

Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von
Marvin Knöchelmann, M.Sc.

2020

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer
 2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor
- Tag der Promotion: 09. Dezember 2020

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau der Leibniz Universität Hannover.

Mein ganz herzlicher Dank richtet sich an Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer, der mich auf dem Weg zur erfolgreichen Fertigstellung dieser Arbeit außerordentlich durch wissenschaftliche Diskussionen und stets hilfreiche Anregungen unterstützt und motiviert hat. Vielen Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor für die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac für die Leitung des Promotionsvorhabens als Prüfungsvorsitzender.

Weiterhin danke ich ganz herzlich meinen Kolleginnen und Kollegen der Gruppe Optomechatronik sowie des gesamten Instituts, die das wissenschaftliche Arbeiten sowie die Stunden dazwischen zu einer spannenden und kurzweiligen Zeit machten. Dabei möchte ich Alexander Wolf und Gerolf Kloppenburg hervorheben, die den Grundstein für das Thema dieser Arbeit legten und mich durch ihre Erfahrung und optischen Sachverstand immer hilfreich unterstützten. Peer-Phillip Ley danke ich besonders für die hilfreichen fachlichen Diskussionen, die sehr zur Präzisierung des Prozesses zur Entwicklung optomechatronischer Systeme beitrugen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir in jeder Lebenslage Geborgenheit und Zuversicht vermittelten. Ich danke meiner lieben Frau, die mir in dieser intensiven Lebensphase viel Rückhalt bot und sich liebevoll um Kind und Kommata gekümmert hat.

Marvin Knöchelmann

Hannover, im Dezember 2020

Kurzfassung

Optische Strahlung ist allgegenwärtig und die Basis für die Aufnahme von Informationen für Menschen. Technische Systeme, die optische Strahlung emittieren oder detektieren, ermöglichen daher vielfältige Funktionen. Optische Systeme in Kombination mit mechanischen und elektronischen Funktionen sowie einer Informationsverarbeitung werden optomechatronische Systeme genannt. Die Entwicklung dieser Art von Systemen ist eine herausfordernde Ingenieurstätigkeit. Abhängigkeiten zwischen den Systemelementen müssen domänenübergreifend betrachtet werden. Die Wirkung emittierter Strahlung auf den Menschen kann Teil der Hauptfunktion des zu entwickelnden Systems sein, aber auch eine Gefährdung darstellen und muss daher explizit berücksichtigt werden. Getrieben durch die Halbleiterindustrie sind Entwicklungszyklen für Systeme, die Lichtquellen oder Detektoren aus Halbleitermaterialien enthalten, kurz. Um optomechatronische Systeme erfolgreich zu entwickeln und die vielfältigen Anforderungen und Rahmenbedingungen strukturiert zu berücksichtigen, ist daher ein methodisches Vorgehen erforderlich.

In dieser Arbeit wird ein Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme vorgestellt. Diese Art von Systemen ähnelt mechatronischen Systemen, weshalb die Basis für den Prozess das V-Modell ist, das für mechatronische Entwicklungen in Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen etabliert ist. Der vorgestellte Prozess basiert auf dem V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 und wird durch operative Arbeitsschritte konkretisiert. Die Anpassung des V-Modells ist notwendig, da, wie in der Arbeit dargestellt wird, die Domäne Optik sich maßgeblich von den klassischen Domänen der Mechatronik unterscheidet. Das allgemeine V-Modell wird daher durch Elemente aus Vorgehensmodellen zur Gestaltung optischer Systeme ergänzt. Weiterhin werden spezifische Methoden vorgestellt, welche die Entwicklung optomechatronischer Systeme unterstützen. Um den entwickelten Prozess zu veranschaulichen, werden die Arbeitsschritte anhand eines Beispiels aus der Fahrzeuglichttechnik demonstriert. Abschließend wird aufgezeigt, für welche optomechatronischen Systeme der Prozess anwendbar ist und wie dieser erweitert werden kann.

Schlagwörter: Optomechatronik, Entwicklungsprozess, V-Modell, Domänenübergreifende Entwicklung

Abstract

Title: Development process for optomechatronic systems

Optical radiation is omnipresent and the basis to perceive information for humans. Technical systems that emit or detect optical radiation therefore enable a wide range of functions. Optical systems in combination with mechanical and electronic functions as well as information processing are called optomechatronic systems. Developing these types of systems is a challenging engineering activity. Dependencies between the system elements must be considered across the domains. Effects of emitted radiation on humans can be part of the main function of the system to be developed, but can also represent a hazard and must therefore be explicitly taken into account. Driven by the semiconductor industry, development cycles for systems that contain light sources or detectors made of semiconductor materials are short. In order to develop optomechatronic systems successfully and to take into account the various requirements and conditions in a structured manner, a methodical approach is required.

In this thesis a process for the development of optomechatronic systems is presented. This type of system is similar to mechatronic systems, which is why the basis for the process is the V-model. The V-model is established for mechatronic developments in industrial companies and research institutions. The presented process is based on the V-model of the VDI guideline 2206 and is detailed by operational work steps. The adaptation of the V-model is necessary because, as analyzed in the thesis, the domain of optics differs significantly from the classic domains of mechatronics. The general V-model is therefore supplemented by elements from development processes for the design of optical systems. Furthermore, specific methods are presented which support the development of optomechatronic systems. To illustrate the developed process, the work steps are demonstrated using an example from vehicle lighting technology. Finally, it is shown for which optomechatronic systems the process can be used and how it can be expanded.

Key words: Optomechatronics, product development process, V-model, cross-domain development

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	IV
Abstract	V
Formelverzeichnis	IX
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Optomechatronik	2
1.3 Wissenschaftliche Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen zur Domäne Optik	7
2.1 Eigenschaften optischer Systeme	7
2.1.1 Lichtverteilung	8
2.1.2 Auflösung	8
2.1.3 Kontrast	9
2.1.4 Wirkungsgrad	11
2.1.5 Wirkungen auf Menschen	13
2.2 Effekte, Wirkprinzipien und Bauelemente	14
2.2.1 Wandler	15
2.2.2 Aktive Umformer	17
2.2.3 Passive Umformer	19
2.2.4 Leiter und Speicher	19
2.3 Entwicklung optischer Systeme	20
2.3.1 Allgemeine Modellbildung	20
2.3.2 Spezifikation	23
2.3.3 Analytischer Entwurf	24
2.3.4 Numerische Modellbildung, Optimierung und Analyse	27
2.3.5 Vorgehensmodelle	28

3	Prozesse für domänenübergreifende Systementwicklungen	31
3.1	V-Modell	33
3.1.1	VDI-Richtlinie 2206	34
3.1.2	Modellbasiertes Systems Engineering	35
3.1.3	V-Modell XT	36
3.1.4	V-Modelle für spezifische Anwendungen	36
3.2	Entwicklungsprozess für optomechatronische Systeme nach Cho	36
3.3	Entwicklungsprozess für optomechanische Systeme nach Yoder	37
3.4	Domänenübergreifende Modellbildung	38
4	Konzeption eines Prozesses zur Entwicklung optomechatronischer Systeme	41
4.1	Besonderheiten der Domäne Optik	41
4.2	Anforderungen an den Prozess	43
4.3	Bewertung bestehender Entwicklungsprozesse	45
4.4	Konzept des Prozesses	48
5	Prozessbausteine zur Entwicklung optomechatronischer Systeme	50
5.1	Prozessbaustein Anforderungsanalyse	50
5.1.1	Ablaufanalyse der optomechatronischen Hauptfunktion	52
5.1.2	Analyse der funktionalen Anforderungen	53
5.1.3	Analyse der Wechselwirkungen mit dem Nutzer und der Umgebung	53
5.1.4	Ermitteln von Anforderungsquellen und Erweitern der Anforderungen	55
5.2	Prozessbaustein Systementwurf	57
5.2.1	Abstraktion zum Erkennen wesentlicher Probleme	58
5.2.2	Aufstellen der Funktionsstruktur	58
5.2.3	Suche nach Wirkprinzipien und Lösungselementen für die Teilfunktionen	61
5.2.4	Konkretisieren zu prinzipiellen Lösungsvarianten	62
5.2.5	Bewerten und Auswählen sowie Festlegen des domänenübergreifenden Lösungskonzepts	65
5.3	Prozessbaustein Domänenspezifischer Entwurf	66
5.4	Prozessbaustein Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung	67
6	Anwendungsbeispiel	70
6.1	Motivation und Entwicklungsziele	70
6.2	Anforderungsanalyse	72
6.2.1	Ablaufanalyse der optomechatronischen Hauptfunktion	72
6.2.2	Analyse der funktionalen Anforderungen	73

6.2.3	Analyse der Wechselwirkungen mit dem Nutzer und der Umgebung . . .	79
6.2.4	Ermitteln von Anforderungsquellen und Erweitern der Anforderungen . . .	79
6.3	Systementwurf	83
6.3.1	Erkennen der wesentlichen Probleme	83
6.3.2	Aufstellen der Funktionsstruktur	86
6.3.3	Suche nach Wirkprinzipien und Lösungselementen für die Teilfunktionen	88
6.3.4	Konkretisieren von prinzipiellen Lösungsvarianten	94
6.3.5	Bewerten und Auswählen	102
6.3.6	Festlegen des domänenübergreifenden Lösungskonzepts	103
6.4	Domänenspezifischer Entwurf	106
6.4.1	Optik	107
6.4.2	Mechanik	108
6.4.3	Software	108
6.4.4	Elektrik und Elektronik	110
6.5	Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung	112
6.5.1	Integration zu Subsystemen	112
6.5.2	Integration zum Gesamtsystem	117
6.5.3	Integration in das Zielsystem	121
6.5.4	Validierung der Entwicklungsziele	122
7	Zusammenfassung und Ausblick	125
7.1	Zusammenfassung und Diskussion	125
7.2	Ausblick	130
	Literaturverzeichnis	131
	Anhang	145
A	Betreute studentische Arbeiten	145

Formelverzeichnis

Abkürzungen

AC	Wechselspannung
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage, Internationale Beleuchtungskommission
DLL	Dynamic Link Library
DLP	Digital Light Processing
DC	Gleichspannung
DMD	Digital Micromirror Device
IR	Infrarotstrahlung
LCD	Liquid Crystal Display
LCoS	Liquid Crystal on Silicon
LED	Light-Emitting Diode
MBSE	Modellbasiertes Systems Engineering
RGB	Farbmischung aus rot, grün und blau
SAE	SAE International, ehemals: Society of Automotive Engineers
SE	Systems Engineering
SysML	Systems Modeling Language
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolettstrahlung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIS	Sichtbare Strahlung

Lateinische Notation

A_ϕ	Lichtstrommatrix
A_l	Lichtstärkematrix
A	Fläche

b	Bildweite
C	Physikalischer Kontrast
d	Abstand zum Objekt
d_v	Vertikaler Abstand zum Objekt
d_{Proj}	Abstand zwischen Scheinwerfer und Projektionsbereich
E_U	Unterschiedsempfindlichkeit
E_V	Beleuchtungsstärke
E_{Proj}	Beleuchtungsstärke im Projektionsbereich
f	Brennweite
f_{Bild}	Bildwiederholfrequenz
F	Brennpunkt
G	Étendue
g	Gegenstandsweite
Δh	Ein-/ Ausblendauflösung
$\Delta h'$	Verschiebeauflösung
I	Optische Invariante
I_V	Lichtstärke
K_W	Weberkontrast
K_m	Photometrisches Strahlungsäquivalent ($K_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$)
K_{Aus}	Ausblendkontrast
K	Nutzungsgrad
L_U	Umgebungsleuchtdichte
L_V	Leuchtdichte
M	Modulation
n	Brechungsindex
P_{el}	Elektrische Leistung
P	Position eines Lichtpunkts in einer Lichtverteilung
$R_{\text{Straße}}$	Radius der Straße
t	Zeit
u	Eindimensionaler Winkel
U	Elektrische Spannung
w	Breite einer Projektion
w_{Proj}	Symbolbreite
x, y, z	Kartesische Koordinaten
y	Bild- oder Gegenstandshöhe

Griechische Notation

β	Abbildungsmaßstab
ε	Halber Öffnungswinkel eines Strahlenbündels
η	Wirkungsgrad
ϑ	Halber Öffnungswinkel einer Lichtverteilung
λ	Wellenlänge der Strahlung
ϱ	Reflexionsgrad
φ_{Kipp}	Kippwinkel der Mikrospiegel eines DMDs
φ_{DMD}	Verkipfung eines DMDs zur Richtung des Lichteinfalls
Φ_{v}	Lichtstrom
Φ_{e}	Optische Strahlungsleistung

1 Einführung

1.1 Motivation

Den Großteil der Informationen über die Umgebung nehmen Menschen durch das Sehen auf, ein physiologischer Prozess, der auf der Umwandlung von optischer Strahlung in elektrische Potentiale beruht [SCHM11]. Licht ist die Grundlage vielfältiger technischer Systeme und wird als Medium zur Informations- und Energieübertragung sowie in speziellen Fällen auch zur Stoffübertragung genutzt. In vielen dieser Systeme ist es notwendig, optische Strahlung in elektrische Leistung umzuwandeln. Die dafür eingesetzten Lichtquellen und Detektoren basieren häufig auf Halbleitermaterialien. Durch die rasante Entwicklung der Halbleitertechnologie, die hauptsächlich durch die Computerindustrie getrieben wird, werden auch im Bereich der halbleiterbasierten Lichtquellen und Detektoren kurze Entwicklungszyklen ermöglicht. Besonders eindrucksvoll ist die Entwicklung von weißen Leuchtdioden, welche die Basis für viele optische Systeme sind [RAHM19]. Die Leuchtdichte und Effizienz weißer Leuchtdioden steigt stetig bei zurückgehenden Produktionskosten [KÖLP11]. Diese Entwicklung ermöglicht den Einsatz von effizienten und leistungsstarken Halbleiterlichtquellen in vielfältigen Anwendungsbereichen, die sich von hochspezialisierten optischen Systemen bis hin zur Allgemeinbeleuchtung erstrecken.

Die Forschungsaktivitäten im Bereich optischer Systeme umfassen neben den technisch-physikalischen Grundlagen auch zunehmend Entwicklungsmethoden, was auch an den Forschungsvorhaben am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau (IPeG) deutlich wird. Das Institut ist beteiligt am Exzellenzcluster *PhoenixD*, in dem mit insgesamt mehr als 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern die Fertigung und Montage optischer Systeme neu gedacht wird und dafür Potenziale der additiven Fertigung genutzt werden. In dem durch das IPeG geleitete Promotionsprogramm *Tailored Light* entwickelten 15 Stipendiaten neuartige Systeme und Simulationsansätze für optische Systeme in den Bereichen Halbleiterlichtquellen, Verkehrssicherheit, Messtechnik, Medizintechnik und Fertigungstechnik [LACH20]. Optische Technologien bieten vielfältige Möglichkeiten zur Entwicklung von Produkten mit neuen oder

verbesserten Funktionen. Die Entwicklung dieser Systeme bringt jedoch auch einige Herausforderungen für Produktentwickler mit sich. Die schnellen Entwicklungszyklen von halbleiterbasierten Lichtquellen und Detektoren ermöglichen ebenfalls kurze Entwicklungszeiten von optischen Systemen. Der Wettbewerbsdruck zu kurzen Entwicklungszeiten ist entsprechend hoch. Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Prozess wird ein Vorgehen vorgestellt, mit dem unter diesen Randbedingungen erfolgreiche Produkte entwickelt werden können.

1.2 Optomechatronik

Moderne technische Produkte sind geprägt durch eine technologische und funktionelle Integration von mechanischen, elektronischen und informationsverarbeitenden Komponenten innerhalb von Systemen. Mit einer interdisziplinären Herangehensweise bei der Produktentwicklung können bestehende Funktionen optimiert und neue Funktionen ermöglicht werden. Systeme mit integrierten mechanischen und elektronischen Funktionen werden als *mechatronische Systeme* bezeichnet. Isermann stellt die Grundlagen mechatronischer Systeme und die historische Entwicklung von mechanischen, elektronischen und mechatronischen Systemen dar [ISER08]. Czichos beschreibt Mechatronik als ganzheitliches Wissenschaftsgebiet, dessen Kernaspekt die räumliche und technologische Integration unterschiedlicher Fachdisziplinen ist [CZIC19]. Neben dem Maschinenbau und der Elektrotechnik wird auch die Optik als eines dieser Teilgebiete verstanden (Abbildung 1.1).

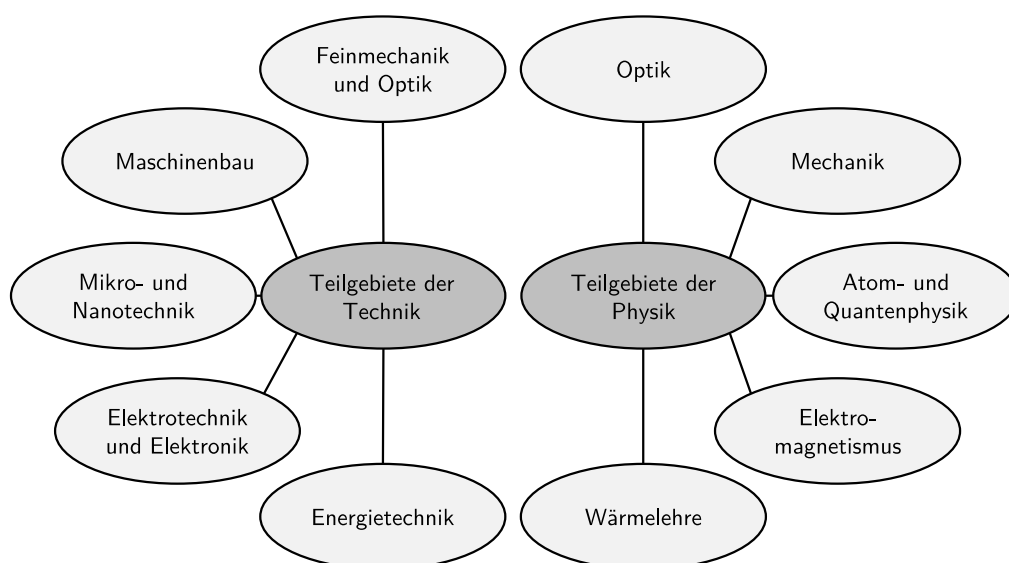


Abbildung 1.1: Teilgebiete der Physik und Technik als Grundlage der integralen Wissensdisziplin Mechatronik nach [CZIC19]

Angelehnt an die Mechatronik wird durch den Begriff *Optomechatronik* die Ingenieursdisziplin beschrieben, welche die technologische und funktionelle Integration von optischen Komponenten in mechanische, elektronische und mechatronische Systeme ermöglicht [LIU97, CHO05a]. In dieser Arbeit wird zur Kenntnis genommen, dass die Optik ein Teilgebiet der Wissenschaft Mechatronik ist. Um die besondere Rolle der optischen Strahlung in den betrachteten Systemen hervorzuheben, wird der Begriff Optomechatronik verwendet. Die historische Entwicklung optomechatronischer Systeme wird von Cho in [CHO02] beschrieben. Auch zukünftig ist eine zunehmende Integration von optischen Technologien zur Entwicklung von Systemen mit neuartigen Funktionen zu erwarten. Die deutsche Bundesregierung erklärte daher das 21. Jahrhundert zum *Jahrhundert des Photons* [BUND10].

Optische Strahlung kann in vielfältiger Weise zur Funktionalität von Systemen beitragen (Abbildung 1.2). Die Bandbreite optomechatronischer Systeme reicht von Systemen, die Bereiche der Umwelt gezielt beleuchten (Fahrzeugscheinwerfer, Bühnenprojektoren) bis hin zu Systemen, die einen breitbandigen Datenaustausch ermöglichen. Je nach Anwendungsgebiet hat das Licht andere relevante Eigenschaften: Für Fahrzeugscheinwerfer ist beispielsweise ein Spektrum notwendig, das einen weißen Farbeindruck beim menschlichen Betrachter erzeugt. Der Lichtstrom liegt in der Größenordnung von 10^3 Lumen. Zur optischen Datenübertragung hingegen werden Laserdioden eingesetzt, die nahezu monochromatisches Licht emittieren und eine hohe Pulsleistung, aber einen im Vergleich zu Scheinwerfern deutlich geringen Lichtstrom emittieren.

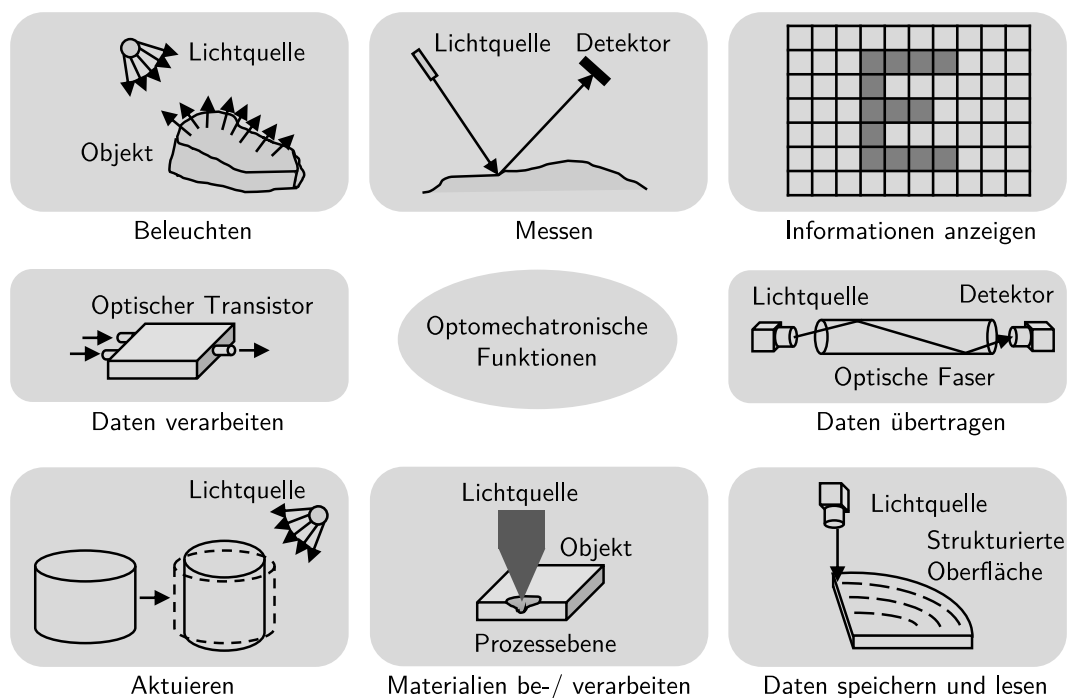


Abbildung 1.2: Basisfunktionen von optomechatronischen Systemen nach [CHO05b]

1.3 Wissenschaftliche Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Um die Potenziale optischer Funktionen in technischen Systemen optimal zu nutzen, ist ein planmäßiges Vorgehen in der Produktentwicklung erforderlich, mit dem die Arbeitsschritte koordiniert und methodisch unterstützt werden. Die Bandbreite der möglichen optomechanischen Hauptfunktionen ist wie in Abbildung 1.2 dargestellt groß. Mit einer Eingrenzung auf bestimmte Systemfunktionen wird sichergestellt, dass der in dieser Arbeit zu entwickelnde Prozess spezifisch ausgestaltet werden kann. Eine wesentliche Eigenschaft optischer Strahlung ist die Wechselwirkung mit dem Menschen, die eine besondere Berücksichtigung im Entwicklungsprozess erfordert. Damit dies auf einer konkreten Ebene von operativen Arbeitsschritten möglich ist, werden in dieser Arbeit Systeme adressiert, bei denen ein Strahlungstransfer über die Systemgrenze erfolgt und optische Wechselwirkungen mit Nutzern des Systems oder Beobachtern auftreten. Der zu entwickelnde Prozess soll daher insbesondere für Systeme mit den Hauptfunktionen (siehe Abbildung 1.2) *Informationen anzeigen* und *Beleuchten* anwendbar sein. Bei Systemen mit der Hauptfunktion *Messen* sind die Wirkungen auf den Menschen typischerweise nicht Bestandteil der Hauptfunktion. Diese sollten aber berücksichtigt werden, wenn für die Messung Strahlung über die Systemgrenze transportiert wird und diese Menschen erreichen kann. Für diese Art von Systemen soll der Prozess ebenfalls anwendbar sein. Eine beispielhafte Struktur der betrachteten Systeme ist in Abbildung 1.3 dargestellt.

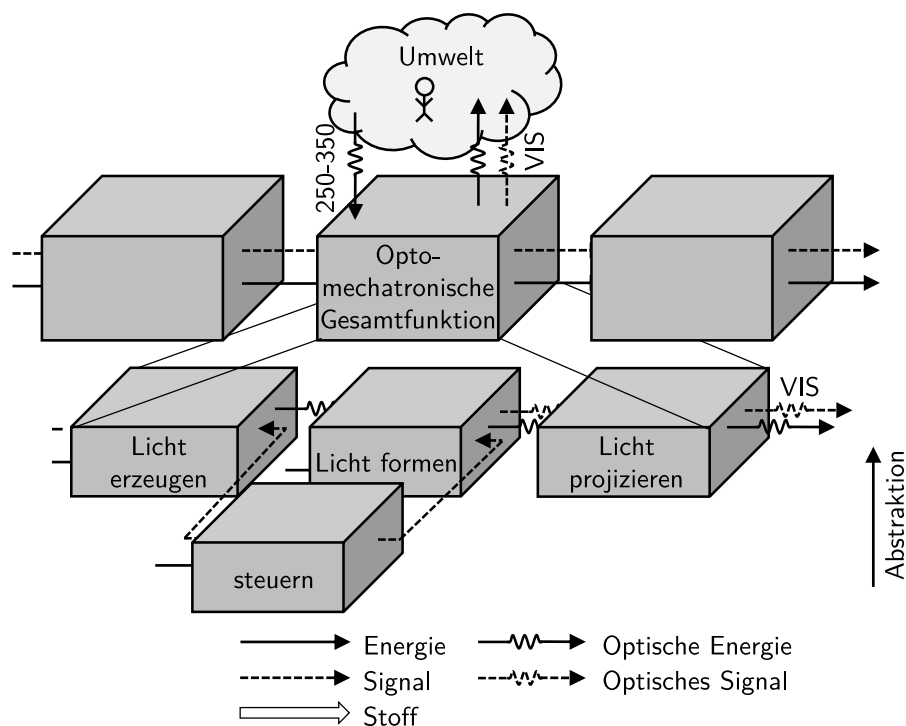


Abbildung 1.3: Beispielhaftes optomechatronisches System mit Teilfunktionen

Die optomechatronische Hauptfunktion *Informationen anzeigen* wird umgesetzt durch die dargestellten Teilfunktionen. Optische Strahlung kann dabei je nach Funktion Eigenschaften eines Energie- oder eines Signalflusses aufweisen. Dies wird verdeutlicht, indem bei optischen Energie- und Signalflüssen die dargestellte Welle mit Angaben zum Spektrum genutzt wird. Die Information wird dabei durch einen optischen Signalfluss repräsentiert.

Mit der in Abschnitt 4.1 durchgeführten Analyse der Eigenschaften der Domäne Optik wird gezeigt, dass es wesentliche Unterschiede zu den klassischen Domänen der Mechatronik, Mechanik und Elektronik, gibt. Eine Gegenüberstellung von verfügbaren Vorgehensmodellen für domänenübergreifende Entwicklungen in Abschnitt 4.3 ergibt, dass bisher kein Prozess bekannt ist, der für die Entwicklung der in dieser Arbeit betrachteten optomechatronischen Systeme geeignet ist. Die wissenschaftlichen Fragestellungen der Arbeit sind daher:

Wie wird die Entwicklung mechatronischer Systeme durch die Domäne Optik beeinflusst?

Wie sehen die Phasen und operative Arbeitsschritte bei der Entwicklung optomechatronischer Systeme aus?

Welche Methoden und Werkzeuge sind bevorzugt bei der Entwicklung optomechatronischer Systeme einzusetzen?

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Entwicklungsprozess für optomechatronische Systeme mit konkreten Arbeitsschritten zu entwickeln. Dabei soll insbesondere berücksichtigt werden, dass die Systeme in Wechselwirkung mit Menschen stehen. Erarbeitet wird der Prozess anhand eines Anwendungsbeispiels aus dem Bereich der Fahrzeuglichttechnik. In diesem Bereich findet in den letzten Jahren ein Technologiewandel statt, der durch die Integration von adaptiven optischen Bauelementen neuartige Funktionen ermöglicht, sodass die Entwicklung von Fahrzeugscheinwerfern vielfältige Herausforderungen beinhaltet. Themen der Fahrzeuglichttechnik sind Gegenstand mehrjähriger Forschung am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, sodass auf den Erfahrungen konkreter Projekte aufgebaut werden kann [JÜRIG15, WOLF17a, KLOP17, HELD20].

Im ersten Teil der Arbeit werden Grundlagen zu der Domäne Optik vorgestellt, um daraus die Besonderheiten bei der Entwicklung optischer Systeme im Vergleich zu mechanischen oder mechatronischen Systemen hervorzuheben (Kapitel 2). Es folgt ein Überblick zu bestehenden Entwicklungsprozessen für Systeme (Kapitel 3). Der Fokus liegt dabei auf dem V-Modell, da dieses für domänenübergreifende Entwicklungen besonders geeignet ist und in Forschung und Industrie ein etabliertes Vorgehensmodell darstellt. Darauf basierend werden Anforderungen an den zu entwickelnden Prozess abgeleitet und die Vorgehensmodelle aus dem Stand der

Technik anhand derer bewertet. Die Bewertung bildet die Basis für das Konzept des Prozesses zur Entwicklung optomechatronischer Systeme (Kapitel 4). Anschließend werden die erarbeiteten Elemente des Entwicklungsprozesses detailliert beschrieben und Methoden genannt und erweitert, die dabei bevorzugt anzuwenden sind (Kapitel 5). Der Prozess wird anhand eines umfangreichen Beispiels demonstriert, das einem Forschungsprojekt zu adaptiven Fahrzeugscheinwerfern entnommen ist (Kapitel 6). Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Arbeit und eine Diskussion des erarbeiteten Prozesses (Kapitel 7).

2 Grundlagen zur Domäne Optik

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten Aspekte der Domäne Optik mit dem Ziel erläutert, diese für Systementwickler anschaulich zu machen. Hierfür werden Begrifflichkeiten aus der allgemeinen Konstruktionsmethodik genutzt. Um ein Verständnis für das Anwendungsbeispiel zu schaffen, anhand dessen der entwickelte Prozess veranschaulicht wird, werden zu Beginn des Kapitels Eigenschaften optischer Systeme beschrieben und an ausgewählten Stellen ein Bezug zur Fahrzeuglichttechnik hergestellt. Anschließend werden optische Bauelemente vorgestellt, die nach einem Schema der allgemeinen Konstruktionsmethodik geordnet sind. Neben den Grundlagen zu lichttechnischen Größen und Bauelementen werden Vorgehensmodelle zur Entwicklung von optischen Systemen beschrieben, deren Elemente für den in dieser Arbeit entwickelten Prozess genutzt werden.

2.1 Eigenschaften optischer Systeme

Die funktionalen Anforderungen an optomechatronische Systeme beziehen sich typischerweise auf die optischen Eigenschaften des Systems. Nachfolgend werden für ein beispielhaftes optomechatronisches System mit den Hauptfunktionen *Beleuchten* und *Information darstellen* (siehe Abbildung 1.2 in Abschnitt 1.2) die Eigenschaften Beleuchtungsstärke, Auflösung, Kontrast und Wirkungsgrad definiert und in Bezug zum Anwendungsbeispiel aus der Fahrzeuglichttechnik gesetzt. Für Systeme mit der Hauptfunktion *Messen* sind die Definitionen ähnlich. Für allgemeine Definitionen photometrischer Grundgrößen wie Lichtstärke, Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte und Lichtstrom wird auf das Standardwerk von Naumann verwiesen [LÖFF20]. Da die betrachteten Systeme Strahlung in die Umgebung emittieren können, werden neben den technischen Systemeigenschaften auch Wirkungen optischer Strahlung auf Menschen beschrieben.

2.1.1 Lichtverteilung

Die Helligkeit einer Lichtverteilung wird als orts- oder winkelabhängige Lichtstärke in Candela (cd) oder als Beleuchtungsstärke in Lux (lx) angegeben. Typischerweise wird die Beleuchtungsstärke von Lichtverteilungen in der Fahrzeuglichttechnik in 25 m gemessen. Die integrale Größe der Beleuchtungsstärke über den vollständigen vertikalen und horizontalen Öffnungswinkel ist der Lichtstrom einer Lichtverteilung, der in Lumen (lm) angegeben wird. Für die präzise Spezifikation und für die Berechnung von Lichtverteilungen ist es vorteilhaft, diese diskret in Form einer Lichtstärkematrix A_l zu beschreiben:

$$A_l = \begin{bmatrix} I_{11} & \cdots & I_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{m1} & \cdots & I_{mn} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Die Indices m und n stehen für den Vektoreintrag der diskretisierten Öffnungswinkel in horizontaler und vertikaler Richtung.

2.1.2 Auflösung

Mit der Auflösung eines abbildenden optischen Systems wird der Abstand zwischen zwei benachbarten Punkten beschrieben, die gerade noch unterschieden werden können [FISC07]. Im Kontext eines Systems zur Informationsprojektion und adaptiven Beleuchtung wird der Begriff der Auflösung häufig auf die Anzahl von Pixeln pro Winkelelement bezogen.

Ein-/ Ausblendauflösung

Die aus der Pixelanzahl resultierende Auflösung Δh (links in Abbildung 2.1) kann mit einem realen optischen System nicht erreicht werden, da wegen optischer Abbildungsfehler die Pixel nicht unendlich scharf abgebildet werden können. In der Fahrzeuglichttechnik kann zur Quantifizierung der realen Auflösung der Grenzwert der Lichtstärke von 625 cd genutzt werden [JAHN16]. Dieser entspricht der maximalen Lichtstärke an einem speziellen Punkt auf einer Messwand (B50L) für Lichtverteilungen, der die Kopfposition eines entgegenkommenden Fahrers repräsentiert [ECE123]. Mit dem Grenzwert soll die Gefahr einer Blendung eines entgegenkommenden Fahrers reduziert werden. Die mit einem realen optischen System erreichbare Auflösung Δh ist rechts in Abbildung 2.1 dargestellt.

Verschiebeauflösung

Für ein ideales optisches System sind die Ein-/Ausblendauflösung Δh und die Verschiebeauflösung $\Delta h'$ identisch. Wird ein reales optisches System betrachtet, ist die Verschiebeauflösung typischerweise größer als die Ein-/Ausblendauflösung (siehe rechts in Abbildung 2.1).

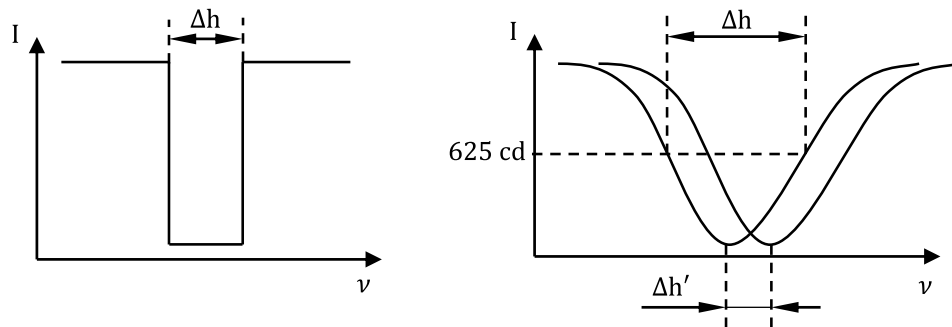


Abbildung 2.1: Vergleich der Auflösung zwischen einem idealen (links) und einem realen optischen System (rechts)

2.1.3 Kontrast

Der Kontrast ist als Kennzahl eines Intensitätsunterschieds ein wichtiger Faktor zum Vergleich optischer Systeme und eine Grundlage zur Bewertung der physiologischen Wahrnehmung von Lichtmustern.

Physikalischer Kontrast

Der physikalische Kontrast C benachbarter Strukturen oder Objekte wird angegeben durch [SCHM11]:

$$C = \frac{L_h - L_d}{L_h + L_d} \quad \text{mit} \quad 0 \leq C < \infty. \quad (2.2)$$

L_h ist dabei die Leuchtdichte der helleren Struktur und L_d die Leuchtdichte der dunkleren Struktur. Die Definition des Kontrasts nach Weber K_W ist ähnlich und kann in den physikalischen Kontrast C umgerechnet werden:

$$K_W = \frac{L_h}{L_d} - 1 \quad \text{mit} \quad 0 \leq K_W \leq 1. \quad (2.3)$$

Der physikalische Kontrast C und der Kontrast nach Weber K_W beziehen sich auf die Leuchtdichte von Strukturen auf einer Oberfläche. Um Systeme direkt vergleichen zu können, wird

der Einfluss der Oberfläche eliminiert und der Kontrast basierend auf der räumlichen Lichtstärkeverteilung des Systems berechnet.

Ausblendkontrast

Für eine Lichtverteilung, in der ein oder mehrere Bereiche maskiert werden, ist der Ausblendkontrast relevant. Mit dem Ausblendkontrast kann das Verhältnis der Intensitäten innerhalb und außerhalb der Ausblendung angegeben werden [MOIS15]. Der berechnete Wert hängt von der gewählten Position und den Intensitäten I_{Dunkel} und I_{Hell} ab (links in Abbildung 2.2). Ein direkter Vergleich unterschiedlicher Systeme auf Basis des Ausblendkontrastes ist daher schwierig. Es bietet sich an, konkrete Szenarien zu vergleichen, also eine Ausblendung definierter Größe und Position innerhalb der Lichtverteilung.

$$K_{Aus} = \frac{I_{Hell}}{I_{Dunkel}} \quad (2.4)$$

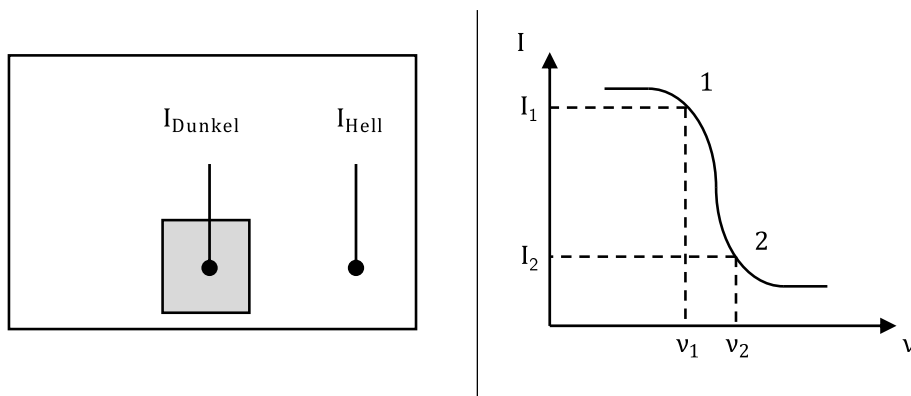


Abbildung 2.2: Links: Ausblendkontrast; Rechts: Intensitätsgradient nach [MOIS15]

Intensitätsgradient

In realen optischen Systemen ist der Verlauf der Intensität nicht sprunghaft, sondern stetig. Eine Kennzahl für diesen Intensitätsgradienten ist die Modulation M [MOIS15]. Rechts in Abbildung 2.2 sind die zur Berechnung der Modulation erforderliche Intensität I und Winkelposition ϑ dargestellt. Bei dem Vergleich von Lichtverteilungen ist zu beachten, dass der Intensitätsgradient an unterschiedlichen Positionen ebenfalls unterschiedlich sein kann. Ein direkter Vergleich kann anhand festgelegter Punkte erfolgen.

$$M = \frac{I_1 - I_2}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \quad (2.5)$$

2.1.4 Wirkungsgrad

In frühen Phasen des Entwicklungsprozesses kann eine erste Auswahl und Dimensionierung von Komponenten optomechatronischer Systeme basierend auf einer Analyse des Wirkungsgrads erfolgen. In Abbildung 2.3 ist der Energiefluss durch ein optisches System dargestellt, bei dem mittels eines Modulators eine adaptive Beleuchtung erzeugt wird. Der Systemaufbau entspricht dabei dem des adaptiven Scheinwerfers des Anwendungsbeispiels, das in Kapitel 6 vorgestellt wird. In adaptiv beleuchtenden Systemen und in Systemen zur Informationsprojektion werden typischerweise optische Komponenten eingesetzt, mit denen die Intensität optischer Strahlung pixelweise moduliert werden kann. Die ungenutzte Strahlung wird absorbiert, sodass abhängig von der Intensitätsverteilung, die mit dem System dargestellt wird, der Wirkungsgrad reduziert ist. Dieser Einflussfaktor auf den Wirkungsgrad von adaptiven optischen Systemen wird im Kontext der Fahrzeuglichttechnik von Gut [GUT14] als Nutzungsgrad K bezeichnet und hier auf allgemeine optomechatronische Systeme übertragen. Nachfolgend wird der Wirkungsgrad inklusive des Nutzungsgrads des beispielhaften Systems in Abbildung 2.3 bestimmt.

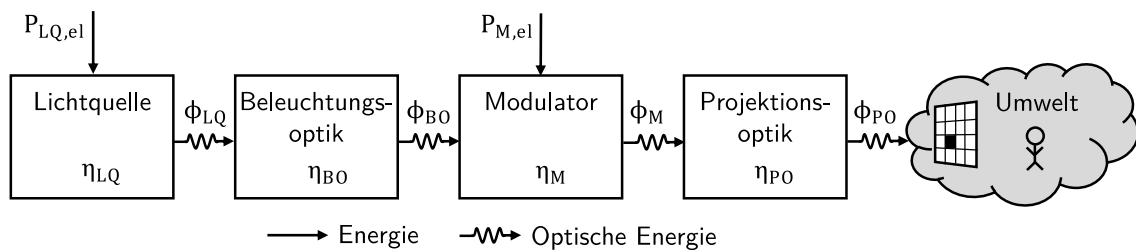


Abbildung 2.3: Herleitung des Wirkungsgrads eines optischen Systems zur adaptiven Beleuchtung

Mit der Lichtquelle wird elektrische Leistung $P_{LQ,el}$ in den Lichtstrom Φ_{LQ} konvertiert. Durch die Beleuchtungsoptik wird dieses Licht eingesammelt und auf den Modulator mit einer Effizienz von η_{BO} gelenkt. Die Effizienz des Modulators η_M hängt von der ausgewählten Technologie zur Modulation ab. Die elektrische Leistungsaufnahme des Modulators $P_{M,el}$ ist im Vergleich zur Leistung der Lichtquelle klein und wird daher hier vernachlässigt. Abhängig von der Anzahl optischer Elemente und deren Eigenschaften ergibt sich der Wirkungsgrad der Projektionsoptik η_{PO} . Der Lichtstrom nach der Projektionsoptik Φ_{PO} entspricht dem Lichtstrom der projizierten Lichtverteilung in der Umgebung. Der optische Wirkungsgrad eines Systems kann aus dem Produkt der Wirkungsgradkette aus Abbildung 2.3 und dem Nutzungsgrad K bestimmt werden:

$$\eta_{System} = \eta_{LQ} \cdot \eta_{BO} \cdot \eta_M \cdot \eta_{PO} \cdot K = \frac{\Phi_{PO}}{P_{LQ,el}} \quad (2.6)$$

Die Herleitung des Nutzungsgrads erfolgt in Anlehnung an die Ausführungen von Gut [GUT14] basierend auf der Lichtstrommatrix A_Φ :

$$A_\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{V,11} & \cdots & \Phi_{V,1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{V,m1} & \cdots & \Phi_{V,mn} \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Für die Berechnung des Nutzungsgrades ist weiterhin die Lichtstrommatrix $A_{\Phi,max}$ erforderlich, die den maximal erreichbaren Lichtstrom des Systems angibt:

$$A_{\Phi,max} = \begin{bmatrix} \Phi_{V,max,11} & \cdots & \Phi_{V,max,1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{V,max,m1} & \cdots & \Phi_{V,max,mn} \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Daraus kann der Nutzungsgrad an jeder Stelle m, n kalkuliert und daraus der Gesamtnutzungsgrad K bestimmt werden:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\Phi_{V,ij}}{\Phi_{V,max,ij}}}{m \cdot n}. \quad (2.9)$$

Bei einer idealen homogenen Beleuchtung des optischen Modulators und einem idealen optischen System ist $A_{\Phi,max}$ für alle m und n konstant:

$$\Phi_{V,max,mn} = \Phi_{V,max} = const. \quad (2.10)$$

Gleichung 2.9 lässt sich dann vereinfachen zu:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Phi_{V,ij}}{\Phi_{V,max} \cdot m \cdot n}. \quad (2.11)$$

Die beschriebenen Eigenschaften beziehen sich auf abbildende optische Systeme, mit denen die optomechatronischen Hauptfunktionen *Informationen anzeigen* und *Beleuchten* umgesetzt werden können, wobei von einem System zur adaptiven Beleuchtung ausgegangen wird. Für ein optomechatronisches System mit der Hauptfunktion *Messen* sind die Definitionen für die Auflösung und den Kontrast vergleichbar.

2.1.5 Wirkungen auf Menschen

Elektromagnetische Strahlung, die über die Systemgrenze hinweg in die Umgebung transportiert wird, kann gewollte und ungewollte Wirkungen auf Menschen ausüben und muss daher bei der Anforderungsanalyse sowie bei der Systemvalidierung berücksichtigt werden. Die Wirkungen werden im Rahmen dieser Arbeit in drei Gruppen unterteilt:

Energiedissipation

Mit optischer Strahlung wird Energie transportiert, die abhängig von Intensität, Einwirkdauer und Wellenlänge unterschiedliche Schädigungsarten am menschlichen Auge oder der Haut hervorruft. Durch festgelegte Grenzwerte wird die Gefährdung durch optische Strahlung reduziert. Die wichtigsten Normen dazu sind:

- Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen (DIN 5031)
- Laser und Laseranlagen – Lasergerät – Mindestanforderungen an die Dokumentation (DIN EN ISO 11252)
- Sicherheit von Maschinen – Bewertung und Verminderung des Risikos der von Maschinen emittierten Strahlung (DIN EN 12198)
- Sicherheit von Lasereinrichtungen (DIN EN 60825)
- Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen (DIN EN 62471)

Sensorische Rezeption und Perzeption

Über den visuellen Sinn nehmen Menschen den Großteil der Informationen aus der Umgebung auf. Durch unterschiedliche Rezeptoren ist es möglich, Hell-Dunkel-Kontraste und Farbkontraste wahrzunehmen. Für Prozesse der Informationsaufnahme wie die Kontrastwahrnehmung sind allgemeine Modelle verfügbar, die auf experimentell ermittelten Zusammenhängen basieren und für verschiedene Anwendungsfälle nutzbar sind [SCHM11]. Bei der Anforderungsanalyse des Anwendungsbeispiels dieser Arbeit wird die Wahrnehmung von Hell-Dunkel-Kontrasten bei unterschiedlichen Umgebungshelligkeiten betrachtet. Störwirkungen, wie die Blendung durch eine zu hohe Strahlungsintensität im Glaskörper des Auges, können ebenfalls durch allgemeine Modelle beschrieben und auf spezielle Anwendungsfälle übertragen werden [JÜR15].

Kognition

Aufgenommene Reize werden über die Nervenbahnen an das zentrale Nervensystem weitergeleitet und dort verarbeitet. Durch Assoziation und Interpretation werden aus wahrgenommenen Kontrasten Objekte erkannt. Auf bestimmte Reizmuster erfolgen Reaktionen des Menschen, die im Sinne des Systemzwecks sein können oder diesem beispielsweise durch Ablenkung entgegenstehen [SCHM11]. Die Kognition und Aufmerksamkeitslenkung des Menschen ist ein komplexer Prozess, der von vielfältigen Umgebungseinflüssen abhängt. Eine allgemeine Modellbildung von kognitiven Prozessen ist daher nicht direkt auf unterschiedliche Anwendungsfälle übertragbar. Die Validierung von kognitiven Reaktionen erfolgt typischerweise als Probandenstudien in möglichst realitätsgetreuen Anwendungsszenarien wie beispielsweise in der von Budanow durchgeführten Studie zu projizierenden Scheinwerfern [BUDA19].

2.2 Effekte, Wirkprinzipien und Bauelemente

Ein wesentlicher Schritt in der Produktentwicklung allgemeiner technischer Systeme ist die Überführung einer Funktionsstruktur in eine Baustruktur des Systems, die konkrete Lösungselemente und deren Anordnung zueinander enthält [ROTH00]. Für die Auswahl von Lösungselementen werden in der allgemeinen Konstruktionslehre Wirkprinzipien zusammengetragen, die auf physikalischen Effekten beruhen. Durch ein Wirkprinzip wird die prinzipielle technische Umsetzung eines physikalischen Effekts mit geometrischen und stofflichen Merkmalen beschrieben [FELD13]. Ein Bauelement ist eine Komponente, mit der ein Wirkprinzip technisch umgesetzt wird. Ein Bauelement wird als Lösungselement bezeichnet, wenn es zur Lösung einer konkreten Teilfunktion eingesetzt wird. In dieser Arbeit wird angenommen, dass es bei der Entwicklung optomechatronischer Systeme hilfreich ist, Wirkprinzipien und Bauelemente der Domäne Optik ebenfalls nach der Klassifikation von Roth [ROTH00] zu strukturieren. Nachfolgend werden daher grundlegende physikalische Effekte der Domäne Optik erläutert und dazugehörige Bauelemente genannt. Die Wirkprinzipien sind eng mit der umzusetzenden Funktion verknüpft, weshalb diese nachfolgend nur teilweise genannt werden. Für die Strukturierung werden die allgemeinen Funktionen technischer Systeme *Wandeln*, *Umformen*, *Leiten* und *Speichern* genutzt. Die Realisierung der Funktion *Leiten* stellt die zentrale Aufgabe bei der Entwicklung optischer Systeme dar und wird im weiteren Verlauf der Arbeit detailliert betrachtet. Das Speichern von optischer Strahlung ist physikalisch möglich, es findet aber keine Anwendung in den betrachteten optomechatronischen Systemen. Der Fokus der nachfolgend beschriebenen Effekte und Bauelemente liegt daher auf optischen Wandlern und Umformern.

2.2.1 Wandler

Als Wandler werden Komponenten bezeichnet, die unterschiedliche Energieformen ineinander überführen. In diesem Kontext werden die Umwandlungen zwischen thermischer bzw. elektrischer und optischer Energie dargestellt. Bei der Lichterzeugung werden prinzipiell zwei Arten unterschieden, die angelehnt an Jansen beschrieben werden [JANS93]. Thermisch angeregte Prozesse in Materialien führen zu einer Emission von Strahlung. Bekannte Beispiele hierfür sind die Sonne oder Glühlampen. Als Lumineszenz wird allgemein die Erzeugung von Licht durch nicht-thermische Prozesse bezeichnet. In Halbleiterlichtquellen wird Lumineszenz durch ein äußeres elektrisches Feld hervorgerufen, wobei eine spontane Emission von Photonen stattfindet, die sich hinsichtlich Frequenz und Phase unterscheiden und deshalb als inkohärent bezeichnet werden. Durch eine Stimulation der Emission können die Photonen bezüglich ihrer Phasenlage und Frequenz synchronisiert werden, sodass kohärente Strahlung emittiert wird. Dies ist die Grundlage für den Aufbau von Lasern, die daher eine besonders schmale Emissionsbandbreite aufweisen. Für detaillierte Informationen über Eigenschaften von Lasern wird auf das Werk von Meschede verwiesen [MES08].

Tabelle 2.1: Physikalische Effekte, Wirkprinzipien und Bauelemente zur Erzeugung von weißem Licht nach [JANS93] und [LACH14]

Physikalischer Effekt	Wirkprinzip zur Erzeugung von weißem Licht	Exemplarisches Bauelement
Strahlungsemission eines Lichtbogens	Überlagerung der Spektrallinien der Gasmoleküle	Gasentladungslampe
Schwarzkörperstrahlung	Farbtemperatur abhängig von Absoluttemperatur	Glühlampe
Äußerer Photoeffekt an Halbleitermaterial, spontane Emission	Örtliche Überlagerung von Farbkanälen	RGB Leuchtdiode
	Leuchtstoffkonversion	Weißer Leuchtdiode
	Zeitliche Überlagerung von Farbkanäle	RGB Leuchtdiode
Äußerer Photoeffekt an Halbleitermaterial, stimulierte Emission	Örtliche Überlagerung von Farbkanäle	RGB Laserdiode
	Zeitliche Überlagerung von Farbkanäle	RGB Laserdiode
	Leuchtstoffkonversion	Blaue oder UV Laserdiode

Da in vielen Anwendungsgebieten weißes Licht benötigt wird, sind in Tabelle 2.1 den physikalischen Effekten Wirkprinzipien zur Erzeugung von weißem Licht zugeordnet und exemplarische Bauelemente aufgelistet. Um weißes Licht mit Leuchtdioden oder Laserdioden zu erzeugen, ist eine örtliche oder zeitliche Überlagerung von Dioden mit unterschiedlichen Emissionsspektren notwendig. Weiterhin ist es möglich, durch eine partielle Konversion von Strahlung aus dem blauen oder ultravioletten Spektrum mit einem Leuchtstoff weißes Licht zu generieren [LACH14]. Weitere Wirkprinzipien zur Lichterzeugung sind Glühlampen und Gasentladungslampen, die auf Schwarzkörperstrahlung respektive Strahlungsemission eines Lichtbogens basieren.

Nachfolgend werden Eigenschaften von Leuchtdioden erläutert, da diese für den Einsatz in der Fahrzeuglichttechnik eine bedeutende Rolle einnehmen. Stiny legt detaillierte Informationen zu Funktion und Aufbau von LEDs und Laserdioden dar [STIN19], unterschiedliche Bauformen von LEDs werden beispielsweise von Bensel [BENS17] beschrieben.

Leuchtfläche Die leuchtende Fläche A der LED beträgt typischerweise $0,5 \text{ mm}^2$ bis 30 mm^2 .

Lichtstärke Die Lichtstärke I_V in cd ist abhängig von dem betrachteten Abstrahlwinkel. Von einem Flächenstrahler ohne Linse wird Licht wie von einem Lambertstrahler emittiert. Die Intensität nimmt mit zunehmendem Abstrahlwinkel mit dem Kosinus des Winkels ab. Kantenstrahler weisen eine elliptische Abstrahlcharakteristik auf. Im Vergleich zu Flächenstrahlern wird mehr Licht nach vorne als zur Seite abgestrahlt [STIN19].

Lichtstrom Der Lichtstrom Φ_V ergibt sich aus der emittierten Strahlungsleistung Φ_e gewichtet mit dem photometrischen Strahlungsäquivalent K_m .

Strahlungsausbeute Mit der Strahlungsausbeute η_e wird das Verhältnis zwischen aufgenommener elektrischer Leistung P_{el} und emittierter Strahlungsleistung Φ_e beschrieben.

Zentrale Wellenlänge Die spektralen Eigenschaften einer LED werden durch die Bandlücke des verwendeten Halbleitermaterials bestimmt. Mit gängigen Materialien können LEDs mit den Farben rot, gelb, grün, orange und blau hergestellt werden, sowie LEDs mit einer Wellenlänge im UV- oder IR-Spektrum. Mit λ_0 wird die zentrale Wellenlänge bezeichnet [STIN19].

Spektrale Halbwertsbreite Die Breite der Emissionskurve einer LED wird als Halbwertsbreite $\Delta\lambda$ angegeben und beträgt typischerweise 40 nm bis 70 nm [STIN19].

Detektoren für optische Strahlung können ebenfalls in zwei Arten unterteilt werden. Von idealen thermischen Detektoren wird einfallendes Licht vollständig absorbiert und in thermische Energie gewandelt, die als Temperaturanstieg messbar ist. Thermische Detektoren sind empfindlich

für ein breites Spektrum und sind somit vielseitig einsetzbar. Nachteilig ist die geringe zeitliche Dynamik [MESC08]. Quanten-Sensoren wandeln einfallende optische Strahlung durch den inneren oder äußeren Photoeffekt in eine messbare elektrische Spannung um. Die Anwendungsgebiete von Quanten-Sensoren sind vielfältig, sodass auch die Detektoren sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Grundlagen zur Funktionsweise von Detektortypen sind in [MESC08] zu finden.

2.2.2 Aktive Umformer

Als Umformer werden Komponenten bezeichnet, durch die Eigenschaften optischer Strahlung wie Wellenlänge, Amplitude bzw. Intensität, Phase, Frequenz und Polarisation geändert werden. An dieser Stelle wird unterschieden zwischen aktiven Umformern, bei denen die Änderung der Eigenschaften gezielt durch Signale gesteuert werden kann, und passiven Umformern, bei denen dies nicht möglich ist.

In Tabelle 2.2 sind exemplarisch aktive Umformer mit den zugrunde liegenden physikalischen Effekten aufgelistet, die Cho detailliert erläutert [CHO05b]. Im Anwendungsbeispiel wird ein Digitales Mikrospiegel Array (DMD, engl. Digital Micromirror Device) eingesetzt, weshalb dieses Bauelement nachfolgend beschrieben wird.

Tabelle 2.2: Aktive Umformer erweitert nach [CHO05b]

Physikalischer Effekt	Exemplarisches Bauelement
Beugung durch akustische Schwingungen	Akustooptischer Modulator
Absorption oder spektrale Filterung	Mechanisches Farbrad
Änderung des Brechungsindices	Photoelastischer Modulator
Reflektion (kontinuierlich)	Mechanischer Scanner (1D oder 2D)
Reflektion (diskret mit zwei Zuständen)	Digitales Mikrospiegel Array
Änderung des Polarisationszustands	Flüssigkristallanzeige
Änderung des Brechungsindices	Elektrooptischer Modulator

Digitales Mikrospiegel Array (DMD)

Bei DMDs sind mehrere 100.000 einzelne Mikrospiegel so auf Gelenken gelagert, dass sich diese in einer Richtung um einen festen Winkel kippen lassen. Die Kipprichtung kann je nach Anordnung der Spiegel diagonal oder parallel zu der Spiegelkante erfolgen. Der typische Kippwinkel von DMDs beträgt $\varphi_{Kipp} = 20^\circ$ oder 24° . Durch diesen wird der Öffnungswinkel des Strahlenbündels begrenzt, mit dem der DMD beleuchtet werden kann, auf den doppelten Wert des Kippwinkels. Dies ist notwendig, damit das einfallende und das reflektierte Strahlenbündel geometrisch voneinander getrennt werden können. Der Kippwinkel hat daher einen Einfluss darauf, wie viel Licht der Lichtquelle genutzt werden kann.

Der optische Wirkungsgrad wird bestimmt durch die Reflektivität der Spiegeloberfläche, dem Transmissionsgrad der Abdeckscheibe, welche die Mikrospiegel vor äußeren Einflüssen schützt, dem Füllfaktor, der von den Abständen zwischen den Mikrospiegeln abhängt, und einem Faktor, der Verluste durch Beugungseffekte berücksichtigt. Die Faktoren ergeben zusammen einen optischen Wirkungsgrad heutiger DMDs von etwa 68 % [TEXA15]. An die Lichtquelle werden keine Anforderungen hinsichtlich Kohärenz oder Polarisation gestellt.

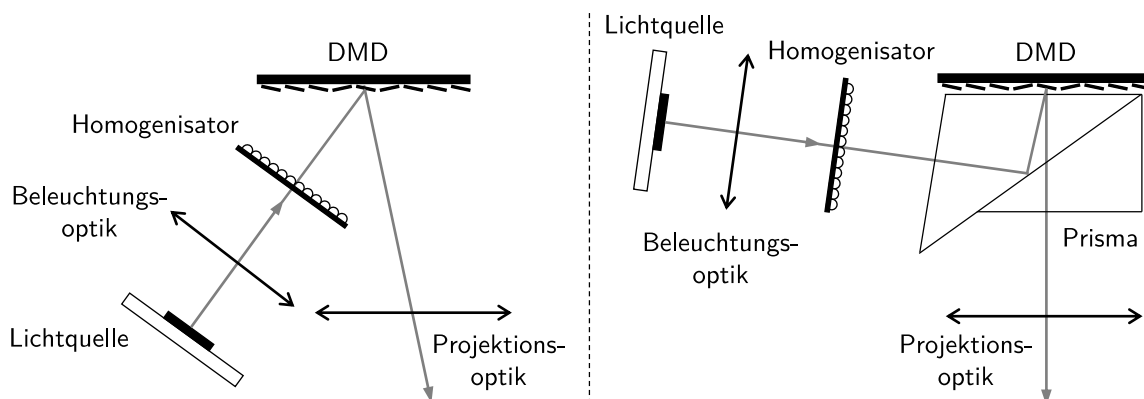


Abbildung 2.4: Prinzipieller Aufbau optomechatronischer Systeme mit DMD nach [TEXA05, KNÖC19a]; Links: Nicht-telezentrisch; Rechts: Telezentrisch

In Abbildung 2.4 sind die beiden häufigsten Systemarchitekturen skizziert, die verschiedene Eigenschaften bezüglich Kontrast, Bauraum und Kosten aufweisen [TEXA05]. Im nicht-telezentrischen Aufbau links wird mit einer Lichtquelle durch eine Beleuchtungsoptik ein DMD beleuchtet. Bei vielen Anwendungen kommt zwischen Lichtquelle und DMD ein Homogenisator zum Einsatz, damit der DMD gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Das reflektierte Licht eines Spiegels des DMDs im angeschalteten Zustand gelangt durch eine Projektionsoptik auf eine Projektionsfläche. Das Licht eines Spiegels im ausgeschalteten Zustand wird durch einen nicht dargestellten Absorber aufgenommen. Rechts in der Abbildung ist ein telezentrischer Aufbau dargestellt, bei dem die Trennung des eingehenden und reflektierten Strahlenbündels durch ein

Prisma realisiert wird. Mit dem Prisma kann der Winkel zwischen einfallendem und reflektiertem Licht im Vergleich zum nicht-telezentrischen Aufbau vergrößert werden, was Vorteile bei der geometrischen Anordnung der Komponenten hat [VAN 98].

2.2.3 Passive Umformer

Mit passiven Umformern ist es möglich, die Eigenschaften des Lichts in einem optischen System gezielt anzupassen. In Tabelle 2.3 sind physikalische Effekte aufgelistet, die von Fischer [FISC05] und Frölich [FRÖL05] beschrieben werden, und mit beispielhaften Bauelementen ergänzt. Weiterführende Informationen und Hinweise zur Auslegung sind im Standardwerk von Naumann zu finden [LÖFF20]. In der Arbeit von Wolf [WOLF17a] sind passive Umformer mit Bezug zur Fahrzeuglichttechnik übersichtlich dargestellt.

Tabelle 2.3: Physikalische Effekte und exemplarische Bauelemente zur passiven Umformung von Licht nach Fischer [FISC05] und Frölich [FRÖL05]

Physikalischer Effekt	Exemplarisches Bauelement
Gerichtete Reflektion	Reflektor
Fresnelreflektion	Teildurchlässiger Spiegel
Totalreflektion	Lichtleiter
Brechung	Sammellinse
Dispersion	Prisma (spektrale Aufspaltung)
Streuung	Diffusor Absorber
Interferenz	Bandpassfilter
Beugung	Diffraktives Element

2.2.4 Leiter und Speicher

Leiter von Licht sind alle Medien, die eine Transmission optischer Strahlung ermöglichen. Luft, Gläser, transparente Kunststoffe und andere lichtleitende Materialien können vereinfachend durch den wellenlängenabhängigen Brechungsindex charakterisiert werden. Wechselwirkungen zwischen optischer Strahlung und Materie treten in Form von Reflektions- und Absorptions-

effekten auf. Diese und andere Effekte sind im vorherigen Kapitel zu Umformern beschrieben. Das Leiten von Licht ist eng an die Gestaltung der optischen Elemente eines Systems gekoppelt. Bei der Entwicklung optischer Systeme ist es daher nicht zielführend, ein Wirkprinzip zur Leitung von Licht auszuwählen, ohne die Gestaltung der optischen Elemente einzubeziehen. Der zentrale Aspekt im nachfolgenden Abschnitt 2.3 zur Entwicklung optischer Systeme ist daher die Gestaltung optischer Elemente, um die allgemeine Funktion *Leiten* zu realisieren.

Das Speichern von Licht ist unter speziellen Bedingungen möglich, indem Photonen vollständig abgebremst [HEIN13] oder durch fortwährende Reflexionen in einem Volumen gehalten werden [RAUS09]. Die Effekte kommen bei einzelnen oder wenigen Photonen zur Anwendung, um beispielsweise Quantencomputer zu realisieren. Eine Anwendung in der Produktentwicklung der in dieser Arbeit betrachteten optomechatronischen Systeme ist bisher nicht absehbar.

2.3 Entwicklung optischer Systeme

Die Entwicklung optischer Systeme ist eine herausfordernde Ingenieurstätigkeit und erfordert ein methodisches Vorgehen, um das bestmögliche Ergebnis zu erzielen. Als optisches System werden zusammenwirkende optische Komponenten bezeichnet, mit denen Strahlung mit einer Wellenlänge im oder nahe des sichtbaren Spektrums geformt wird. In diesem Abschnitt werden prinzipielle Ansätze zur Modellierung optischer Strahlung vorgestellt sowie ausgewählte Vorgehensmodelle zur Entwicklung optischer Systeme aus der Literatur beschrieben und verglichen.

2.3.1 Allgemeine Modellbildung

Die Modellierung von Licht zur Beschreibung von optischen Effekten ist die Grundlage für die Entwicklung optischer und optomechatronischer Systeme. Die Besonderheit der optischen im Vergleich zur mechanischen Domäne ist, dass aufgrund der speziellen Eigenschaften des Lichts grundsätzlich unterschiedliche Modellansätze für die Beschreibung von optischen Effekten existieren. Mit Modellen der klassischen Physik kann die Ausbreitung von Licht im Raum beschrieben werden. Spezielle Wechselwirkungen mit Materie, wie die spontane Emission von Photonen eines angeregten Photons oder die Resonanzfluoreszenz, können dagegen nur mit modernen Theorien der Physik wie der Quantenelektrodynamik beschrieben werden [MESC08]. Dies ist erforderlich, um beispielsweise die Effizienz von Lichtquellen und Detektoren zu analysieren, deren Wirkungsweisen auf dem inneren und äußeren Photoeffekt beruhen. Für die betrachteten

Systeme und das Anwendungsbeispiel in Kapitel 6 reicht typischerweise eine Modellierung von Licht in der klassischen Physik aus, weshalb nachfolgend diese Ansätze beschrieben werden.

Geometrische Optik

Historisch werden die ersten optischen Modelle genutzt, um Geräte wie Vergrößerungsgläser und Mikroskope zu konstruieren. Die Beschreibung des Lichts basiert dabei auf der Vorstellung von Licht als Strahlen, die sich geradlinig im Raum ausbreiten und deren Richtung beispielsweise durch Linsen beeinflusst werden kann [MESC08]. Mit der *geometrischen Optik* kann eine Vielzahl von optischen Phänomenen beschrieben werden, sodass dieser Ansatz auch heutzutage für die Entwicklung von optischen Geräten geeignet ist. Die Annahmen der geometrischen Optik sind zutreffend, wenn die Wellenlänge des Lichts deutlich unter der betrachteten Objektgröße liegt [FISC05].

Folgende Annahmen werden innerhalb der geometrischen Optik getroffen [FISC05]:

- Lichtstrahlen breiten sich in optisch homogenen Materialien geradlinig aus.
- Lichtstrahlen beeinflussen sich nicht gegenseitig.
- Es gilt das Brechungs- und Reflexionsgesetz für den Grenzflächenübergang zwischen zwei optischen Medien.

Mit diesen Annahmen können eine Vielzahl optischer Effekte der Lichtausbreitung beschrieben werden [FISC05]:

Gerichtete Reflexion In der geometrischen Optik wird prinzipiell von einer gerichteten Reflexion ausgegangen, die mit dem Reflexionsgesetz beschrieben wird.

Brechung, Totalreflexion und Dispersion Die Richtung von Lichtstrahlen ändert sich beim Übergang zwischen Medien unterschiedlicher Brechungsindices. Der Winkel der Richtungsänderung hängt dabei von der Wellenlänge des Lichts ab, sodass eine spektrale Aufspaltung von polychromatischem Licht erfolgt (Dispersion). Ab einem bestimmten Winkel von der Normalen der Oberfläche gelangt kein Licht in das benachbarte Medium (Totalreflexion).

Streuung Diffuse Reflexion und Brechung von Lichtstrahlen an Oberflächen und in Medien (Volumenstreuung) können in der geometrischen Optik mit stochastischen Berechnungsverfahren beschrieben werden. In Streufunktionen wird angegeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Lichtstrahl in eine bestimmte Richtung abgelenkt wird. Dieser Ansatz

ist nicht exakt, die phänomenologische Wirkung von Streuung wird aber in vielen Fällen ausreichend gut beschrieben.

Abbildungsfehler Die Qualität optischer Abbildungen wird durch Fehler reduziert, die prinzipiell in Wellenfrontfehler und chromatische Fehler unterschieden werden. Die Analyse dieser Fehler und damit auch die Berücksichtigung bei der Entwicklung ist mit den Annahmen der geometrischen Optik möglich.

Bei der Entwicklung optischer Systeme wird häufig in einem ersten Schritt vereinfachend angenommen, dass nur Strahlen betrachtet werden, die einen kleinen Winkel zur optischen Achse bilden. Die sogenannte paraxiale Optik, die auch als Gaussche Optik bezeichnet wird, kann damit als linearisierte Beschreibung eines optischen Systems verstanden werden [SHAN97].

Wellenoptik

Einige optische Effekte können nicht durch die geradlinige Ausbreitung von Lichtstrahlen in der geometrischen Optik beschrieben werden. Der Physiker C. Huygens (1629-1695) erarbeitet mit dem Huygensschen Prinzip eine anschauliche Vorstellung von Licht als Wellen, mit denen Effekte wie Interferenz beschrieben werden können [PIAG40]. Mit der mathematischen Beschreibung der *Wellenoptik* mit den Maxwellschen Gleichungen kann die Ausbreitung von elektromagnetischer Strahlung und damit auch von Licht im Raum präzise beschrieben werden. Dieser Ansatz wird gewählt, wenn die Objektgröße des zu entwickelnden Systems im Bereich der Wellenlänge des Lichts liegt. Die geometrische Optik kann als Spezialfall der Wellenoptik verstanden werden, bei der die Wellenlänge des Lichts unendlich klein ist. Mit der Modellvorstellung von Licht als Wellen können zusätzlich zu den oben genannten die folgenden Effekte beschrieben werden [FRÖL05]:

Interferenz Mehrere kohärente Einzelwellen erzeugen bei Überlagerung räumliche und zeitliche Variationen in der Feldstärke, die als Interferenzmuster bezeichnet werden. Interferenz ist die Grundlage für die Funktionsweise eines Interferometers, mit dem Weglängen präzise gemessen werden können. Weiterhin wird der Effekt der Interferenz genutzt, um die spektralen Reflexions- und Transmissionseigenschaften eines optischen Bauelements gezielt zu beeinflussen, um beispielsweise ungewollte Reflexe zu reduzieren.

Beugung Als Beugung wird die Ablenkung von Licht an Strukturen bezeichnet, die zu einer nicht geradlinigen Ausbreitung des Lichts führt. Beugungseffekte können daher nicht mit der geometrischen Optik beschrieben werden. Beugung tritt in optischen Systemen immer auf, durch sie wird beispielsweise die maximal mögliche Auflösung des Systems begrenzt. Anschaulich kann die Beugung durch das von dem Physiker C. Huygens ent-

wickelte Prinzip der Elementarwellen beschrieben werden. Die Funktion von diffraktiven optischen Elementen basiert auf der Beugung von Licht.

Reflexion Die Reflexion von Licht an Oberflächen wird in der geometrischen Optik stark vereinfacht. Mit der Wellenoptik können Einflüsse der Polarisation und dem Einfallswinkel des Lichts auf Reflektionen beschrieben werden.

Die in dieser Arbeit betrachteten Systeme weisen Strukturgrößen auf, die deutlich größer als die Wellenlänge des Lichts sind. Nachfolgend werden daher Vorgehensmodelle zur Entwicklung optischer Systeme vorgestellt, welche die Vereinfachungen der geometrischen Optik nutzen. Bei einzelnen optischen Elementen innerhalb dieser Systeme kann es dennoch erforderlich sein, Effekte mit dem Ansatz der Wellenoptik zu berücksichtigen.

2.3.2 Spezifikation

Das Vorgehen zur Entwicklung optischer Systeme ist in den analysierten Literaturquellen ähnlich und wird zur einfacheren Vergleichbarkeit in dieser Arbeit in die Phase 1: *Spezifikation*, Phase 2: *Analytischer Entwurf* und Phase 3: *Numerische Modellbildung, Optimierung und Analyse* unterteilt. Nachfolgend werden diese Phasen beschrieben und anschließend auf Besonderheiten der analysierten Vorgehensmodelle eingegangen.

Tabelle 2.4: Exemplarische funktionale Anforderungen, Qualitätsanforderungen und Randbedingungen abbildender optischer Systeme nach [SCHU05, FISC07]

Funktionale Anforderungen	Qualitätsanforderungen	Randbedingungen
Brennweite	Spot-Durchmesser	Baulänge
Abbildungsmaßstab	MTF	Durchmesser
Blendenzahl	Verzeichnung	Gewicht
Objekthöhe	Vignettierung	Material
Bildhöhe	Wirkungsgrad	Herstellbarkeit
Numerische Apertur	Homogenität	Kosten
Wellenlänge		

Die Entwicklung eines optischen Systems beginnt mit der vollständigen Spezifikation der funktionalen Anforderungen, Qualitätsanforderungen und Randbedingungen. In Tabelle 2.4 sind diese exemplarisch für abbildende optische Systeme aufgelistet. Für beleuchtende optische Systeme sind typischerweise der Wirkungsgrad und die Homogenität wichtige Anforderungen.

Bei der Spezifikation ist zu beachten, dass zwischen den funktionalen Anforderungen physikalische Abhängigkeiten bestehen, die nicht widersprüchlich formuliert sein sollen. Es ist daher zu empfehlen, die vereinfachten Formeln der paraxialen Optik, die in der nächsten Phase des analytischen Entwurfs beschrieben werden, bereits für die widerspruchsfreie Spezifikation zu nutzen.

2.3.3 Analytischer Entwurf

Das Ziel des analytischen Entwurfs ist es, ein optisches System zu erstellen, mit dem die funktionalen Anforderungen erreichbar sind. Der Entwurf kann händisch, mit Tabellenkalkulationsprogrammen oder mit spezieller Optiks simulationssoftware erfolgen. Um die formelmäßigen Zusammenhänge zur Auslegung handhabbar zu machen, werden Vereinfachungen getroffen und Linsen beispielsweise als dünn angenommen. Nachfolgend beschriebene Zusammenhänge von Fischer [FISC05] für das Verständnis des Anwendungsbeispiels basieren auf den Annahmen der paraxialen geometrischen Optik.

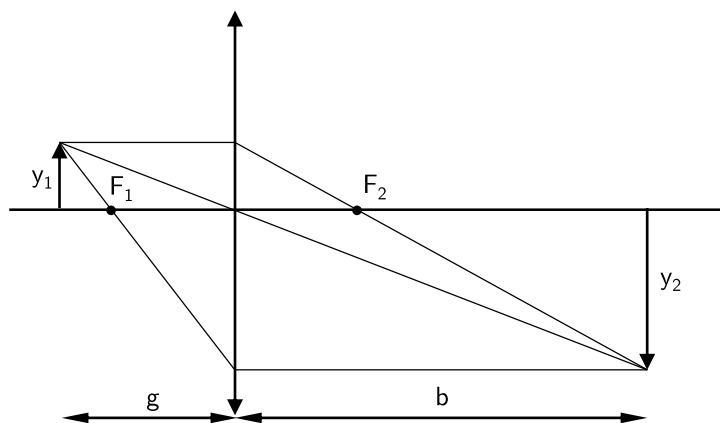


Abbildung 2.5: Abbildung durch eine Linse nach [VELZ14]

In Abbildung 2.5 liegt der Gegenstand mit der Gegenstandsweite g links der Linse und das Bild mit der Bildweite b rechts der Linse. Für diesen Fall sind die Abstände von der Linse positiv definiert. Es wird angenommen, dass die gesamte Brechkraft einer Linse in der Hauptebene liegt. Mit der Abbildungsgleichung kann die Brennweite f der Linse bestimmt werden:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}. \quad (2.12)$$

Der Abbildungsmaßstab β ist definiert als das Verhältnis zwischen Bildhöhe y_2 und Gegenstandshöhe y_1 . Mit dem Strahlensatz ergibt sich:

$$\beta = \frac{y_2}{y_1} = -\frac{b}{g}. \quad (2.13)$$

Für $\beta > 0$ ist das Bild gleichsinnig zum Objekt orientiert, für $\beta < 0$ steht das Bild umgekehrt. Die Position (vor oder hinter der Linse) und die Art (real oder virtuell) des Bildes hängen von dem Objektort bezüglich der Brennweite ab [FISC05].

Bei realen optischen Systemen ist der Abbildungsmaßstab nicht über die gesamte Bildhöhe konstant, sondern variiert abhängig von dem Abstand zur optischen Achse (siehe Abbildung 2.6). Nimmt der Abbildungsmaßstab mit zunehmendem Abstand von der optischen Achse zu, wird von einer *kissenförmigen Verzeichnung* gesprochen, das Gegenteil wird als *tonnenförmige Verzeichnung* bezeichnet [FISC07]. Für die meisten optischen Systeme ist dieser Effekt unerwünscht und soll daher minimiert werden.

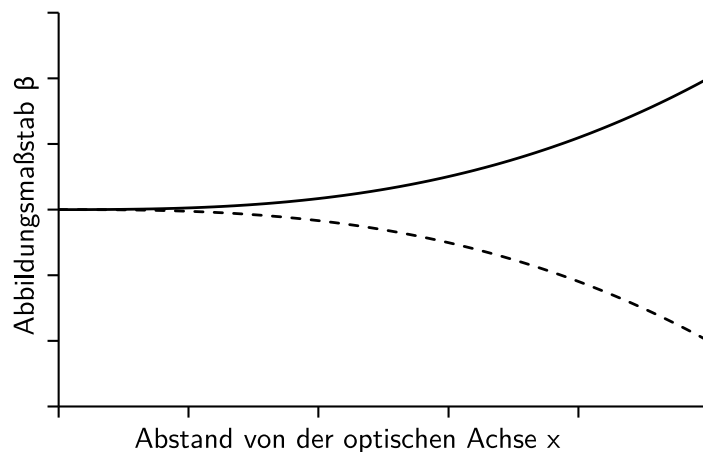


Abbildung 2.6: Abbildungsmaßstab β über dem Abstand von der optischen Achse x ; Durchgezogene Linie: Kissenförmige Verzeichnung; Gestrichelte Linie: Tonnenförmige Verzeichnung

Im Anwendungsbeispiel in Kapitel 6 wird ein optisches System eingesetzt, bei dem die Verzeichnung gezielt genutzt wird, um die Lichtverteilung zu beeinflussen. Um das Konzept zu beschreiben und detaillierter zu analysieren, wird der veränderliche Abbildungsmaßstab $\beta(x,y)$ eingeführt, wobei durch x und y die Abstände von der optischen Achse in einem kartesischen Koordinatensystem beschrieben werden. Wird bei der Projektionsoptik gezielt der Ab-

bildungsmaßstab über die Fläche verändert, ergeben sich Vorteile, die für die Erzeugung von Lichtverteilungen für die Fahrzeuglichttechnik genutzt werden können.

Mit der paraxialen Näherung werden Brechkraft, Dispersion und Abstände zwischen Linsen eines optischen Systems ausgelegt. Um eine hohe Abbildungsqualität zu erreichen, können mit der paraxialen Näherung Farbfehler analysiert und der Entwurf entsprechend optimiert werden. Aufwendiger wird die Berechnung, wenn die paraxiale Näherung nicht gilt und eine trigonometrische Strahldurchrechnung (Raytracing) erfolgt. Damit ist es möglich, sphärische Aberrationen und weitere Fehler höherer Ordnung mit in den Entwurf einzubeziehen [VELZ14]. Berechnungen mit der paraxialen Näherung werden manuell oder mit Kalkulationsprogrammen wie Excel oder Matlab durchgeführt. Für die aufwendigere trigonometrische Strahldurchrechnung stehen spezielle Softwareumgebungen wie beispielsweise Zemax OpticStudio, Synopsys Code V oder Lambda Research OSLO zur Verfügung.

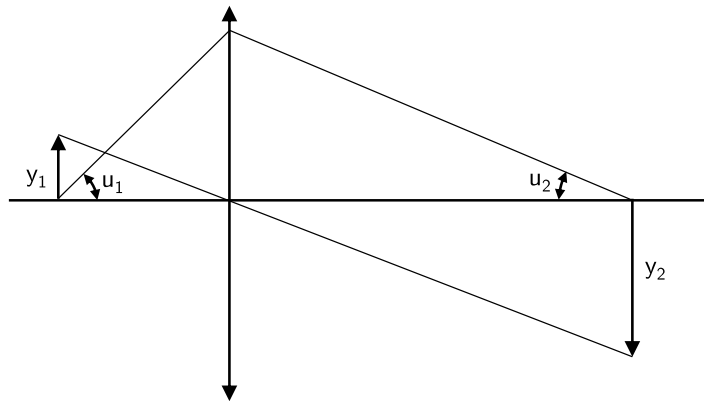


Abbildung 2.7: Skizze zur Herleitung der optischen Invarianten nach [FISC07]

Die *optische Invariante* I , die auch als Lagrange Invariante oder Helmholtz Invariante bezeichnet wird, ist in einem idealen System konstant. In realen Systemen weicht die optische Invariante zwischen Ein- und Ausgang voneinander ab und kann daher bei der analytischen Auslegung von beleuchtenden optischen Systemen hilfreich sein, bei denen der Wirkungsgrad betrachtet wird [FISC07]. In der Gegenstandsebene und in der Objektebene kann die eindimensionale Invariante I bestimmt werden [FISC07]:

$$I = y_1 n_1 u_1 = y_2 n_2 u_2. \quad (2.14)$$

Darin ist y die Gegenstands- bzw. Objekthöhe, n der Brechungsindex und u der Winkel zwischen Randstrahl und optischer Achse (Abbildung 2.7). Die optische Invariante ist nur gültig mit der paraxialen Näherung, wird aber dennoch häufig mit trigonometrischen Funktionen angegeben [FISC07]:

$$I = y_1 n_1 \sin(u_1) = y_2 n_2 \sin(u_2). \quad (2.15)$$

In der zweidimensionalen Betrachtung wird die optische Invariante als Étendue bezeichnet. Unter der Annahme eines idealen optischen Systems ist der Durchsatz bzw. die Étendue in der Eintritts- und Austrittspupille gleich. Mit der Fläche A der Pupille kann die Étendue G bestimmt werden [FISC07]:

$$G = I^2 = A \cdot n^2 \cdot \sin^2(u). \quad (2.16)$$

Für die Konzeptionierung eines beleuchtenden optischen Systems mit LEDs wird die Emissionscharakteristik häufig vereinfacht und die LED als Lambertstrahler angenommen. Ein Lambertstrahler ist dadurch ausgezeichnet, dass Licht in den 2π Halbraum abgestrahlt wird, wobei die Intensität mit dem Kosinus des Winkels abnimmt. In der Arbeit von Wolf [WOLF17a] ist anschaulich hergeleitet, wie der Lichtstrom eines Lambertstrahlers, der von einem optischen System eingefangen wird, bestimmt werden kann. Das Verhältnis zwischen dem durch das optische System eingefangenen Lichtstrom Φ_{Nutz} und dem gesamten Lichtstrom der Lichtquelle Φ_{Ges} ist gegeben durch:

$$\frac{\Phi_{Nutz}}{\Phi_{Ges}} = \frac{1}{2} (1 - \cos(2\varepsilon)). \quad (2.17)$$

Der Winkel ε ist dabei der halbe Winkel des Strahlenbündels, das durch das optische System eingefangen wird, gemessen von der Normalen der Emissionsfläche. Mit diesem Zusammenhang können grundlegende optische Konzepte für Fahrzeugscheinwerfer basierend auf der Analyse des Wirkungsgrads entworfen werden. Der Ansatz wird daher auch in dem Anwendungsbeispiel dieser Arbeit in Kapitel 6 genutzt.

Das Ergebnis des analytischen Entwurfs ist ein optisches System, mit dem die funktionalen Anforderungen erfüllt werden. In der nachfolgenden Optimierung werden die Freiheitsgrade des Systems genutzt, um die Leistung hinsichtlich der Qualitätsanforderungen zu verbessern.

2.3.4 Numerische Modellbildung, Optimierung und Analyse

Der nachfolgend beschriebene typische Ablauf der numerischen Optimierung bezieht sich auf abbildende optische Systeme, da diese herausfordernder als bei beleuchtenden Systemen ist. Die Vorgehensweise ist aber prinzipiell auch bei beleuchtenden Systemen nutzbar. Zuerst werden ausgewählte Parameter des Entwurfs als variabel definiert und Randbedingungen gesetzt.

Damit wird die mögliche Anzahl an Lösungen reduziert und die Berechnung beschleunigt. Die Systemvariablen umfassen Radius, Dicke, Abstand, Material und weitere Oberflächenparameter wie Asphärenkoeffizienten der einzelnen optischen Elemente. Zu den Randbedingungen gehören beispielsweise Fokusabstand, Blendenzahl, Länge und Durchmesser. Zu Beginn der Optimierung wird ein Teil der möglichen Variablen unverändert belassen. Beispielsweise sollte das Material erst in späteren Iterationen der Optimierung variiert werden, da das Material keinen wesentlichen Einfluss auf die Funktionsweise hat, solange keine Farbfehler korrigiert werden sollen. Bei der Optimierung werden die Variablen inkrementweise variiert und nach jeder Änderung einer Variablen die Leistung des optischen Systems in Form einer einzelnen Zahl, der Fehlerfunktion (engl. Merit function oder Error function), bewertet. Die Variablen werden solange geändert, bis ein Optimum, ein Minimum der Fehlerfunktion, gefunden ist. Die Herausforderungen dabei sind die geeignete Wahl von Variablen und Randbedingungen und die Bewertung des gefundenen lokalen Optimums, da dieses nicht dem globalen Optimum entsprechen muss [FISC07].

Die numerische Optimierung erfolgt computerunterstützt mit spezieller Software. Die Strahl-durchrechnung erfolgt stochastisch, indem der Verlauf von einer hohen Anzahl von Strahlen mit zufällig gewählten Startpositionen und -richtungen durch das gesamte optische System verfolgt wird. Eine detaillierte Beschreibung der mathematischen Grundlagen zur computer-unterstützten Strahlverfolgung und Optimierung innerhalb der geometrischen Optik kann in dem Werk von Lin [LIN14] nachvollzogen werden.

Nach der Optimierung folgt die Toleranzanalyse zur Festlegung der maximal erlaubten Abweichungen bei der Fertigung und Montage. Idealerweise wird schon während der Optimierung darauf geachtet, ein System zu entwickeln, das eine geringe Sensitivität für Toleranzen aufweist. Der Entwurf der Mechanik zur Aufnahme der optischen Komponenten sowie die Montage und Tests zur Eigenschaftsabsicherung schließen die Entwicklung ab [FISC07].

2.3.5 Vorgehensmodelle

Die drei Phasen zur Entwicklung optischer Systeme sind in den Vorgehensmodellen aus der Literatur unterschiedlich ausgeprägt. In Abbildung 2.8 sind die einzelnen Schritte von drei Vorgehensmodellen gegenübergestellt und den Phasen *Spezifikation* (1), *Analytischer Entwurf* (2) und *Numerische Modellbildung, Optimierung und Analyse* (3) zugeordnet.

Velzel [VELZ14] beschreibt sechs Vorgehensschritte anschaulich an Beispielen zur Entwicklung von optischen Systemen, wobei der Fokus auf abbildenden Linsensystemen liegt. Der analy-

	Velzel	Fischer	Gomez und Hernandez
Phase 1: <i>Spezifikation</i>	Spezifikation	Spezifikation	Spezifikation
Phase 2: <i>Analytischer Entwurf</i>	Paraxialer Entwurf	Entwurf eines Startsystems	Paraxialer Entwurf
	Entwurf mit dünnen Linsen		
	Entwurf mit dicken Linsen		
Phase 3: <i>Numerische Modellbildung, Optimierung und Analyse</i>	Optimierung	Optimierung	Optimierung
	Toleranzanalyse	Toleranzanalyse	Toleranzanalyse
			Streulichtanalyse
			Fertigungsanalyse
<i>Weitere Schritte</i>		Entwurf Mechanik	
		Montage und Test	

Abbildung 2.8: Vorgehensmodelle zur Entwicklung optischer Systeme nach [VELZ14, FISC07, GOME17]

tische Entwurf ist unterteilt in den paraxialen Entwurf (im Original: *Lay-Out*), den Entwurf mit dünnen Linsen (im Original: *Thin Lens Predesign*) und den Entwurf mit dicken Linsen (im Original: *Surface Model*). Der Fokus von Velzel liegt darauf, möglichst viele Fehlerarten bereits im analytischen Entwurf zu berücksichtigen und zu minimieren. Daher werden manuelle Berechnungen von Aberrationen umfangreich dargestellt. Die numerische Optimierung wird im Vergleich zu den anderen Vorgehensmodellen nur knapp beschrieben.

Im Vorgehensmodell von Fischer [FISC07] erfolgt nach der Spezifikation der Entwurf eines Startsystems mit vereinfachten formelmäßigen Zusammenhängen. Fischer verweist dabei auf die Möglichkeit, Startsysteme aus Datenbanken und Patenten zu nutzen und an die Anforderungen des zu entwickelnden Systems anzupassen. Der Fokus des Vorgehensmodells liegt auf der Optimierung, die in einzelne Schritte unterteilt ist, aber im Wesentlichen dem zuvor beschriebenen Vorgehen entspricht. Nach der Optimierung und Toleranzanalyse erfolgen der Entwurf der mechanischen Komponenten zur Aufnahme und Ausrichtung der optischen Elemente sowie Montage und Test des optischen Systems.

Gomez-Vieyra und Malacara-Hernandez [GOME17] beschreiben sechs Vorgehensschritte zur Entwicklung optischer Systeme. Es wird empfohlen, bereits während der Spezifikation kritische Systemkomponenten eingehend zu analysieren. Im Schritt *Paraxialer Entwurf* werden verschiedene Quellen für Startsysteme aufgezeigt: Ähnliche Entwürfe aus der Literatur, Patente, Skalierung bestehender Entwürfe mit gleicher Blendenzahl, paraxialer Neuentwurf mit anschließender Analyse der Aberrationen höherer Ordnung. Der Schritt *Optimierung* entspricht dem Vorgehen von Velzel und Fischer. Gomez-Vieyra und Malacara-Hernandez beschreiben darüber hinaus konkrete numerische Optimierungsmethoden. Im Schritt *Toleranzanalyse* wird darauf verwiesen, dass das Verständnis über die zur Verfügung stehenden optischen und mechanischen Fertigungs- und Montageprozesse unabdingbar für eine erfolgreiche Entwicklung ist. Um die Leistung eines optischen Systems unter realen Umweltbedingungen zu bewerten, ist eine Streulichtanalyse notwendig. Dabei werden alle Einflüsse untersucht, die in einer Reduktion des Kontrasts oder der Bildqualität resultieren. Bei detaillierten Streulichtanalysen müssen alle Komponenten des Systems modelliert werden. In der *Fertigungsanalyse* werden die Einflüsse der zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren berücksichtigt. Es ist vorteilhaft, die Randbedingungen der Fertigungsverfahren bereits in der Spezifikation zu ermitteln.

Die Erkenntnisse aus diesem Kapitel über Eigenschaften optischer Systeme, deren Bauelemente und deren Entwicklung werden in Kapitel 4 genutzt, um einen Vergleich zu den Domänen der Mechatronik anzustellen. Aus dem Vergleich werden anschließend Anforderungen an den zu entwickelnden Prozess abgeleitet, für den auch Elemente der in diesem Kapitel vorgestellten Vorgehensmodelle genutzt werden.

Die in dieser Arbeit betrachteten Systeme bestehen zusätzlich zu den optischen Elementen aus weiteren Komponenten der Domänen Mechanik und Elektronik. Im nächsten Kapitel werden daher allgemeine Vorgehensmodelle für die Entwicklung von technischen Systemen vorgestellt, die als Basis für den zu entwickelnden Prozess genutzt werden. Der Fokus liegt dabei auf Vorgehensmodellen für domänenübergreifende Entwicklungen.

3 Prozesse für domänenübergreifende Systementwicklungen

In Technologieunternehmen ist die Produktentwicklung die Basis für wirtschaftlichen Erfolg. Ein auf dem Markt erfolgreiches Produkt zeichnet sich im Vergleich zu früheren Produkten und Produkten von Konkurrenten durch einen höheren Kundennutzen bzw. eine höhere Qualität oder niedrigere Kosten aus. Die Treiber erfolgreicher Produkte sind Innovationen, also neuartige Eigenschaften des Produktes oder Verbesserungen des Produktionsprozesses. Um Innovationen zu entwickeln und diese in ein Produkt umzusetzen, ist ein hohes Maß an Kreativität einerseits und ein planmäßiges und strukturiertes Vorgehen andererseits erforderlich. Weiterhin müssen vielfältige Randbedingungen wie gesetzliche Anforderungen, Umweltaspekte und Marktveränderungen beachtet werden und machen die Produktentwicklung zu einer komplexen Tätigkeit. In Unternehmen wird dieser Komplexität mit Prozessen begegnet, die den beteiligten Mitarbeitern und Abteilungen definierte Abläufe vorgeben und den Austausch von Informationen und Ergebnissen in Form von Produktdatenmodellen regeln [FELD13]. Entwicklungsprozesse sind daher eine wichtige Grundlage für den Erfolg von Technologieunternehmen und ebenfalls bei der Entwicklung optomechatronischer Systeme gewinnbringend.

Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung basieren auf unterschiedlichen Betrachtungszielen. Lindemann schlägt die Skala Mikrologik bis Makrologik vor, um Vorgehensmodelle entsprechend ihres Betrachtungsziels einzuordnen [LIND09]. Braun ordnet verschiedene Vorgehensmodelle nach diesem Ansatz ein [BRAU05]. In Abbildung 3.1 wird unterschieden in elementare Handlungsabläufe, operative Arbeitsschritte, Phasen und Gesamtprojekte. Auf der Ebene der elementaren Handlungsabläufe werden beispielsweise Gestaltzonen, Toleranzen und Maßangaben betrachtet. Unter operativen Arbeitsschritten werden konkrete Aktivitäten bei der Entwicklung verstanden. In Phasen oder Arbeitsabschnitten erfolgt z.B. der Entwurf eines überschaubaren Systems oder Subsystems. Mehrere Phasen werden zu einem Phasenmodell zusammengefasst. Das Gesamtprojekt umfasst die komplette Produktentwicklung eines Systems, für die typischerweise mehrere Iterationen eines Phasenmodells notwendig sind [VDI2206]. Der Fokus liegt dabei auf der organisatorischen Koordination der Entwicklung und unterstützenden Unternehmensbereichen.

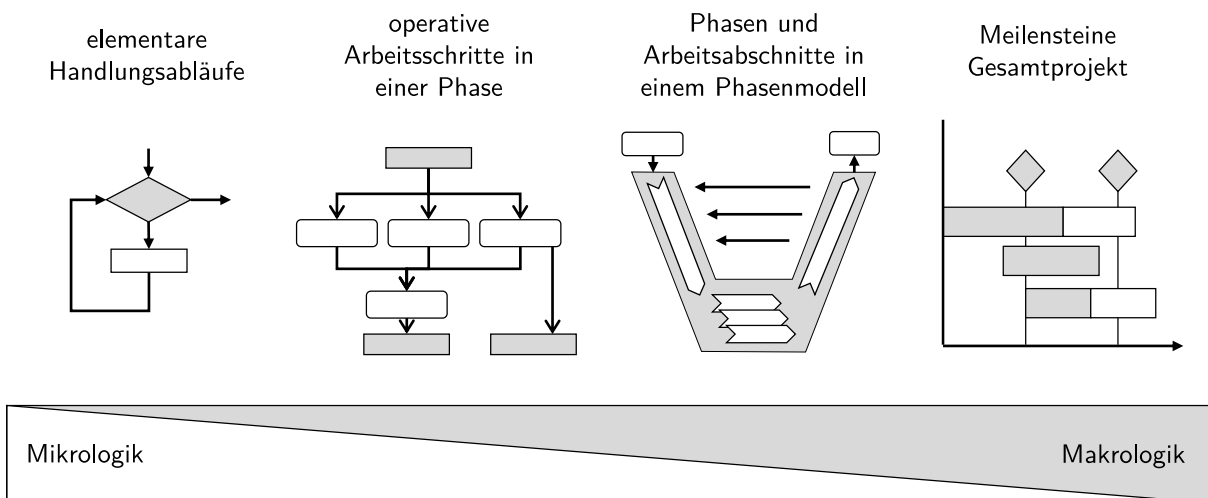


Abbildung 3.1: Betrachtungsziele von Produktentwicklungsprozessen nach [LIND09]

Optomechatronische Systeme sind wie mechatronische Systeme dadurch ausgezeichnet, dass diese aus Elementen unterschiedlicher Domänen bestehen. Bei der Entwicklung dieser Systeme finden daher Prozesse Anwendung, die explizit domänenübergreifende Wechselwirkungen berücksichtigen. Für mechatronische Systeme ist dafür das V-Modell in der Industrie und Forschung etabliert, dessen Fokus auf dem domänenübergreifenden Systementwurf liegt. Wegen der Ähnlichkeit zu mechatronischen Systemen wird angenommen, dass das V-Modell auch prinzipiell für die Entwicklung optomechatronischer Systeme geeignet ist. In Abschnitt 3.1 werden daher die Grundlagen und allgemeinen Ideen des V-Modells sowie unterschiedliche Ausprägungen beschrieben. Darüber hinaus werden in Abschnitt 3.2 und 3.3 weitere domänenübergreifende Entwicklungsprozesse aus der Literatur vorgestellt, bei denen die Domäne Optik explizit enthalten ist. Die vorgestellten Entwicklungsprozesse werden nach der Klassifikation von Lindemann [LIND09] den Phasenmodellen zugeordnet. Die Phasen enthalten allgemeine Arbeitsabschnitte, die für ein konkretes Entwicklungsvorhaben detailliert werden müssen, um anwendbar zu werden [VDI2206]. Diese Detaillierung erfolgt, indem für die einzelnen Abschnitte des übergeordneten Phasenmodells operative Arbeitsschritte definiert werden. Um diesen Ansatz zu verdeutlichen, werden in Unterabschnitt 3.1.4 exemplarisch V-Modelle vorgestellt, die für ein spezielles Anwendungsgebiet detailliert sind.

Abschließend werden in Abschnitt 3.4 Ansätze zur domänenübergreifenden Modellierung beschrieben, mit denen Wechselwirkungen zwischen Systemelementen analysiert werden können. Speziell wird dabei darauf eingegangen, wie Wechselwirkungen zwischen optischen Elementen und Elementen anderer Domänen betrachtet werden können.

3.1 V-Modell

Der Fokus des V-Modells liegt darauf, dass Entwickler bei interdisziplinären Entwicklungsaufgaben unterstützt werden. Weiterhin steht der Systemgedanke bei dem V-Modell stärker im Fokus als bei vergleichbaren Vorgehensmodellen aus dem Maschinenbau, wie beispielsweise der VDI-Richtlinie 2221. Der Grundgedanke des V-Modells ist die Zerlegung der Anforderungen hinsichtlich Domäne und Hierarchie auf dem linken Ast des V und die Integration auf dem rechten Ast. Mit der grafischen Darstellung in Form eines V (Abbildung 3.2) werden die Tests der Komponenten und Subsysteme gegenüber den Anforderungen auf der gleichen Hierarchieebene zugeordnet. Die vier Grundprinzipien des V-Modells sind [ANGE19]:

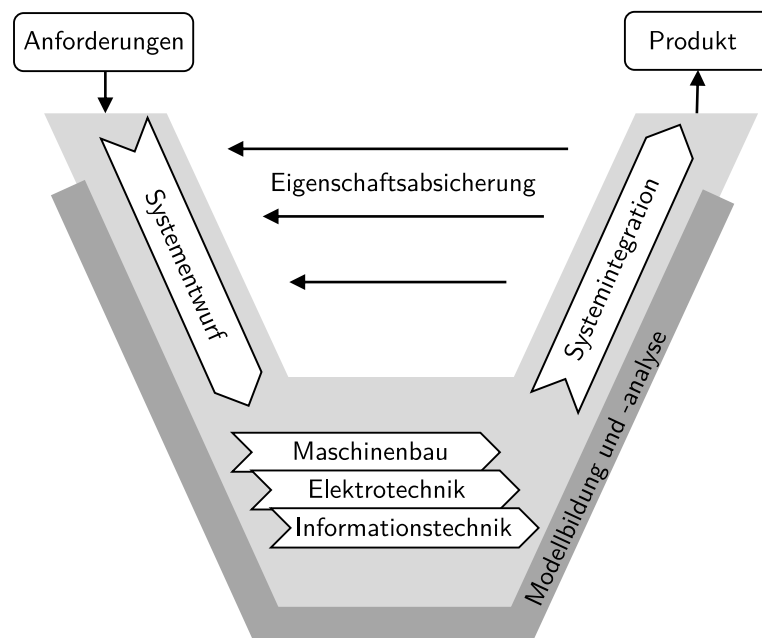


Abbildung 3.2: Allgemeines V-Modell nach [VDI2206]

Spezifikation und Zerlegung Auf der linken Seite des V-Modells werden die Anforderungen an das Gesamtsystem aus dem Entwicklungsauftrag abgeleitet. Es folgt die schrittweise Zerlegung des Produkt in Subsysteme und Module, um die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen weiter zu detaillieren. Im Systementwurf wird der prinzipielle Aufbau des Systems entwickelt, ohne dabei konkrete Wirkmechanismen vorzuschreiben.

Realisierung und Integration Im unteren Bereich und auf der rechten Seite des V-Modells werden spezifizierte Module entwickelt bzw. beschafft und schrittweise zum Gesamtsystem integriert.

Verifikation und Validierung Auf der horizontalen Ebene findet bei jedem Integrations-schritt eine Eigenschaftensicherung gegenüber der Spezifikation statt. Als Verifikation

wird dabei der Abgleich der Systemeigenschaften gegenüber den Anforderungen bzw. dem Pflichtenheft verstanden. Die Validierung des Systems ist weitreichender. Daher wird geprüft, ob das durch den Kunden beauftragte Entwicklungsziel mit dem System erreichbar ist.

Iterationen und Inkremente Komplexe Systeme können häufig nicht durch einen einzigen Durchlauf des V-Modells entwickelt werden, sondern es sind mehrere Zyklen bis zum fertigen Produkt erforderlich. Dabei ist es zu empfehlen, für eine neue Produktgeneration Informationen aus Entwicklung, Herstellung und Nutzung der vorherigen Generation einzubeziehen. Dieses Vorgehen erfordert eine strukturierte Dokumentation und Datenanalyse und wird auch als *Technische Vererbung* bezeichnet [MOZG15, GOTT16].

Nachfolgend werden generalistische V-Modelle ohne konkreten Bezug zu bestimmten Domänen und Produkten beschrieben. Anschließend werden weitere V-Modelle genannt, die auf einen spezifischen Kontext angepasst sind.

3.1.1 VDI-Richtlinie 2206

In der VDI-Richtlinie 2206, *Methodik zur Entwicklung mechatronischer Produkte*, wird eine in Industrie und Forschung verbreitete Version des V-Modells beschrieben. Das Vorgehen ist in Abbildung 3.2 dargestellt und besteht aus den Phasen des Systementwurfs, des domänenspezifischen Entwurfs und der Systemintegration.

Das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 stellt nach der Einordnung in Abbildung 3.1 ein Phasenmodell dar, in dem Arbeitsabschnitte beschrieben werden. Die Intention dabei ist, dass die Arbeitsabschnitte flexibel an den Unternehmens- und Produktkontext angepasst werden können. Für die wiederkehrenden Arbeitsschritte Systementwurf, Modellbildung und -analyse, domänenspezifischer Entwurf, Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung werden darüber hinaus Prozessbausteine definiert [VDI2206].

Das Anwendungsgebiet der Richtlinie sind bevorzugt Systeme, die aus diskreten mechanischen und elektronischen Komponenten bestehen und durch die Nutzung der Informationstechnologie funktional integriert sind. Durch technologische Weiterentwicklungen insbesondere von elektronischen Bauteilen sowie durch die zunehmende Vernetzung von Systemen wird eine Überarbeitung dieser Richtlinie aus dem Jahr 2004 motiviert [GRAE18]. Neue Aspekte des aktualisierten und erweiterten V-Modells sind die Einführung von Kontrollpunkten und die Integration eines durchgängigen Anforderungsmanagements [GRAE20].

3.1.3 V-Modell XT

Die Entwicklung des V-Modells XT ist durch die Bundesrepublik Deutschland beauftragt worden und wurde in der ersten Version 1992 durch die Bundeswehr veröffentlicht [ANGE19]. Mit einer ersten Revision entstand das V-Modell 97. Seit 2005 ist das V-Modell XT der zweiten Revision gültig. Der Namenszusatz XT soll dabei die starke Flexibilität und Anpassbarkeit des Modells unterstreichen (*XT: eXtreme Tailoring*). Das Modell wurde von einem Forschungskonsortium um die TU Clausthal und die TU München entwickelt und soll die Grundlage für IT-Systementwicklungen im Bereich von Unternehmen, öffentlichen Stellen und im militärischen Umfeld sein. Anders als das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 und des MBSE ist das V-Modell XT als Softwaretool umgesetzt. Neben dem eigentlichen Vorgehen werden Projektrollen und die einzelnen Arbeitsinhalte detailliert beschrieben. Die Grundstruktur ist der des V-Modells der VDI-Richtlinie 2206 ähnlich und wird daher nicht grafisch dargestellt.

3.1.4 V-Modelle für spezifische Anwendungen

Die vorgestellten V-Modelle sind Phasenmodelle, die auf den konkreten Unternehmens- und Produktkontext angepasst werden müssen. In der Literatur sind verschiedene Anpassungen beschrieben, beispielsweise für mechatronische Systeme [BEND05], verteilte Automatisierungssysteme [FRAN13], sicherheitsrelevante Elektroniksysteme im Fahrzeug [BENZ04] und Mikro-Elektromechanische Systeme [WATT07]. Die Detaillierung erfolgt dabei, indem in den einzelnen Phasen der Entwicklung operative Arbeitsschritte (vgl. Abbildung 3.1) definiert werden, um das Vorgehen anwendbar zu machen. Eine Detaillierung des V-Modells für die Domäne Optik ist bisher nicht bekannt.

Durch die Anpassung des allgemeinen V-Modells für spezifische Aufgaben ist eine Anwendung auch für optomechatronische Systeme prinzipiell möglich. Im nächsten Abschnitt werden weitere Vorgehensmodelle vorgestellt, die einen direkten Bezug zur Domäne Optik haben.

3.2 Entwicklungsprozess für optomechatronische Systeme nach Cho

Die in der Einleitung zu dieser Arbeit beschriebene Definition optomechatronischer Systeme basiert auf den Veröffentlichungen von Hyungsuck Cho, der Potenziale und Eigenschaften optomechatronischer Systeme beschreibt und systematisch optomechatronische Systemvaria-

tionen und deren Auslegung darlegt [CHO05a]. Cho stellt Entwicklungsmethoden auf verschiedenen Abstraktionsebenen vor. Der von ihm aufgestellte allgemeine Entwicklungsprozess für optomechanische Systeme besteht aus der Phase 1 *Anforderungsanalyse*, Phase 2 *Konzeptentwurf und Bewertung* sowie Phase 3 *Detailentwurf und Bewertung*. Ergänzt wird der Prozess durch den *Entwurf des Produktionssystems* sowie die Phasen *Fertigung* und *Service und Support* [CHO02]. Wie konkrete Konzepte entworfen und bewertet werden wird nicht beschrieben. In einem weiteren Vorgehensmodell von Cho, dem hierarchischen Entwicklungsprozess, steht die Verknüpfung von Systemelementen aus unterschiedlichen Domänen im Vordergrund. Basierend auf der geplanten Hauptfunktion des optomechanischen Systems werden Teilfunktionen abgeleitet und physikalischen Komponenten zugeordnet. Anschließend werden optische, mechanische und elektronische Komponenten und Subsysteme entwickelt, Schnittstellen geschaffen und zu einem Gesamtsystem integriert [CHO05b]. Neben den beiden Vorgehensmodellen beschreibt Cho exemplarisch die Dimensionierung von Systemkomponenten für konkrete Anwendungen, beispielsweise für einen Laserdrucker und ein konfokales Mikroskop.

3.3 Entwicklungsprozess für optomechanische Systeme nach Yoder

Die bestimmungsgemäße Funktionalität eines optischen Systems hängt neben der Auslegung und Fertigung der optischen Komponenten auch maßgeblich von der präzisen Positionierung der einzelnen Elemente innerhalb der festgelegten Toleranzen ab. Da die Toleranzen optischer Systeme typischerweise deutlich geringer sind als bei klassischen mechanischen Systemen, ergeben sich besondere Anforderungen an die mechanischen Komponenten zur Aufnahme und Justierung der optischen Elemente. Yoder begegnet dieser Herausforderung mit einem Entwicklungsprozess für optomechanische Systeme, der nachfolgend beschrieben wird [YODE05].

In der ersten Phase des Vorgehens, der Konzeptionierung des Gesamtsystems, wird der Zweck des Systems definiert. Anschließend wird ein Überblick über das Gesamtsystem inklusive weiterer mechanischer und elektronischer Komponenten erstellt, beispielsweise mithilfe eines funktionalen Blockdiagramms des Systems. In der Phase der Spezifikation (im englischen Original: Performance Specification and Design Constraints) werden funktionale Anforderungen an die Leistung des Systems festgelegt und physikalische Randbedingungen wie Größe, Bauraum, Einsatzbedingungen etc. dokumentiert. Eine Übersicht über vorgeschlagene Bestandteile der Spezifikation sind in Form einer Checkliste hinterlegt. Weiterhin beschreibt Yoder umfangreich internationale Standards für die Entwicklung von optischen Systemen. In der folgenden

Phase des Vorentwurfs (im englischen Original: Preliminary Design) wird basierend auf den Anforderungen und Randbedingungen ein erster Entwurf des optischen Systems erstellt. Linsen werden dafür im ersten Schritt als dünn angenommen. Im anschließenden Entwurf mit dicken Linsen werden Durchmesser, Dicke und Abstand zwischen optischen Elementen festgelegt, so dass der Entwurf der mechanischen Komponenten beginnen kann. In der Phase Modellbildung und Analyse werden Modelle des Systems erstellt und mit weiteren Analysen geprüft, ob die Anforderungen erfüllt werden und der Entwurf gegebenenfalls angepasst werden muss. Die Analysen beziehen sich unter anderem auf Streulicht, mechanische und thermische Spannungen und Fertigbarkeit des Systems. Yoder gibt dabei konkrete Hinweise zu Herausforderungen bei dem Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Computerwerkzeugen und möglichen Datenformaten. Diese Analysen sind die Basis für die nächste Phase, in der Toleranzen für die Fertigung der optischen und mechanischen Komponenten sowie für deren Anordnung zueinander festgelegt werden. Anschließend empfiehlt Yoder eine experimentelle Modellierung des Systems bzw. der kritischen Systemkomponenten. In den letzten Entwicklungsphasen wird der Entwurf finalisiert und Fertigungsdokumente und -prozesse ausgearbeitet. Abschließend wird das System gefertigt und verifiziert [YODE05].

3.4 Domänenübergreifende Modellbildung

Modelle sind ein Abbild der Wirklichkeit, die mit dem Ziel erstellt werden, komplexe Systeme einfacher handhabbar zu machen. Das grundlegende Prinzip der Modellerstellung ist die Abstraktion, folglich das Weglassen von Details und Systembereichen, die für die geplanten Analysen keinen oder einen vernachlässigbaren Einfluss haben. Abstrakte Modelle werden genutzt, um Anforderungen, Funktionen und Lösungselemente in Beziehung zu setzen. Mit konkreteren Modellen wird die Auslegungen, Analyse und Verifikation von Systemen vorgenommen.

Eine durchgängige und domänenübergreifende Modellbildung ist die Grundlage für die Entwicklung interdisziplinärer und vernetzter Produkte. Im Kontext des Modellbasierten Systems Engineering (vgl. Abschnitt 3.1.2) werden drei Abstraktionsebenen von Modellen beschrieben [EIGN17]:

Modellbildung und Spezifikation Die Beschreibung des Systems erfolgt qualitativ und beinhaltet Modelle zu Anforderungen, Funktionen, Verhalten und logischen Systemstrukturen. Das System kann mit diesen Modellen beschrieben, aber nicht simuliert werden. Als Sprache wird häufig SysML eingesetzt. Das Ergebnis ist ein Modell des gesamten

Systems, mit dem Anforderungen an die einzelnen Komponenten abgeleitet werden können.

Modellbildung, erste Simulation und Verifikation Mit quantifizierten Modellen können domänenübergreifende Simulationen durchgeführt werden. Als Werkzeuge kommen Simulationseditoren wie Matlab/Simulink oder Modelica zum Einsatz.

Disziplinspezifische Modellbildung, detaillierte Simulation und Verifikation Mit Modellen von konkreten Komponenten werden realitätsnahe Simulationen durchgeführt. Häufig findet diese detaillierte Modellbildung innerhalb einer einzelnen Domäne statt.

Typischerweise finden detaillierte Simulationen innerhalb einer betrachteten Domäne statt. Für optomechatronische Systeme kann es erforderlich sein, diese auch domänenübergreifend durchzuführen. Die disziplinspezifische Modellbildung der dritten Abstraktionsebene wird daher nachfolgend detaillierter beschrieben.

Das allgemeine Vorgehen, um disziplinspezifische Modelle zu bilden, kann mit den Arbeitsschritten des Prozessbausteins *Modellbildung* der VDI-Richtlinie 2206 erfolgen, der in Abbildung 3.4 dargestellt ist.

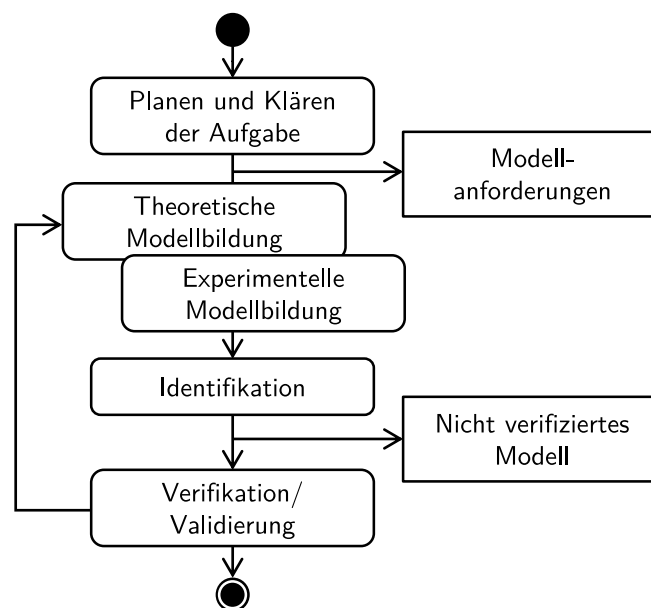


Abbildung 3.4: Prozessbaustein für die Modellbildung nach [VDI2206]

Der erste Schritt in diesem Vorgehen ist die Formulierung des Modellierungsziels, bei der das zu lösende Problem eingegrenzt wird. Die anschließende Modellbildung basiert entweder auf theoretisch analysierbaren Zusammenhängen oder auf Experimenten. Nach der Parametrisierung der identifizierten Zusammenhänge steht ein nicht verifiziertes Modell zur Verfügung, mit dem die Systemanalyse durchgeführt werden kann. Um die Aussagekraft der Berechnungser-

gebnisse zu erhöhen, kann das Modell durch Experimente oder Simulationen verifiziert werden. Damit wird geprüft, ob die identifizierten Zusammenhänge hinreichend genau sind und ob alle erwarteten Phänomene erfasst werden.

Auf der dritten Abstraktionsebene der detaillierten Simulationen werden Systemkomponenten typischerweise mit Methoden und Werkzeugen einer Domäne modelliert. In der Domäne Optik existieren dafür unterschiedliche Modellansätze, um die Eigenschaften und Wirkungen optischer Strahlung zu beschreiben. Mit den Ansätzen der klassischen Physik ist es möglich, die Ausbreitung optischer Strahlung im Raum zu modellieren. Für viele Anwendungen ist die Modellierung innerhalb der geometrischen Optik ausreichend, um alle relevanten Effekte abbilden zu können. Um Wechselwirkungen mit Materie wie die spontane Emission eines Photons zu analysieren, sind dagegen Theorien wie die Quantenelektrodynamik erforderlich. In Abschnitt 2.3.1 sind die verschiedenen Ansätze erläutert.

Bei einigen Systemen reicht die Modellbildung innerhalb einer Domäne zur detaillierten Simulation nicht aus, um das reale Systemverhalten ausreichend genau vorherzusagen. In diesen Fällen müssen Komponenten des Systems domänenübergreifend modelliert und simuliert werden. Dafür existieren Computerwerkzeuge mit denen auch optische Effekte modellierbar sind [HEIJ18]. Darüber hinaus ist es möglich, für konkrete interdisziplinäre Fragestellungen vorhandene Schnittstellen domänenspezifischer Computerwerkzeuge zu nutzen und diese zu koppeln. Pütsche entwickelt beispielsweise einen Ansatz zur Auslegung von aktiven Strahlformungssystemen mit Mikrospiegeln. Dafür koppelte er zwei Computerwerkzeuge aus den Domänen Optik und Mechanik, um Deformationen des Mikrospiegels in der Optiksimulation zu berücksichtigen [PÜTS16]. Zur Auslegung und Analyse von Weißlichtquellen, die nach dem Remote Phosphor Prinzip arbeiten, müssen optische und thermische Eigenschaften des Leuchtstoffs gemeinsam modelliert werden [WOLF16b]. Eine Umsetzung dieses Ansatzes ist von Chatziryli veröffentlicht [CHAT20]. Eine der Herausforderungen bei der Kopplung von Computerwerkzeugen verschiedener Disziplinen ist es, die unterschiedlichen Datenformate ineinander zu überführen. Hatheway stellt einen Überblick über mögliche Kopplungen und Datenformate vor und analysiert den Einfluss von Fehlern dabei [HATH04].

Die vorgestellten Entwicklungsprozesse für domänenübergreifende Systementwicklungen werden im nächsten Kapitel bewertet und ausgewählte Elemente für den zu entwickelnden Prozess weiterverwendet. Die Erkenntnisse zur domänenübergreifenden Modellbildung fließen ebenfalls in den Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme ein.

4 Konzeption eines Prozesses zur Entwicklung optomechatronischer Systeme

Für die Entwicklung von mechatronischen Systemen existieren Prozesse, die prinzipiell auch für optomechatronische Systeme einsetzbar sind. Die in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen der Domäne Optik werden mit Eigenschaften mechatronischer Systeme verglichen, um daraus Anforderungen an den Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme abzuleiten. Anhand der Anforderungen an den Prozess werden anschließend die in Kapitel 3 vorgestellten Prozesse zur domänenübergreifenden Entwicklung bewertet, um daraus Elemente zu identifizieren, die für den zu erarbeitenden Prozess nutzbar sind. Darauf aufbauend wird das Konzept des Prozesses zur Entwicklung optomechatronischer Systeme beschrieben, der in Kapitel 5 detailliert dargelegt wird.

4.1 Besonderheiten der Domäne Optik

Czichos beschreibt Mechatronik als integrale Wissensdisziplin, die auch das Teilgebiet der Optik umfasst [CZIC19]. Um die Besonderheiten der Domäne Optik herauszustellen, werden in diesem Abschnitt die Eigenschaften optischer Systeme aus Kapitel 2 mit denen mechatronischer Systeme in Tabelle 4.1 gegenübergestellt. Die Eigenschaften der Mechatronik entstammen der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206].

Für die allgemeinen Funktionen *Wandeln* und *Umformen* können Wirkprinzipien identifiziert werden, welche die Basis für Lösungselemente im Systementwurf sind. Das Leiten von optischer Energie hängt stark von dem optischen Konzept ab, also von Typ, Anzahl, Anordnung und Geometrie der optischen Komponenten. Bei mechanischen und elektronischen Komponenten hängt der Energiefluss weniger direkt von dem Konzept ab. Das Speichern von Licht ist zwar physikalisch möglich, es existiert aber kein Wirkprinzip, mit dem dieser Effekt in den betrachteten optomechatronischen Systemen umgesetzt werden kann. Bei der optischen Modellbildung wird Licht als Welle verstanden oder als Strahlen vereinfacht. Innerhalb der geometrischen Optik werden keine zeitabhängigen Effekte berücksichtigt. Die modellierten Strahlen weisen also

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der Eigenschaften der Domäne Optik und der Mechatronik

Bereich	Domäne Optik	Mechatronik
Allgemeine Funktionen	<i>Leiten</i> stark abhängig von optischem Konzept, <i>Speichern</i> nicht sinnvoll	<i>Leiten</i> unterliegt weniger Restriktionen als in Domäne Optik, <i>Speichern</i> mechanisch und elektronisch einfach möglich
Modellbildung	Zeitunabhängig, Unterschiedliche Ansätze: Geometrische Optik, Wellenoptik	Zeitabhängig, domänenübergreifende Differentialgleichungen
Wechselwirkung mit Menschen	Inhärent bei sichtbarem Licht	Über Mensch-Maschine-Schnittstelle
Entwurf	Anzahl, Anordnung und Geometrie von Systemelementen	Zeitabhängiges domänenübergreifendes Systemverhalten
Validierung	Photometrische Messungen, Feldtests für physiologische Validierung	Fokus auf dynamischen Wechselwirkungen zwischen Systemelementen

keine Geschwindigkeit auf, sondern es wird davon ausgegangen, dass die optische Leistung an jeder Stelle des Systems zeitgleich vorhanden ist. Dagegen ist das zeitabhängige Verhalten mechatronischer Systeme der zentrale Aspekt im Systementwurf. Die Übertragungsfunktionen der mechanischen und elektronischen Elemente werden in Form von Differenzialgleichungen kombiniert, um eine domänenübergreifende Modellierung und Systemoptimierung zu ermöglichen. Bezüglich der Wechselwirkungen mit Menschen bestehen ebenfalls Unterschiede zwischen der Domäne Optik und der Mechatronik. Die betrachteten Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass ein Strahlungstransport über die Systemgrenze stattfindet. Wechselwirkungen mit Menschen sind daher eine typische Eigenschaft, die explizit berücksichtigt werden muss. Bei mechatronischen Systemen finden Wechselwirkungen mit Menschen ebenfalls statt, beispielsweise über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle. Störwirkungen auf Menschen sind bei optischen und mechatronischen Systemen möglich und werden entsprechend berücksichtigt. Der Entwurf eines optischen Systems hat das Ziel, die Anzahl, Anordnung und Geometrie der optischen Komponenten festzulegen, sodass die funktionalen Anforderungen erfüllt werden. Der Fokus bei dem Systementwurf mechatronischer Systeme liegt darauf, das zeitabhängige Systemverhalten beispielsweise durch Zustandsregler gezielt zu beeinflussen. Bei der Verifikation optischer Systeme werden durch photometrische Messungen die funktionalen Anforderungen abgesichert. Um die Wirkung von Lichtfunktionen auf Menschen zu validieren, sind darüber hinaus physiologische Untersuchungen notwendig. Bei der Validierung mechatronischer Systeme stehen die Wechselwirkungen zwischen Systemelementen im Fokus. Dies erfolgt typischerweise mit der Methode *Hardware in the Loop*, bei der eine physikalische Komponente oder ein

System in eine virtuelle Umgebung eingebunden wird, um mögliche Wechselwirkungen und Systemzustände zu analysieren.

Die betrachteten optomechatronischen Systeme enthalten Systemelemente, die der Domäne Optik zuzuordnen sind, sowie mechanische und elektronische Elemente. Mit der Gegenüberstellung der Eigenschaften der Domäne Optik und der Mechatronik werden Unterschiede aufgezeigt, die in dem zu entwickelnden Prozess berücksichtigt werden müssen.

4.2 Anforderungen an den Prozess

Nachfolgend werden Anforderungen an den Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme abgeleitet. Die Anforderungen sind die Basis für die anschließende Bewertung der in der Literatur beschriebenen Entwicklungsprozesse.

Anforderung 1 Optomechatronische Systeme sind typischerweise Bestandteil von Systemen mit mehreren Hierarchieebenen, was eine detaillierte Betrachtung der Systemgrenze, Schnittstellen und Wechselwirkungen sowie ein planmäßiges Vorgehen bei der Validierung erfordert. Weiterhin enthalten Systeme nach der Definition von Huth [HUTH20] Elemente aus unterschiedlichen Domänen, deren Entwicklung koordiniert werden muss, um domänenübergreifende Wechselwirkungen innerhalb des Systems zu berücksichtigen. Für den zu entwickelnden Prozess wird daher eine hohe Anwendbarkeit für Systementwicklungen gefordert.

Anforderung 2 Mit Entwicklungsprozessen der Makrologik (vergleiche Abbildung 3.1 in Kapitel 3) erhält der Entwickler eine Übersicht über Phasen, Arbeitspakete und Meilensteine des Gesamtprojekts. Durch die Verknüpfung eines Prozesses der Makrologik mit Elementen der Mikrologik wie operativen Arbeitsschritten und elementaren Handlungsabläufen wird der Entwickler bei wiederkehrenden Aufgaben unterstützt. Prozesse der Makrologik wie das allgemeine V-Modell werden durch operative Arbeitsschritte detailliert, um die Anwendbarkeit für konkrete Entwicklungsprozesse zu erhöhen. Diese Verknüpfung von Prozesselementen der Mikro- und Makrologik wird auch für den Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme gefordert, damit Entwickler den Prozess als konkrete Hilfestellungen nutzen können.

Anforderung 3 In der allgemeinen Entwicklungsmethodik wird empfohlen, Anforderungen, die einen großen Einfluss auf das Konzept eines Systems haben, besonders früh in der Entwicklung zu berücksichtigen, da so aufwendige Änderungen im Verlauf der Entwick-

lung vermieden werden können [FELD13]. Bei den betrachteten optomechatronischen Systemen entstammen die Hauptfunktion und die funktionalen Anforderungen der Domäne Optik. Das Leiten von optischer Strahlung ist im Vergleich zu anderen Domänen eng mit der geometrischen Gestaltung der optischen Elemente und deren Relation zueinander verknüpft (siehe Tabelle 4.1 und Abschnitt 2.3). Mit der Festlegung der optischen Anforderungen wird Einfluss auf das Konzept des Gesamtsystems genommen, weshalb für den Prozess gefordert wird, dass konzeptbestimmende Anforderungen der Domäne Optik in einer frühen Phase des Entwicklungsprozesses berücksichtigt werden.

Anforderung 4 Bei den betrachteten optomechatronischen Systemen wird Strahlung über die Systemgrenze transportiert, die Menschen erreichen kann. Dabei können Wirkungen auf Menschen Teil der Hauptfunktion sein oder eine zu vermeidende Störwirkung. Für den Prozess wird daher gefordert, dass Wirkungen optischer Strahlung auf Menschen explizit berücksichtigt werden.

Anhand dieser Anforderungen werden im nächsten Abschnitt die Entwicklungsprozesse für Systementwicklungen aus Kapitel 3 bewertet, um Elemente zu identifizieren, die auch für den Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme eine hohe Relevanz haben.

4.3 Bewertung bestehender Entwicklungsprozesse

In diesem Abschnitt werden die bestehenden Entwicklungsprozesse anhand der aufgestellten Anforderungen bewertet. Tabelle 4.2 zeigt das Ergebnis der Bewertung, welche die Grundlage für das Konzept des Prozesses zur Entwicklung optomechatronischer Systeme darstellt.

Wie in Abschnitt 4.1 dargestellt weisen optische Systeme Unterschiede zu mechatronischen Systemen auf. Eine Gemeinsamkeit der betrachteten optomechatronischen und mechatronischen Systeme ist, dass diese sich in ihrer Grundstruktur ähneln, also aus Elementen verschiedener Domänen bestehen und typischerweise eine hierarchische Struktur aufweisen. Im Stand der Forschung zu Entwicklungsmethoden wird daher ein Fokus auf das V-Modell gelegt.

Tabelle 4.2: Bewertung der interdisziplinären Entwicklungsprozesse anhand der aufgestellten Anforderungen mit den Bewertungsstufen: *voll erfüllt (+)*, *teilweise erfüllt (o)*, *nicht erfüllt (-)*

Vorgehensmodelle	Anforderung 1: <i>Anwendbarkeit für Systementwicklungen</i>	Anforderung 2: <i>Verknüpfung von Prozesselementen der Mikro- und Makrologik</i>	Anforderung 3: <i>Berücksichtigung der konzeptbestimmenden Anforderungen der Domäne Optik</i>	Anforderung 4: <i>Berücksichtigung der Wirkungen auf Menschen</i>
V-Modell VDI2206	+	o	-	-
V-Modell MBSE	+	-	-	-
V-Modell XT	+	o	-	-
Angepasste V-Modelle nach Bender, Frank, Benz und Watty	+	+	-	-
Prozess nach Cho	+	-	+	-
Prozess nach Yoder	o	+	+	-

Das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 ist ein generisches Modell, mit dem die interdisziplinäre Entwicklung insbesondere von mechatronischen Systemen unterstützt werden kann, das aber auch für andere Arten von Systemen einsetzbar ist. Mit konkreten Prozessbausteinen wird ein planmäßiges und zielgerichtetes Vorgehen ermöglicht. Für konkrete Entwicklungsaufgaben muss das Vorgehensmodell weiter ausgestaltet werden, um anwendbar zu sein. Die Verknüpfung von Prozesselementen der Mikro- und Makrologik ist daher nur teilweise erfüllt. Das V-Modell des MBSE und das V-Modell XT sind ebenfalls allgemein formuliert ohne Fokus auf bestimmte Arten von Systemen. Neben der eigentlichen Entwicklungstätigkeit wer-

den auch vor- und nachgelagerte Prozesse der Produktentstehung einbezogen. Der Fokus des MBSE liegt darauf, das betrachtete System in allen Phasen der Produktentwicklung rechnerunterstützt zu modellieren. Damit wird ein strukturierter und nachvollziehbarer Austausch von Informationen und Daten zwischen unterschiedlichen Unternehmensabteilungen möglich. Im Vorgehensmodell des MBSE sind jedoch keine Prozesselemente der Mikrologik enthalten. Die allgemeinen V-Modelle werden für konkrete Entwicklungsaufgaben angepasst und detailliert, wofür in den Vorgehensmodellen von Bender [BEND05], Frank [FRAN13], Benz [BENZ04] und Watty [WATT07] operative Arbeitsschritte als Prozesselemente der Mikrologik genutzt werden. Für Systeme mit einer optischen Hauptfunktion ist keine Anpassung bekannt. Wirkungen auf Menschen werden ebenfalls in keinem der beschriebenen V-Modelle explizit berücksichtigt.

Im Entwicklungsprozess nach Cho wird Optomechatronik als Ingenieursdisziplin aufgefasst, in der Systeme entwickelt werden, die mindestens eine optische Komponente beinhalten. Dies umfasst ein mechatronisches System mit einem optischen Sensor genauso wie ein optisches Gerät mit mechanischen und elektronischen Zusatzfunktionen [CHO05b]. Der von Cho beschriebene Entwicklungsprozess auf der Ebene der Makrologik ist daher generalistisch und sehr ähnlich zu einem Entwicklungsprozess für mechatronische oder andere domänenübergreifende Systeme. Auf der Ebene der Mikrologik werden Hinweise zur Dimensionierung exemplarischer optomechatronischer Systeme gegeben, die aber nicht als allgemeine operative Arbeitsschritte nutzbar sind. Es erfolgt keine Einordnung der Arbeitsschritte in ein übergeordnetes Vorgehensmodell. Aspekte wie die Erarbeitung, Bewertung und Auswahl von Konzepten sowie die Verifikation und Validierung des Systems sind nicht enthalten. Wechselwirkungen mit Menschen werden nicht betrachtet. Ein detailliertes Vorgehensmodell für die Entwicklung optomechatronischer Systeme stellt Cho in Form eines hierarchischen Entwicklungsprozesses auf. Die Grundidee des Vorgehens ähnelt der des V-Modells, da das Produkt als funktionaler und räumlicher Zusammenschluss von Teilsystemen und Komponenten unterschiedlicher Domänen aufgefasst wird. Über diesen Grundgedanken geht das Vorgehensmodell von Cho nicht hinaus, es werden keine konkreten Arbeitsschritte oder Methoden für die einzelnen Phasen beschrieben. Die angegebenen Formeln und Zusammenhänge zur Dimensionierung sind häufig nur für eine Komponente des Gesamtsystems und nur für ein mögliches Konzept gültig. Es ist keine Verknüpfung von konkreten Arbeitsschritten mit den übergeordneten Phasen in dem Entwicklungsprozess ersichtlich.

Der Entwicklungsprozess für optomechanische Systeme von Yoder ist ein Prozess auf der Ebene der Makrologik, wobei der Fokus auf der Schnittstelle zwischen den Domänen Mechanik und Optik liegt. Da die Domäne Elektronik nicht adressiert ist, wird die Anwendbarkeit für Systementwicklungen nur als teilweise erfüllt bewertet. Innerhalb der einzelnen Phasen definiert

Yoder operative Arbeitsschritte zur Verifikation des Vorentwurfs, zur Toleranzanalyse und zur Verifikation des fertigen Produkts in Form von Ablaufplänen. Weiterhin werden konkrete Verweise zu relevanten Informationen wie Normen und Richtlinien gegeben. Yoder empfiehlt spezifische Computerwerkzeuge und nennt Herausforderungen bei dem Datenaustausch zwischen diesen. Durch die Verknüpfung des Entwicklungsprozesses auf der Makroebene mit konkreten operativen Arbeitsschritten wird das Vorgehen anwendbar für Entwickler von optischen Systemen [YODE05]. In dem Vorgehen steht in allen Phasen die Domäne Optik stark im Fokus. Eine Verknüpfung zur Mechanik besteht nur hinsichtlich mechanischer Elemente zum Halten und Justieren der optischen Elemente. Weitere Elemente oder Subsysteme anderer Domänen werden nicht berücksichtigt. Der Einfluss von Wechselwirkungen mit Menschen wird in keiner Phase des Prozesses betrachtet.

Velzel, Fischer und Gomez und Hernandez verfolgen das Ziel, optische Systeme zu entwickeln. Diese stellen nur einen Teil der betrachteten optomechatronischen Systeme dar, weshalb sich die Prozesse nicht für die angestrebten Systementwicklungen eignen. Die Prozesse sind daher nicht in die Bewertung einbezogen, liefern aber konkrete Inhalte für den Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme und werden in Abschnitt 5.2 entsprechend berücksichtigt.

Anhand der Analyse der vorgestellten Prozesse wird deutlich, dass die V-Modelle für Systementwicklungen nutzbar sind. Durch eine Verknüpfung des Vorgehens mit Elementen der Mikrologik kann wie durch Bender, Frank, Benz und Watty gezeigt wird, die Anwendbarkeit erhöht werden. Ein angepasstes V-Modell, bei dem die Eigenschaften der Domäne Optik berücksichtigt werden, ist nicht bekannt. Die drei vorgestellten allgemeinen V-Modelle (V-Modell VDI2206, V-Modell XT, V-Modell MBSE) sind alle prinzipiell als Basis für den zu entwickelnden Prozess nutzbar. Der Fokus des V-Modells XT sind Projekte im Bereich von IT-Systementwicklungen. Mit dem V-Modell MBSE wird das Ziel verfolgt, vernetzte und interdisziplinäre Entwicklungen in Unternehmensprozesse zu integrieren, wodurch das Modell komplizierter aufgebaut ist als das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 und eine Anpassung erschwert wird. Als Basis für die Entwicklung des Prozesses wird in dieser Arbeit das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 ausgewählt, da dieses generisch aufgebaut und dabei übersichtlich gestaltet ist. Das Modell enthält Prozessbausteine in denen operative Arbeitsschritte als Elemente der Mikrologik enthalten sind. Diese Art der Verknüpfung mit Elementen der Mikrologik wird auch für den zu entwickelnden Prozess angestrebt. Um die konzeptbestimmenden Anforderungen der Domäne Optik in dem zu entwickelnden Prozess zu berücksichtigen, können Elemente der Prozesse von Cho und Yoder verwendet werden. Im nächsten Abschnitt wird der Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme erarbeitet.

4.4 Konzept des Prozesses

Mit der Bewertung der vorgestellten interdisziplinären Entwicklungsprozesse im vorherigen Abschnitt wird gezeigt, dass mit keinem der Prozesse alle gestellten Anforderungen erfüllt werden. Zwar ist das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 prinzipiell für die Entwicklung von optomechatronischen Systemen einsetzbar, es existiert aber keine Detaillierung des Modells für die Domäne Optik mit Elementen der Mikrologik, um die Anwendbarkeit zu erhöhen. Für den in dieser Arbeit vorgestellten Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme wird daher das V-Modell als Basis genutzt und die Phasen der Makrologik mit operativen Arbeitsschritten der Mikrologik verknüpft [KNÖC19b].

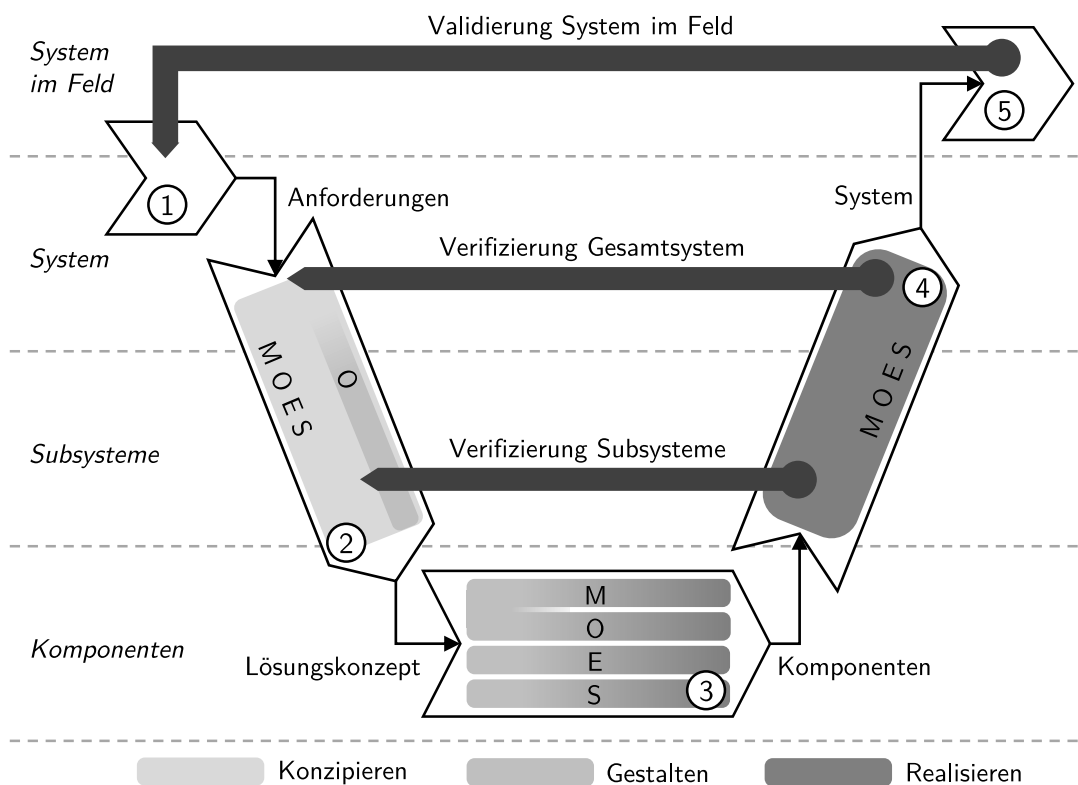


Abbildung 4.1: Gesamtprozess im Überblick mit den Domänen: Mechanik (M), Optik (O), Elektrik/Elektronik (E) und Software (S)

In Abbildung 4.1 ist der erarbeitete Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme im Überblick dargestellt. Die Benennung der Phasen Anforderungsanalyse (1), Systementwurf (2), Domänenspezifischer Entwurf (3), Systemintegration (4) sowie die Grundprinzipien des V-Modells (siehe Abschnitt 3.1) werden aus dem allgemeinen V-Modell [VDI2206] übernommen. Ein Teil der Eigenschaftsabsicherung (5) erfolgt mit dem System im Feld. Die Arbeitsschritte dazu werden der Phase der Systemintegration zugeordnet. Zu Beginn des Prozesses erfolgt die domänenübergreifende Anforderungsanalyse (1) und die Zerlegung des Gesamtsystems in

Subsysteme und Komponenten. Nachdem die innerhalb der Domänen entworfenen Komponenten realisiert sind, erfolgt die schrittweise Integration zum Gesamtsystem und die Absicherung nach jedem Integrationsschritt. Um die Anwendbarkeit des Prozesses zu erhöhen, werden im nächsten Kapitel operative Arbeitsschritte für jeden der dargestellten Prozessbausteine beschrieben. In den Phasen (2) - (4) erfolgen Entwicklungstätigkeiten (*Konzipieren, Gestalten, Realisieren*), die entsprechend der Legende in Abbildung 4.1 farblich gekennzeichnet sind.

Die konzeptbestimmenden Anforderungen, die bei den betrachteten Systemen der Domäne Optik zuzuordnen sind, sollen früh im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden. Eine der Besonderheiten der Domäne Optik ist, dass das Leiten von optischer Strahlung stark mit der Gestaltung der optischen Elemente verknüpft ist. Um den Einfluss der Anforderungen der Domäne Optik auf das Lösungskonzept zu bewerten, ist daher bereits in der Phase des Systementwurfs (2) eine Gestaltung der optischen Elemente zu empfehlen. Durch diesen Aspekt unterscheidet sich der Prozess von dem allgemeinen V-Modell, bei dem im Systementwurf alle Domänen gleichberechtigt beschrieben sind. Das Lösungskonzept ist die Basis für den domänenspezifischen Entwurf (3). Anders als im allgemeinen V-Modell kann die Gestaltung nicht vollständig getrennt in den einzelnen Domänen erfolgen. Im Entwicklungsprozess nach Yoder wird deutlich, dass bei der Gestaltung der mechanischen Komponenten zur Aufnahme der optischen Elemente Wechselwirkungen wie Toleranzen beachtet werden müssen. In der Phase des domänenspezifischen Entwurfs (3) in Abbildung 4.1 sind die Domänen Mechanik (M) und Optik (O) daher zu Beginn verbunden. Nach der Realisierung aller Komponenten und Softwareelemente erfolgt die Systemintegration (4), bei der zu Beginn der optische Entwurf durch photometrische Messungen verifiziert wird. Ergeben sich nicht kompensierbare Abweichungen zu den Anforderungen, muss der Entwurf entsprechend in der Phase des Systementwurfs angepasst werden. Es folgt die Integration und Verifikation der Subsysteme und des Gesamtsystems. Im allgemeinen V-Modell ist der Prozess an dieser Stelle beendet. Um die Wirkungen optischer Strahlung auf Menschen detailliert und realitätsnah untersuchen zu können, werden typischerweise Feldtests mit dem System durchgeführt. Dies ist im Prozess dadurch berücksichtigt, dass ein Teil der Eigenschaftsabsicherung (5) mit dem Gesamtsystem im Feld erfolgt und erst an dieser Stelle die vollständige Validierung des Systems gegenüber dem Entwicklungsziel abgeschlossen ist.

Im nächsten Kapitel werden die Phasen des Prozesses detailliert beschrieben und jeweils operative Arbeitsschritte erläutert, durch welche die erfolgreiche Bearbeitung der jeweiligen Entwicklungsphase unterstützt wird. Angelehnt an das allgemeine V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 werden die Phasen Prozessbausteine genannt.

5 Prozessbausteine zur Entwicklung optomechatronischer Systeme

In den folgenden Abschnitten wird jeweils ein erarbeiteter Prozessbaustein detailliert beschrieben und visualisiert. Zu Beginn der Beschreibung wird erläutert, wie die entsprechende Entwicklungsphase in dem V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 und in der Konstruktionsmethodik allgemeiner technischer Systeme dargestellt ist. Darauf basierend werden anschließend konkrete Arbeitsschritte abgeleitet, in denen die oben genannten Aspekte berücksichtigt werden. Teilweise werden dafür Darstellungen aus dem Anwendungsbeispiel genutzt, um den Prozess anschaulich zu gestalten.

5.1 Prozessbaustein Anforderungsanalyse

Die Anforderungsanalyse (Phase (1) in Abbildung 4.1) ist der zentrale Arbeitsschritt in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses. Zu Beginn eines Entwicklungsprojektes besteht das Ziel häufig nur aus einer abstrakten Vorstellung. Dieses Ziel muss anschließend in konkrete Anforderungen überführt werden, die als initiale Anforderungen bezeichnet werden [FELD13]. In enger Absprache mit dem Kunden werden die Soll-Eigenschaften des Produkts in eindeutige und quantifizierbare Anforderungen in Form von Anforderungsdokumenten zusammengetragen. Anforderungen können allgemein in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen unterteilt werden. Anforderungen, die einen direkten Einfluss auf mögliche Konzepte haben, also beispielsweise bestimmte Konzepte prinzipiell ausschließen, werden konzeptbestimmende Anforderungen genannt. Um den Änderungsaufwand in der weiteren Entwicklung zu begrenzen, ist anzustreben, alle konzeptbestimmenden Anforderungen frühzeitig zu erkennen und festzulegen.

In der VDI-Richtlinie 2206 wird für die Phase der Anforderungsanalyse kein Prozessbaustein vorgeschlagen. Mit der in dieser Arbeit vorgenommenen Eingrenzung auf ausgewählte optomechatronische Systeme ist die Definition konkreter operativer Arbeitsschritte möglich. Durch diese wird der Entwickler bei der planmäßigen Anforderungsanalyse unterstützt, um konzept-

bestimmende Anforderungen zu erkennen und die Besonderheiten der optischen Domäne zu berücksichtigen. Die Anforderungen an das System werden im nachfolgenden Systementwurf detailliert dargestellt und für Subsysteme und Komponenten abgeleitet. In Abbildung 5.1 sind die Aktivitäten des Prozessbausteins dargestellt. Mit dem hinterlegten grauen Pfeil wird die Position innerhalb des Gesamtprozesses in Abbildung 4.1 angezeigt. Die dargestellte Legende in Abbildung 5.1 gilt für alle nachfolgend beschriebenen Prozessbausteine.

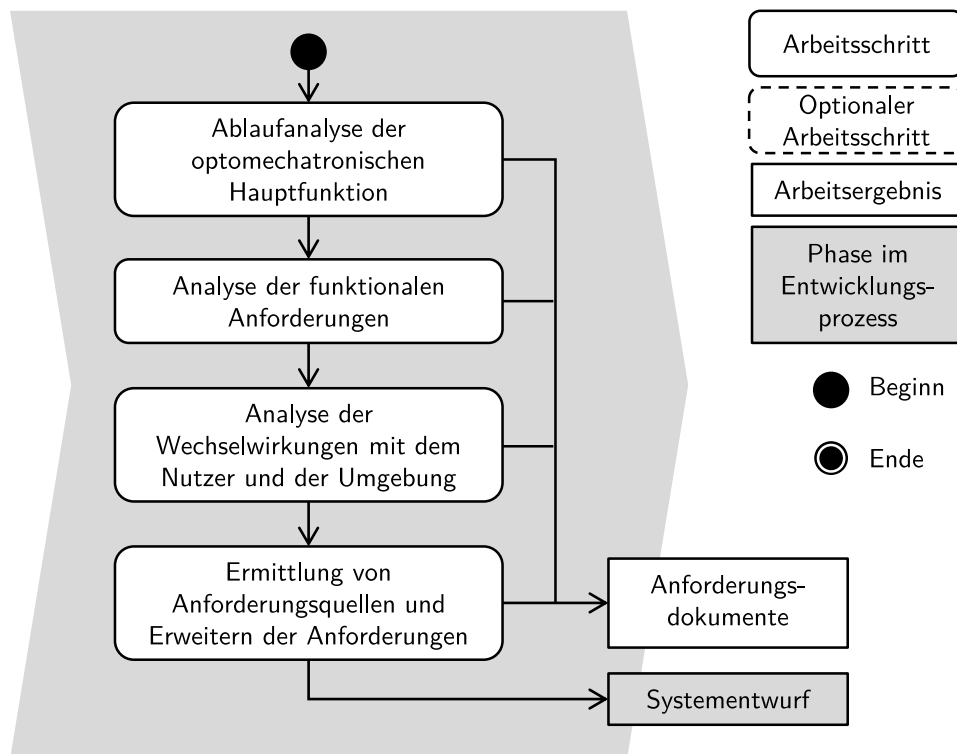


Abbildung 5.1: Prozessbaustein für die Phase der Anforderungsanalyse

Die betrachteten optomechatronischen Systeme zeichnen sich durch ihre Adaptivität und einen wechselseitigen lichtbasierten Austausch von Daten und Informationen mit der Umgebung und dem Menschen aus. Zu Beginn der Anforderungsanalyse wird empfohlen, diese Aspekte anschaulich darzustellen. Mit der Ablaufanalyse als ersten Arbeitsschritt wird ein Verständnis für den Systemumfang und Schnittstellen geschaffen. Darauf basierend werden die funktionalen Anforderungen an das System in Absprache mit dem Auftraggeber definiert und Zielkonflikte analysiert. Gefundene Zielkonflikte können teilweise gelöst werden, indem Anforderungen in Absprache mit dem Auftraggeber priorisiert werden. Anschließend erfolgt die Analyse von Wechselwirkungen zwischen System und Nutzer sowie System und Systemumgebung. Nicht-funktionale Anforderungen können durch die systematische Analyse von Anforderungsquellen und durch weitere Methoden, die in diesem Abschnitt genannt werden, identifiziert werden.

In der Anforderungsanalyse kommen typischerweise qualitative Modelle des Systems zum Einsatz, um Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den Komponenten, der Umgebung und dem Nutzer zu erkennen. Erste Berechnungsmodelle werden eingesetzt, um Anforderungen zu quantifizieren. Detaillierte Modelle zur domänenspezifischen und domänenübergreifenden Simulation werden erst im Systementwurf erstellt und genutzt.

Als Ergebnis der Phase stehen die Anforderungen geordnet in Form der Anforderungsdokumente für den anschließenden Systementwurf zur Verfügung. In den folgenden Unterabschnitten werden die Arbeitspakete der Phase Anforderungsanalyse detailliert beschrieben.

5.1.1 Ablaufanalyse der optomechatronischen Hauptfunktion

Aus dem Entwicklungsziel wird im ersten Schritt der Anforderungsanalyse die optomechatronische Hauptfunktion des Systems konkretisiert. Um den Austausch von Daten und Informationen mit dem Nutzer, anderen Personen und der Umgebung zu analysieren, wird ein Ablaufplan erstellt. An diesem können unterschiedliche Systemgrenzen und Schnittstellen diskutiert werden. In Abbildung 5.2 ist für das Beispiel eines adaptiven Scheinwerfers ein Ablaufplan dargestellt.

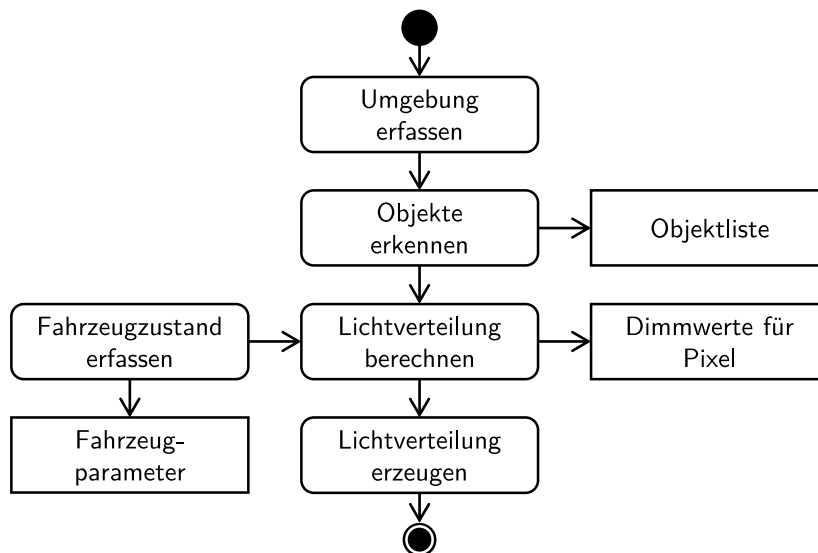


Abbildung 5.2: Ablaufplan eines adaptiven Fernlichts nach [JÜRIG15]

Die Hauptfunktion in dem abgebildeten Beispiel ist das Erzeugen von adaptiven Lichtverteilungen. Die Erfassung von Objekten der Umgebung basierend auf Kamera-, Radar- oder Lidarsystemen ist die Basis für die Berechnung der Lichtverteilung. Eine räumliche Integration der Sensorik bietet Vorteile bei der präzisen Ausrichtung der Komponenten zueinander, erhöht jedoch die Systemkomplexität. Die Berechnung der Verteilung kann direkt im Schein-

werfer erfolgen oder außerhalb in einem zentralen Fahrzeugcomputer. Daraus ergeben sich unterschiedliche Anforderungen beispielsweise an den Datentransport. Mit der Diskussion der Ablaufanalyse werden erste abstrakte Systemkonzepte erarbeitet und ein gemeinsames Verständnis zwischen Entwicklern und Auftraggebern für das zu entwickelnde System geschaffen.

5.1.2 Analyse der funktionalen Anforderungen

Die Hauptfunktionen des zu entwickelnden Produkts können direkt aus dem Entwicklungsziel abgeleitet werden und bilden die Basis für die funktionalen Anforderungen. Bei den betrachteten optomechatronischen Systemen entstammt daher ein Großteil der funktionalen Anforderungen der Domäne Optik. Typische funktionale Anforderungen sind Öffnungswinkel, räumliche und zeitliche Auflösung, Bestrahlungsstärke, Kontrast und Spektrum. Dabei ist es zu empfehlen, geforderte Lichtverteilungen nicht nur punktuell, sondern als Matrix mit Realkoordinaten entsprechend Gleichung 2.1 anzugeben. Dadurch wird der analytische Entwurf und die Verifikation eines Konzepts beispielsweise bezüglich des Nutzungsgrads erleichtert.

Da die funktionalen Anforderungen häufig in einem physikalischen Zusammenhang stehen, ist es wichtig, die Anforderungen hinsichtlich möglicher Zielkonflikte zu analysieren. Zielkonflikte zwischen Anforderungen wie Auflösung und Öffnungswinkel oder zwischen Abbildungsqualität und Wirkungsgrad eines Systems können wegen physikalischer Zusammenhänge nicht vollständig aufgelöst werden. Vielmehr muss bei den detaillierteren Analysen in dem nachfolgenden Systementwurf ein Kompromiss zwischen den Extrema in Absprache mit dem Auftraggeber gefunden werden, um Anforderungen zu priorisieren.

5.1.3 Analyse der Wechselwirkungen mit dem Nutzer und der Umgebung

Die betrachteten Systeme weisen Wechselwirkungen zwischen dem Nutzer, anderen Personen und der Umgebung auf, die auf optischer Strahlung basieren. Diese Wechselwirkungen sind teils gewollt und gehören damit zu den funktionalen Anforderungen des Systems. In diesem Fall ist die Analyse der entsprechenden Wechselwirkung dem vorherigen Arbeitsschritt zuzuordnen. Zur Analyse der Wechselwirkungen wird das System als Black Box abstrahiert. In der allgemeinen Konstruktionsmethodik gemäß VDI-Richtlinie 2242 [VDI2242] werden Wirkungen zwischen Systemen untereinander und Wirkungen zwischen Systemen und Menschen in fünf Kategorien eingeordnet:

Zweckwirkung Mit der Zweckwirkung wird die funktionale Wirkung des Systems bezeichnet, die bereits bei der Analyse der funktionalen Anforderungen untersucht wird.

Einwirkung Als Einwirkung wird eine funktionale Beziehung eines Menschen auf das technische System bezeichnet.

Rückwirkung Eine Rückwirkung bezeichnet eine funktionale Beziehung des Systems auf den Menschen oder ein anderes System. Bei den betrachteten Systemen können sich die Rückwirkungen und Zweckwirkungen entsprechend überschneiden.

Störwirkung Eine Störwirkung ist ein nicht gewollter Einfluss auf das technische System oder den Menschen, welche die Funktionserfüllung beeinträchtigt.

Nebenwirkung Als Nebenwirkung wird eine Beziehung bezeichnet, die unbeabsichtigt auf den Menschen oder auf ein anderes System wirkt und dabei aber nicht schädlich ist.

In Abbildung 5.3 ist beispielhaft die Umgebung eines Beleuchtungssystems dargestellt. Ausgehend von dem betrachteten System A sind die Wechselwirkungen mit der Umgebung gezeigt. Die Hauptfunktion von System A ist es, die dargestellte Oberfläche in der Art zu beleuchten, dass Betrachter 1 eine visuelle Information aufnehmen kann. Direkte und indirekte Störwirkungen gehen von der Streulichtquelle aus. Die Auswirkung der Störwirkung kann beispielsweise die Reduktion des Kontrastes oder die Blendung des Betrachters 1 sein. Ausgehend von System A sind weiterhin die Nebenwirkungen auf den Betrachter 2 und das System B zu beachten. Bei der Analyse werden die relevanten Eigenschaften der Strahlung berücksichtigt, also beispielsweise die spektrale, zeitliche und räumliche Ausdehnung. So können Stör- und Nebenwirkungen zunächst identifiziert und anschließend gezielt reduziert oder vermieden werden.

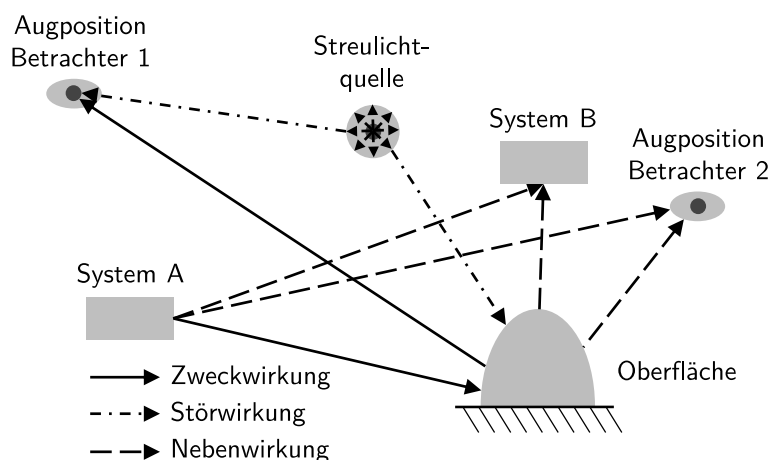


Abbildung 5.3: Analyse der Wechselwirkungen des optomechatronischen Systems A mit der Umgebung; Darstellung von Zweck-, Stör- und Nebenwirkungen optischer Strahlung

Typische Wechselwirkungen optomechatronischer Systeme mit der Umgebung sind:

- Störstrahlung durch Sonne und andere Strahlungsquellen
- Wechselwirkung von Strahlung an Oberflächen
- Sensorische (Blendung) und physiologische (Ablenkung oder Störung) Wirkung von optischer Strahlung auf Menschen
- Thermische Erwärmung oder Schädigung

Zur Analyse der Wechselwirkungen des Systems mit der Umgebung werden in dieser Phase vereinfachte Modelle genutzt. Beispielsweise kann eine Vielzahl von Objekten als Lambertreflektor angenommen werden. Statt des exakten Spektrums der Sonne kann eine Betrachtung der Beleuchtungsstärke am Boden zu unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten genügen. Für die Wahrnehmung von Objekten durch den Menschen sowie für die Blendung existieren experimentell ermittelte Zusammenhänge, die in Form von Diagrammen und einfachen Berechnungsmodellen für die Anforderungsanalyse nutzbar sind. Die tatsächlich unter realen Einsatzbedingungen auftretenden Wechselwirkungen können nicht vollständig anhand der vereinfachten Modelle analysiert werden. Es ist daher zu empfehlen, die tatsächlichen Wechselwirkungen des Systems durch Versuche zu ermitteln. Störwirkungen durch andere Strahlungsquellen können im Rahmen der Anforderungsanalyse untersucht werden. Wirkungen des Systems auf die Umgebung oder den Menschen werden im Zuge der Eigenschaftsabsicherung analysiert.

5.1.4 Ermitteln von Anforderungsquellen und Erweitern der Anforderungen

Weitere funktionale und nicht-funktionale Anforderungen an das System sind häufig nicht offensichtlich und müssen daher systematisch erarbeitet werden. Eine Möglichkeit dabei ist es, Quellen von Anforderungen zu analysieren. Anforderungsquellen werden allgemein in Personen, Produkte und Dokumente unterteilt [FELD13]. Durch eine gezielte Analyse dieser Quellen können weitere Anforderungen an das System identifiziert werden.

Eine gemeinsame Eigenschaft der betrachteten optomechatronischen Systeme ist, dass Strahlung über die Systemgrenze transportiert wird. Da diese Strahlung potenziell Menschen schaden kann, existieren Gesetze und Richtlinien zum Umgang mit optischer Strahlung (vgl. Unterabschnitt 2.1.5). Aus diesen Richtlinien können neben konkreten Grenzwerten beispielsweise für die maximale Emission von kohärenter Strahlung auch Anhaltspunkte für den Systementwurf entnommen werden, da die Berechnung der Grenzwerte von Systemeigenschaften wie Divergenzwinkel, Strahldurchmesser und Wellenlänge abhängt. Diese Eigenschaften sind im

Systementwurf direkt beeinflussbar und können entsprechend des Produktzwecks vorteilhaft ausgelegt werden.

Die bisher ermittelten Anforderungen basieren direkt auf dem Entwicklungsziel und den identifizierten Anforderungsquellen. Weitere Anforderungen können durch den Einsatz von Methoden systematisch erarbeitet werden. In der allgemeinen Konstruktionslehre werden dafür beispielsweise die Hauptmerkmalliste, die Szenariotechnik und das perspektivische Lesen genannt [FELD13]. Die Hauptmerkmalliste enthält, gegliedert nach Domänen und Lebenszyklen, Merkmale, die eine Assoziation mit dem zu entwickelnden Produkt hervorrufen und weitere Anforderungen erkennen lassen. Die allgemeine Hauptmerkmalliste muss für die Domäne Optik erweitert werden (vgl. Abbildung 5.4) und wird im nächsten Abschnitt dargestellt. Die zuvor genannten weiteren Methoden zur Anforderungsermittlung aus der allgemeinen Konstruktionsmethodik können unverändert angewendet werden.

Konzept	
<p>Licht</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lichtfunktionen - Lichtverteilungen - Ausgangslichtstrom - Öffnungswinkel - Ein-/Ausblendauflösung - Verschiebeauflösung - Abbildungsleistung - Spektrum - Homogenität - Kontrast - Optische Effizienz - Frequenz 	<p>Ergonomie</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kultureller Hintergrund bei Farbinterpretation - Individuelle Sehleistung bzgl. <ul style="list-style-type: none"> • Alter • Fehlsichtigkeit • Farbblindheit
	<p>Sicherheit</p> <ul style="list-style-type: none"> - Augensicherheit - Blaulichtgefährdung - Störung, Ablenkung, Blendung durch Licht

Abbildung 5.4: Ergänzende Aspekte der Domäne Optik zur Hauptmerkmalliste von Feldhusen und Grote [FELD13]

Methode: Hauptmerkmalliste

Um weitere Anforderungen zu identifizieren, kann eine Hauptmerkmalliste genutzt werden, in der zu Gruppen von Merkmalen wie Stoff, Energie, Signal, Geometrie, Mechanik und Elektrik Untermerkmale aufgeführt sind. Das Ziel dabei ist, dass Entwickler durch Assoziation weitere Anforderungen an das System erkennen. Eine ausführliche Hauptmerkmalliste für technische Systeme wird von Feldhusen und Grote gezeigt [FELD13]. Für die Entwicklung von optomechatronischen Systemen wird diese Liste um die Gruppe *Licht* erweitert und weitere Untermerkmale in den Gruppen *Ergonomie* und *Sicherheit* ergänzt (Abbildung 5.4).

5.2 Prozessbaustein Systementwurf

Basierend auf den Anforderungen erfolgt im nächsten Schritt der Systementwurf (Phase (2) in Abbildung 4.1). Ziel des Systementwurfs ist es, ein domänenübergreifendes Lösungskonzept zu entwickeln, mit dem die geforderten Anforderungen erfüllbar sind. Das Lösungskonzept umfasst dabei die Spezifikation der Systemkomponenten sowie die Anordnung dieser Komponenten untereinander [FELD13]. Der Konzeptionierung des Systems muss eine hohe Aufmerksamkeit zukommen, da konzeptionelle Änderungen in späteren Entwicklungsphasen aufwendig und kostspielig sind. Der in der VDI-Richtlinie 2206 verwendete Begriff Systementwurf ist der Phase des Konzipierens der allgemeinen Konstruktionsmethodik (VDI-Richtlinie 2221) zuzuordnen. Die Phasen Entwerfen und Ausarbeiten sind unter dem Begriff des domänenspezifischen Entwurfs im V-Modell enthalten. In der VDI-Richtlinie 2206 wird ein Prozessbaustein für den Systementwurf vorgeschlagen, der die Arbeitsschritte auf der linken Seite in Abbildung 5.5 enthält.

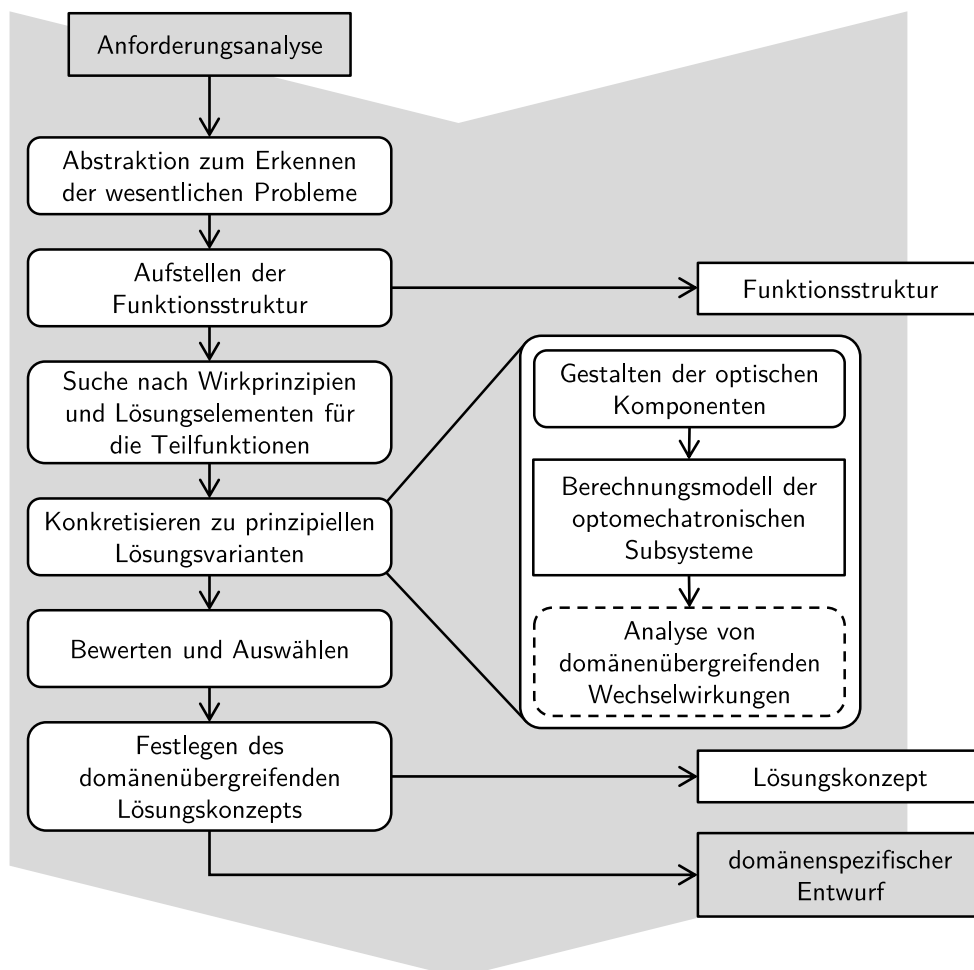


Abbildung 5.5: Prozessbaustein zum Systementwurf

Für die Entwicklung optomechatronischer Systeme werden die Reihenfolge und Benennung der Arbeitsschritte übernommen und diese inhaltlich angepasst. Um die konzeptbestimmenden Anforderungen der Domäne Optik zu berücksichtigen, wird eine Gestaltung der dafür notwendigen optischen Elemente als Teil des Arbeitsschritts *Konkretisieren zu prinzipiellen Lösungsvarianten* durchgeführt. Dafür werden mit spezieller Simulationssoftware der Domäne Optik detaillierte Berechnungsmodelle erstellt, mit denen geprüft werden kann, ob die gestellten Anforderungen prinzipiell erfüllbar sind. Domänenübergreifende Wechselwirkungen mit den optischen Subsystemen werden anschließend analysiert, indem die detaillierten Berechnungsmodelle um die Aspekte der Wechselwirkungen erweitert werden. Dieser Schritt ist optional und nicht immer erforderlich, um Lösungsvarianten zu erarbeiten. In den nachfolgenden Unterabschnitten werden die Arbeitsschritte des Systementwurfs beschrieben und Anpassungen empfohlen, um die Entwicklung optomechatronischer Systeme zu unterstützen.

5.2.1 Abstraktion zum Erkennen wesentlicher Probleme

In der allgemeinen Konstruktionslehre [FELD13] wie auch in der VDI-Richtlinie 2206 ist der erste Schritt des Systementwurfs das Erkennen wesentlicher Probleme. Ein wesentliches Problem bei der Produktentwicklung kann beispielsweise der erstmalige Einsatz von neuartigen Technologien oder das Übertragen bekannter Technologien auf ein neues Anwendungsgebiet sein. Das ist häufig auch notwendig und Zweck der Entwicklung, damit ein Mehrwert für den Kunden generiert werden kann oder das eigene Produkt von Produkten der Wettbewerber differenzierbar ist. Durch die Abstraktion des Entwicklungsziels wird der Blick bewusst auf die zentrale Problemstellung fokussiert, die in der Konzeptphase gelöst werden muss. Das Ergebnis dieses Schritts ist eine lösungsneutrale Formulierung der Problemstellung.

5.2.2 Aufstellen der Funktionsstruktur

Die Produktstruktur, also die Art der Systemkomponenten und deren Relation zueinander, ist zu Beginn des Entwicklungsprozesses nicht festgelegt. Es kann vorteilhaft sein, dass durch eine einzelne Systemkomponente mehrere Funktionen im Sinne einer Funktionsintegration erfüllt werden. Eine alternative Strategie ist, ein System mit hoher Modularität zu entwickeln, bei dem kundenindividuelle Wünsche mit geringerem Aufwand umsetzbar sind. Für Systeme mit einer großen Anzahl an Haupt- und Nebenfunktionen ergeben sich daraus unterschiedliche Varianten der Produktstruktur. Mit der funktionalen Sicht auf das System mithilfe einer Funktionsstruktur wird der Entwickler beim Konzeptionieren dieser verschiedenen Varianten

unterstützt. Diese können anschließend bewertet werden, um die optimale Produktstruktur zu identifizieren. Richter et al. [RICH16] stellen weitere Methoden übersichtlich dar, mit denen eine geeignete Produktstruktur erarbeitet werden kann.

In der Funktionsstruktur werden die Hauptfunktionen eines Systems detailliert und in Teil- und Nebenfunktionen untergliedert (vgl. Abbildung 5.6). Die Hauptfunktionen eines technischen Systems können direkt aus der Zielsetzung abgeleitet werden. Teilfunktionen sind unmittelbar für die Erfüllung der Hauptfunktionen notwendig. Nebenfunktionen sind für die Erfüllung der Hauptfunktionen nicht unmittelbar notwendig, aber häufig dennoch unterstützend erforderlich. Bei mechatronischen und optomechatronischen Systemen hat die Funktionssicht im Vergleich zu mechanischen Systemen einen weiteren Vorteil. Der Zusammenhang zwischen den Komponenten der einzelnen Domänen kann bereits früh im Entwicklungsprozess formuliert werden und ermöglicht eine Darstellung und Analyse des Gesamtsystems [VDI2206]. Weiterhin sind die betrachteten optomechatronischen Systeme typischerweise in Systeme höherer Ordnung eingebunden. Mit der Funktionssicht wird der Entwickler dabei unterstützt, die notwendigen Schnittstellen zu erkennen und zu spezifizieren.

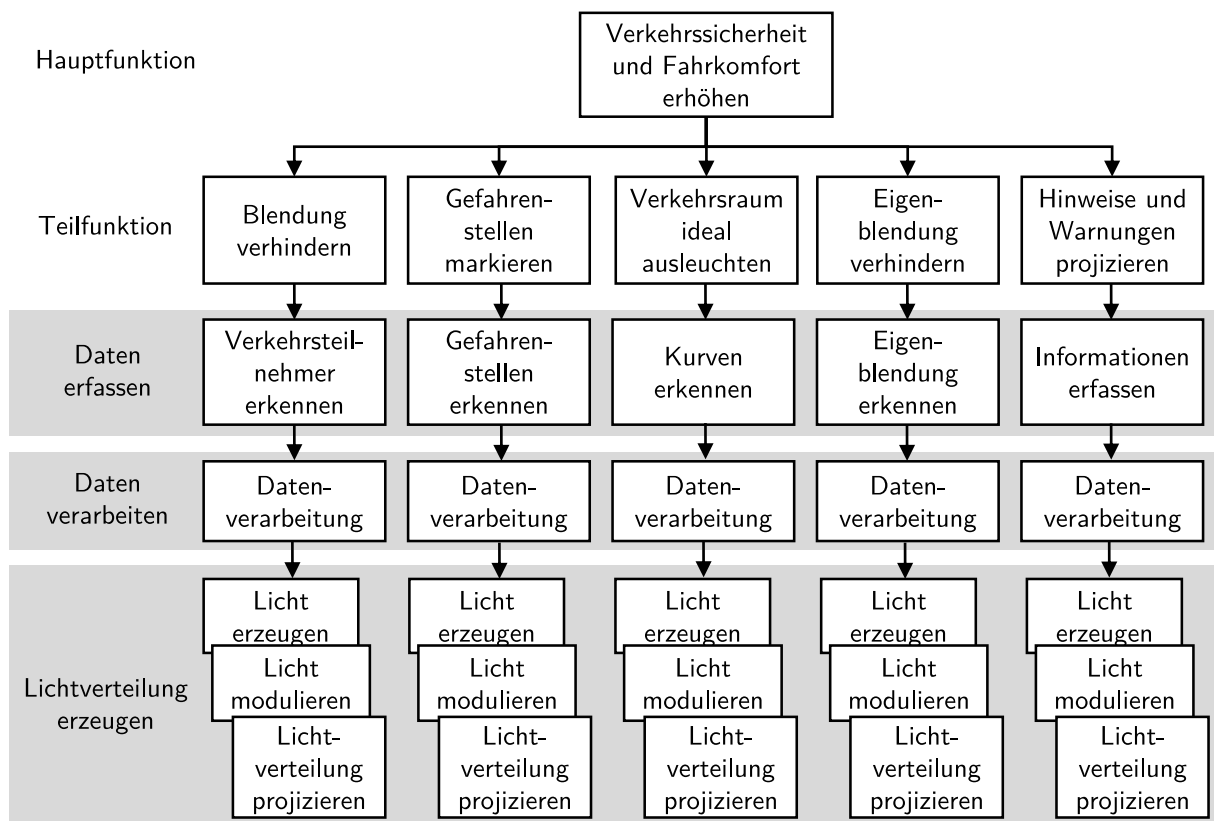


Abbildung 5.6: Hierarchische Funktionsstruktur eines adaptiven Scheinwerfersystems

Mit einer hierarchischen Funktionsstruktur wird das Ziel verfolgt, die Abhängigkeiten der Teilfunktionen untereinander anschaulich darzustellen [FELD13]. Diese Ansicht bietet sich an, um

unterschiedliche Systemgrenzen zu diskutieren und ein Verständnis des Gesamtsystems zu vermitteln. In Abbildung 5.6 ist exemplarisch eine hierarchische Funktionsstruktur eines adaptiven Scheinwerfers dargestellt. In Vorbereitung für mögliche Produktstrukturen kann diskutiert werden, wie die Teilfunktionen räumlich und funktional integriert werden können. Beispielsweise ist es möglich, dass alle oder nur ausgewählte Teilfunktionen mit den identischen optischen Komponenten realisiert werden. Weiterhin kann die Datenverarbeitung zentral für alle Teilfunktionen erfolgen oder dezentral in jeweils eigenständigen Steuergeräten.

Bei einer Funktionsstruktur in der Input-Output Sicht liegt der Fokus auf der Beschreibung des eindeutigen Zusammenhangs zwischen den Ein- und Ausgängen jeder Teilfunktion [FELD13]. Diese Sicht findet Anwendung in späteren Entwicklungsphasen bei der Analyse des Systemwirkungsgrads. In Abbildung 5.7 ist exemplarisch eine Funktionsstruktur eines optomechatronischen Systems dargestellt, die ähnliche Funktionen wie die zuvor beschriebene hierarchische Funktionsstruktur enthält.

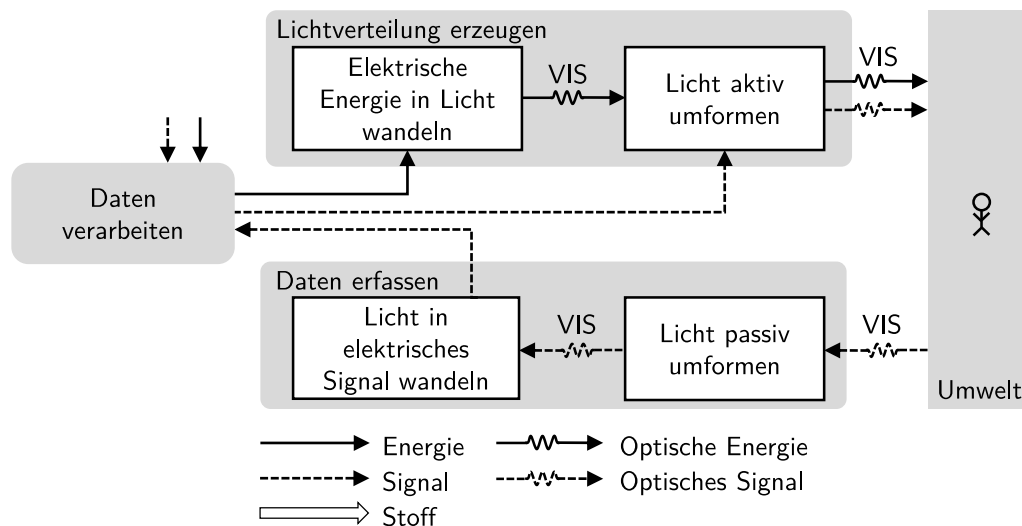


Abbildung 5.7: Funktionen eines adaptiven Scheinwerfersystems in der Input-Output Sicht

Der Fokus der betrachteten Systeme liegt auf der Nutzung von optischer Strahlung, wobei die Strahlung je nach Anwendungsfall Eigenschaften eines Energie-, Signal-, oder Stoffflusses haben kann. Um dies in der Funktionsstruktur zu kennzeichnen, wird empfohlen, die elementaren Flussgrößen Energie und Signal durch das dargestellte Wellensymbol für optische Flüsse zu ergänzen. Über dem Symbol wird die Wellenlänge oder der spektrale Bereich (Infrarot: IR, Ultraviolett: UV, Sichtbar: VIS) gekennzeichnet. In dem dargestellten Beispiel entspricht das erzeugte Licht bei der Teilfunktion *Lichtverteilung erzeugen* einem energetischen Fluss, der anschließend durch Modulation in einen Signalfluss überführt wird. Bei der Teilfunktion *Daten erfassen* wird Licht durch ein optisches System passiv umgeformt und auf einen Sensor geleitet, der aus dem optischen Signal ein elektrisches Signal erzeugt. Mit dieser Darstellung kann auch

die äußere Sicht auf das System analysiert werden, um Schnittstellen zu anderen Systemen aufzuzeigen.

Als Ergebnis dieses Arbeitsschritts sind alle Haupt-, Teil- und Nebenfunktionen des Systems strukturiert dokumentiert. Dies ist die Basis, um im nächsten Arbeitsschritt die Funktionssicht zu verlassen und die Baustruktur des Systems zu erarbeiten, welche die Systemelemente und deren Relationen enthält.

5.2.3 Suche nach Wirkprinzipien und Lösungselementen für die Teilfunktionen

Der erste Schritt beim Übergang von der Funktions- zur Baustruktur des Systems erfolgt durch die Auswahl von Wirkprinzipien und Lösungselementen für die Teilfunktionen. Ein Wirkprinzip besteht laut Feldhusen und Grote aus dem zugrundeliegenden physikalischen Effekt sowie stofflichen und geometrischen Merkmalen [FELD13]. Aus der Verbindung von Wirkprinzipien und Lösungselementen kann anschließend die Wirkstruktur als Basis des domänenübergreifenden Lösungskonzepts entwickelt werden.

Optomechatronische Wandler sind Komponenten, mit denen optische Energie in eine andere Energieform gewandelt werden kann (Abschnitt 2.2.1). Aktive optomechatronische Umformer sind Komponenten, die es ermöglichen, die Eigenschaften des Lichts aktiv zu steuern. Die beeinflussbaren Eigenschaften sind in diesem Zusammenhang die spektrale, räumliche und zeitliche Modulation sowie Polarisation und Phase des Lichts. Als passive Umformer werden in dieser Arbeit alle weiteren Komponenten bezeichnet, mit denen die genannten Eigenschaften des Lichts geändert werden können (Abschnitt 2.2.2). Zwischen den einzelnen Komponenten ist eine Leitung von Licht erforderlich, wobei abhängig von dem leitenden Medium Effekte wie Transmission, Absorption und Streuung auftreten. Konzepte, um verschiedene Lichtpfade zu vereinen, sind in der Literatur verfügbar [KLOP17].

In Abbildung 5.8 ist beispielhaft eine mögliche Wirkstruktur der Teilfunktion *Lichtverteilung erzeugen* aus Abbildung 5.7 dargestellt. Für die Funktion *Elektrische Energie in Licht wandeln* wird das Lösungselement *Leuchtdiode* ausgewählt. Um das emittierte Licht zu formen und eine räumliche Information zu modellieren, wird das Lösungselement *Mikrospiegelarray (DMD)* genutzt. Da der Kippwinkel der einzelnen Mikrospiegel begrenzt ist, muss der Winkel zwischen eingehendem und reflektiertem Strahlenbündel ebenfalls diesen Winkel aufweisen. Die Auswahl der Komponenten hat damit einen erheblichen Einfluss auf die Wirkstruktur. Weiterhin sind Umformer erforderlich, mit denen die räumlichen Eigenschaften des Lichts zwischen

Leuchtdiode und Mikrospiegelarray sowie zwischen Mikrospiegelarray und Projektionsfläche angepasst werden. Eine detaillierte Beschreibung weiterer Wirkstrukturen für unterschiedliche aktive Umformer ist an anderer Stelle veröffentlicht [KNÖC19a]. Für eine vollständige Wirkstruktur müssen weiterhin Elemente für mechanische, elektrische und elektronische Funktionen ausgewählt werden. Es ist empfehlenswert, die Wirkstruktur für eine Auswahl von Funktionen zu erstellen, damit diese überschaubar bleibt. Eine detaillierte Betrachtung aller Teilfunktionen erfolgt im domänenspezifischen Entwurf in Abschnitt 5.3. Bei den betrachteten optomechatronischen Systemen sind die Hauptfunktionen der Domäne Optik zuzuordnen, weshalb es empfehlenswert ist, die Wirkstruktur hauptsächlich auf optische Komponenten zu beziehen.

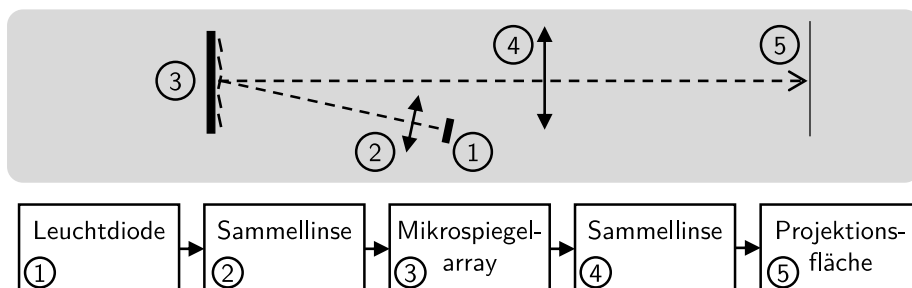


Abbildung 5.8: Wirkstruktur der Teilfunktion *Lichtverteilung erzeugen*

An der beschriebenen Wirkstruktur wird deutlich, dass die Leitung von Licht verschiedenen Restriktionen unterliegt. Das emittierte Licht der Leuchtdiode soll in diesem Fall so geformt werden, dass eine gleichmäßige Ausleuchtung des Mikrospiegelarrays gelingt. Das von dem Mikrospiegelarray reflektierte Licht muss entsprechend den Systemanforderungen ebenfalls geformt werden. Für die Formung von Licht zwischen den genannten Komponenten werden in der Optik passive Umformer eingesetzt. Da Licht in den betrachteten Systemen auch immer eine gezielte räumliche Verteilung aufweist, ergeben sich für Größe und Position der Komponenten sowie Abstände dazwischen geometrische Abhängigkeiten. Diese haben einen großen Einfluss auf die Baugröße und auf das Konzept auf Systemebene. Um aus der Wirkstruktur eine Lösungsvariante zu erarbeiten, mit der die Anforderungen prinzipiell erfüllbar sind, ist eine Gestaltung der optischen Komponenten zu empfehlen. Die Gestaltung ist Teil des nächsten Arbeitsschritts.

5.2.4 Konkretisieren zu prinzipiellen Lösungsvarianten

Das Ziel des Arbeitsschritts *Konkretisieren zu prinzipiellen Lösungsvarianten* ist es, basierend auf der Wirkstruktur Lösungsvarianten zu erarbeiten, die so konkret sein müssen, dass eine Bewertung hinsichtlich der qualitativen und quantitativen Erfüllung der Anforderungen möglich ist. Neben der Anforderungsliste sind weiterhin die erkannten wesentlichen Probleme aus

Unterabschnitt 5.2.1 zu berücksichtigen. Bei der Konkretisierung mechatronischer Systeme kommen vereinfachte Berechnungsmodelle zum Einsatz, um das domänenübergreifende Systemverhalten zu beschreiben [VDI2206]. Bei den betrachteten optomechatronischen Systemen sind die Hauptfunktionen der Domäne Optik zuzuordnen, weshalb dieser auch bei der Erarbeitung von Lösungsvarianten eine hohe Bedeutung zukommt. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben ist, weisen die optischen Komponenten starke gegenseitige Abhängigkeiten auf und haben einen großen Einfluss auf das Konzept des Systems. Es wird daher empfohlen, einen Teil des domänenspezifischen Entwurfs der Domäne Optik bereits in der Phase des Systementwurfs durchzuführen. Die dafür erforderlichen Arbeitsschritte sind nachfolgend dargelegt.

Gestalten der optischen Komponenten

Die Hauptfunktion der betrachteten optomechatronischen Systeme basiert auf optischer Strahlung. Das optische Konzept zur Erfüllung der Hauptfunktion hat daher einen großen Einfluss auf die Eigenschaften des gesamten optomechatronischen Systems. In diesem Schritt werden daher die in der Wirkstruktur enthaltenen optischen Komponenten gestaltet. Für die zuvor beschriebene Wirkstruktur umfasst dies die nachfolgend genannten Aspekte:

- Geometrische Eigenschaften der optischen Elemente (Radius, Durchmesser, Asphärenkoeffizienten)
- Weitere Eigenschaften der optischen Elemente (Material, Beschichtung)
- Typ, Abmessungen, Anzahl und Anordnung der Leuchtdioden
- Typ und Abmessungen des Mikrospiegelarrays

In Abbildung 5.9 ist der Ablauf des Vorgehensschritts *Gestalten der optischen Komponenten* dargestellt. Die Arbeitsschritte sind angelehnt an die Vorgehensmodelle zur Entwicklung optischer Systeme, die im Stand der Forschung in Abschnitt 2.3 dargelegt sind. Im ersten Schritt erfolgt basierend auf den Systemanforderungen eine detaillierte Spezifikation der optischen Eigenschaften, die in der Anforderungsliste des betrachteten Subsystems festgehalten werden. Die erarbeitete Wirkstruktur ist die Basis für den Entwurf, in dem Art und Anzahl der optischen Komponenten festgelegt und mit einem vereinfachten Strahlenmodell deren Eigenschaften wie Brennweite, Durchmesser und Abstände abgeschätzt werden. Je nach Komplexität und Neuheitsgrad des Systemaufbaus ist das Ergebnis dieses Schritts ausreichend, um eine Bewertung durchzuführen. Die gestrichelt dargestellten Schritte sind entsprechend optional und zu empfehlen, wenn eine Bewertung basierend auf der Analyse des vereinfachten Strahlenmodells nicht möglich ist. Im analytischen Entwurf mit realen Geometrien werden die optischen Komponenten dimensioniert. Dies ist der Ausgangspunkt für die Erstellung eines detaillierten

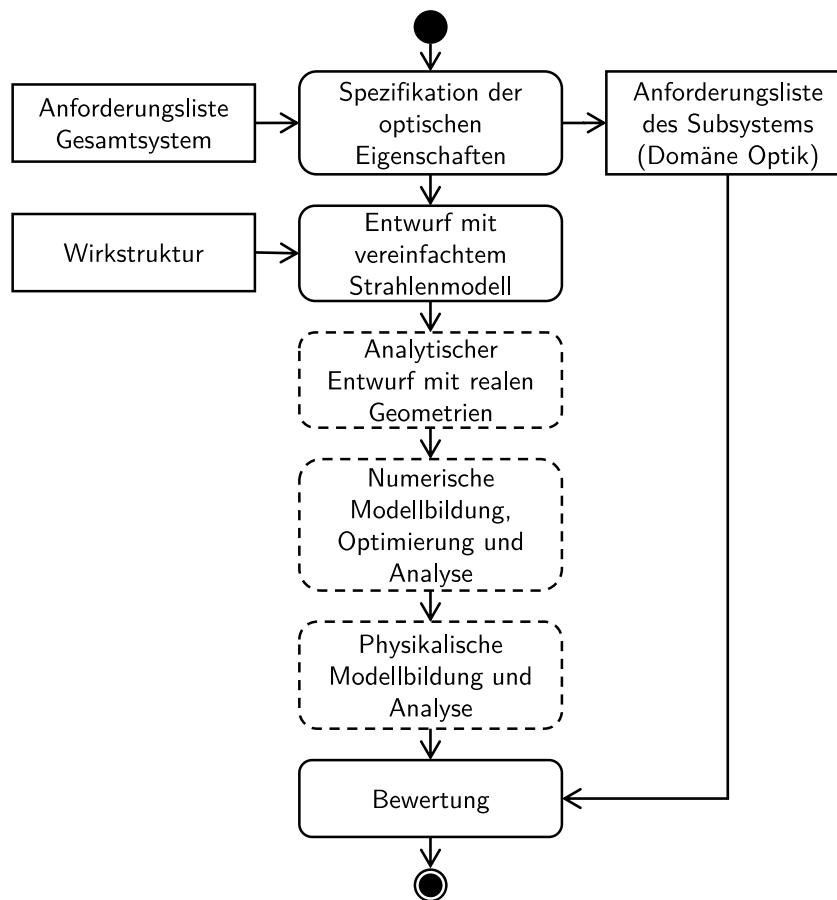


Abbildung 5.9: Detaillierter Ablauf im Vorgehensschritt zur Gestaltung der optischen Komponenten

Berechnungsmodells, anhand dessen die numerische Optimierung erfolgt. Für Konzepte, die sich stark von bekannten Lösungen unterscheiden, ist es empfehlenswert, ein physisches Muster zu erstellen, um die Annahmen der Simulation zu bestätigen. Anschließend wird der Entwurf hinsichtlich Parametern wie Abbildungsqualität und Wirkungsgrad analysiert und gegenüber der Anforderungsliste bewertet. Bei Abweichungen zwischen den Systemparametern und den Anforderungen erfolgen Iterationen, bis ein akzeptables Ergebnis vorliegt.

Analyse von domänenübergreifenden Wechselwirkungen

Mit der Wirkstruktur des Gesamtsystems sind die physikalischen Effekte und die Komponenten festgelegt, mit denen die Funktionen des Systems konkret umgesetzt werden. Anhand der Wirkstruktur können daher domänenübergreifende Wechselwirkungen mit vereinfachten Berechnungsmodellen analysiert werden. An dieser Stelle des Prozesses ist es notwendig zu prüfen, welche Wechselwirkungen der verschiedenen Domänen auftreten. Gegebenenfalls kommen in diesem Schritt domänenübergreifende detaillierte Berechnungsmodelle zum Einsatz, um Fragestellungen wie beispielsweise den Einfluss einer inhomogenen Temperaturverteilung auf

die örtliche Strahlungskonversion eines Leuchtstoffs zu untersuchen. Typischerweise beziehen sich diese Analysen auf einzelne Komponenten, sodass kein vollständiges domänenübergreifendes Modell des optomechatronischen Systems erforderlich ist. Die gewonnenen Erkenntnisse der domänenübergreifenden Analyse werden anschließend im Entwurf der optischen Subsysteme berücksichtigt. Qualitative Modelle werden typischerweise mit der Sprache SysML erstellt. Eine domänenübergreifende Modellierung ist dabei vollumfänglich möglich. Quantitative Modelle zur detaillierten Berechnung und Analyse sind dagegen typischerweise domänenspezifisch (vgl. Abschnitt 3.4).

Das Ergebnis des Arbeitsschritts *Konkretisieren zu prinzipiellen Lösungsvarianten* sind mögliche Lösungen, anhand derer eine Bewertung hinsichtlich der gestellten Anforderungen erfolgen kann. Im nächsten Arbeitsschritt erfolgt die Auswahl einer Lösungsvariante für die weitere Realisierung.

5.2.5 Bewerten und Auswählen sowie Festlegen des domänenübergreifenden Lösungskonzepts

Die Bewertung der optomechatronischen Lösungskonzepte umfasst wie bei mechanischen und mechatronischen Systemen individuelle Aspekte der Bereiche Anforderungserfüllung, Qualität und Kosten. Methoden zur Bewertung wie die Nutzwertanalyse, die in der VDI-Richtlinie 2225 [VDI2225] ausgeführt ist, können unverändert angewandt werden. Das Ergebnis ist die begründete Auswahl eines Lösungskonzepts, dessen Komponenten in der nächsten Phase mit domänenspezifischen Werkzeugen und Methoden gestaltet werden. Das Lösungskonzept soll dabei Informationen zu den Energie-, Signal- und Stoffflüssen enthalten. Weiterhin ist es empfehlenswert, an dieser Stelle die geometrischen Eigenschaften des Gesamtsystems abzuschätzen. Anschließend kann geprüft werden, wie das System in das übergeordnete Zielsystem integrierbar ist. Abschließend werden die Subsysteme definiert, die in der Phase der Systemintegration zuerst realisiert werden. Dies sind typischerweise die Subsysteme, welche direkt an der Hauptfunktion beteiligt sind. Für die Eigenschaftsabsicherung der Subsysteme können bereits in diesem Arbeitsschritt Werkzeuge und Methoden definiert werden, um sicherzustellen, dass diese bei der Integration verfügbar sind.

Als Ergebnis des Systementwurfs ist eine konkrete Lösungsvariante für die weitere Umsetzung ausgewählt. Die optischen Elemente zur Erfüllung der Hauptfunktion sind soweit konkretisiert, dass die prinzipielle Umsetzbarkeit sichergestellt werden kann. Im nächsten Abschnitt werden für alle Systemfunktionen die notwendigen Elemente innerhalb der Domänen entworfen.

5.3 Prozessbaustein Domänenspezifischer Entwurf

Das ausgewählte Lösungskonzept ist die Grundlage für den domänenspezifischen Entwurf. In der VDI-Richtlinie 2206 findet der Entwurf der Komponenten innerhalb der einzelnen Domänen statt. Dies ist praktikabel, da dafür jeweils spezifische Methoden und Werkzeuge vorhanden sind, die an die speziellen Anforderungen des Entwurfs angepasst sind. Für optomechatronische Systeme ist das grundsätzlich ähnlich. Es muss aber berücksichtigt werden, dass beispielsweise die Qualität einer optischen Abbildung stark von der geometrischen Lage der optischen Komponenten zueinander abhängt. Weiterhin kann der mechanische Aufbau des Systems die optischen Eigenschaften beeinflussen, wenn eine Wechselwirkung der Strahlung mit mechanischen Komponenten beispielsweise durch Streuung stattfindet.

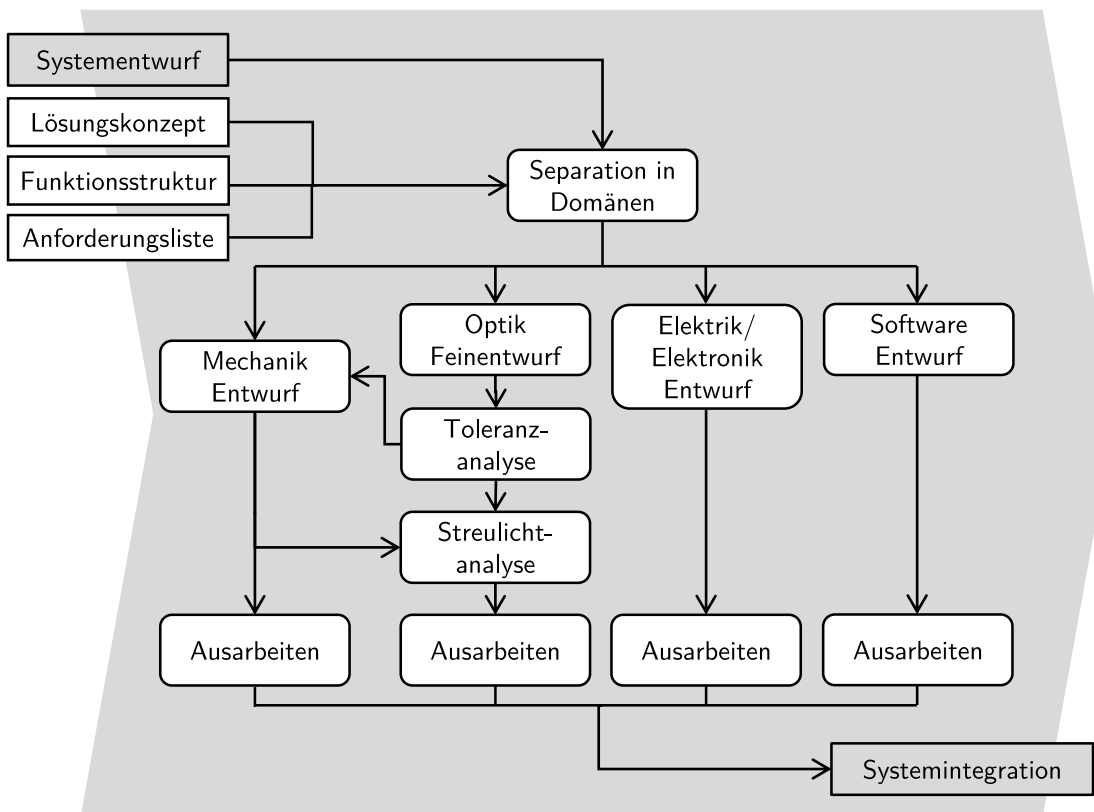


Abbildung 5.10: Prozessbaustein zum domänenspezifischen Entwurf eines optomechatronischen Systems

Die Arbeitsschritte des Prozessbausteins zum domänenspezifischen Entwurf sind in Abbildung 5.10 dargestellt. Als erster Schritt werden die erforderlichen Arbeitsergebnisse, die das Lösungskonzept, die Funktionsstruktur und die Anforderungsliste umfassen, nach den Domänen separiert, damit nur die jeweils relevanten Informationen für den Entwurf zur Verfügung stehen. Der Entwurf der mechanischen Komponenten kann zu Beginn unabhängig von den anderen Domänen erfolgen. Bei der konkreten Gestaltung der Komponenten, die einen Bezug

zu optischen Elementen haben, ist das Ergebnis der optischen Toleranzanalyse erforderlich, deren Ablauf von Yoder [YODE05] detailliert beschrieben wird. Nicht dargestellt sind Analysen des mechanischen Systems, die beispielsweise mit der Finite Elemente Methode durchgeführt werden. Das Geometriemodell des mechanischen Systems wird anschließend genutzt, um eine Streulichtanalyse durchzuführen. Je nach Entwicklungsstand der optischen Subsysteme, der im Systementwurf erzielt wird, erfolgt im Feinentwurf die weitere Ausgestaltung und Optimierung der optischen Komponenten beispielsweise hinsichtlich asphärischer Komponenten und Beschichtungen. Es folgen weitere Analysen des elektrischen und elektronischen Systems und der Software, die in Abbildung 5.10 nicht dargestellt sind.

Zusammenfassend ist auch für optomechatronische Systeme die Gestaltung in domänenspezifischen Werkzeugen anzustreben. Insbesondere zwischen den Domänen Mechanik und Optik müssen jedoch Wechselwirkungen betrachtet und Daten ausgetauscht werden. Informationen zu geeigneten Datenformaten und Herausforderungen bei der Konversion zwischen diesen werden von Hatheway dargelegt [HATH04]. Als Ergebnis des domänenspezifischen Entwurfs sind für alle Systemfunktionen die erforderlichen Systemelemente vollständig ausgearbeitet, sodass im nächsten Schritt die Fertigung und Beschaffung und anschließend die Integration erfolgen kann.

5.4 Prozessbaustein Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung

Das Ziel der Systemintegration ist die räumliche und funktionale Integration der entwickelten Teilkomponenten zu dem Gesamtsystem. Das Gesamtsystem ist als das finale Ergebnis zu verstehen, das je nach technologischem Reifegrad ein Labormuster, Funktionsmuster, Vorserienprodukt oder Serienprodukt sein kann [VDI2206]. Die Herausforderung bei der Systemintegration im Maschinenbau ist primär die geometrische Gestaltung der Komponenten. Bei mechatronischen Systemen stehen dagegen die vielfältigen Wechselwirkungen der Elemente im Vordergrund, die bei der Systemintegration beachtet werden müssen [VDI2206]. In der VDI-Richtlinie 2206, die speziell für mechatronische Systeme erarbeitet wurde, stehen im Prozessbaustein zur Systemintegration daher die Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen im Fokus.

Optomechatronische Systeme sind häufig in übergeordnete Systeme wie ein Fahrzeug im Anwendungsbeispiel in Kapitel 6 eingebunden. Die Berücksichtigung von Wechselwirkungen inner-

halb des Systems und mit dem übergeordneten System ist bei der Entwicklung optomechatronischer Systeme daher ein wichtiger Aspekt. Weiterhin muss geprüft werden, ob die optischen Leistungsparameter erfüllt und die funktionalen Anforderungen erreicht werden. Die wechselseitigen Wirkungen zwischen System und Umgebung können nicht vollständig in Modellen abgebildet werden, insbesondere dann nicht, wenn die menschliche Wahrnehmung betrachtet wird (vgl. Unterabschnitt 2.1.5). In dem Prozess sind daher nach der Integration des Systems in das Zielsystem Feldtests als optionaler Validierungsschritt vorgesehen. Die einzelnen Arbeitsschritte des Prozessbausteins sind in Abbildung 5.11 dargestellt.

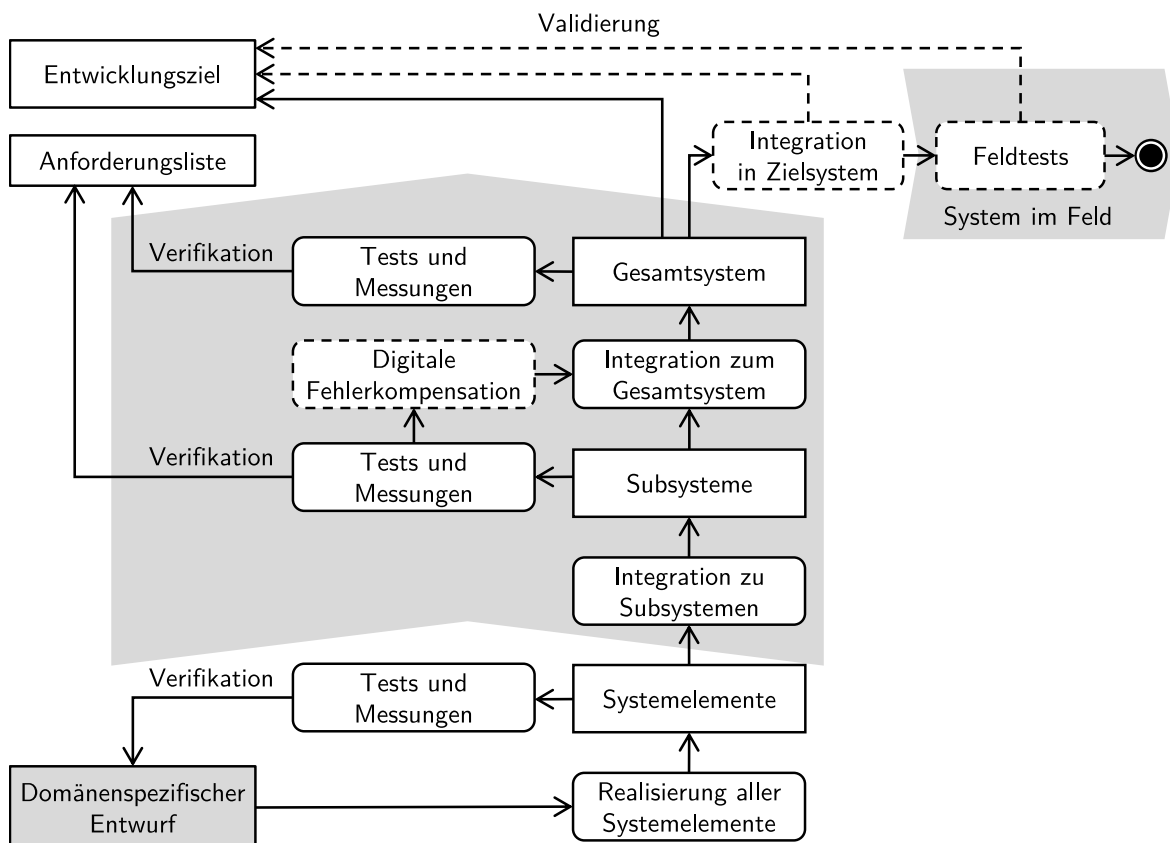


Abbildung 5.11: Prozessbaustein zur Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung

Als Ergebnisse der vorherigen Entwicklungsphase sind alle notwendigen Dokumente und Daten verfügbar, welche benötigt werden, um die Systemelemente zu realisieren. Realisierung bedeutet dabei die Fertigung oder Beschaffung von Komponenten und die Programmierung von Softwareelementen. Durch Messungen werden die Eigenschaften der realisierten Systemelemente geprüft und mit den Anforderungen abgeglichen. Bei Abweichungen müssen gegebenenfalls Anpassungen in der Phase des domänenspezifischen Entwurfs erfolgen. Die in der vorherigen Phase realisierten Komponenten werden im ersten Schritt zu Subsystemen integriert. Die Komponenten und Subsysteme sind bisher nicht in einem vollständigen digitalen Modell hinterlegt. Es kann daher zu nicht betrachteten Inkompatibilitäten kommen, die durch Anpassungen

des entsprechenden Entwurfs aufgelöst werden müssen. Die Subsysteme werden anschließend vermessen und damit gegenüber den Anforderungen verifiziert. Dabei treten aufgrund von unvermeidbaren Ungenauigkeiten bei der Fertigung und bei der Montage Abweichungen auf, die bei optomechatronischen Systemen teilweise digital kompensiert werden können. Anschließend erfolgt die Integration der Subsysteme zum Gesamtsystem, mit dem Messungen unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden, um die Eigenschaften des Systems gegenüber den Anforderungen zu verifizieren. Die betrachteten optomechatronischen Systeme sind typischerweise Bestandteil eines übergeordneten Zielsystems. Nach der Integration in das Zielsystem ist eine Kalibrierung notwendig, um die Koordinatensysteme von Gesamtsystem und Zielsystem ineinander zu überführen. Abschließend erfolgt eine Validierung des Systems, also die Absicherung der Systemfunktionen gegenüber dem Entwicklungsziel. Abhängig von der Formulierung des Entwicklungsziels erfolgt die Validierung des Gesamtsystems direkt oder nach der Integration in das Zielsystem. Wenn Wirkungen auf den Menschen Bestandteil des Entwicklungsziels sind, werden diese durch Feldtests unter realen Umgebungsbedingungen validiert.

Das Ergebnis der Phase ist das vollständig integrierte und gegenüber der Anforderungsliste und dem Entwicklungsziel abgesicherte Gesamtsystem. Messungen und Test werden nach jedem Integrationsschritt durchgeführt, um Inkompatibilitäten frühzeitig zu erkennen und entsprechend reagieren zu können. Der Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme ist mit dieser Phase abgeschlossen. Im nächsten Kapitel werden die erarbeiteten Phasen und Arbeitsschritte anhand eines Anwendungsbeispiels veranschaulicht. Nach dem Anwendungsbeispiel erfolgt in Kapitel 7 eine Zusammenfassung und eine kritische Diskussion des erarbeiteten Prozesses.

6 Anwendungsbeispiel

Die Entwicklung des vorgestellten Prozesses basiert auf Erkenntnissen aus Industrieprojekten, in denen unterschiedliche optomechatronische Systeme entwickelt wurden. Die Arbeitsschritte bei der Entwicklung eines adaptiven Fahrzeugscheinwerfers werden an dieser Stelle genutzt, um den Prozess zu veranschaulichen. Dabei werden teilweise Inhalte und Diagramme retrospektiv ergänzt, um das Vorgehen bei der Entwicklung zusammenhängend darstellen zu können. Im nächsten Abschnitt wird das Anwendungsbeispiel motiviert und anschließend der Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme veranschaulicht.

6.1 Motivation und Entwicklungsziele

Die Sichtbarkeit des Fahrzeugs für andere Verkehrsteilnehmer und die optimale Sicht des Fahrers sind elementare Voraussetzungen für einen sicheren Straßenverkehr bei Dämmerung und Nacht. Die zunehmende Ausstattung von Fahrzeugen mit Sensorik sowie technologische Fortschritte im Bereich der halbleiterbasierten Lichtquellen ermöglichen es, neuartige lichtbasierte Funktionen umzusetzen [LACH17]. Die Frontscheinwerfer bieten dafür ein besonders großes Potenzial. Dies wird an vielfältigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von Fahrzeugherstellern, Zulieferern und Forschungseinrichtungen deutlich. Durch den Einsatz spezieller Modulatoren kann die Lichtverteilung eines Frontscheinwerfers in einzeln schaltbare Segmente unterteilt werden, die in Anlehnung an die Videoprojektionstechnik Pixel genannt werden. Es stehen Technologien zur Verfügung mit denen es möglich ist, Scheinwerfer mit 10^1 Pixeln bis hin zu 10^6 Pixeln zu realisieren. Mit diesen sogenannten hochauflösenden Scheinwerfern können neuartige Lichtfunktionen zur Steigerung von Sicherheit und Komfort umgesetzt werden. Ein Beispiel dafür ist das hochauflösende blendfreie Fernlicht, bei dem entgegenkommende Verkehrsteilnehmer im Fernlicht maskiert werden. Damit kann die Sichtweite des Fahrers erhöht und gleichzeitig eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer vermieden werden [ZYDE14]. Neben adaptiven Lichtfunktionen können mit hochauflösenden Scheinwerfern Projektionen vor

dem Fahrzeug realisiert werden, die der Ergänzung der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle dienen oder zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern genutzt werden [KRAH17]. Eine beispielhafte Funktion ist das sogenannte Baustellenlicht, bei dem die Breite des Fahrzeugs durch eine ausgeleuchtete Fläche auf der Fahrbahn dargestellt wird. Durch die Projektion von Symbolen zur Information oder Warnung des Fahrers muss dieser den Blick nicht von der Straße abwenden und kann so Gefahren schneller erkennen [HAMM18, BUDA19].

Neben den neuartigen Lichtfunktionen macht der Technologiewandel hin zu pixelbasierten Systemen Fahrzeugscheinwerfer zu einem interessanten und herausfordernden Beispiel optomechatronischer Systeme [KNÖC19b]. Da durch hochauflösende Scheinwerfer der Verkehrsraum ausgeleuchtet und gleichzeitig Projektionen auf der Straße erzeugt werden, können zwei der in der Einleitung zu dieser Arbeit genannten optomechatronischen Hauptfunktionen adressiert werden: *Beleuchten* und *Informationen anzeigen*.

Die in diesem Kapitel beschriebene Entwicklung ist das Ergebnis eines Forschungsprojektes zu adaptiven Scheinwerfern. Das Ziel des Projekts ist, technologische Potenziale und Limitierungen für einen Systemaufbau zu erforschen, bei dem mit einem DMD als Modulator vollständige Lichtverteilungen erzeugt werden. Der DMD wird ausgewählt, da dieser im Vergleich zu anderen Modulatoren eine höhere Anzahl von Pixeln aufweist und weißes, nicht kohärentes Licht effizient moduliert werden kann. Die Erkenntnisse werden anhand eines Prototypen gewonnen, der anschließend für physiologische Studien im realen Verkehrsraum nutzbar sein soll. Die Entwicklungsziele für den Prototypen sind:

- Realisieren eines adaptiven Scheinwerfers basierend auf der DMD-Technologie
- Erzeugen von hochauflösten Lichtverteilungen, die bezüglich Öffnungswinkel, Lichtstrom und Beleuchtungsstärke mit Lichtverteilungen von aktuellen Serienscheinwerfern vergleichbar sind oder diese übersteigen
- Erzeugen von kontrastreichen Projektionen vor dem Fahrzeug
- Integrieren des Systems in einen mobilen Versuchsträger zur Evaluation neuartiger Lichtverteilungen im Verkehrsraum unter realen Umgebungsbedingungen

6.2 Anforderungsanalyse

Aus den Entwicklungszielen werden nach dem vorgestellten Vorgehen Anforderungen abgeleitet. Im ersten Schritt ist es erforderlich, die Hauptfunktionen des Systems zu definieren. Anschließend werden die funktionalen Anforderungen analysiert. Das sind die Anforderungen, die direkt für die Hauptfunktionen notwendig sind. Weitere nicht-funktionale Anforderungen werden mithilfe der Hauptmerkmalliste erhoben (vgl. Unterabschnitt 5.1.4). Die Anforderungen werden in Form einer Anforderungsliste dokumentiert, die am Ende des Abschnitts in Abbildung 6.7 gezeigt ist. Zur Nachvollziehbarkeit wird bei der nachfolgenden Analyse jeweils auf die Nummer der entsprechenden Anforderung verwiesen.

6.2.1 Ablaufanalyse der optomechatronischen Hauptfunktion

Zu Beginn der Anforderungsanalyse wird der Ablauf zur Umsetzung adaptiver Lichtfunktionen und Projektionen auf der Straße betrachtet und in Form des Ablaufplans in Abbildung 6.1 dargestellt. Durch adaptive Lichtfunktionen können entgegenkommende Verkehrsteilnehmer im Fernlicht maskiert und Gefahrenstellen markiert werden.

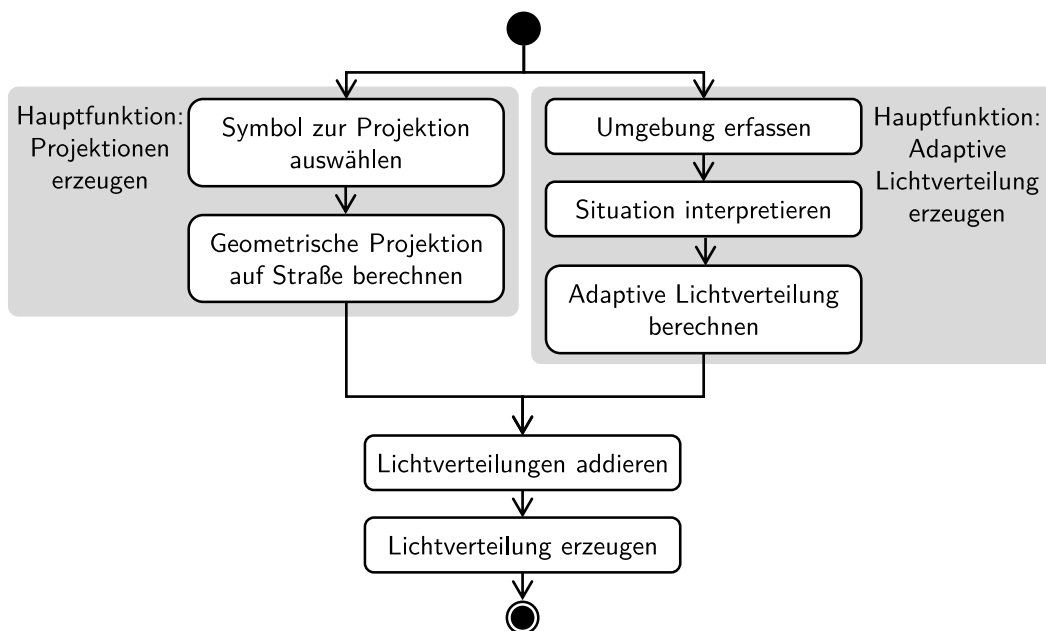


Abbildung 6.1: Ablaufplan der Hauptfunktionen des adaptiven Scheinwerfers

Die Zulassung eines hochaufgelösten blendfreien Fernlichts ist bereits nach den aktuellen ECE-Regelungen möglich (ECE-Regelungen werden herausgegeben durch die UNECE: *United Nations Economic Commission for Europe*). Für die Realisierung der Funktion sind Daten über

die Umgebung notwendig, um andere Verkehrsteilnehmer erkennen zu können. Anschließend werden die Daten interpretiert und eine Basislichtverteilung so angepasst, dass keine Blendung der erkannten Verkehrsteilnehmer auftritt. Um diese Funktion umzusetzen, muss der Prototyp vollständige Fernlichtverteilungen erzeugen können, bei denen die Lichtstärke jedes Pixels steuerbar ist.

Die Projektion von Inhalten neben oder hinter dem Fahrzeug kann für Kommunikationszwecke mit anderen Verkehrsteilnehmern eingesetzt werden. Eine Ausgabe von farbigem Licht in Fahrtrichtung ist dabei nicht zulässig [ECE48]. Durch Projektionen ist eine Ablenkung anderer Verkehrsteilnehmer möglich, die im Sinne der Verkehrssicherheit zu vermeiden ist. Für den Prototypen werden die Projektionen daher auf schwarz-weiß Projektionen vor dem Fahrzeug beschränkt. Für den Farbort der Projektionen sowie der adaptiven Lichtverteilung wird weiß gemäß ECE48 gefordert (Anforderung 1.1). Diese Funktion ist eine Erweiterung der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle und greift auf Hinweise und Warnungen zurück, die durch das Fahrzeug ausgegeben werden sollen. Nach der Auswahl des Symbols oder Warnhinweises zur Projektion erfolgt eine geometrische Projektion auf die Straße. Anschließend werden die Helligkeitswerte der Pixel von Projektion und maskierter Lichtverteilung addiert und durch das System erzeugt.

6.2.2 Analyse der funktionalen Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen an den Prototypen können direkt aus den beiden definierten umzusetzenden Lichtfunktionen abgeleitet werden. Nachfolgend werden Öffnungswinkel, Beleuchtungsstärke, Auflösung und Kontrast für das adaptive Fernlicht und für die Projektion von Symbolen analysiert.

Adaptives Fernlicht

Objekte können nachts bei deutlich größerer Entfernung erkannt werden, wenn der Verkehrsraum mit Fernlicht statt Abblendlicht ausgeleuchtet wird [ZYDE14]. Um andere Verkehrsteilnehmer wie entgegenkommende Fahrzeugführer nicht zu blenden, wird das Fernlicht manuell oder automatisch abgeblendet. Mit einem adaptiven Fernlicht können andere Fahrzeuge im Verkehrsraum durch die Fahrzeugsensorik erkannt und genau in diesem Bereich der Lichtverteilung die Helligkeit reduziert werden. Der nächste Schritt in der Weiterentwicklung dieser Systeme sind Scheinwerfer, bei denen die gesamte Lichtverteilung adaptiv gesteuert werden kann. Damit ist es möglich, für jede auftretende Situation eine angepasste Lichtverteilung zu erzeugen [HOFF14]. Nachfolgend werden die lichttechnischen Anforderungen für ein vollständig adaptives Fernlicht erarbeitet.

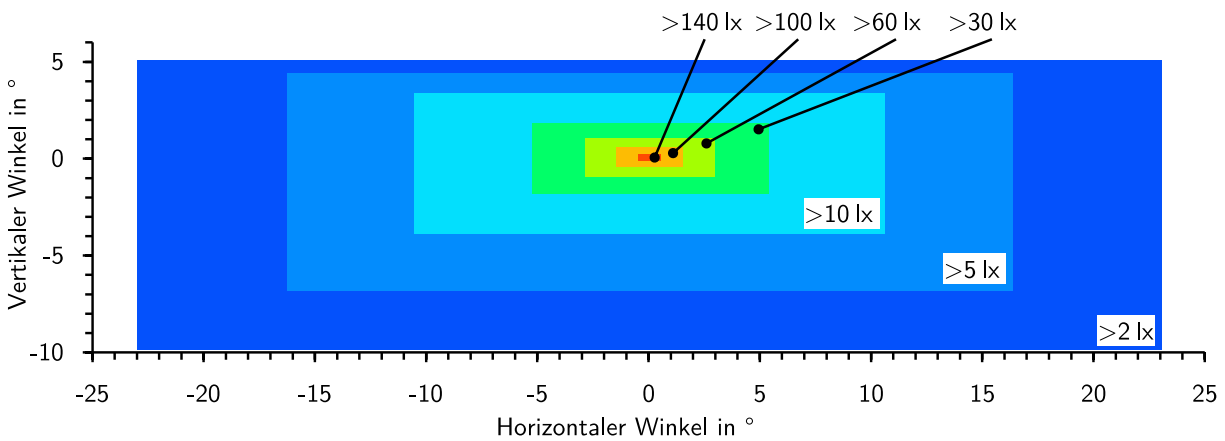


Abbildung 6.2: Idealisierte Lichtverteilung für die Anforderungsanalyse; Beleuchtungsstärke in 25 m Entfernung

Die geforderte Beleuchtungsstärkeverteilung (Anforderung 1.2) ist idealisiert in Abbildung 6.2 dargestellt und basiert auf Messergebnissen verschiedener Serienscheinwerfer von Günther [GÜNT10]. Die zentrale Beleuchtungsstärke beträgt 150 lx (Anforderung 1.3), der Lichtstrom der Verteilung beträgt etwa 1400 lm (Anforderung 1.4).

Für die Analyse der Auflösung wird die in Abbildung 6.3 dargestellte beispielhafte Situation analysiert, in der ein entgegenkommendes Objekt maskiert werden soll. Analysiert wird der kritische Fall einer 4-spurigen Fahrbahn in einer Linkskurve für den rechten Scheinwerfer. In diesem Fall ist der vertikale Abstand zwischen Scheinwerfer und Objekt besonders groß. Ermittelt wird der maximale notwendige horizontale Öffnungswinkel ϑ_h sowie die notwendige Auflösung Δh bei diesem Winkel.

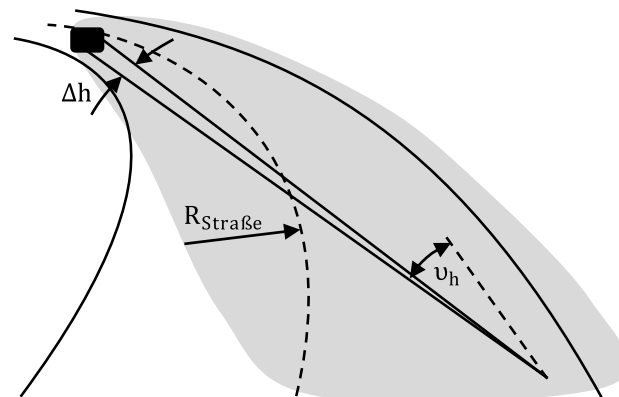


Abbildung 6.3: Skizze zur Herleitung der Abhängigkeit zwischen notwendiger Auflösung Δh und Öffnungswinkel ϑ_h

Bei der Analyse werden folgende Annahmen getroffen:

- 4-spurige Fahrbahn (2 Spuren in jede Richtung) mit einer Breite von 3,5 m je Fahrbahn und einem Mittelstreifen mit einer Breite von 1 m. Der vertikale Abstand zwischen

rechtem Scheinwerfer und zu maskierendem Objekt beträgt damit im Moment der Vorbeifahrt etwa $d_v = 14$ m

- Breite des zu maskierenden Objektes: $w = 750$ mm
- Maximale Detektionsdistanz der Fahrzeugsensorik: $d = 200$ m
- Einfluss der Latenz zwischen Objektdetektion und Reaktion des Scheinwerfers ist vernachlässigbar

Auflösung und Öffnungswinkel werden abhängig von dem Kurvenradius $R_{\text{Straße}}$ ermittelt. Mit dem direkten Abstand zwischen Objekt und Scheinwerfer d kann die Auflösung Δh bestimmt werden:

$$\Delta h = \arctan\left(\frac{w}{d}\right) \quad (6.1)$$

Aus den geometrischen Abhängigkeiten kann die Formel des horizontalen Öffnungswinkels ϑ_h hergeleitet werden:

$$\vartheta_h = \arcsin\left(\frac{R_{\text{Straße}}^2 + d^2 - (R_{\text{Straße}} - d_v)^2}{2 \cdot R_{\text{Straße}} \cdot d}\right) \quad (6.2)$$

In dem Diagramm in Abbildung 6.4 ist dargestellt, in welchem Winkelbereich welche Auflösung notwendig ist, um ein entgegenkommendes Objekt entsprechend Abbildung 6.3 zu maskieren. Der Diagrammbereich wird nach links durch die minimale Auflösung begrenzt, die sich aus der Annahme der maximalen Detektionsdistanz der Fahrzeugsensorik zu $0,2^\circ$ ergibt. Die oberen Diagrammlinien stellen exemplarisch ausgewählte Kurvenradien dar. Alle Diagrammlinien unterschiedlicher Kurvenradien enden auf der gestrichelten Linie. An dieser Stelle wird das entgegenkommende Objekt hinter der Kurvenböschung das erste Mal für das eigene Fahrzeug bzw. die Sensorik sichtbar. Ergebnis der Betrachtung ist, dass die Auflösung für die Funktion des adaptiven Fernlichts nicht konstant über den kompletten Öffnungswinkel sein muss. Für das betrachtete Szenario ist eine Ausblendauflösung von $0,5^\circ$ im Winkelbereich über 15° nicht erforderlich. Im zentralen Bereich der Lichtverteilung bis 5° wird eine Auflösung von $\Delta h = 0,2^\circ$ gefordert (Anforderung 1.5). Diese Angabe ist nur für die oben beschriebenen Annahmen gültig.

Die Verschiebeauflösung $\Delta h'$ sollte so gewählt sein, dass die Relativbewegung zwischen dem Fahrzeug mit hochauflösendem Scheinwerfer und dem zu maskierenden Objekt ohne wahrnehmbare Sprünge erfolgt. Reisinger empfiehlt für die Verschiebeauflösung einen Wert von maximal $\Delta h' = 0,1^\circ$, da auch mit einer mechatronischen Leuchtweitenregulierung aktueller

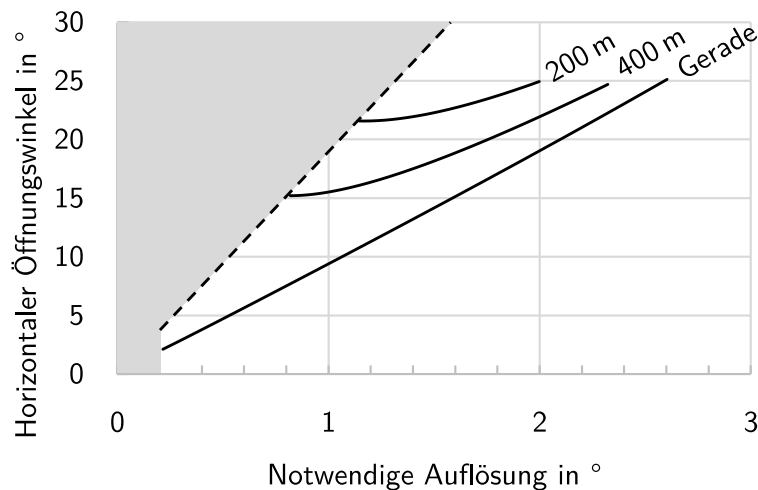


Abbildung 6.4: Abhängigkeit zwischen Öffnungswinkel und Auflösung.

Scheinwerfer diese Auflösung möglich ist [REIS16] (Anforderung 1.6). Erkenntnisse zur Verschiebeauflösung basierend auf Probandenstudien sind bisher nicht verfügbar.

Um eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden, darf im ausgeblendeten Bereich eine maximale Lichtstärke nicht überschritten werden. Im Bereich der Ausblendung wird der Punkt B50L herangezogen, der die Lichtstärke an der ungefähren Kopfposition eines entgegenkommenden Fahrers beschreibt. Für Landstraßen (Klasse E nach ECE123) beträgt die maximale Beleuchtungsstärke an diesem Punkt 1 lx (Anforderung 1.7).

Symbolprojektion

In Abbildung 6.5 sind die geometrischen Zusammenhänge einer Symbolprojektion dargestellt. Der vollständige Projektionsbereich soll erzeugt werden, indem die Projektionen beider Scheinwerfer nebeneinander liegen. Eine Überlagerung der Projektionen des linken und rechten Scheinwerfers soll nicht stattfinden, da durch Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs die Qualität der Projektion reduziert wird.

Es wird eine Höhe der Lichtaustrittspunkte der Scheinwerfer von $z_0 = 0,8$ m angenommen und ein Abstand beider Scheinwerfer zueinander von $y_0 = 1,4$ m. Lee und Park haben in einer Probandenstudie die präferierte Größe und den Abstand zwischen Fahrzeug und Beginn eines projizierten Symbols für den Fahrer untersucht [LEE11]. Als Symbolbreite wird ein Wert von $w_{Proj} = 1,2$ m bis 2 m und für die Entfernung ein Abstand von $d_{Proj} = 10$ m bis 15 m ermittelt. Bei den Untersuchungen zu dieser Arbeit wurde von Experten bereits ein kürzerer Abstand ab etwa $d_{Proj} = 5$ m als angenehm empfunden. Der vertikale Projektionsbereich soll daher bei $-9,1^\circ$ beginnen und theoretisch bis zum Horizont (0°) reichen (Anforderung 1.8). Neben der Projektion von Symbolen sollen mit dem Prototypen auch Funktionen wie ein Baustellenlicht

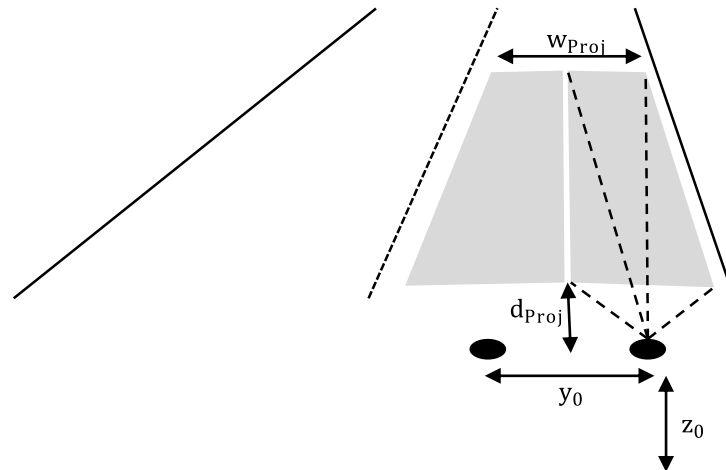


Abbildung 6.5: Skizze zur Projektion von Symbolen vor dem Fahrzeug

realisierbar sein. Daher wird mit 3,5 m ein breiterer Projektionsbereich als von Lee und Park angestrebt, mit dem eine vollständige Fahrbahn ausgeleuchtet werden kann. Die horizontale Ausdehnung des Projektionsbereichs kann mit dem minimalen Abstand von dem Fahrzeug von $d_{Proj} = 5 \text{ m}$ zu $\pm 11,9^\circ$ bestimmt werden (Anforderung 1.9).

Um zu analysieren, welche Beleuchtungsstärke im Projektionsbereich durch das System erreicht werden soll, wird der Kontrast der auf der Straße projizierten Symbole betrachtet. In dem Diagramm in Abbildung 6.6 wird gezeigt, welcher Weberkontrast notwendig ist, um bei einer bestimmten Umgebungsleuchtdichte ein Objekt zu erkennen. Der Zusammenhang bezieht sich auf das Erkennen von Objekten im Verkehrsraum wie beispielsweise Schildern oder Tieren. Bei der Projektion von Symbolen ist es zu empfehlen, einen Kontrast zu wählen, der deutlich über der Erkennbarkeitsschwelle liegt, um eine schnelle und komfortable Wahrnehmbarkeit zu gewährleisten. Der Zusammenhang in Abbildung 6.6 wird daher mit einer Probandenstudie verglichen, die Jahn durchgeführt hat. In der Probandenstudie wird anhand der beispielhaften Funktion eines optischen Baustellenassistenten mit einem Forschungsscheinwerfer untersucht, welcher Kontrast in Abhängigkeit von der Umgebungsleuchtdichte von den Probanden gewünscht ist [JAHN17]. Die Ergebnisse der Studie sind ebenfalls in Abbildung 6.6 eingetragen. Es ist ersichtlich, dass der gewünschte Kontrast für die Symbolprojektion deutlich über der Erkennbarkeitsschwelle liegt. Zu beachten ist, dass diese Studie innerhalb eines Labors und nicht mit einer typischen Straßenoberfläche durchgeführt wurde. Die Ergebnisse werden daher nur als Richtwert verstanden. Es ist zu erwarten, dass der bevorzugte Kontrast zudem von mehr Faktoren abhängt als der Umgebungsleuchtdichte. Für die Quantifizierung weiterer Einflüsse wie der Gestaltung des projizierten Symbols oder einer dynamischen Veränderung liegen noch keine Studien vor. Dennoch wird angenommen, dass die von Jahn ermittelten Werte für den betrachteten Fall anwendbar sind.

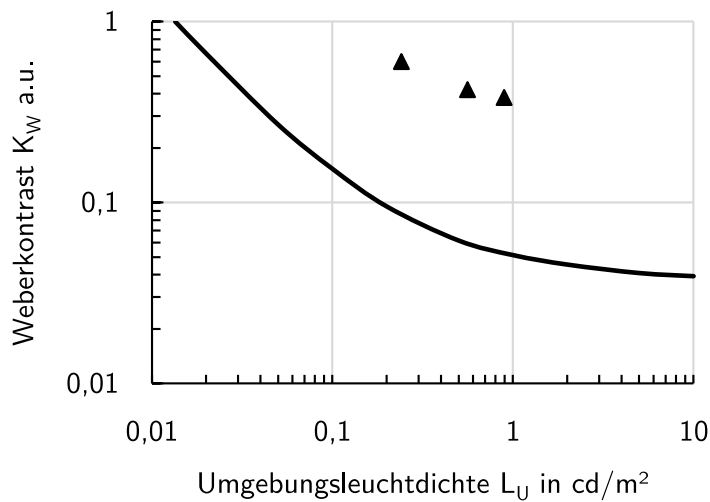


Abbildung 6.6: Schwarze Linie: Grenze der Erkennbarkeit abhängig von der Umgebungsleuchtdichte nach [KHAN15]; Dreiecke: Favorisierter Kontrast von Projektionen abhängig von der Umgebungsleuchtdichte nach Jahn [JAHN17]

Das System soll nach der Dämmerung nutzbar sein. Um eine Abschätzung der erforderlichen Lichtstärke vorzunehmen, wird das Beleuchtungsszenario bei Nacht vereinfacht betrachtet. Die hellsten Lichtquellen sind dann andere Scheinwerfer mit etwa 15 lx und die Straßenbeleuchtung mit 9,5 lx [KLOP17]. Ausgehend von einem lambertschen Reflektionsverhalten der Straße kann aus der Beleuchtungsstärke die Leuchtdichte bestimmt werden, die bei Lambertstrahlern unabhängig von dem Betrachtungswinkel ist. Kloppenburg leitet für den Zusammenhang die nachfolgende Gleichung her [KLOP17]:

$$L_U = \frac{E_U \cdot \varrho}{\pi} \quad (6.3)$$

Darin ist L_U die Umgebungsleuchtdichte in cd/m^2 , E_U die Umgebungsbeleuchtungsstärke in lx und ϱ der Reflektionsgrad der Straßenoberfläche. Die Reflektionseigenschaften von Straßenoberflächen hängen von Faktoren wie der mikroskopischen Beschaffenheit, Verschmutzungen, Nässe, Material und Oberflächengeometrie ab. Hoffmann [HOFF03] stellt in seiner Arbeit detaillierte physikalische und experimentelle Modelle zur Reflektion an Straßenoberflächen zusammen und ergänzt diese durch eigene Modelle zur Beschreibung des Reflektionsverhaltens bei Nässe. An dieser Stelle wird zur vereinfachten Berechnung der Mittelwert der Reflektionsgrade verschiedener Fahrbahnmaterialien gebildet, der 0,1 beträgt [HOFF03]. Mit Gleichung 6.3 wird die Leuchtdichte L_U der Straßenoberfläche durch Scheinwerfer zu $0,5 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ und durch Straßenbeleuchtung zu $0,3 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ bestimmt. Nach Abbildung 6.6 ist bei diesen Umgebungsleuchtdichten ein Weberkontrast von unter 0,1 ausreichend, um Symbole zu erkennen. Der favorierte Kontrast liegt nach der Studie von Jahn deutlich darüber. Für den zu entwickelnden Scheinwerfer

wird daher gefordert, dass der Kontrast bei der Symbolprojektion bei einer Umgebungsleuchtdichte von $0,5 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ mindestens $K_W = 0,5$ beträgt. Die Leuchtdichte des Symbols muss daher mindestens $0,75 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ betragen, wobei durch den Scheinwerfer davon $0,25 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ zu erzeugen sind. Mit Gleichung 6.3 kann daraus die erforderliche Beleuchtungsstärke im Projektionsbereich zu $E_{Proj} = 8 \text{ lx}$ bestimmt werden (Anforderung 1.10). Bezüglich der Auflösung, die für eine Symbolprojektion notwendig ist, gibt es bisher keine klare Empfehlung. Für diesen Prototypen wird davon ausgegangen, dass die gestellten Anforderungen an die Auflösung der Funktion des adaptiven Fernlichts auch für die Symbolprojektion ausreichen.

6.2.3 Analyse der Wechselwirkungen mit dem Nutzer und der Umgebung

Die Wechselwirkungen des Systems mit dem Fahrer sind Bestandteil der Hauptfunktion und werden bei der Anforderungsanalyse bezüglich des notwendigen Kontrasts für die Symbolprojektion untersucht. Mögliche Störwirkungen sind die Blendung von Verkehrsteilnehmern, die nicht durch die Fahrzeugsensorik erfasst werden, was typischerweise auf Radfahrer und Fußgänger zutrifft. Weiterhin ist es möglich, dass andere Verkehrsteilnehmer durch Projektionen abgelenkt oder gestört werden. Dieser Aspekt ist Inhalt aktueller Forschungen zu hochauflösenden Scheinwerfern [JAHN19]. Bei der Darstellung dynamisch veränderlicher Symbole oder Lichtverteilungen ist eine minimale Bildwiederholfrequenz erforderlich, damit der Betrachter kein Flimmern wahrnimmt. Beim skotopischen Sehen, das bei niedriger Umgebungsleuchtdichte durch die Stäbchen der Netzhaut erfolgt, beträgt die minimale Bildwiederholfrequenz, die sogenannte Flimmerfusionsfrequenz, $f_{Bild} = 25 \text{ Hz}$ [SCHM11] (Anforderung 1.11).

6.2.4 Ermitteln von Anforderungsquellen und Erweitern der Anforderungen

Eine wichtige Quelle für Anforderungen an den Prototypen sind Erkenntnisse anderer Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Fahrzeuglichttechnik. Weiterführende Literatur und eine Übersicht über veröffentlichte Prototypen von hochauflösenden Scheinwerfern sind an anderer Stelle veröffentlicht [KNÖC19a]. Normen und Richtlinien werden über die bisher genannten ECE-Regelungen hinaus nicht betrachtet, da der Prototyp unter kontrollierten Bedingungen und nur durch eingewiesenes Personal betrieben wird. Weitere nicht-funktionale Anforderungen werden mithilfe der Hauptmerkmaliste aus Abschnitt 5.1 erhoben und sind nach den Bereichen Mechanik, Elektrik und Sonstige gegliedert.

Mechanische Anforderungen

Die adaptiven Scheinwerfer sollen für die Durchführung von Studien in ein Versuchsfahrzeug integriert werden (Anforderung 2.1). Als Integrationsort ist der Bauraum konventioneller Scheinwerfer vorgesehen, weshalb zwei der adaptiven Scheinwerfer aufgebaut werden sollen (Anforderung 2.2). Dies ist vorteilhaft, da die äußere Erscheinung des Fahrzeugs bei Studien mit Probanden unverändert ist. Der maximale Bauraum wird basierend auf einem digitalen Geometriemodell bestimmt (Anforderung 2.3). Damit der Bereich maximaler Beleuchtungsstärke bei unterschiedlichen Beladungszuständen unverändert bleibt, ist ein Ladungsausgleich erforderlich (Anforderung 2.4).

Elektrische Anforderungen

In Fahrzeugen beträgt die Spannung des Boardnetzes üblicherweise 12 V, die auch für den Betrieb der adaptiven Scheinwerfer gefordert wird (Anforderung 3.1). Es sollen Versuche mit dem System durchgeführt werden können, wenn der Motor des Versuchsfahrzeugs abgestellt ist und somit keine elektrische Leistung durch den Generator zur Verfügung steht. Es wird gefordert, dass die adaptiven Scheinwerfer mindestens 120 min bei stillstehendem Motor und ohne externe Energieversorgung betrieben werden können (Anforderung 3.2).

Sonstige Anforderungen

Für die Umsetzung des Scheinwerfers wird die DMD-Technologie ausgewählt, da mit dieser eine Pixelanzahl von bis zu über 1 Million möglich ist und hohe Kontraste erreicht werden können. Weiterhin bieten DMDs die Möglichkeit unpolarisiertes Licht, wie es von LEDs emittiert wird, im Vergleich zu anderen Bildmodulatoren besonders effizient umzulenken (Anforderung 4.1). Bei Probandenversuchen muss ein Versuchsleiter die Möglichkeit haben, die adaptiven Scheinwerfer im Betrieb zu steuern (Anforderung 4.2). Damit Versuche im öffentlichen Straßenverkehr durchführbar sind, ist eine entsprechende Genehmigung notwendig (Anforderung 4.3). Um die Sicherheit bei Versuchen im öffentlichen Straßenverkehr zu gewährleisten, sind weitere Maßnahmen erforderlich. Im Falle eines Ausfalls der adaptiven Scheinwerfer muss eine Lichtverteilung (statisches Abblendlicht) erzeugt werden, damit die Sicht des Fahrers und die Sichtbarkeit für andere Verkehrsteilnehmer gewährleistet wird (Anforderung 4.4). Weiterhin ist eine Notabschaltung des Systems vorzusehen, die durch den Fahrer oder den Versuchsleiter betätigt werden kann (Anforderung 4.5).


		Hochauflösender DMD-Scheinwerfer		F = Festforderung Z = Zielforderung W = Wunschforderung	
Nr.	Anforderungen	Art	Wert/ Bereich		Variable/ Einheit
			Exakt	Toleranz	
1	Lichttechnische Anforderungen				
1.1	Farbort	F	"weiß" nach ECE48	-	-
1.2	Beleuchtungsstärkeverteilung	Z	vgl. Abbildung 6.2	min	E / lx
1.3	Beleuchtungsstärke Hotspot	Z	150	min	E / lx
1.4	Lichtstrom	Z	1400	min	ϕ_v / lm
1.5	Ein-/ Ausblendauflösung	Z	0,2	max	Δh / °
1.6	Verschiebeauflösung	Z	0,1	max	$\Delta h'$ / °
1.7	Beleuchtungsstärke im ausgeblendeten Bereich	Z	1	max	E_{Aus} / lx
1.8	Projektionsbereich vertikal	Z	-9,1 bis 0	min	- / °
1.9	Projektionsbereich horizontal	Z	$\pm 11,9$	min	- / °
1.10	Beleuchtungsstärke im Projektionsbereich	Z	8	min	E_{Proj} / lx
1.11	Frequenz bei dynamischen Lichtverteilungen	Z	25	min	f_{Bild} / Hz
2	Mechanische Anforderungen				
2.1	Integration in Versuchsfahrzeug	F	ja	-	-
2.2	Anzahl von Scheinwerfern	F	2	-	-
2.3	Bauraum	Z	300x300x150	max	$LxBxH$ / mm ³
2.4	Ladungsausgleich	Z	2	min	- / °
3	Elektrische Anforderungen				
3.1	Energieversorgung: Spannung	F	12	± 1	U / V
3.2	Energieversorgung: Betrieb ohne Motor	Z	120	min	t / min
4	Sonstige Anforderungen				
4.1	Technologie zur Bildmodulation	F	DMD	-	-
4.2	Bedienung während der Fahrt durch Versuchsleiter	F	ja	-	-
4.3	Genehmigung für den öffentlichen Straßenverkehr	F	ja	-	-
4.4	Statische Lichtverteilung bei Systemausfall	F	ja	-	-
4.5	Notabschaltung des Systems	F	ja	-	-

Abbildung 6.7: Anforderungsliste für die Entwicklung des Prototyps

6.3 Systementwurf

Das Ergebnis der Anforderungsanalyse ist die initiale Spezifikation des zu entwickelnden hochauflösenden Scheinwerfers. Der Systementwurf erfolgt nach dem in Abschnitt 5.2 erarbeiteten Prozessbaustein, dessen Ergebnis ein domänenübergreifendes Lösungskonzept ist. Im ersten Schritt werden wesentliche Probleme identifiziert. Anschließend wird eine Funktionsstruktur aufgestellt und für jede Teilfunktion Wirkprinzipien und Lösungselemente ausgewählt. Die entstehenden Wirkstrukturen werden zu prinzipiellen Lösungsvarianten konkretisiert, wobei ein erster simulativer Entwurf der optischen Subsysteme erfolgt. Nach der Auswahl eines Konzepts wird das domänenübergreifende Lösungskonzept festgelegt.

6.3.1 Erkennen der wesentlichen Probleme

Basierend auf der Analyse der funktionalen Anforderungen sowie der Analyse der veröffentlichten Prototypen können drei wesentliche Herausforderungen bei der Entwicklung des Scheinwerfers erkannt werden [KNÖC18a]. Die im Stand der Forschung beschriebenen aktiven Umformer werden für Anwendungen entwickelt bei denen eine möglichst homogene Beleuchtungsstärke über dem Öffnungswinkel das Ziel ist. Die Anforderung an den Prototypen ist dahingehend eine inhomogene Beleuchtung mit einer deutlich höheren Beleuchtungsstärke in der Mitte der Lichtverteilung als an den Rändern (Anforderung 1.2).

Die geforderte Lichtverteilung kann mit einem hochauflösenden Scheinwerfer umgesetzt werden, der eine homogene Beleuchtungsstärke von 150 lx im gesamten Bereich der Lichtverteilung aufweist (Anforderung 1.3). Dafür ist unter Vernachlässigung aller Verluste im optischen System ein Lichtstrom der Lichtquelle von etwa 23.000 lm notwendig. Mit dem geforderten Lichtstrom der adaptiven Lichtverteilung von 1400 lm (Anforderung 1.4) kann der resultierende Nutzungsgrad zu 6,2% bestimmt werden. Die Lichtquelle und alle weiteren Komponenten müssen entsprechend deutlich überdimensioniert werden.

Die zweite Herausforderung ist, dass der maximale Lichtstrom des Systems begrenzt wird durch den maximalen Einfallswinkel des eingehenden Lichts, der Fläche und der thermischen Belastbarkeit des Bildmodulators. Der maximale Lichtstrom des Systems hängt weiterhin von der verwendeten Lichtquelle ab. Abhängig von der Fläche und dem Öffnungswinkel der Lichtquelle kann nur ein Teil des emittierten Lichts unter den genannten Restriktionen auf dem Bildmodulator auftreffen. Die Flächen und Winkel der Lichtquelle und der Beleuchtungsoptik hängen über die Étendue zusammen.

Zur Veranschaulichung dieses Effekts wird eine vereinfachte Berechnung mit LEDs als Lichtquellen gezeigt. Zum Zeitpunkt der Entwicklung sind zwei DMDs für den Einsatz in Fahrzeugen verfügbar. Der größere der beiden weist eine nutzbare Fläche von etwa 78 mm^2 auf [TEXA18b]. Für die Trennung von Beleuchtungs- und Projektionspfad der Lichtstrahlen wird eine Verkipfung des DMDs von $\varphi_{Kipp} = 24^\circ$ angenommen, wodurch die wirksame Fläche des DMDs mit dem Cosinus des Winkels reduziert wird. Unter der Annahme eines maximalen Winkels des einfallenden Lichtbündels von $\varphi_{DMD} = \pm 12^\circ$ in vertikaler und horizontaler Richtung und dem Medium Luft mit dem Brechungsindex $n = 1$ beträgt die Étendue des DMDs gemäß Gleichung 2.16:

$$G_{DMD} = A_{DMD} \cdot n^2 \cdot \cos(\varphi_{Kipp}) \cdot \sin^2(\varphi_{DMD}) = 3,1 \text{ mm}^2 \text{ sr}. \quad (6.4)$$

Die Étendue der Lichtquelle kann ebenfalls entsprechend Gleichung 2.16 bestimmt werden. Der Halbwinkel wird bei einer LED als Lichtquelle durch den Akzeptanzwinkel der Beleuchtungsoptik festgelegt. Ist die Étendue der Lichtquelle kleiner als die des Bildmodulators, kann das gesamte Licht der Lichtquelle auf den Bildmodulator treffen. Andernfalls ist der maximale Lichtstrom über den Quotienten der beiden Étenduewerte reduziert. Für die Berechnung wird eine LED angenommen, die für die Anwendung in Scheinwerfer einen besonders hohen Lichtstrom pro Fläche von 949 lm/mm^2 aufweist [OSRA19]. Der Lichtstrom Φ_{LED} , der innerhalb eines begrenzten halben Öffnungswinkels ε_{LED} emittiert wird, wird mit Gleichung 2.17 bestimmt.

In Abbildung 6.8 ist der maximale mögliche Lichtstrom auf dem DMD über dem halben Akzeptanzwinkel der Beleuchtungsoptik für eine unterschiedliche Anzahl von Lichtquellen aufgetragen. Für das betrachtete Setup ist erkennbar, dass der mögliche Lichtstrom ein Maximum von etwa 2900 lm aufweist. Dieser Wert kann bereits mit 4 LEDs und einem Halbwinkel von 62° erreicht werden. Werden mehr LEDs genutzt, kann der Lichtstrom nicht weiter gesteigert werden, da die Étendue des Bildmodulators der begrenzende Faktor wird. Unter der Annahme eines optischen Systemwirkungsgrads von etwa 40% , der von ähnlichen Aufbauten bekannt ist, wird ein maximaler Lichtstrom des System von unter 1160 lm erwartet. Damit ist der in Anforderung 1.4 geforderte Lichtstrom von 1400 lm nicht erreichbar.

Das dritte Problem bei der Entwicklung eines hochauflösenden Scheinwerfers mit DMD als Bildmodulator ist das abweichende Aspektverhältnis zwischen Modulator und Lichtverteilung. Die geforderte Lichtverteilung (Anforderung 1.2) in Abbildung 6.2 weist ein Aspektverhältnis von 3:1 auf. Die DMD-Technologie wird vielfach in der Videoprojektion eingesetzt. Aus diesem

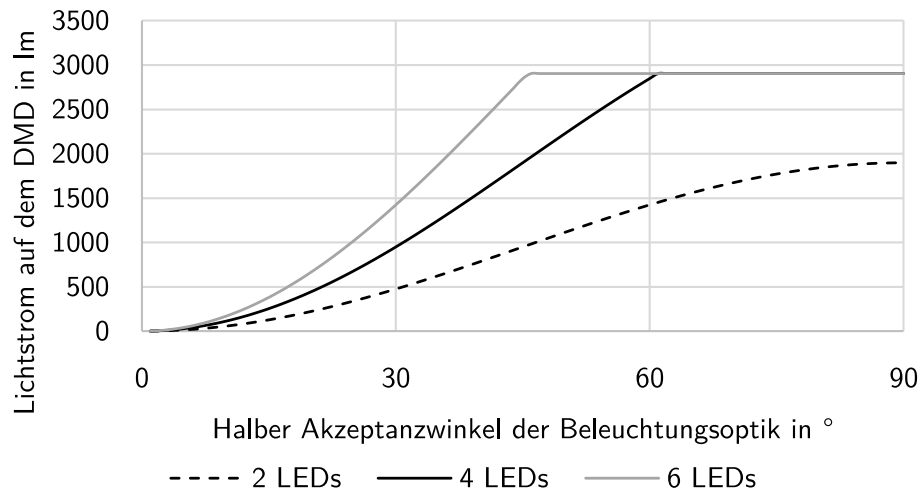


Abbildung 6.8: Berechnung des theoretischen Lichtstroms für eine unterschiedliche Anzahl von Lichtquellen

Grund sind auch die Abmessungen der Chips entsprechend ausgelegt. Typische Aspektverhältnisse von DMDs sind daher 4:3 oder 16:9. Um eine vollständige Fernlichtverteilung mit einem DMD zu erzeugen, werden im einfachsten Fall die unbenötigten Pixel auf schwarz geschaltet. Dies ist eine sehr ineffiziente Lösung, da für keine Lichtverteilung der gesamte Lichtstrom der Lichtquelle genutzt werden kann. Ebenfalls ist es möglich, mehrere Bildmodulatoren zu nutzen, die insgesamt das korrekte Aspektverhältnis aufweisen. Auch dieser Lösungsansatz wird wegen Nachteilen hinsichtlich des Bauraums und der Kosten nicht verfolgt. Zusammengefasst sind die wesentlichen Probleme bei der Entwicklung des Prototyps:

Geringer Nutzungsgrad/ inhomogene Lichtverteilung Lichtverteilungen von Fahrzeugscheinwerfern weichen stark von dem eigentlichen Anwendungsfall der Bildmodulatoren ab, bei dem eine homogene Projektion das Ziel ist. Mit einem konventionellen Systemaufbau ist daher der Nutzungsgrad einer Lichtverteilung für Fahrzeugscheinwerfer inakzeptabel gering. Lichtfunktionen, die eine hohe Adaptivität erfordern wie ein digitales Kurvenlicht, bedingen eine weitere deutliche Reduktion des Nutzungsgrads.

Maximaler Lichtstrom begrenzt durch Étendue des Bildmodulators Die nutzbare Fläche und Öffnungswinkel einer Lichtquelle hängen von der Art und Geometrie des Bildmodulators ab. Da Bildmodulatoren als komplexe technische Komponenten nur in wenigen Varianten verfügbar sind, ist daher der nutzbare Lichtstrom begrenzt.

Abweichendes Aspektverhältnis zwischen Bildmodulator und Lichtverteilung Das Aspektverhältnis der verfügbaren Bildmodulatoren ist häufig angepasst für den Einsatz in Videoprojektoren. Das Aspektverhältnis von Lichtverteilungen ist dagegen deutlich breiter.

Die wesentlichen Probleme stehen im weiteren Verlauf des Systementwurfs im Fokus der Betrachtungen. Im nächsten Teilkapitel wird eine mögliche Funktionsstruktur des Scheinwerfers erarbeitet. Dabei ist es das Ziel, neben den Hauptfunktionen auch alle relevanten Teil- und Nebenfunktionen zu identifizieren.

6.3.2 Aufstellen der Funktionsstruktur

Die Hauptfunktionen des hochauflösenden Scheinwerfers sind die Erzeugung von vollständig adaptiven Lichtverteilungen und die Projektion von Symbolen vor dem Fahrzeug. Laut Ablaufplan des Systems in Abbildung 6.1 werden beide Hauptfunktionen gemeinsam mit einem Scheinwerfer umgesetzt, weshalb diese auch in der Funktionsstruktur gemeinsam betrachtet werden. Die Teilfunktion der ersten Ebene *Informationen erfassen* in Abbildung 6.9 umfasst Teilfunktionen der zweiten Ebene, die notwendig sind, um eine adaptive Lichtverteilung zu erzeugen sowie ein situationsangepasstes Symbol zur Projektion auszuwählen. Für die dafür erforderliche Sensorik muss Energie bereitstehen und ein Datenaustausch ermöglicht werden. Diese Nebenfunktionen sind zur besseren Übersicht nicht direkt den Teilfunktionen zugeordnet.

Basierend auf den erhobenen Informationen werden situationsangepasst Symbole ausgewählt und die adaptive Lichtverteilung berechnet. Das Symbol muss durch einen Algorithmus geometrisch auf die Ebene der Straße projiziert werden und steht dann wie die adaptive Lichtverteilung als Lichtstärkematrix bereit. Durch die Addition der adaptiven Lichtverteilung mit der Lichtstärkematrix des Symbols können beide Funktionen zeitgleich von einem Scheinwerfer umgesetzt werden (Teilfunktion *Lichtverteilung berechnen*).

Für die Teilfunktion *Lichtverteilung erzeugen* sind die dargestellten Teilfunktionen der zweiten Ebene *Weißes Licht erzeugen*, *Licht formen*, *Licht modulieren* und *Lichtverteilung projizieren* notwendig. Zur Erzeugung von Licht sind weiterhin Nebenfunktionen erforderlich, welche die Steuerung und Überwachung der Lichterzeugung sicherstellen. Bedingt durch das Funktionsprinzip des ausgewählten aktiven Umformers muss Licht, das aktuell nicht für eine Lichtverteilung benötigt wird, umgelenkt oder absorbiert werden. Weitere Nebenfunktionen sind die Steuerung und Überwachung der Lichtmodulation. In der Abbildung sind weitere Nebenfunktionen dargestellt, die zur besseren Übersicht nicht hierarchisch eingeordnet sind. Je nach Prinzip der Lichterzeugung entsteht innerhalb des Systems Strahlung, die wegen ihrer Intensität oder spektralen Eigenschaften eine Gefahr für Menschen und die Umwelt darstellen kann. Durch geeignete Maßnahmen muss der Austritt dieser Strahlung aus dem System verhindert werden. Weiterhin soll eine Wartung und ein Austausch der Komponenten ermöglicht werden. Je nach

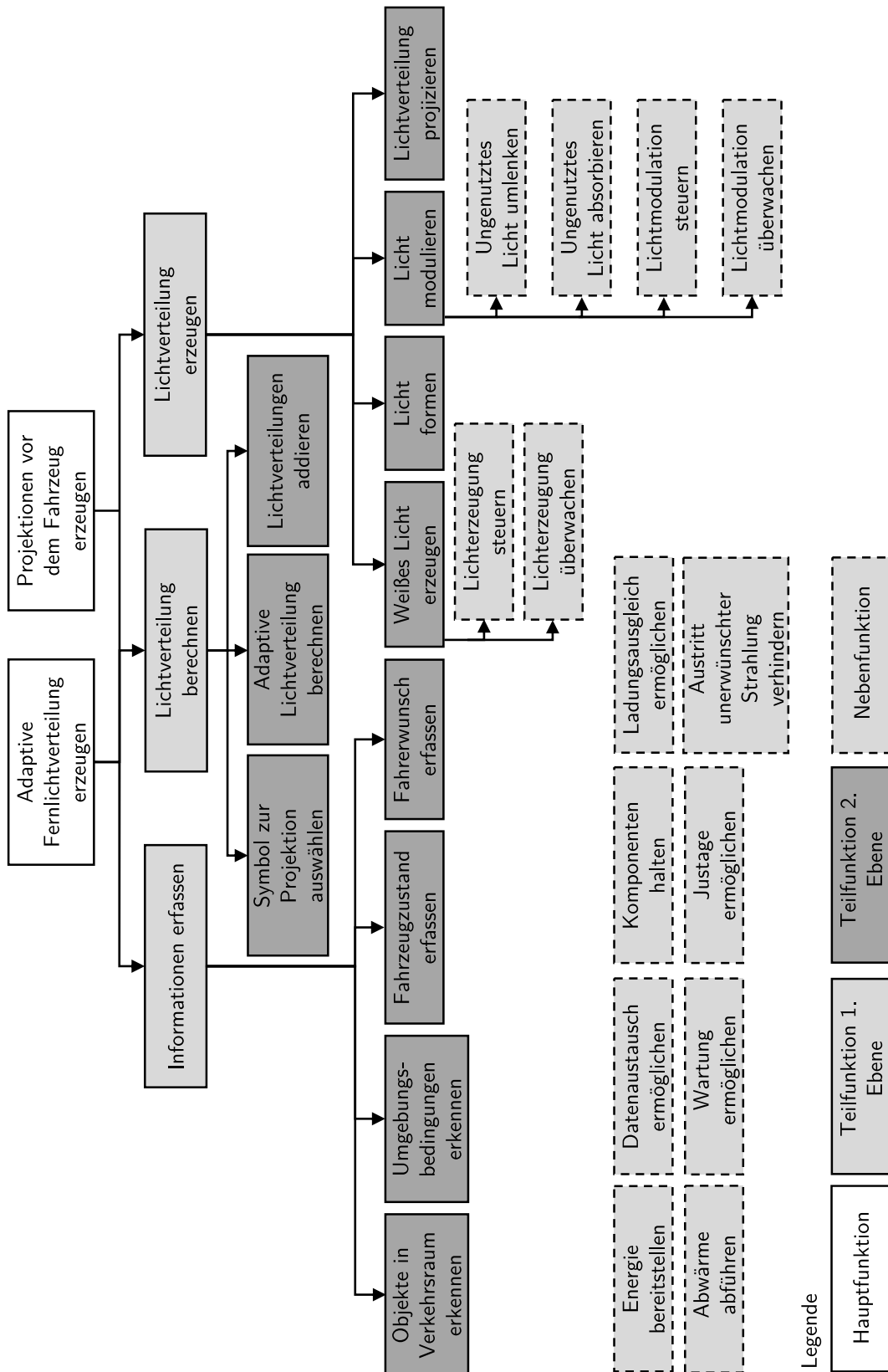


Abbildung 6.9: Funktionsstruktur mit Hauptfunktionen, Teilfunktionen der ersten und zweiten Ebene sowie Nebenfunktionen des hochauflösenden Forschungscheinwerfers

Prinzip der Lichterzeugung kann eine hohe Wärmelast in dem System entstehen, die entsprechend abzuführen ist. Die hohe Anzahl einzelner Pixel des ausgewählten aktiven Umformers erfordert die Möglichkeit das System präzise justieren zu können. Bezogen auf das Gesamtsystem müssen alle Komponenten mechanisch gehalten und ein Ladungsausgleich ermöglicht werden.

Im nächsten Arbeitsschritt werden Wirkprinzipien identifiziert und eine Wirkstruktur erarbeitet. Der Fokus liegt dabei auf den Teilfunktionen der ersten und zweiten Ebene. Bei der Auswahl der umzusetzenden Wirkprinzipien wird anschließend beachtet, dass auch die erforderlichen Nebenfunktionen umsetzbar sind.

6.3.3 Suche nach Wirkprinzipien und Lösungselementen für die Teilfunktionen

Die Suche nach Wirkprinzipien ist der erste Schritt, um die Funktionssicht auf das System zu verlassen und eine Produktstruktur zu erarbeiten. Häufig sind für die einzelnen Elemente der Funktionsstruktur bereits allgemeine Wirkprinzipien bekannt, die im weiteren Verlauf der Entwicklung zu angepassten Lösungselementen gestaltet werden. Betrachtet wird dabei die hierarchische Ebene der Teilfunktionen der ersten Ebene, da mit diesen die identifizierten wesentlichen Probleme gelöst werden müssen. Die Teilfunktion *Lichtverteilung erzeugen* wird detaillierter betrachtet und daher Wirkprinzipien für die Teilfunktionen der zweiten Ebene beschrieben (vgl. Abbildung 6.9).

Informationen erfassen

Um die Lichtfunktionen umzusetzen, sind Informationen über die Umgebung und den Fahrzeugzustand notwendig. Für die Datenerfassung der Umgebung kann vorhandene Fahrzeugsensorik wie die integrierte Frontkamera genutzt werden oder eine zusätzliche Kamera integriert werden. Der Fahrzeugzustand wird mit integrierten Sensoren durch das Fahrzeug erfasst. Daten zum Fahrzeugzustand wie die Geschwindigkeit, Lenkwinkel oder Bremspedalstellung können auf dem Fahrzeugbus gelesen oder durch nachträglich integrierte Sensoren erfasst werden.

Lichtverteilung berechnen

Für die Datenverarbeitung können Steuergeräte eingesetzt werden, die bezüglich der Rechen- und Speicherleistung seriennah sind. Alternativ kann ein leistungsstärkerer Computer für die Datenverarbeitung genutzt werden. Die Datenverarbeitung kann zentral im Fahrzeug für die

Sensordatenverarbeitung und für die Steuerung der Scheinwerfer erfolgen oder verteilt auf mehrere Steuergeräte direkt in oder an den Scheinwerfern. Um die Daten zu den Scheinwerfern zu übertragen, kann ein lokales Netzwerk, eine Medienschnittstelle oder eine serielle Schnittstelle (USB) genutzt werden. Der vorhandene Fahrzeugbus reicht bezüglich der Datenübertragungsrates nicht aus, um die hochauflösenden Scheinwerfer zu steuern.

Weißes Licht erzeugen

Für die Funktion *Lichtverteilung erzeugen* werden Wirkprinzipien für die einzelnen Teilfunktionen der zweiten Ebene beschrieben. Die Teilfunktion *Weißes Licht erzeugen* ist eine häufige Funktion optischer Systeme. Zur Bildmodulation ist in der Anforderungsliste die DMD-Technologie festgelegt. LEDs sind für die Beleuchtung eines DMDs besser geeignet als Laserdioden, da die Effizienz von LEDs höher ist und das Licht für die Modulation nicht kohärent oder polarisiert sein muss. Nachfolgend werden daher zwei Wirkprinzipien beschrieben, mit denen mit LEDs ein hoher Lichtstrom erreichbar ist.

Wirkprinzip 1 Der Lichtstrom, der auf den DMD gelenkt werden kann, ist durch die Étendue des DMDs begrenzt. Es ist daher vorteilhaft, eine oder mehrere weiße LEDs mit einer hohen Leuchtdichte zur Beleuchtung einzusetzen.

Wirkprinzip 2 Mit dem Wirkprinzip *Spektrale Überlagerung von LEDs* kann ein höherer Lichtstrom unter einem begrenzten Winkel auf eine ebenfalls begrenzte Fläche auftreffen als mit einer einzelnen Lichtquelle. Eine spektrale Überlagerung mehrerer Lichtquellen ist mit speziellen optischen Filtern möglich, die einen wellenlängenabhängigen Reflektions- und Transmissionsgrad aufweisen. Neben einem hohen Lichtstrom bietet dieser Ansatz die Möglichkeit, das Spektrum beziehungsweise die Farbe der Beleuchtung im Betrieb zu variieren [LEY17].

Licht formen

Mit der Teilfunktion *Licht formen* wird sichergestellt, dass möglichst viel Licht der Lichtquelle unter dem geforderten Winkel und der geforderten Intensitätsverteilung auf den Bildmodulator trifft. Allgemeine Wirkprinzipien für die passive Umformung von Licht sind in Unterabschnitt 2.2.3 beschrieben.

Wirkprinzip 3 Das in den meisten Anwendungen umgesetzte Wirkprinzip zur Beleuchtung eines DMD ist, diesen durch ein optisches System homogen zu beleuchten (Wirkprinzip 3). Mit Bezug auf die erkannten wesentlichen Probleme werden zwei weitere Wirkprinzipien beschrieben.

Wirkprinzip 4 Mit dem Wirkprinzip 4 *Inhomogene Beleuchtung* kann der Nutzungsgrad bei ansonsten gleichem Systemaufbau im Vergleich zu einer homogenen Beleuchtung erhöht werden. Dies gilt, solange vergleichbare inhomogene Lichtverteilungen im Verkehrsraum erzeugt werden. Günther wählt diesen Ansatz für den entwickelten Scheinwerfer mit DMD als Bildmodulator [GÜNT10]. Wilhelmy et al. patentieren das Konzept eines hochauflösenden Scheinwerfers, bei dem weißes Licht durch die Konversion mittels eines Leuchtstoffs erzeugt wird. Ein Anspruch des Patents ist, dass die Leuchtdichte auf dem Bildmodulator inhomogen ist [WILH15]. Grötsch et al. patentieren ebenfalls ein Konzept, mit dem der Bildmodulator inhomogen beleuchtet wird. Die Besonderheit des Wirkprinzips ist, dass eine Vielzahl von Leuchtdioden in einer speziellen Anordnung zusammen mit Laserdioden als Lichtquelle verwendet wird. Das Licht der Laserdioden wird dabei durch eine Leuchtstoffschicht teilweise spektral verändert, um weißes Licht zu erzeugen [GROE17].

Wirkprinzip 5 Der Nutzungsgrad von Lichtverteilungen einen großen Einfluss auf den Systemwirkungsgrad. Mit dem Wirkprinzip 5 *Inhomogen abbildend* kann der Nutzungsgrad gesteigert werden, indem die Elemente der Lichtquelle so angesteuert werden, dass bereits auf dem Bildmodulator eine örtlich angepasste Lichtintensität auftritt. Durch eine geeignete Anordnung der Abbilder der einzelnen Lichtquellen ist es möglich, mit dem Wirkprinzip eine Beleuchtung auf dem DMD zu erzielen, die eine höhere zentrale Beleuchtungsstärke aufweist als an den Rändern. Cortigiani et al. patentieren dieses Wirkprinzip und geben als weiteren Vorteil einen im Vergleich zu einer Lichtquelle ohne einzeln schaltbare Elemente höheren erreichbaren Kontrast an [CORT17]. Grötsch und Rothneicher patentieren eine ähnliche Erfindung, bei der die Lichtquelle aus mehreren LEDs und Laserdioden zusammengesetzt ist. Das Licht der Laserdioden wird dabei durch einen Leuchtstoff in weißes Licht konvertiert. Einer der Ansprüche ist, dass das Licht der Lichtquellen mit einer zum Rand abfallenden Intensität auf dem Bildmodulator abgebildet wird [GROE17].

Licht modulieren

Für die Teilfunktion *Licht modulieren* ist das Wirkprinzip DMD in der Anforderungsliste (vgl. Abbildung 6.7 in Abschnitt 6.2) festgelegt. Die Funktionsweise eines DMDs bedingt, dass ein Teil des Lichts der Lichtquelle ungenutzt bleibt und typischerweise absorbiert wird. Weiterhin wird durch den Kippwinkel der Mikrospiegel der Öffnungswinkel des beleuchtenden Strahlenbündels begrenzt.

Wirkprinzip 6 Mit Wirkprinzip 6 wird der unveränderte Einsatz eines DMDs zur Modulation des Lichts beschrieben.

Wirkprinzip 7 Mit einem DMD als Bildmodulator wird in einem typischen Systemaufbau das Licht ausgeschalteter oder gedimmter Pixel auf einen Absorber gelenkt. Stattdessen ist es möglich, dieses Licht für andere Zwecke, zum Beispiel zur Generation einer Grundlichtverteilung, zu nutzen. Das Wirkprinzip 7 *Nutzen des Absorberlichtstroms* ist in mehreren Patenten beschrieben [SEIT17, MIEM15, BLUM10], aber noch nicht in einem veröffentlichten Prototypen umgesetzt. Beachtet werden muss dabei, dass eine Wechselwirkung zwischen dem Nutzlicht und dem Absorberlicht besteht [KAUS06]. Das Wirkprinzip hat einen Einfluss auf den Nutzungsgrad, jedoch nicht auf die Umsetzung von inhomogenen Lichtverteilungen.

Wirkprinzip 8 Mit einem DMD als Bildmodulator ist der maximale Öffnungswinkel zur Beleuchtung in einer Richtung begrenzt. Dies ist notwendig, um das eintreffende und das reflektierte Strahlenbündel geometrisch voneinander zu trennen. In der Richtung, die senkrecht zu der Kippbewegung der Mikrospiegel orientiert ist, ist der maximale Öffnungswinkel hingegen nicht bedingt durch die geometrische Trennung der Strahlenbündel begrenzt. Typischerweise wird für diesen Öffnungswinkel der gleiche Winkel verwendet wie in der erstgenannten kritischen Richtung, um rotationssymmetrische optische Elemente verwenden zu können. Mit dem Wirkprinzip 8 *höherer Akzeptanzwinkel* ist es möglich, eine höhere Étendue des Bildmodulators zu nutzen. Damit kann ein höherer Lichtstrom von der Lichtquelle auf den Bildmodulator gelenkt werden. Das Wirkprinzip ist in einem Patent von Grötsch et al. beschrieben [GROE17].

Lichtverteilung projizieren

Um die auf dem Bildmodulator erzeugte Verteilung in den Verkehrsraum zu projizieren, ist eine abbildende Optik erforderlich. Die Projektionsoptik ist die letzte Komponente im Strahlengang, die einen Einfluss auf die Lichtverteilung hat. Es wird von einer klaren Abschlusscheibe des Scheinwerfers ausgegangen, durch die kein gezielter optischer Effekt erzeugt wird. Die Wirkprinzipien können anhand des Abbildungsmaßstabes unterschieden werden (Abbildung 6.10).

Wirkprinzip 9 Mit einer direkt abbildenden Projektionsoptik wird der DMD mit konstantem Abbildungsmaßstab in x- und y-Richtung in den Verkehrsraum projiziert. Es ist nicht möglich, Einfluss auf das Aspektverhältnis zu nehmen (Abbildung 6.10 a).

Wirkprinzip 10 Kauschke erläutert das Potenzial von Zylinderlinsen (Wirkprinzip *Anamorphe Projektionsoptik*), mit denen es möglich ist, einen unterschiedlichen Abbildungsmaß-

stab in zwei Richtungen zu erzielen. Damit kann das Seitenverhältnis einer typischen Lichtverteilung mit einem Bildmodulator erreicht werden, dessen Aspektverhältnis davon abweicht [KAUS06]. Günther und Bhakta setzen ebenfalls Zylinderlinsen ein, um den horizontalen Öffnungswinkel der Lichtverteilung aufzuweiten [GÜNT10, BHAK15] (Abbildung 6.10 b).

Wirkprinzip 11 Der Abbildungsmaßstab kann nicht nur in unterschiedlichen Richtungen variiert werden, sondern auch über die Bildhöhe. Das Wirkprinzip *Verzeichnende Projektionsoptik* basiert auf diesem Effekt, der in klassischen optischen Systemen als Abbildungsfehler vermieden wird. Mit diesem Ansatz können die Größe von Pixeln und die Beleuchtungsstärke gezielt manipuliert werden. Das Konzept einer Zylinderlinse mit nicht linearem Abbildungsmaßstab in einer Richtung ist in einem Patent von Rivero et al. beschrieben [RIVE16]. Mit diesem Wirkprinzip kann mit der Projektionsoptik der Nutzungsgrad des Systems für ähnliche Lichtverteilungen im Vergleich zu konventionellen Projektionsoptiken erhöht und das Apektverhältnis angepasst werden.

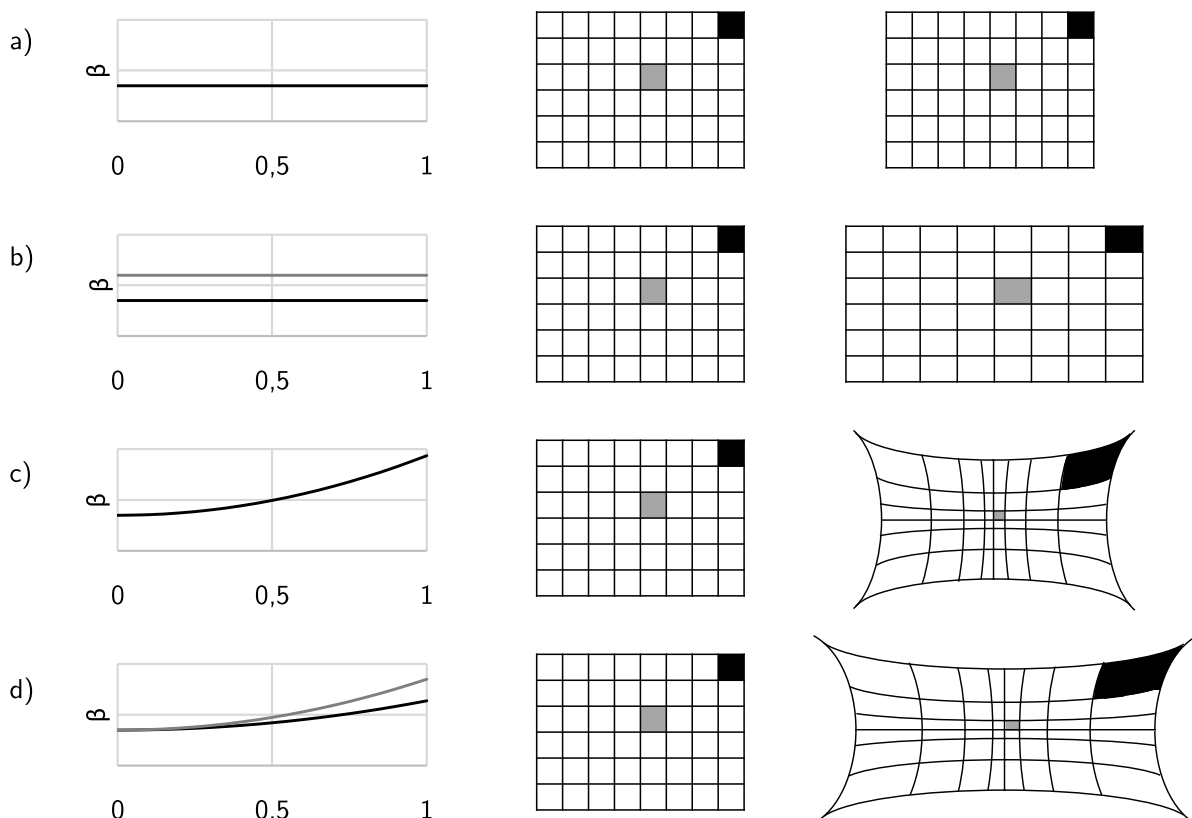


Abbildung 6.10: Wirkprinzipien der Projektionsoptik nach [WOLF16a, KNÖC18b]; Links: Änderung des Abbildungsmaßstabs über dem Abstand von der optischen Achse; Rechts: Schematische Darstellung der aus dem mittigen Raster resultierenden Abbildung mit dem jeweiligen Wirkprinzip

Das Ziel des veränderlichen Abbildungsmaßstabes ist es, eine homogen beleuchtete Fläche so abzubilden, dass eine inhomogene Abbildung dieser Fläche entsteht. Wie in Abbildung 6.10 c) ersichtlich ist, kann mit diesem Ansatz Lichtstrom von den Rändern der Lichtverteilung zur Mitte umverteilt werden, da der transportierte Lichtstrom mit der Pixelgröße korreliert. Im Zentrum der Verteilung entsteht ein runder Bereich hoher Beleuchtungsstärke. Das Aspektverhältnis kann in diesem Ansatz nicht unabhängig in x- und y-Richtung angepasst werden. In d) ist der Ansatz mit der höchsten Flexibilität gezeigt, bei dem die Änderung des Abbildungsmaßstabs in x- und y-Richtung unabhängig voneinander möglich ist. Die dargestellten Konzepte zur Variation der Abbildungsbedingungen der Projektionsoptik können genutzt werden, um den Nutzungsgrad für inhomogene Lichtverteilungen zu erhöhen.

Anhand der beschriebenen Wirkprinzipien und Lösungselemente wird die Wirkstruktur des Systems erarbeitet, die in Abbildung 6.11 dargestellt ist. Das Ziel dabei ist, die Relationen der Lösungselemente zueinander aufzuzeigen.

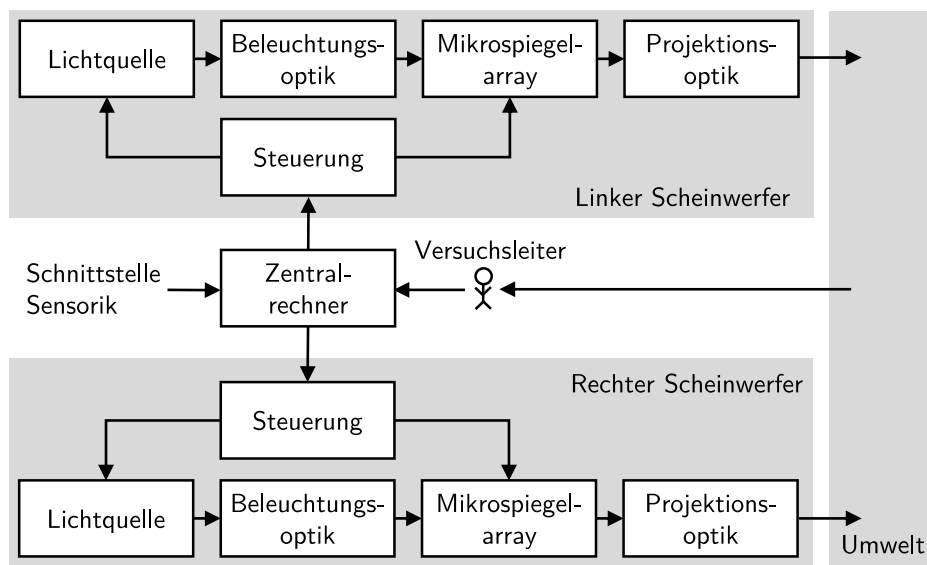


Abbildung 6.11: Wirkstruktur des Systems zur adaptiven Beleuchtung

Der Fokus des Anwendungsbeispiels liegt darauf, das technologische Potenzial der DMD-Technologie für Fahrzeugscheinwerfer zu untersuchen und ein System aufzubauen, mit dem Untersuchungen im Verkehrsraum durchführbar sind. Es wird daher kein Wirkprinzip zur Erfassung von Informationen über die Objekte im Verkehrsraum, die Umgebung und das Fahrzeug ausgewählt. Bei physiologischen Untersuchungen wird stattdessen ein Versuchsleiter eingesetzt, der die notwendigen Informationen zur Berechnung der Lichtverteilung manuell vorgibt. Um das System nachträglich weiter zu automatisieren, wird gefordert, dass Schnittstellen bereitgestellt werden, um Sensordaten zu nutzen.

Bei der Teilfunktion *Lichtverteilung berechnen* liegt der Fokus darauf, dem Versuchsleiter eine einfache Auswahl unterschiedlicher Lichtverteilungen und Symbole zur Projektion zu ermöglichen. Es wird daher ein Zentralrechner zur Datenverarbeitung und Berechnung der Lichtverteilungen eingesetzt, den der Versuchsleiter während Versuchsfahrten bedienen kann. Die Daten der Lichtverteilung werden anschließend an beide Scheinwerfer übertragen, in denen ein Steuergerät die Lichtquelle und das Mikrospiegelarray steuert.

Die in Unterabschnitt 6.3.1 aufgezeigten identifizierten Probleme bei der Entwicklung betreffen die Lösungselemente der Teilfunktion *Lichtverteilung erzeugen*. Die Auswahl der Wirkprinzipien für diese Teilfunktion erfolgt im nächsten Arbeitsschritt mit der Gestaltung der optischen Elemente.

6.3.4 Konkretisieren von prinzipiellen Lösungsvarianten

Die in Unterabschnitt 6.3.1 identifizierten wesentlichen Probleme beziehen sich auf die Teilfunktion *Lichtverteilung erzeugen*. Da die für diese Teilfunktion eingesetzten Komponenten stark voneinander abhängig sind, müssen die Lösungsvarianten soweit konkretisiert werden, dass eine Bewertung und Auswahl möglich ist. Nach der Bewertung und der Auswahl einer Lösungsvariante werden darauf basierend Lösungselemente für die anderen Teilfunktionen ausgewählt und ein Lösungskonzept für das Gesamtsystem erarbeitet. In Tabelle 6.1 ist dargestellt, mit welchen Wirkprinzipien für die Teilfunktion *Lichtverteilung erzeugen* die wesentlichen Probleme gelöst werden können. Bevor konkrete Lösungsvarianten abgeleitet werden, erfolgt die Bewertung der Umsetzbarkeit der Wirkprinzipien für den Prototypen des adaptiven Scheinwerfers.

Wirkprinzip 1 Das Licht einer einzelnen LED kann mit einem hohen Wirkungsgrad auf den DMD gelenkt werden. Die örtliche Überlagerung mehrerer dieser LEDs zu einer Lichtquelle mit hohem Lichtstrom ist ebenfalls möglich. Die Umsetzbarkeit ist im Vergleich zu Wirkprinzip 2 einfacher. Wieviele LEDs zu einer Lichtquelle kombiniert werden sollten, hängt von der Étendue von DMD und Lichtquelle ab.

Wirkprinzip 2 Am IPeG wird ein Labormuster für Wirkprinzip 2 aufgebaut [LEY17]. Dabei werden die Herausforderungen der korrekten Justierung der Lichtquellen zueinander und des großen Bauraums deutlich. Die Umsetzbarkeit für den Prototypen des hochauflösenden Scheinwerfers wird daher geringer als für Wirkprinzip 1 bewertet.

Wirkprinzip 3 Die homogene Beleuchtung des DMDs stellt den einfachsten Fall für die Funktion *Licht formen* dar. Bedingt durch die thermische Belastbarkeit des DMDs kann bei

Tabelle 6.1: Mittlere Spalten: Einfluss der Wirkprinzipien auf die wesentlichen Probleme bei der Entwicklung; Rechte Spalte: Bewertung der Umsetzbarkeit: (+) Einfache Umsetzung, (o) Umsetzung mit mittlerem Aufwand, (-) Umsetzung mit hohem Aufwand

		Identifizierte wesentliche Probleme					Bewertung der Umsetzbarkeit in Prototyp
		Lichtverteilung erzeugen	Wirkprinzip	Geringer Nutzungsgrad	Begrenzter Lichtstrom	Aspektverhältnis	
Teilfunktionen 2. Ebene	Weißes Licht erzeugen	1	Weißes LED mit hoher Leuchtdichte		x		+
		2	Spektrale Überlagerung von LEDs		x		o
	Licht formen	3	Homogene Beleuchtung				+
		4	Inhomogene Beleuchtung	x			o
		5	Inhomogene Abbildung	x			-
	Licht modulieren	6	DMD				+
		7	DMD, Nutzen des Absorberlichtstroms	x			-
		8	DMD, Höherer Akzeptanzwinkel		x		+
	Lichtverteilung projizieren	9	Direkt abbildende Projektionsoptik				+
		10	Anamorphe Projektionsoptik			x	o
		11	Verzeichnende Projektionsoptik	x		x	o

einem gleichmäßigen Wärmeeintrag der höchste Lichtstrom übertragen werden. Zu beachten ist, dass durch die rechteckige Geometrie des DMDs bei dem Einsatz von rotationssymmetrischen Linsen nicht der gesamte Lichtstrom auf die aktive Fläche des DMDs treffen kann. Ein Teil des Lichts bleibt damit ungenutzt.

Wirkprinzip 4 Das Wirkprinzip *Inhomogene Beleuchtung* wird an einem Prototypen eines hochauflösenden Scheinwerfers umgesetzt, der ebenfalls am IPeG im Rahmen eines Forschungsprojekts aufgebaut wird. Als Bildmodulator wird ein LCoS (Liquid Crystal on Silicon) genutzt, dessen Funktionsprinzip dem von LCDs ähnelt. Als Lichtquelle werden mehrere Laserdioden eingesetzt. Da die Anforderungen bezüglich des Öffnungswinkels des eingehenden Strahlenbündels zwischen LCoS und DMD vergleichbar sind, können die Erkenntnisse auf den in dieser Arbeit zu entwickelnden Prototypen übertragen werden. Das Licht der Lichtquellen wird über einen speziellen Homogenisator, der über Einzel-linsen mit unterschiedlicher Brennweite verfügt, auf dem Bildmodulator abgebildet. Das

Ergebnis der Simulation zeigt, dass mit einer nicht-verzeichnenden Projektionsoptik die an den LCoS Prototypen gestellten Anforderungen erfüllt sind und der Nutzungsgrad des Systems von etwa 11 % auf 39 % gesteigert werden kann [L119]. Zu beachten ist, dass Bildmodulatoren typischerweise eine auf die Fläche bezogene konstante thermische Belastbarkeit aufweisen. Das führt dazu, dass die Grenze der thermischen Belastbarkeit mit einer inhomogenen Beleuchtung bereits bei geringerem Lichtstrom erreicht wird als bei einer homogenen Beleuchtung. Mit diesem Prinzip kann daher nicht die maximale Leistung des Bildmodulators ausgenutzt werden kann. Die Umsetzbarkeit des Wirkprinzips wird im Vergleich zu einer homogenen Beleuchtung als schwieriger bewertet, da die Auslegung und Fertigung des speziellen Homogenisator herausfordernd ist.

Wirkprinzip 5 Das Wirkprinzip *Inhomogene Abbildung* wird am IPeG durch optische Simulationen untersucht. Es wird ein DMD als Bildmodulator in einem telezentrischen Systemaufbau eingesetzt, wobei die Trennung des einfallenden und reflektierten Strahlenbündels mit einem Prisma realisiert ist. Gegenüber einer homogenen Abbildung ist ein Vorteil bezüglich des Nutzungsgrads theoretisch gegeben, der bisher nicht an einem praktischen Beispiel gezeigt werden konnte. Eine Herausforderung dabei ist, dass der optische Wirkungsgrad bei der abbildenden Beleuchtung geringer ist als bei einer nicht abbildenden Beleuchtung des Bildmodulators [LEY19b]. Die Umsetzbarkeit des Wirkprinzips 5 wird daher im Vergleich zu Wirkprinzip 4 als schwieriger bewertet.

Wirkprinzip 6 Mit dem Wirkprinzip *DMD* wird der Bildmodulator wie üblich eingesetzt. Der ungenutzte Lichtstrom wird auf einen Absorber gelenkt. Der Öffnungswinkel des einfallenden Lichtbündels entspricht dem vollen Kippwinkel der Mikrospiegel. Die Umsetzbarkeit wird als einfach bewertet.

Wirkprinzip 7 Das Wirkprinzip *Nutzung des Absorberlichtstroms* wird nicht detaillierter untersucht, da der konstruktive Aufwand als hoch eingeschätzt wird. Das Prinzip ist auch in veröffentlichten Arbeiten bisher noch nicht in Prototypen umgesetzt worden. Die Umsetzbarkeit wird als schwierig bewertet.

Wirkprinzip 8 Für das Wirkprinzip *DMD, höherer Akzeptanzwinkel* wird der Einfluss auf den maximalen Lichtstrom rechnerisch bestimmt. Unter der Annahme der vereinfachten Berechnung der Étendue des Bildmodulators nach Gleichung 6.4 mit einem zur Kipprichtung der Spiegel senkrechten Öffnungswinkel von $\varphi_{Kipp} = 17^\circ$ statt 12° ergibt sich eine Erhöhung des maximalen Lichtstroms von 41 %, wobei die maximale thermische Belastbarkeit des Bildmodulators beachtet werden muss. Die Erhöhung des Akzeptanzwinkels

hat aufgrund der Funktionsweise des DMDs einen negativen Einfluss auf das maximale Kontrastverhältnis. Die Umsetzbarkeit wird als einfach bewertet.

Wirkprinzip 9 Mit dem Wirkprinzip *Direkt abbildende Projektionsoptik* entspricht die projizierte Lichtverteilung genau der Intensitätsverteilung des Bildmodulators. Der Abbildungsmaßstab ist konstant über der Bildhöhe und identisch in x- und y-Richtung. Das Wirkprinzip ist im Vergleich zu den weiteren Prinzipien für die Teilfunktion *Licht projizieren* einfach umzusetzen.

Wirkprinzip 10 Mit dem Wirkprinzip *Anamorphe Projektionsoptik* kann die Abbildung des Bildmodulators gestreckt oder gestaucht werden, damit das Aspektverhältnis der Lichtverteilung den Anforderungen entspricht. Das Wirkprinzip wird am IPeG in einem Projekt zu einem Fahrzeugscheinwerfer mit Mikropixel LED als Lichtquelle realisiert [HELD20]. Die Umsetzbarkeit ist aufwendiger als bei einer direkt abbildenden Projektionsoptik.

Wirkprinzip 11 Das Wirkprinzip *Verzeichnende Projektionsoptik* basiert auf der gezielten Verzeichnung der Lichtverteilung, um die Beleuchtungsstärke in der Mitte deutlich zu erhöhen und gleichzeitig die Größe der Pixel in der Mitte im Vergleich zu den Rändern zu reduzieren. Im Rahmen des als Anwendungsbeispiel beschriebenen Projektes wird basierend auf diesem Ansatz ein Funktionsmuster realisiert. Die prinzipielle Machbarkeit des Wirkprinzips einer radial verzeichnenden Optik, das auch am IPeG patentiert wurde [WOLF17b], kann damit gezeigt werden [PFUL17]. Durch die Umverteilung des Lichts durch die Projektionsoptik kann der Nutzungsgrad von Fernlichtverteilungen erhöht werden. Außerdem ist es möglich, das Aspektverhältnis der Lichtverteilung entsprechend den Anforderungen anzupassen. Der Aufwand zur Simulation und Fertigung einer verzeichnenden Projektionsoptik hängt von der Stärke der zu erzielenden Verzeichnung ab. Die Umsetzbarkeit im Vergleich zu einer direkt abbildenden Projektionsoptik wird als schwieriger bewertet.

Basierend auf dem Einfluss der vorgestellten Wirkprinzipien auf die wesentlichen Probleme und der Bewertung der Umsetzbarkeit werden nachfolgend Lösungsvarianten für die Teilfunktion *Lichtverteilung erzeugen* erarbeitet. Die Auswahl von Lösungselementen für die weiteren Teilfunktionen ist davon abhängig und erfolgt im nächsten Arbeitsschritt.

Lösungsvariante A

Der Fokus der Lösungsvariante A liegt darauf, Lösungselemente zu nutzen, die bezüglich der Betriebstemperaturen in Fahrzeugen prinzipiell einsetzbar sind. Mit dem Prototypen soll es möglich sein, adaptive Lichtverteilungen und Projektionen vor dem Fahrzeug zu erzeugen.

Die Lichtquelle braucht daher keine unterschiedlichen Farben erzeugen, sondern nur weißes Licht. Da zudem die Umsetzbarkeit von Wirkprinzip 1 *Weißer LED mit hoher Leuchtdichte* einfacher als von Wirkprinzip 2 *Spektrale Überlagerung von LEDs* ist, werden als Lichtquelle weiße LEDs eingesetzt. Zum Zeitpunkt der Entwicklung steht mit der LED OSRAM BOOST HL eine Lichtquelle zur Verfügung, die bezogen auf die Emissionsfläche einen sehr hohen Lichtstrom von bis zu 949 lm/mm^2 emittiert [OSRA19]. Der Lichtstrom, der tatsächlich auf den DMD gelenkt werden kann, ist von der Fläche und dem Akzeptanzwinkel des ausgewählten DMDs abhängig. In Tabelle 6.2 sind die Eigenschaften von drei DMDs gegenüber gestellt. Zum Zeitpunkt der Entwicklung sind zwei DMDs (DLP5530 und DLP3030) verfügbar, die bezüglich der Betriebstemperatur in Fahrzeugen eingesetzt werden können. Das Aspektverhältnis des größeren DLP5530 beträgt 2:1. Damit ist es im Vergleich zu den anderen DMDs einfacher, das notwendige Aspektverhältnis von 3:1 zu erreichen. Der Kippwinkel der drei DMDs ist identisch. Durch eine spezielle Anordnung der Spiegel entspricht die native Auflösung nicht dem Seitenverhältnis der aktiven Fläche. Die Anzahl an Pixeln ist bei allen DMDs ausreichend, um die geforderte Auflösung von $0,1^\circ$ (Anforderung 1.6) im gesamten Bereich der Lichtverteilung (Anforderung 1.2) zu realisieren. In Tabelle 6.2 ist der maximale Lichtstrom angegeben, der basierend auf den folgenden Annahmen erreichbar ist:

- Der Wirkungsgrad der DMDs beträgt 66 % [TEXA18b]. Der Wirkungsgrad wird weiterhin durch die Verkippung des DMDs zur Beleuchtung um den Faktor $\cos(24^\circ)$ reduziert. Damit der DMD homogen ausgeleuchtet werden kann, wird in realen Anwendungen ein etwas größerer Bereich beleuchtet als die aktive Fläche des DMDs. Dieser Einfluss wird mit einem Wirkungsgrad von 90 % berücksichtigt. Insgesamt beträgt der Wirkungsgrad des Modulators damit $\eta_M = 54 \%$.
- Durch die Beleuchtungsoptik wird von der Lichtquelle ein Halbwinkel von $\varepsilon = 60^\circ$ eingefangen. Durch einen höheren Winkel wird nur die Anzahl der notwendigen LEDs verändert, der mögliche maximale Lichtstrom bleibt aufgrund der Étendue des DMD und der Lichtquelle konstant. Die Lichtquelle wird als Lambertstrahler angenommen. Der unter dem angegebenen Winkel eingefangene Lichtstrom kann dann mit Formel 2.17 bestimmt werden.
- Die Étendue des DMDs und der LED wird mit der vereinfachten Formel 2.16 berechnet.
- Der Wirkungsgrad der Beleuchtungsoptik beträgt mit unbeschichteten Linsen 90 %.
- Der Wirkungsgrad der Projektionsoptik beträgt mit unbeschichteten Linsen 90 %.
- Weitere Verluste, beispielsweise durch die Abschlusscheibe, werden durch einen zusätzlichen Wirkungsgrad von 85 % berücksichtigt.

- Der Wirkungsgrad des Systems wird mit Formel 2.6 bestimmt und beträgt mit den zuvor genannten Annahmen 37 %.

Mit dem DLP3030 kann der geforderte Lichtstrom von 1400 lm (Anforderung 1.4) nicht erreicht werden. Bei dem DLP5530 ergibt die theoretische Analyse, dass der Lichtstrom ausreichend ist, um eine Fernlichtverteilung umzusetzen. Mit dem DLP7000 kann der geforderte Lichtstrom ebenfalls erreicht werden, allerdings ist der spezifizierte Bereich der Betriebstemperatur deutlich kleiner. Für Lösungsvariante A wird daher der DLP5530 als Bildmodulator ausgewählt. Der Lichtstrom ist mit sechs der ausgewählten LEDs erreichbar. Um die geforderte Beleuchtungsstärke in der Mitte der Lichtverteilung zu erreichen, wird für die Beleuchtungsoptik das Wirkprinzip *Inhomogene Beleuchtung* eingesetzt. Bei diesem Wirkprinzip ist zu prüfen, ob die maximale thermische Belastbarkeit des DMDs überschritten wird. Um das Aspektverhältnis des DMDs von 2:1 auf das geforderte Verhältnis der Lichtverteilung von 3:1 anzupassen, wird eine anamorphe Projektionsoptik vorgesehen (Wirkprinzip 10).

Tabelle 6.2: Übersicht relevanter Eigenschaften von DMDs und erreichbarer Lichtstrom einer adaptiven Lichtverteilung; Werte der DMDs nach [TEXA18b, TEXA18a, TEXA15]

Eigenschaft	DLP5530	DLP3030	DLP7000
Auflösung	1152 × 1152 (diamond)	684 × 608 (diamond)	1024 × 768
Aspektverhältnis	2:1	16:9	4:3
Fläche	77,5 mm ²	24,3 mm ²	147,2 mm ²
Kippwinkel der Mikrospiegel	±12°	±12°	±12°
Betriebstemperatur	-40°C – 105°C	-40°C – 105°C	10°C – 65°C
Max. Lichtstrom mit OSRAM Boost LED	1596 lm	372 lm	2256 lm

Lösungsvariante B

Bei Lösungsvariante B liegt der Fokus darauf, einen hohen Lichtstrom bereitzustellen, um die Anforderung an die Beleuchtungsstärke im Zentrum der Lichtverteilung zu erreichen. Die Betriebstemperatur wird nachrangig betrachtet. Als Lichtquelle wird wie bei Projektoren üblich eine Gasentladungslampe vorgesehen, mit der ein höherer Lichtstrom als mit LEDs erwartet wird. Um eine gleichmäßige thermische Belastung des DMDs und damit einen hohen Lichtstrom des Systems zu erreichen, wird eine homogene Beleuchtung des DMDs angestrebt. Um die Anforderung an die zentrale Beleuchtungsstärke von 150 lx in 25 m mit einer direkt abbildenden Projektionsoptik zu erreichen, ist ein Lichtstrom des Systems von etwa 23.000 lm erforderlich. Für Fernlichtverteilungen liegt der Nutzungsgrad bei diesem Ansatz wie zuvor analysiert bei deutlich unter 10 %. Lichtquellen, DMDs und Optiken sind für diese Leistungsklasse verfügbar, allerdings übersteigt die resultierende Systemgröße den verfügbaren Bauraum, da typischerweise drei DMDs eingesetzt werden müssen. Das in der Anforderungsliste spezifizierte Bauvolumen beträgt $0,0135 \text{ m}^3$ (Anforderung 2.3). Ein exemplarisch ausgewähltes System emittiert einen Lichtstrom von bis zu 28.000 lm und weist ein Bauvolumen von $0,397 \text{ m}^3$ [BARC19] auf, was eine Integration in den vorgesehenen Bauraum unmöglich macht.

Um die geforderte Lichtverteilung aus Abbildung 6.2 mit einem homogen beleuchteten DMD zu erzeugen, wird das Potenzial einer verzeichnenden Projektionsoptik untersucht. Nachfolgend wird analysiert, welcher Lichtstrom der Lichtquelle notwendig ist, um die geforderte Lichtverteilung umsetzen zu können. Für die Projektionsoptik sollen radial symmetrische Linsen eingesetzt werden, da diese einfacher ausgelegt und gefertigt werden können als Linsen mit anderen Geometrien. In Abbildung 6.12 ist die notwendige Beleuchtungsstärkeverteilung der Projektionsoptik gezeigt, die sich aus der geforderten Lichtverteilung ergibt. Der Lichtstrom wird bestimmt, indem der angegebene Winkel in eine Position auf einer virtuellen Wand umgerechnet wird. Durch Drehung der dargestellten Verteilung um 360° um die vertikale Achse entsteht eine Fläche. Durch Integration des Volumens unter dieser Fläche wird der Lichtstrom zu 3909 lm bestimmt. Der Nutzungsgrad für die geforderte Lichtverteilung beträgt damit etwa 36 %. Es ist zu erwarten, dass mit einer Projektionsoptik, bei der zusätzlich anamorphe Elemente zum Einsatz kommen, der Nutzungsgrad weiter gesteigert werden kann.

Das Wirkprinzip der verzeichnenden Projektionsoptik geht über den Stand der Technik hinaus, weshalb zur Absicherung der Ablauf zur Gestaltung (vgl. Abbildung 5.9 in Unterabschnitt 5.2.4) vollständig durchgeführt und ein physikalisches Modell realisiert wird. Der optische Entwurf wird an dieser Stelle nicht detailliert ausgeführt. Als Ergebnis der Untersuchungen mit dem physikalischen Modell bzw. Labormuster wird festgehalten, dass das Wirkprinzip einer radial

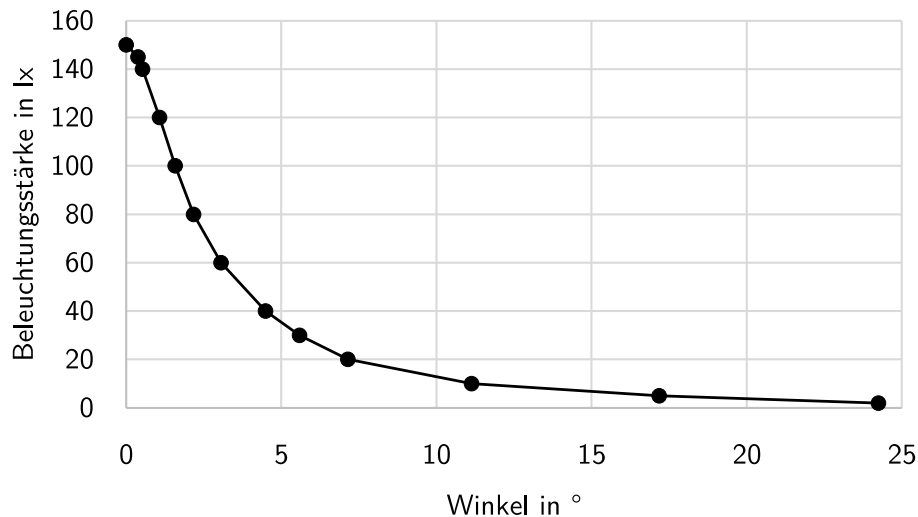


Abbildung 6.12: Geforderte Beleuchtungsstärkeverteilung der verzeichnenden Projektionsoptik
verzeichnenden Projektionsoptik geeignet ist, um inhomogene Lichtverteilungen mit hohem Nutzungsgrad umzusetzen. Das Wirkprinzip ist als Patent veröffentlicht [WOLF17b].

Wenn möglich, werden für den Prototypen verfügbare Komponenten eingesetzt, um eine hohe Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Als Lichtquelle und dazu passende homogen beleuchtende Optik werden daher Komponenten eines Video-Projektors genutzt. Die Auslegung der Projektionsoptik ist für ein System mit telezentrischem Aufbau einfacher als für einen Projektor mit nicht-telezentrischer Architektur. Es werden daher Komponenten eines Projektors genutzt, der einen telezentrischen Aufbau aufweist. Aufgrund des laut Datenblatt erreichbaren Lichtstroms von 6000 lm wird der Projektor Optoma X605 ausgewählt, in dem als Lichtquelle eine OSRAM P-VIP 330 Gasentladungslampe eingesetzt ist [OPTO15]. Die Trennung zwischen den Lichtbündeln, die auf den DMD treffen und von diesem reflektiert werden, erfolgt durch ein Prisma. Eine Vermessung der Lichtquelle mit einer Ulbricht-Kugel ergibt einen Lichtstrom von etwa 20.900 lm. Es wird somit davon ausgegangen, dass die Anforderungen bezüglich der Beleuchtungsstärke und des Lichtstroms mit den ausgewählten Komponenten erreicht werden können. In dem ausgewählten Projektor wird der DLP7000 eingesetzt. Durch die Elektronik des Projektors werden Algorithmen auf die Eingangsbilder angewendet, welche die projizierten Bilder für Videodarstellungen vorteilhaft verändern. Dies ist für den Prototypen unerwünscht, weshalb ein Entwicklungsboard ausgewählt wird, mit dem über eine dynamische Programmbibliothek (DLL, Dynamic Link Library) eine direkte Steuerung des DMDs möglich ist. Das ausgewählte Entwicklungsboard enthält ebenfalls den DLP7000 [VIAL].

6.3.5 Bewerten und Auswählen

In Tabelle 6.3 sind die beiden erarbeiteten Lösungsvarianten zusammengefasst. Der Fokus der Lösungsvariante A liegt darauf, einen Prototypen eines adaptiven Scheinwerfers zu entwickeln, bei dem die Lichtquelle und der DMD die Anforderungen für einen Serieneinsatz in Fahrzeugen prinzipiell erfüllen. Zur Umsetzung der Lösungsvariante sind mehrere Neuentwicklungen erforderlich, beispielsweise der Lichtquelle und der Beleuchtungsoptik. Ley analysiert ein ähnliches Konzept einer Lichtquelle und Beleuchtungsoptik detailliert. Die in dieser Arbeit in Abschnitt 2.3 vorgestellten Vorgehensweisen zur Gestaltung optischer Systeme können dafür nicht unverändert angewandt werden, weshalb Ley eine spezielle Vorgehensweise dafür entwickelt [LEY19a].

Tabelle 6.3: Lösungsvarianten

Teilfunktionen 2. Ebene	Lösungsvariante mit Wirkprinzipien	
	A	B
Weißes Licht erzeugen	Räumliche Überlagerung von 6 weißen LEDs (OSRAM BOOST HL)	Gasentladungslampe OSRAM P-VIP 330
Licht formen	Inhomogen beleuchtend	Homogen beleuchtend
Licht modulieren	DLP5530	DLP7000
Lichtverteilung projizieren	Anamorphe Projektionsoptik	Verzeichnende Projektionsoptik

Mit Lösungsvariante B wird das Ziel verfolgt, einen Prototypen eines hochauflösenden Scheinwerfers zu realisieren, der in ein Versuchsfahrzeug integriert werden kann. Durch den Einsatz einer leistungsstarken Lichtquelle wird sichergestellt, dass Lichtverteilungen mit hoher Beleuchtungsstärke erzeugt werden können. Durch den Aufbau eines Musters einer verzeichnenden Projektionsoptik kann die prinzipielle Eignung des Ansatzes gezeigt werden. Um sicherzustellen, dass die geforderten Lichtfunktionen erzeugt werden können, wird für die weitere Realisierung und Fahrzeugintegration Lösungsvariante B ausgewählt.

6.3.6 Festlegen des domänenübergreifenden Lösungskonzepts

Die ausgewählte Lösungsvariante bezieht sich auf die Teilfunktion *Lichtverteilung erzeugen*. In diesem Abschnitt werden Lösungselemente für der weiteren Teilfunktionen der Funktionsstruktur (Abbildung 6.9 in Unterabschnitt 6.3.2) ausgewählt und zu dem domänenübergreifenden Lösungskonzept zusammengestellt. In Abbildung 6.13 ist das Lösungskonzept des adaptiven Scheinwerfers bezüglich der Energie-, Signal- und Stoffflüsse dargestellt. Zur besseren Übersicht ist nur einer der beiden Scheinwerfer gezeigt. Das Licht der Lichtquelle (OSRAM P-VIP 330) wird durch die Beleuchtungsoptik auf den DMD (DLP7000) gelenkt und anschließend durch die Projektionsoptik in den Verkehrsraum abgebildet. Die Datenanbindung des DMD-Steuergeräts (Vialux Entwicklungsboard Hi-Speed) mit dem Zentralrechner erfolgt per USB.

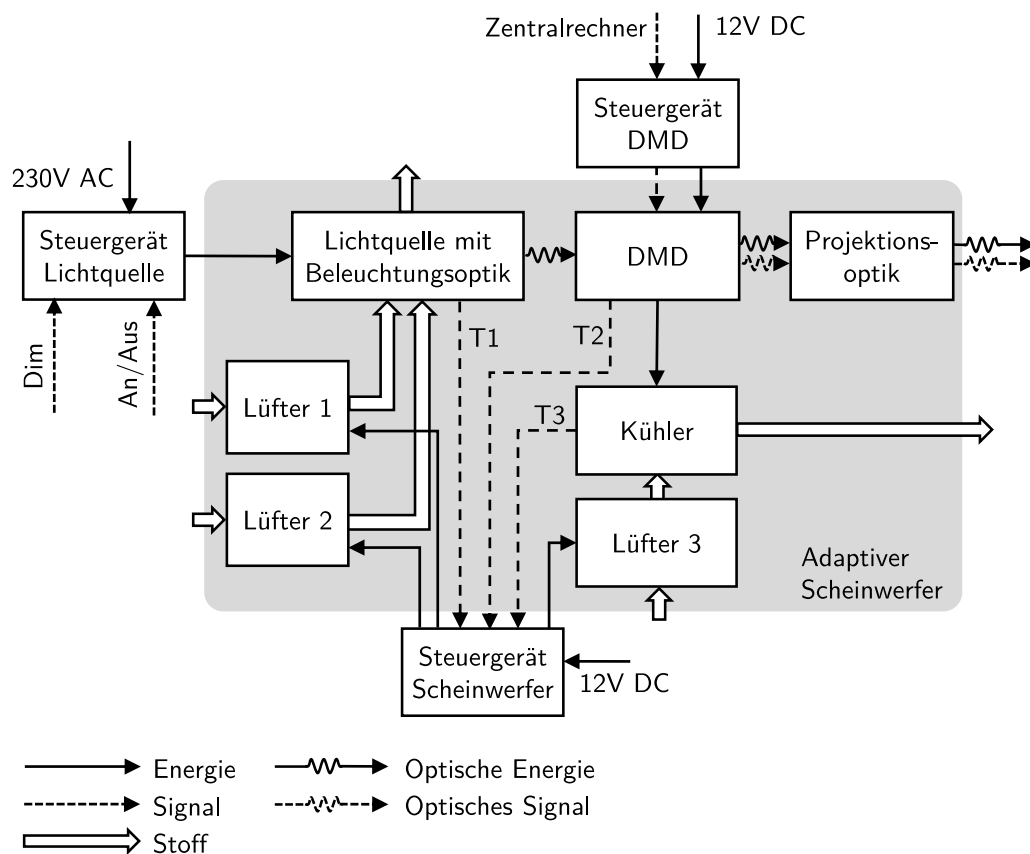


Abbildung 6.13: Lösungskonzept des adaptiven Scheinwerfers

Das Vorsteuergerät der Lichtquelle (OSRAM PT-VIP) wird mit 230 V Wechselspannung (AC) betrieben. Die Lichtquelle kann durch den Fahrer und den Versuchsleiter während der Fahrt geschaltet (An/Aus) und gedimmt (Dim) werden. Dies ist erforderlich, um auf Fehlfunktionen des Systems reagieren zu können. Nicht dargestellt sind zusätzliche konventionelle Scheinwerfer, die bei einem Ausfall der adaptiven Scheinwerfer ebenfalls durch den Fahrer und den Versuchsleiter während der Fahrt geschaltet werden können. Der adaptive Scheinwerfer ent-

hält drei Temperaturfühler (T1, T2, T3) sowie drei Lüfter, um die Wärme an die Umgebung abzuführen. Ein Großteil der Wärmelast entsteht durch das Prinzip der Lichterzeugung bei der Lichtquelle. Um die maximale Betriebstemperatur des DMDs nicht zu überschreiten, ist am DMD eine aktive Kühlung mit Lüfter erforderlich. Die Luftströme sind in der Abbildung idealisiert als Stoffflüsse eingezeichnet. Das DMD-Steuergerät sowie das Scheinwerfersteuergerät benötigen 12V Gleichspannung (DC). Die Energieversorgung erfolgt durch von der Fahrzeugbatterie unabhängige Batterien, um auch bei Stillstand des Motors das System betreiben zu können. Außerdem kommen unabhängige Batterien zum Einsatz, damit ein Fehlerfall des Scheinwerfersystems keinen Einfluss auf die Funktion des gesamten Fahrzeugs hat. Das Vorsteuergerät der Lichtquelle und die Steuergeräte für den DMD und den Scheinwerfer können innerhalb oder außerhalb des Scheinwerfergehäuses positioniert werden. Die Entscheidungen dafür erfolgen bei der Systemintegration abhängig von dem tatsächlich verfügbaren Bauraum.

Neben den Energie-, Stoff- und Signalflüssen muss weiterhin die geometrische Anordnung der Komponenten zueinander konzipiert werden. Dazu gehören auch mechanische Schnittstellen mit dem übergeordneten System, das in diesem Fall das Scheinwerfergehäuse darstellt. In Abbildung 6.14 ist die geometrische Anordnung der Komponenten dargestellt, deren Position zueinander durch den optischen Energiefluss bzw. den optischen Signalfluss festgelegt ist.

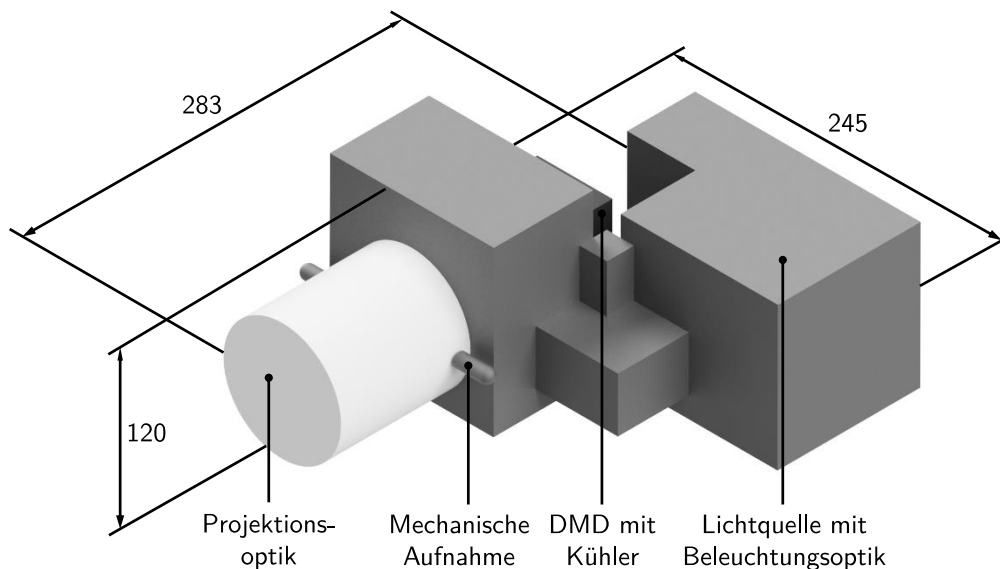


Abbildung 6.14: Geometrische Darstellung der Lösungselemente mit Hauptabmessungen

Weitere Komponenten wie Lüfter und Steuergeräte können flexibler als die optischen Komponenten positioniert werden. Die Lichtquelle mit Beleuchtungsoptik ist eine Standardkomponente eines Projektors und weist eine mechanische Schnittstelle zur Projektionsoptik auf, die weiterverwendet wird. Mit der Schnittstelle kann der DMD transversal in x- und y-Richtung verschoben werden. Damit können bei der Inbetriebnahme des Systems Fertigungs- und Mon-

tageungenaugigkeiten der Projektionsoptik teilweise kompensiert werden. Um unterschiedliche Beladungszustände des Versuchsfahrzeugs auszugleichen, wird ein manueller Ladungsausgleich gefordert, wie er auch bei konventionellen Scheinwerfern üblich ist. Dafür werden an den in Abbildung 6.14 dargestellten mechanischen Aufnahmen zwei Kugelgelenke vorgesehen. Die Position ist dabei so gewählt, dass sich Drehachse des Systems und optische Achse der Projektionsoptik schneiden und die Drehachse möglichst nah am DMD liegt. Dies führt dazu, dass die mittlere Achse des DMDs in Relation zu dem Fahrzeug nicht verschoben wird. An einem dritten Punkt an der starren Beleuchtungsoptik, der in der Abbildung nicht dargestellt ist, wird eine Verschiebung ermöglicht, um den Ladungsausgleich manuell durchführen zu können. Nicht dargestellt sind die drei Lüfter sowie die Steuergeräte, da die Positionierung dieser Komponenten flexibler erfolgen kann als die Positionierung der optischen Elemente. Die Anforderungen bezüglich der Hauptabmessungen des Systems werden erfüllt (Anforderung 2.3).

Im Prozess wird an dieser Stelle empfohlen, Subsysteme zu definieren, bei denen eine räumliche oder funktionelle Integration zu einem frühen Zeitpunkt in der Phase der Systemintegration durchgeführt werden soll (Unterabschnitt 5.2.5). Die definierten Subsysteme sind in Abbildung 6.15 dargestellt.

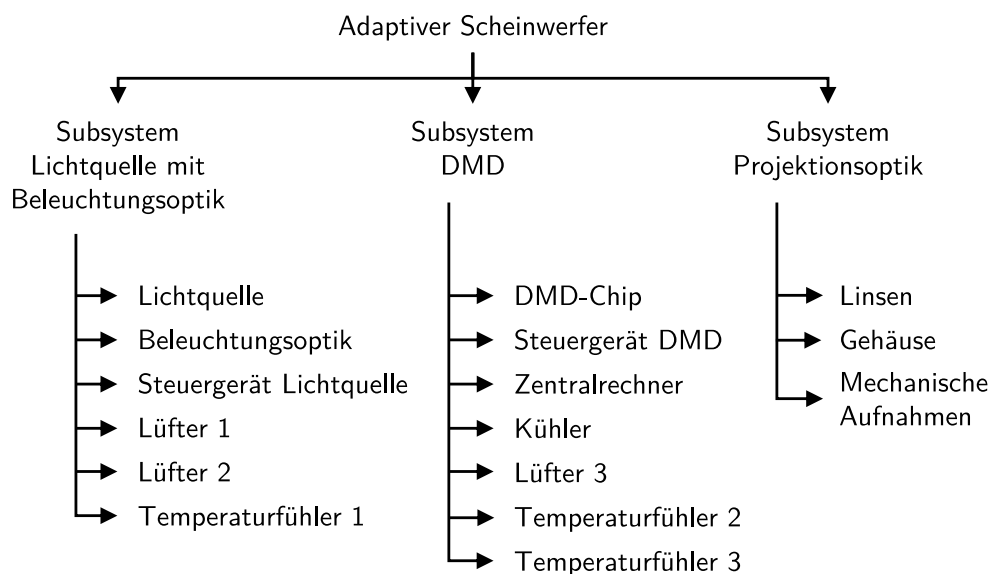


Abbildung 6.15: Subsysteme des adaptiven Scheinwerfers

Die Lichtquelle mit Beleuchtungsoptik wird als integriertes Subsystem beschafft. Weiterhin werden das Steuergerät der Lichtquelle, die Lüfter 1 und 2 sowie der Temperatursensor 1 diesem Subsystem zugeordnet. Zur Analyse des Farborts soll eine Messung der spektralen Strahlungsleistung des Subsystems durchgeführt werden. Das Subsystem DMD besteht aus dem DMD selbst sowie allen Komponenten, die für dessen Betrieb notwendig sind. Daher wird auch der Zentralrechner dem Subsystem DMD zugeordnet. Bei dem Subsystem DMD soll die Steuerung

des DMDs anhand der im kommenden Abschnitt 6.4 entwickelten Programmelemente geprüft werden. Außerdem ist zu prüfen, ob die Geschwindigkeit der Berechnung der Lichtverteilungen über der spezifizierten Frequenz (Anforderung 1.11) liegt, um flimmerfreie Lichtverteilungen realisieren zu können. Das Subsystem Projektionsoptik besteht aus den optischen Elementen, hier Linsen, und dem mechanischen Gehäuse. Bei der Eigenschaftsabsicherung ist zu prüfen, ob reale und simulierte Lichtverteilung übereinstimmen. Die photometrische Messung soll mit einem Goniophotometer im Fernfeld bei 25 m erfolgen. Dafür ist es notwendig, die Projektionsoptik an einem Projektionssystem zu montieren, in dem der gleiche DMD eingesetzt wird wie im Gesamtsystem. Darüber hinaus ist an diesem Subsystem zu prüfen, ob die Verzeichnung der Projektionsoptik durch eine geeignete Ansteuerung korrigiert werden kann.

Als Ergebnis dieses Arbeitsschritts liegt das domänenübergreifende Lösungskonzept vor, das die Energie-, Signal- und Stoffflüsse sowie die geometrische Anordnung der konzeptbestimmenden Komponenten umfasst. Diese Ergebnisse sind die Grundlage für die nachfolgende Entwicklung der einzelnen Komponenten innerhalb der Domänen. Außerdem sind Subsysteme definiert, die bei der Systemintegration zuerst zusammengefügt und analysiert werden. Für die Eigenschaftsabsicherung der Subsysteme sind Tests geplant und dafür notwendige Werkzeuge ausgewählt.

6.4 Domänenspezifischer Entwurf

Die nächste Phase im Entwicklungsprozess ist der domänenspezifische Entwurf, der die detaillierte optische Simulation und Optimierung der Projektionsoptik, die Entwicklung von Algorithmen für die Ansteuerung des Systems sowie die Konstruktion von Gehäuseteilen beinhaltet. Die Arbeitsschritte sind teilweise voneinander abhängig und können daher nicht vollständig parallel ablaufen. Die Konstruktion der mechanischen Aufnahmen für die optischen Elemente ist erst möglich, nachdem die Geometrie der optischen Elemente durch detaillierte Simulationen festgelegt ist. Der Entwurf der elektronischen Komponenten kann parallel erfolgen. Auch der Entwurf der Software zum Betrieb des Systems erfolgt parallel, wobei in diesem Fall eine Parametrisierung eines Algorithmus notwendig ist, die erst nach Abschluss der optischen Simulation erfolgen kann. Das Ergebnis der Phase des domänenspezifischen Entwurfs ist, dass alle Systemkomponenten entworfen und ausgearbeitet sind. Abschließend stehen alle Daten und Dokumente bereit, um die Systemkomponenten zu fertigen oder zu beschaffen. Dies sind beispielsweise Geometriemodelle der optischen Komponenten und technische Zeichnungen der mechanischen Elemente.

6.4.1 Optik

Lichtquelle und Beleuchtungsoptik wurden bereits im Systementwurf ausgewählt. Der domänenspezifische Entwurf bezieht sich daher auf die verzeichnende Projektionsoptik. Diese wird so ausgelegt, dass mit dem zur Verfügung stehenden Lichtstrom der Lichtquelle die Anforderungen bezüglich der Lichtverteilung erreicht werden können. Das konkrete Vorgehen zum simulativen Entwurf der Projektionsoptik ist an anderer Stelle veröffentlicht [KNÖC18b].

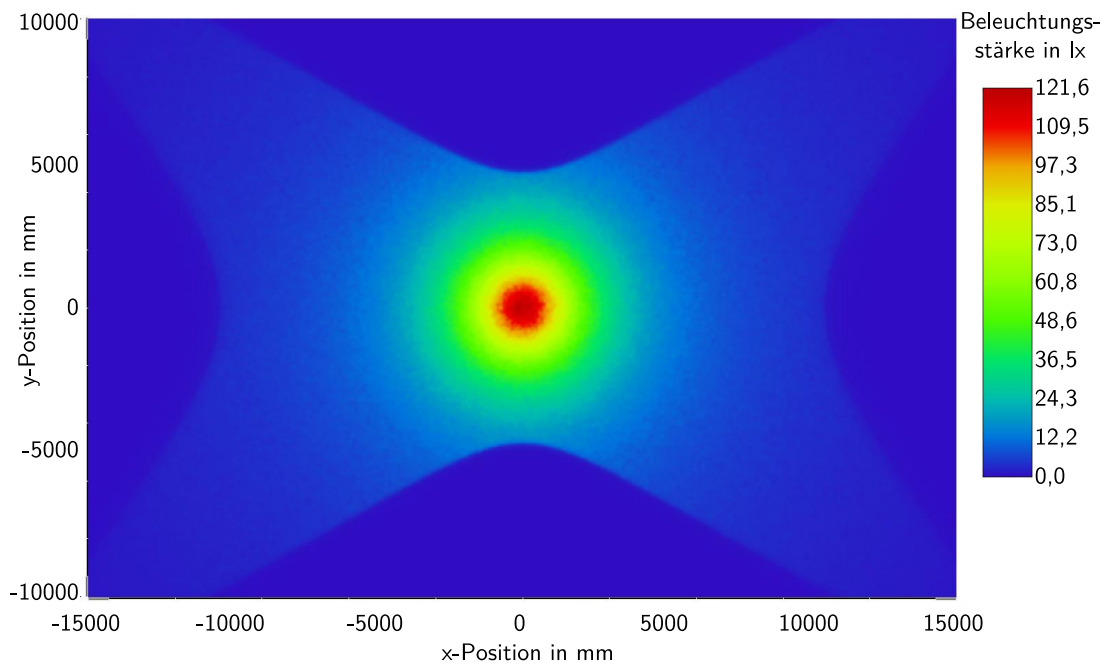


Abbildung 6.16: Simulation der verzeichnenden Projektionsoptik für einen 0,7'' DMD; Beleuchtungsstärkeverteilung in lx in 25 m Entfernung; x- und y-Achse in mm; Detektor: 1500 × 1000 Pixel; 10^7 Strahlen

In Abbildung 6.16 ist das Ergebnis einer optischen Simulation der Projektionsoptik gezeigt. Das simulierte System besteht aus dem DMD und der Projektionsoptik, sodass der DMD als Lichtquelle definiert wird. Für die Geometrie der Lichtquelle werden die Maße des DLP7000 genutzt, da dieser für den Prototypen eingesetzt wird. Durch die Verzeichnung werden Pixel in der Mitte deutlich kleiner abgebildet als an den Rändern. Die Beleuchtungsstärke korreliert mit der Pixeldichte, sodass die dargestellte Verteilung entsteht. Der Wirkungsgrad der simulierten Projektionsoptik beträgt 73,8%. Eine detaillierte Toleranz- und Streulichtanalyse wird für die Projektionsoptik nicht erstellt, da im Rahmen des Projektes als erster Schritt die Machbarkeit des Ansatzes gezeigt werden soll. Ungenauigkeiten bei der Fertigung und Montage müssen daher durch Freiheitsgrade des Gehäuses der Projektionsoptik kompensiert werden können. Als Ergebnis des Arbeitsschritts stehen die optischen Elemente als Geometriemodell zur Verfügung, die direkt für die Fertigung genutzt werden können.

6.4.2 Mechanik

Basierend auf der Simulation der Projektionsoptik werden Linsenaufnahmen sowie ein Gehäuse zur Einstellung der optischen Elemente zueinander konstruiert. Dies ist erst möglich, nachdem der domänenspezifische Entwurf des optischen Systems soweit fortgeschritten ist, dass die finale Geometrie der optischen Elemente und deren Position zueinander feststeht (vgl. Abbildung 5.10 in Abschnitt 5.3). Die drei rotationssymmetrischen Linsen werden in zylindrischen Elementen eingefasst und verklebt. Das Gehäuse ist so konstruiert, dass eine präzise Verschiebung der Komponenten zueinander durch Drehen der Gehäuseteile möglich ist. Die mechanische Verbindung dieses Subsystems zur Beleuchtungsoptik und Lichtquelle wird über einen starren Ring realisiert, der mit der Beleuchtungsoptik verschraubt wird.

6.4.3 Software

Zum Betrieb des Systems ist eine elektronische Datenverarbeitung notwendig, deren Programmelemente in diesem Abschnitt beschrieben werden. In Abbildung 6.17 ist ein Überblick über die physischen Elemente und die Programmelemente der Datenverarbeitung gezeigt. Zur besseren Übersicht ist nur einer der adaptiven Scheinwerfer dargestellt.

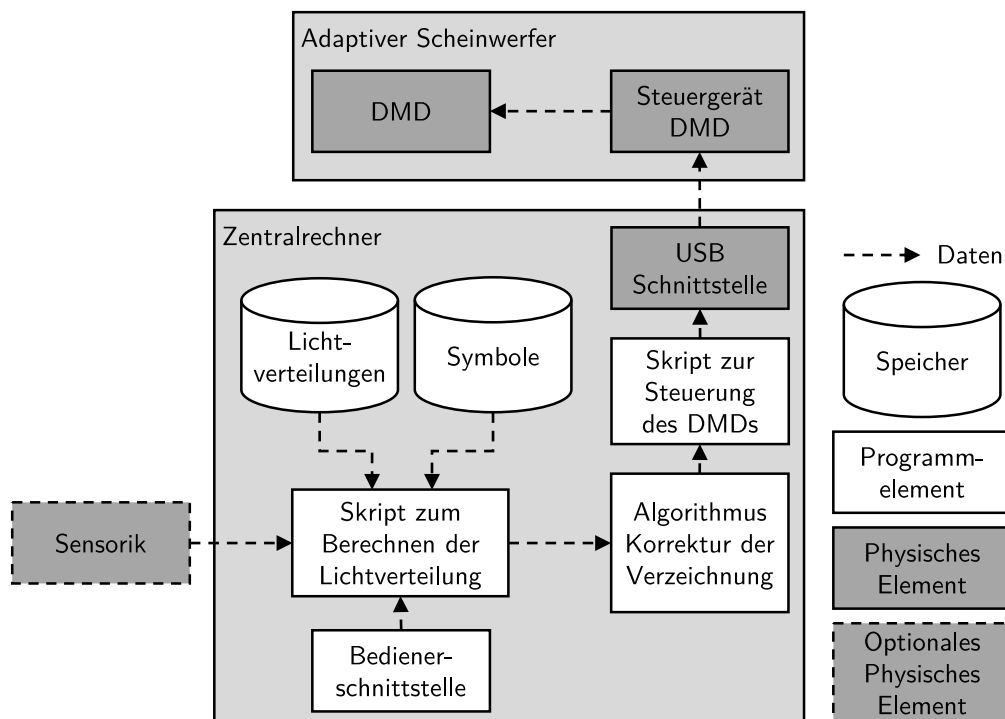


Abbildung 6.17: Elemente der elektronischen Datenverarbeitung zum Betrieb der adaptiven Scheinwerfer

Für die Umsetzung der Programmelemente wird Matlab gewählt, da Anpassungen nachträglich einfacher umsetzbar sind als beispielsweise bei einer Programmierung in der Sprache C. Über die Bedienerschnittstelle kann der Versuchsleiter auswählen, welche Lichtfunktion erzeugt und welches Symbol projiziert werden soll. In einem Speicher werden Verteilungen von Lichtfunktionen wie Abblendlicht, Fernlicht und Kurvenlicht hinterlegt. Verschiedene Symbole können statisch oder dynamisch angezeigt werden. Weiterhin ist es möglich, die Symbole mit einem Scheinwerfer oder mit beiden Scheinwerfern zu projizieren. Nach der Auswahl einer Lichtfunktion und eines Symbols zur Projektion wird die Lichtverteilung berechnet. Dabei ist es möglich, den Projektionsbereich vollständig oder teilweise abzdunkeln, um den Kontrast der Projektion auf der Straße zu erhöhen. Die Programmelemente können bei Bedarf erweitert werden, um Daten von weiterer Sensorik in die Berechnung der Lichtverteilungen einzubeziehen. Durch die eingesetzte Projektionsoptik wird die auf dem DMD erzeugte Lichtverteilung verzeichnet. Mit einem Algorithmus wird die Verzeichnung bei der Berechnung der Lichtverteilung kompensiert. Anschließend wird die berechnete Lichtverteilung in das Programmelement zur Steuerung des DMDs übertragen. Für die Steuerung des DMDs stellt Vialux eine Programmbibliothek bereit, die einen Zugriff auf die Funktionen des DMDs ermöglicht. Mit diesem Skript werden die Grauwerte für jeden Mikrospiegel des DMDs an das DMD-Steuergerät übertragen.

In der im letzten Abschnitt gezeigten Abbildung 6.16 befinden sich alle Spiegel des DMDs in der An-Stellung. Mit einer direkt abbildenden Projektionsoptik würde in diesem Fall eine homogene und rechteckige Lichtverteilung projiziert werden. Um die Lichtverteilung gezielt zu adaptieren, muss die Verzeichnung bei der Berechnung der Lichtverteilungen berücksichtigt werden (Abbildung 6.18).

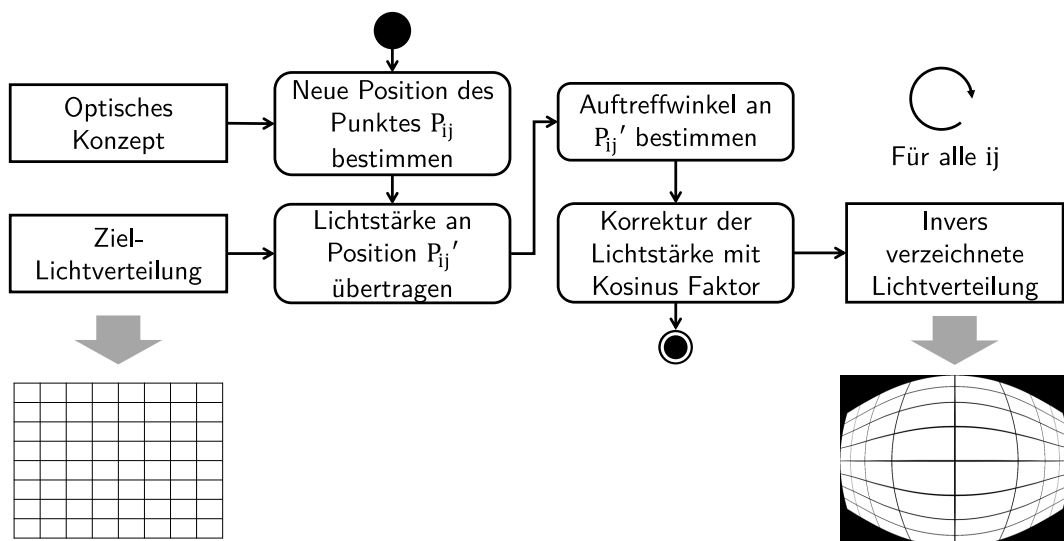


Abbildung 6.18: Ablauf zur Korrektur der Verzeichnung der Projektionsoptik

In Abbildung 6.18 ist der dafür entwickelte Algorithmus dargestellt. Zu Beginn wird für jeden Punkt P_{ij} der Lichtverteilung die durch die Verzeichnung resultierende Position P'_{ij} bestimmt und die Lichtstärke der Ziel-Lichtverteilung übertragen. Anschließend erfolgt eine Korrektur der Lichtstärke basierend auf dem Auftreffwinkel für jeden Punkt. Das Ergebnis des Algorithmus ist die rechts dargestellte invers verzeichnete Lichtverteilung. Wird diese mit der Projektionsoptik abgebildet, entsteht das ursprüngliche Raster auf der linken Seite der Abbildung 6.18.

6.4.4 Elektrik und Elektronik

Der Entwurf der Elektrik und Elektronik umfasst die Auslegung der Energieversorgung sowie die Auslegung und Auswahl elektronischer Komponenten für den Betrieb des Systems. In Abbildung 6.19 sind die elektrischen Verbindungen der Komponenten dargestellt. Nicht beschriftete Pfeile stellen elektrische Leitungen mit einer Spannung von 12 V dar. Die adaptiven Scheinwerfer sollen auch bei Stillstand des Fahrzeugmotors für mindestens 120 min betrieben werden können. Basierend auf dem Leistungsbedarf der Lichtquellen (je 330 W), welche die größten Verbraucher im System darstellen, wird der gesamte Leistungsbedarf des Systems zu 800 W angenommen. Bei 12 V sind daher mindestens 130 Ah an Batteriekapazität vorzuhalten, die in Form von Batterien im Heck des Fahrzeugs realisiert werden. Das Boardnetz des Fahrzeugs wird unverändert belassen, damit mögliche Fehler im System der adaptiven Scheinwerfer keine Auswirkung auf sicherheitsrelevante Fahrzeugfunktionen haben können. Ausgehend von der Energieversorgung im Heck wird elektrische Leistung mit einer Spannung von 12 V zu den Wechselrichtern und dem Zentralrechner geleitet. Mit den Wechselrichtern wird die Gleichspannung von 12 V in eine Wechselspannung von 230 V für die adaptiven Scheinwerfer konvertiert. Zur besseren Übersicht ist nur ein Wechselrichter dargestellt. Die Energieversorgung wird so entworfen, dass die elektrischen Systeme des linken und rechten Scheinwerfers vollständig getrennt sind. Im Falle eines Ausfalls einer Komponente im elektrischen System wird so sichergestellt, dass der zweite adaptive Scheinwerfer funktionsfähig bleibt. Fahrer oder Versuchsleiter haben anschließend die Möglichkeit, durch die Schalter im Innenraum die Zusatzscheinwerfer einzuschalten und die adaptiven Scheinwerfer von der Energieversorgung zu trennen. Die Energieversorgung der Zusatzscheinwerfer erfolgt daher durch das Fahrzeugboardnetz und ist somit unabhängig von der Energieversorgung der adaptiven Scheinwerfer.

Elektronische Komponenten in dem System sind die Steuergeräte der Lichtquellen, die Wechselrichter sowie die Steuergeräte der DMDs und der Scheinwerfer. Als Steuergeräte der Lichtquellen werden passende Komponenten ausgewählt (OSRAM PT-VIP) und so modifiziert, dass die Steuerung durch den Schalter im Innenraum möglich ist. Die Wechselrichter werden

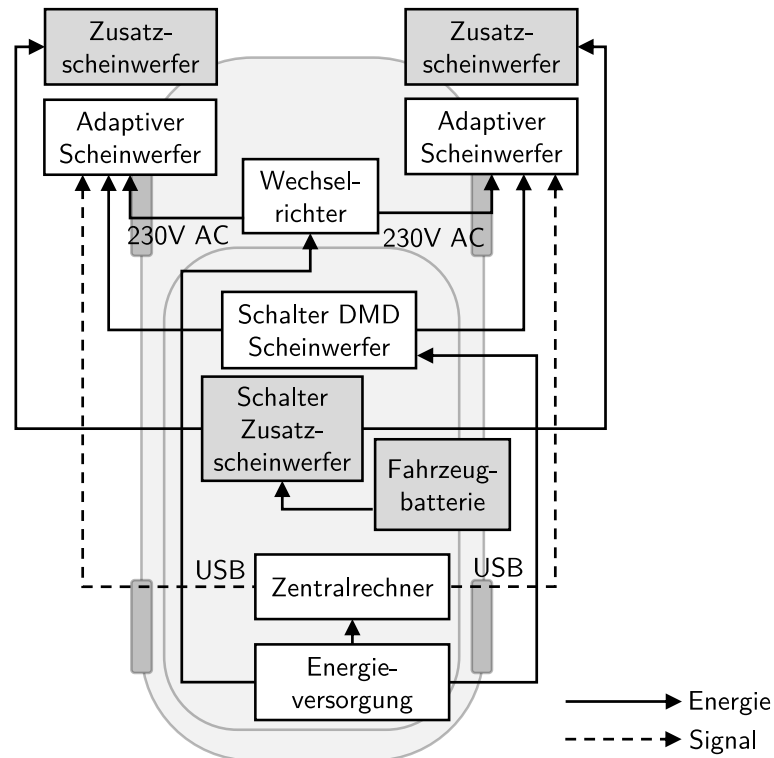


Abbildung 6.19: E/E-Architektur des Systems

passend zu der notwendigen Leistung des Systems ausgewählt. Die Steuergeräte der DMDs sind Bestandteil des ausgewählten DMD-Entwicklungsboards der Firma Vialux. Die Steuergeräte der Scheinwerfer enthalten einen Mikrocontroller, der die Daten der Temperatursensoren ausliest und die Lüfter (vgl. Abbildung 6.13 in Unterabschnitt 6.3.6) adaptiv steuert.

Als Ergebnis des domänenspezifischen Entwurfs sind alle Komponenten vollständig ausgearbeitet. Die Ergebnisse liegen in den für die jeweilige Domäne üblichen Datenformaten vor. Nach dieser Phase findet die Fertigung oder Beschaffung aller Komponenten statt. Anschließend erfolgt in der nächsten Phase des Prozesses die Systemintegration und die Absicherung der Eigenschaften nach jedem Integrationsschritt.

6.5 Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung

Das Ergebnis der vorherigen Entwicklungsphase sind alle notwendigen Dokumente und Daten, um die Systemelemente zu realisieren. Die ausgewählten mechanischen, optischen und elektronischen Komponenten werden beschafft und die Komponenten der Projektionsoptik gefertigt. Die Programmelemente zur Steuerung des Systems werden in Matlab umgesetzt. Zu Beginn der Phase *Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung* stehen damit alle Systemelemente zur Verfügung. Durch Messungen und Tests werden die Eigenschaften der Systemelemente gegenüber den Anforderungen abgesichert. Bei Abweichungen erfolgt gegebenenfalls ein Rücksprung in den domänenspezifischen Entwurf.

6.5.1 Integration zu Subsystemen

In der Phase des Systementwurfs werden Subsysteme definiert, die bei der Systemintegration zuerst zusammenzufügen sind (vgl. Abbildung 6.15 in Unterabschnitt 6.3.6). Nachfolgend werden die Integration der Subsysteme und die Ergebnisse der Tests und Messungen zur Eigenschaftsabsicherung dargelegt.

Subsystem Lichtquelle mit Beleuchtungsoptik

In dem Subsystem sind die Lichtquelle und die Beleuchtungsoptik sowie die für den Betrieb notwendigen weiteren Komponenten wie das Steuergerät der Lichtquelle und die Lüfter enthalten. Da die Lichtquelle und die Beleuchtungsoptik aus dem gleichen Video-Projektor genutzt werden, sind passende Montageelemente verfügbar.

In der Beleuchtungsoptik wird ein Bandpassfilter eingesetzt, um die für das menschliche Auge schädliche Strahlung im UV-Bereich zu filtern. Weiterhin wird die Strahlungsleistung im IR-Bereich reduziert, um den Wärmeintrag in den DMD zu begrenzen. In Abbildung 6.20 ist das Ergebnis von zwei Messungen in einer Ulbricht-Kugel mit und ohne Bandpassfilter dargestellt. Aus der spektralen Strahlungsleistung können die Farbkoordinaten bestimmt werden. Diese betragen $x = 0,29$ und $y = 0,29$ in dem Farbsystem der internationalen Beleuchtungskommission CIE [CIE1931]. Durch den hohen Blauanteil liegt der Farbort etwas außerhalb des Bereichs, der in der geltenden Regelung als weiß spezifiziert ist [ECE48]. Dieser Bereich beginnt am Punkt $x = 0,31$ und $y = 0,29$. Bei physiologischen Studien mit dem System ist dieser Aspekt zu berücksichtigen.

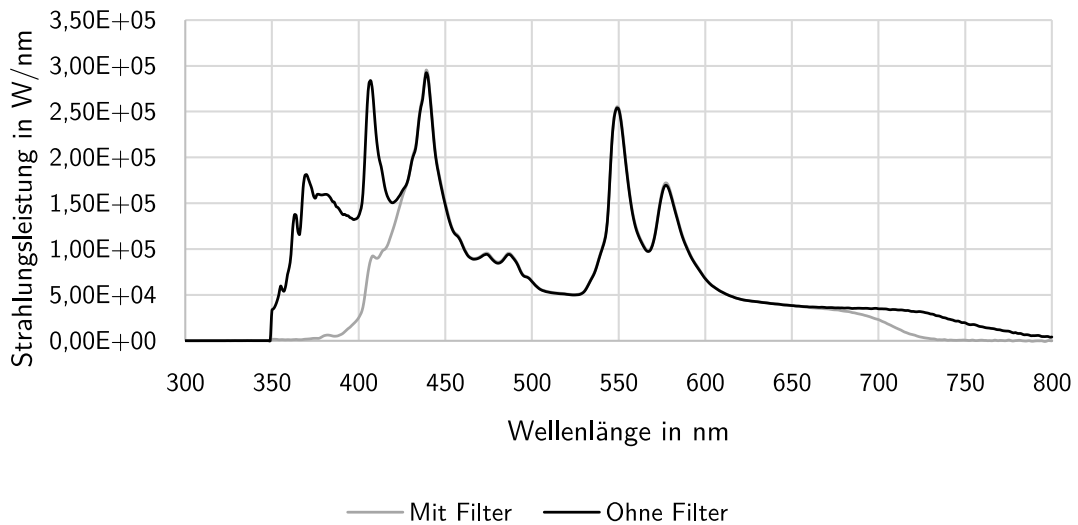


Abbildung 6.20: Ergebnis der Messung der spektralen Strahlungsleistung des Subsystems Lichtquelle mit Beleuchtungsoptik

Das Ergebnis des Integrationsschritts ist, dass die Lichtquelle mit der Beleuchtungsoptik montiert ist und die Lichtquelle zuverlässig durch das Steuergerät geschaltet werden kann.

Subsystem DMD

In dem Subsystem DMD sind alle Komponenten enthalten, die für den Betrieb des DMDs erforderlich sind. Dazu gehören neben dem DMD und dem DMD-Steuergerät auch der Zentralrechner, mit dem Bilder erzeugt und auf das DMD-Steuergerät übertragen werden. Die Analyse des Subsystems ergibt, dass mit der Hardware des Zentralrechners die erarbeiteten Programmelemente mit einer Zykluszeit von 20 ms bei einer Lichtverteilung mit 1024 x 768 Pixeln berechnet werden. Dies ist ausreichend, um die geforderte Wiederholfrequenz von 25 Hz bei dynamischen Lichtverteilungen zu erreichen (Anforderung 1.11). Zur Darstellung von Graustufen werden die Mikrospiegel mit einer Frequenz von 100 Hz gekippt, sodass kein Flimmern zu erwarten ist. Die Benutzerschnittstelle wird getestet und zeigt die erwarteten Funktionen. Ungültige Eingabewerte werden durch das Programm ignoriert. Als Ergebnis des Integrationsschritts wird festgehalten, dass der eingesetzte DMD mit dem Zentralrechner über die Benutzerschnittstelle erfolgreich angesteuert werden kann.

Subsystem Projektionsoptik

In dem Subsystem Projektionsoptik sind die optischen Elemente zur Projektion sowie das Gehäuse zur Positionierung der optischen Elemente zueinander enthalten. Darüber hinaus kann der entwickelte Algorithmus zur Korrektur der Verzeichnung ebenfalls als Bestandteil dieses Subsystems betrachtet werden. Im ersten Schritt der Verifikation wird geprüft, ob mit dem Algorithmus die Verzeichnung der Projektionsoptik korrigiert werden kann. Dies erfolgt anhand

des Simulationsmodells der Projektionsoptik. Im zweiten Schritt wird die Projektionsoptik an einen Projektor montiert, in dem der gleiche DMD wie im adaptiven Scheinwerfer eingesetzt ist. Durch photometrische Messungen wird geprüft, ob die vorherige Aussage zur Korrektur der Verzeichnung in der Simulation auch für die reale Projektionsoptik gilt.

Die Verzeichnung der Projektionsoptik hat zwei Effekte auf die projizierte Lichtverteilung. Pixel werden in der Mitte der Verteilung kleiner abgebildet als am Rand, sodass eine geometrische Verschiebung der Pixel zueinander resultiert. Der zweite Effekt betrifft die Intensitätsverteilung, die ebenfalls mit der Größe der abgebildeten Pixel korreliert. Um die Korrektur der geometrischen Verschiebung der Pixel zu prüfen, wird ein Raster mit rechteckigen Elementen durch den Algorithmus invers verzeichnet. In Abbildung 6.21 ist das Ergebnis der Simulation der Projektionsoptik mit der invers verzeichneten Lichtverteilung dargestellt. Die geometrische Verschiebung der Pixel wird durch den Algorithmus vollständig korrigiert.

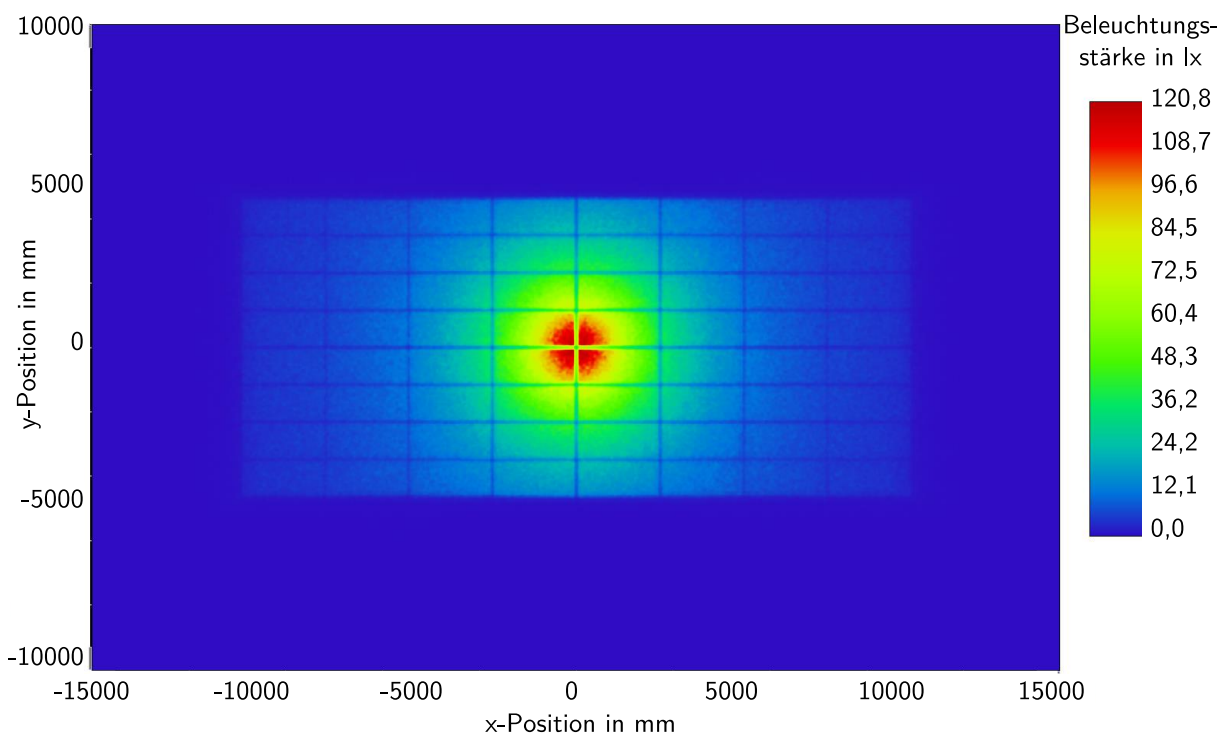


Abbildung 6.21: Simulation zur Verifikation des Algorithmus zur Korrektur der Verzeichnung der Projektionsoptik. Beleuchtungsstärkeverteilung in lx in 25 m Entfernung. x- und y-Achse in mm. Detektor: 1500 x 1000 Pixel. 10^7 Strahlen.

Zur Verifikation der Korrektur der Intensitätsverteilung mit dem Algorithmus wird ein Testbild mit unterschiedlichen Graustufen simuliert und mit dem Ergebnis des Algorithmus verglichen. Streulicht wird in der Simulation nicht betrachtet, da der Algorithmus darauf keinen Einfluss hat. Die Testverteilung ist oben in Abbildung 6.22 dargestellt. Aus der Testverteilung wird mit dem entwickelten Algorithmus die invers verzeichnete Verteilung generiert und diese in

der optischen Simulation in zwei Varianten als Maske eingesetzt (Abbildung 6.22 Mitte und unten).

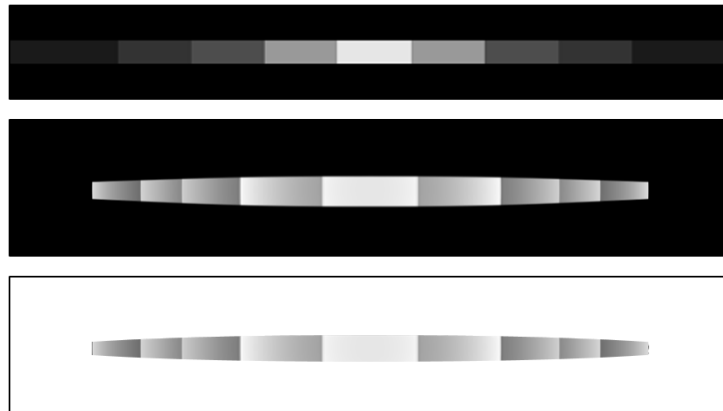
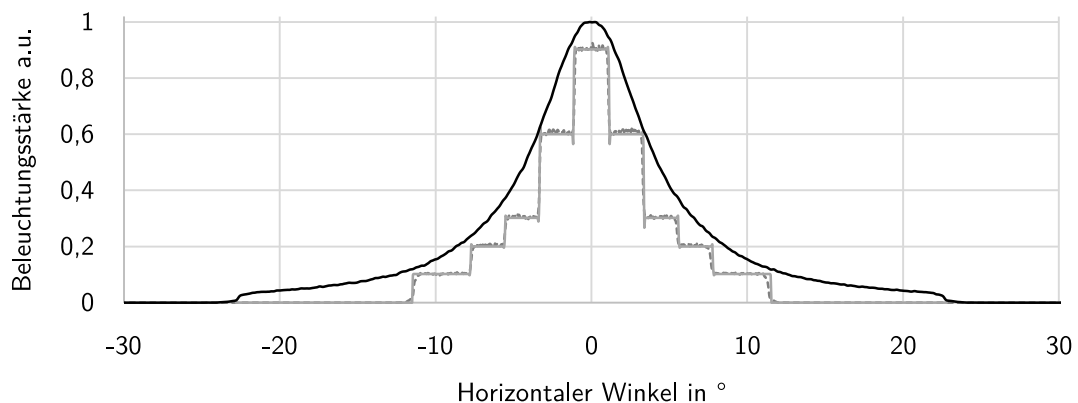


Abbildung 6.22: Oben: Testverteilung; Mitte: Maske für die Simulation der Projektionsoptik mit schwarzer Umgebung; Unten: Maske für die Simulation der Projektionsoptik mit weißer Umgebung

Das Ergebnis der Simulation der Projektionsoptik ist in Abbildung 6.23 dargestellt und zeigt, dass die simulierte Beleuchtungsstärkeverteilung gut mit der Testverteilung bezüglich Geometrie und Intensität übereinstimmt. Damit wird gezeigt, dass mit dem Algorithmus die geometrische Verschiebung der Pixel sowie die Intensitätsverteilung korrekt berechnet werden kann.



----- Simulation Testverteilung ——— Testverteilung ——— Simulation max. Intensität

Abbildung 6.23: Horizontaler Schnitt durch die Testverteilung mit Vergleich zur maximalen Intensität; Beleuchtungsstärke normiert auf die maximale Intensität

Als zweiter Schritt wird die Testverteilung mit der verzeichnenden Projektionsoptik projiziert. Dafür wird die Optik an dem Projektor Optoma X605 mit einem DLP7000 montiert und Messungen der Beleuchtungsstärke mit einem Fernfeldgoniophotometer in 25 m durchgeführt. In Abbildung 6.24 ist das Ergebnis der Messungen der Projektionsoptik dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Position der Stufen in den Messungen mit der Testverteilung übereinstimmen. Bei der Messung der Testverteilung mit weißer Umgebung stimmt die Intensitätsverteilung

akzeptabel mit der Testverteilung überein (Abbildung 6.22, unten). Jedoch ist erkennbar, dass die Kanten der Stufen in der Messung deutlich abgerundet sind. Um den Einfluss von Streulicht zu erfassen, wird eine Testverteilung in schwarzer Umgebung projiziert und vermessen (Abbildung 6.22, mitte). Die Kanten der Stufen sind dabei weniger abgeflacht als bei der Testverteilung mit weißer Umgebung. Die Messwerte der Intensität weichen jedoch besonders in der Mitte der Verteilung deutlich von der Testverteilung ab. Beide Aspekte lassen vermuten, dass Streulicht in der Projektionsoptik zu einem verminderten Kontrast führt. Bei der Bewertung dieses Ergebnisses ist zu beachten, dass reale Lichtverteilungen deutlich ähnlicher zu der Testverteilung mit weißer Umgebung sind. Die Testverteilung mit schwarzer Umgebung findet in Realität keine Anwendung. Genauere Analysen bezüglich des erreichbaren Kontrasts werden nach der Integration zum Gesamtsystem durchgeführt. Eine digitale Kompensation des Streulichteinflusses ist nicht möglich. Um den Kontrast der Projektionsoptik zu verbessern, ist eine Optimierung der optischen Elemente erforderlich, welche für die nächste Generation der Projektionsoptik vorgesehen ist.

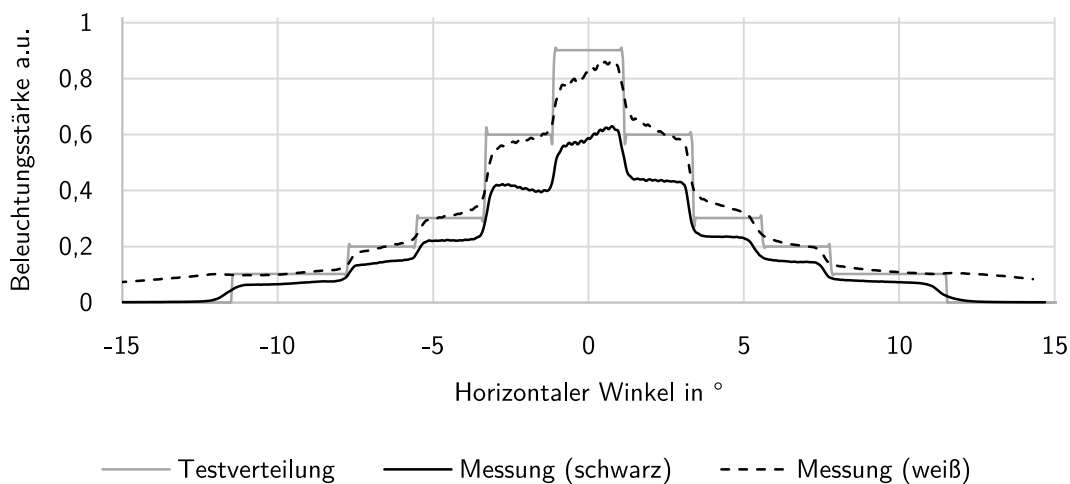


Abbildung 6.24: Horizontaler Schnitt durch die Testverteilung mit Vergleich zu einer Messung der projizierten Testverteilung mit weißer und schwarzer Umgebung; Beleuchtungsstärke normiert auf die maximale Intensität

Als Ergebnis der Verifikation des Subsystems Projektionsoptik wird festgehalten, dass mit dem entwickelten Algorithmus die Einflüsse der Verzeichnung der Projektionsoptik berechnet werden können. Damit ist es möglich, Lichtverteilungen invers zu verzeichnen, damit diese nach der Abbildung durch die Projektionsoptik die erwartete Intensitätsverteilung aufweisen. Bei der realen Projektionsoptik funktioniert die Korrektur der geometrischen Verschiebung der Pixel wie erwartet. Die geforderten Intensitätsverteilungen können nicht ideal abgebildet werden, da in der Projektionsoptik der Kontrast durch Streulicht reduziert wird.

6.5.2 Integration zum Gesamtsystem

Nach der Integration der Systemelemente zu Subsystemen und deren Verifikation erfolgt die Integration der Subsysteme zum Gesamtsystem im finalen Gehäuse. In Abbildung 6.25 ist einer der beiden realisierten adaptiven Scheinwerfer dargestellt und die Komponenten des Lösungskonzepts gekennzeichnet. Weitere Elemente, die für einen vollständigen Scheinwerfer notwendig sind, wie ein Fahrtrichtungsanzeiger und ein Tagfahrlicht, werden nicht implementiert. Diese Funktionen sind Bestandteil der Zusatzscheinwerfer, die im Falle eines Ausfalls eines adaptiven Scheinwerfers die Lichtverteilung erzeugen.

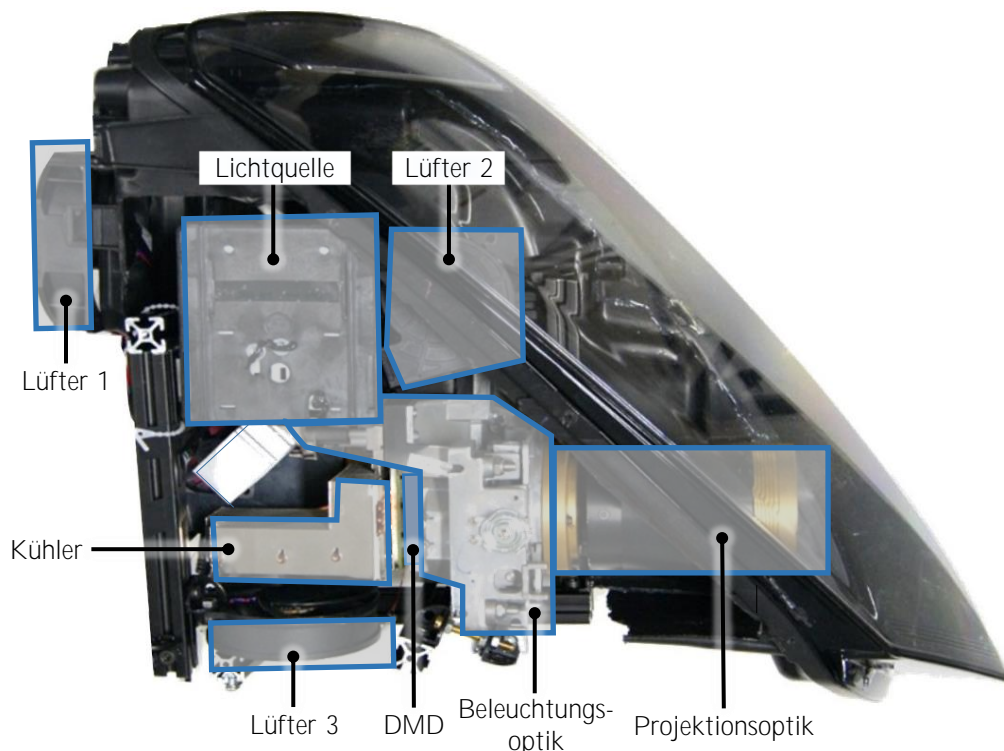


Abbildung 6.25: Realisierter adaptiver Scheinwerfer mit Systemelementen

Nachfolgend wird die photometrische Vermessung des Prototyps beschrieben und in Relation zu den Anforderungen gesetzt. Dafür wird das Gesamtsystem bei maximaler Leistung betrieben und mit einem Fernfeldgoniophotometer vermessen. In Abbildung 6.26 ist oben ein horizontaler und unten ein vertikaler Schnitt durch die Verteilung gezeigt (jeweils schwarze durchgezogene Linie) und der Anforderung (jeweils graue Linie) gegenübergestellt. Die Anforderungen an die Lichtverteilung (Anforderung 1.2) sowie an die Beleuchtungsstärke im Zentrum der Verteilung (Anforderung 1.3) sind erfüllt. Der gesamte Lichtstrom eines Scheinwerfers beträgt $\Phi_V = 6600 \text{ lm}$. Durch die Abschlusscheibe, die bei der Messung nicht montiert ist, werden die Beleuchtungsstärke und der Lichtstrom um etwa 15 % reduziert. Die Lichtquelle des Scheinwerfers kann so gesteuert werden, dass die maximale Beleuchtungsstärke im Zentrum

der Verteilung der Anforderung entspricht. In diesem Fall beträgt der Nutzungsgrad des Systems $K = 29,3\%$. In Abbildung 6.26 sind weitere Schnitte gezeigt, die den Projektionsbereich begrenzen. Im oben dargestellten horizontalen Schnitt bei einem vertikalen Winkel von $-9,1^\circ$ beträgt die Beleuchtungsstärke E_{Proj} im Bereich $\pm 11,9^\circ$ durchgängig über 13 lx . Im unten dargestellten vertikalen Schnitt bei einem horizontalen Winkel von $\pm 11,9^\circ$ beträgt die Beleuchtungsstärke E_{Proj} im Projektionsbereich ebenfalls durchgängig über 13 lx . Die Anforderungen an den Projektionsbereich (Anforderungen 1.8 bis 1.10) sind damit erfüllt.

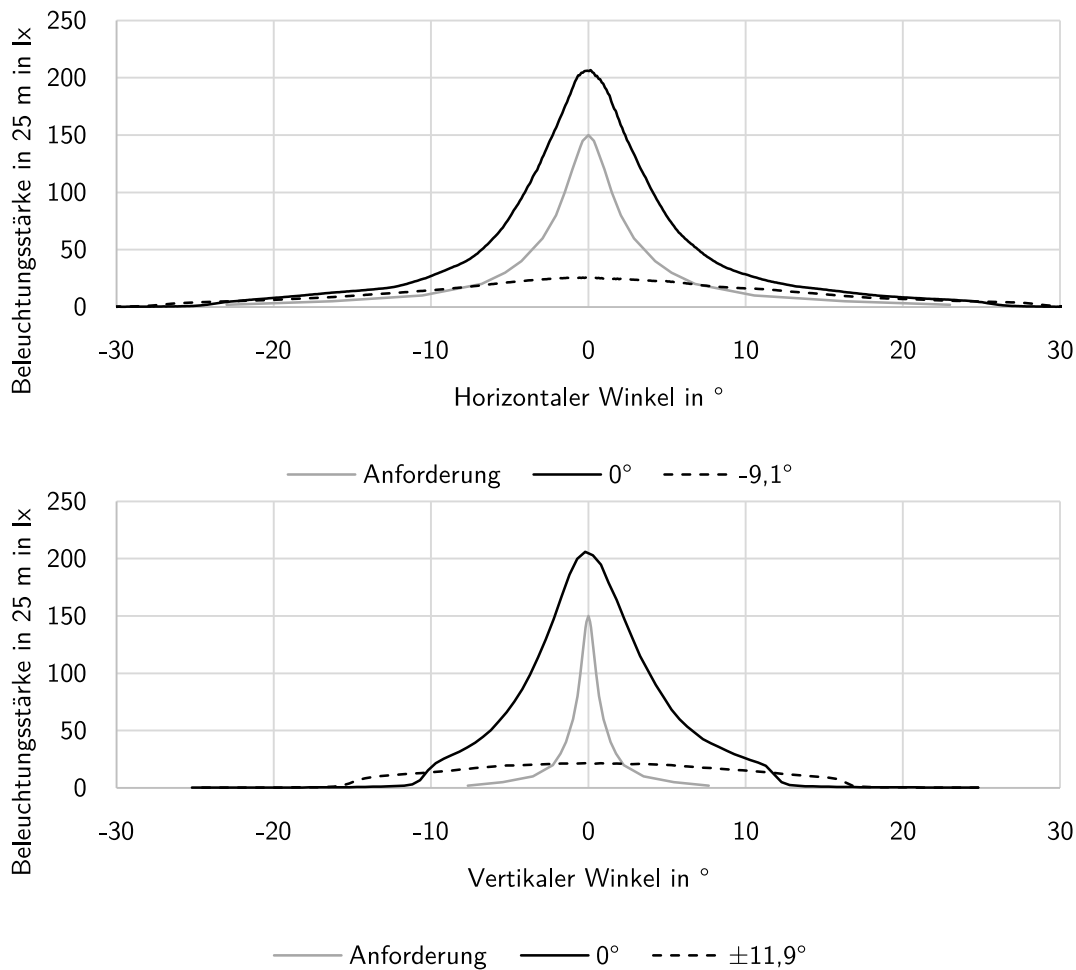


Abbildung 6.26: Beleuchtungsstärke des Prototypen gegenüber der Anforderung als horizontaler (oben) und vertikaler Schnitt (unten) bei den angegebenen Winkelpositionen

Um die Lichtfunktion *Adaptives Fernlicht* zu realisieren, ist der Ausblendkontrast entscheidend. Dafür werden mit dem Prototypen unterschiedlich breite Ausblendungen an verschiedenen horizontalen Positionen der Lichtverteilung erzeugt und jeweils die Beleuchtungsstärke als horizontaler Schnitt gemessen. Der vertikale Winkel beträgt dabei 0° . Für eine Breite von $0,5^\circ$ sind die Intensitätsverteilung und die horizontalen Positionen der Ausblendungen in Abbildung 6.27 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der erreichbare Kontrast im Zentrum der Verteilung von

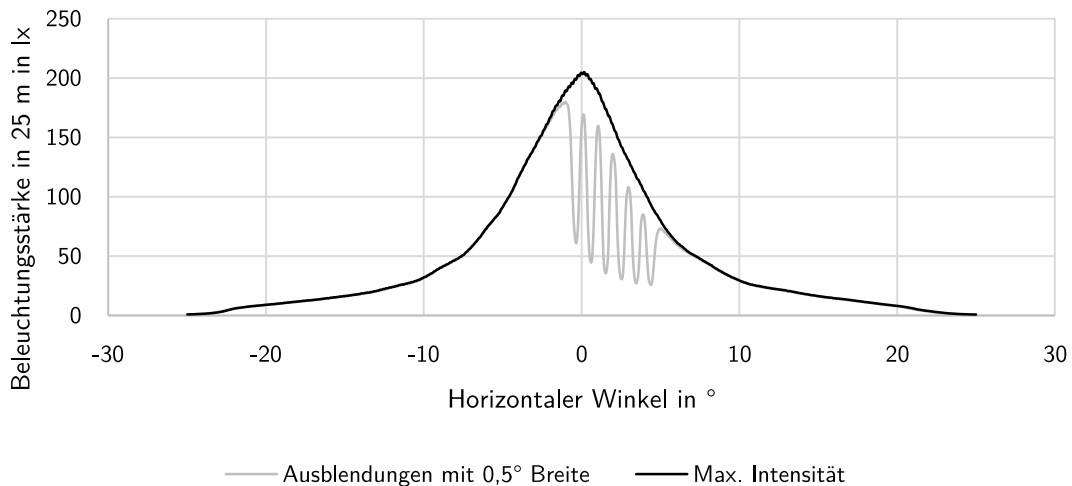


Abbildung 6.27: Ausblendungen mit einer Breite von $0,5^\circ$ an verschiedenen horizontalen Positionen der Lichtverteilung

etwa $K_{Aus} = 3,2$ nicht ausreichend ist, damit die geforderte Beleuchtungsstärke im Bereich der Ausblendung den Wert von 1 lx nicht übersteigt. Der Ein-/ Ausblendkontrast des Systems kann daher nicht gemäß Abschnitt 2.1 bestimmt werden.

Eine Erklärung für den geringen erreichbaren Kontrast ist, dass Licht von Mikrosiegeln in der Aus-Stellung in die Projektionsoptik gelangt und nicht wie gewollt absorbiert wird. Zur Analyse wird eine Messung der Strahlungsstärke im Nahfeld des Systems ohne Projektionsoptik durchgeführt, bei dem alle Mikrospiegel des DMDs in der An-Stellung sind. In einer weiteren Messung befinden sich alle Mikrospiegel in der Aus-Stellung. Aus der Messung wird ein Modell des Systems erstellt, das in einem Simulationsprogramm als Strahlungsquelle genutzt wird. In Abbildung 6.28 sind die Auftreffwinkel der Strahlen dargestellt. Im Entwurf der Projektionsoptik wird ein Akzeptanzwinkel von $\pm 15^\circ$ gewählt, um möglichst viel Licht des DMDs einzufangen. Mit der Messung wird deutlich, dass Strahlung der Spiegel in Aus-Stellung dadurch ungewollt in die Projektionsoptik gelangen kann. Um das Kontrastverhältnis zu erhöhen, muss in der nächsten Generation der Projektionsoptik der Akzeptanzwinkel näher an dem Kippwinkel von $\varphi_{Kipp} = \pm 12^\circ$ der Mikrospiegel gewählt werden.

Das Kontrastverhältnis von Projektionen vor dem Fahrzeug hängt auch von der Strukturbreite der Symbole ab. Bei einer angenommenen Projektionsentfernung von 10 m und einer Strukturbreite von 0,1 m beträgt der Winkel der Struktur etwa $0,5^\circ$. Bei dieser Breite ist ein Kontrast von über $K_W = 3$ erreichbar, was den Anforderungen für Symbolprojektionen genügt. Es wird festgehalten, dass der Prototyp geeignet ist, um kontrastreiche Projektionen vor dem Fahrzeug und adaptive Lichtverteilungen mit hohem Gradienten zu erzeugen. Zur Realisierung eines hochauflösenden blendfreien Fernlichts reicht der Kontrast der aktuellen Version der Projektionsoptik nicht aus.

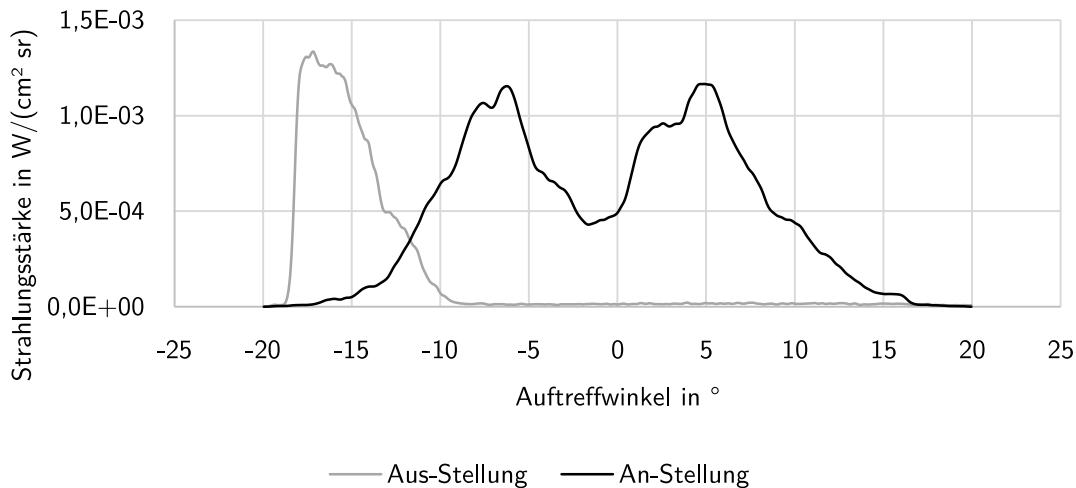


Abbildung 6.28: Ergebnis der goniometrischen Messung der Strahlungsstärke des Subsystems Lichtquelle mit Beleuchtungsoptik

Um dynamisch veränderliche Projektionen und Lichtverteilungen generieren zu können, wird bei der Anforderungsanalyse eine maximale Verschiebeauflösung von $\Delta h' = 0,1^\circ$ gefordert. Die Verschiebeauflösung entspricht dabei dem Winkelbereich, der pro Pixel erzeugt wird (vgl. Unterabschnitt 2.1.2). In Abbildung 6.29 ist der Zusammenhang zwischen der horizontalen Position eines Lichtpunkts der Lichtverteilung und der Verschiebeauflösung gezeigt. Durch die verzeichnende Projektionsoptik werden Pixel im Zentrum der Verteilung kleiner abgebildet als an den Rändern, weshalb die Verschiebeauflösung im Zentrum höher ist. Die Anforderung 1.6 an die maximale Verschiebeauflösung wird im gesamten Bereich der Lichtverteilung erfüllt.

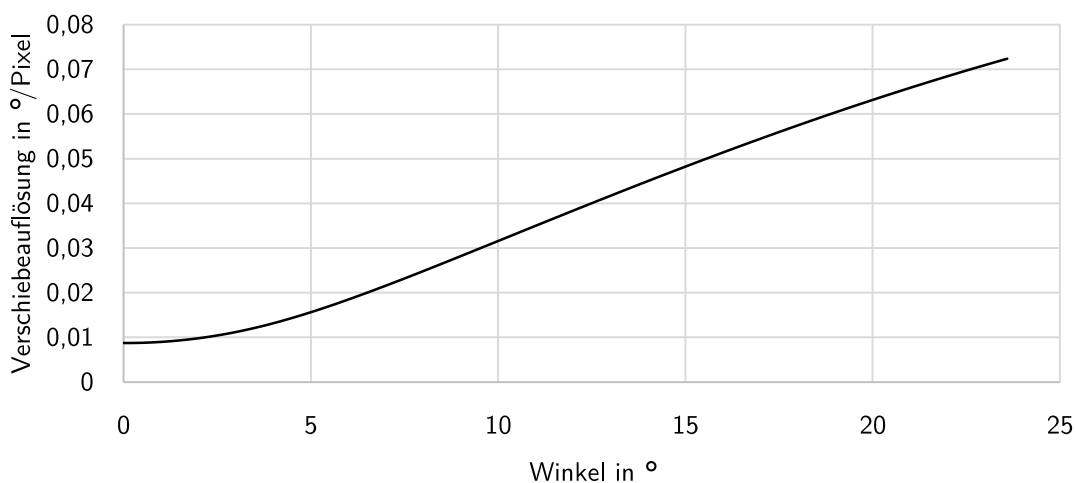


Abbildung 6.29: Verschiebeauflösung des Systems über dem horizontalen Winkel

Damit der Prototyp im öffentlichen Straßenverkehr einsetzbar ist, müssen gesetzliche Anforderungen an die Lichtverteilung erfüllt werden. Für die Bewertung wird die Richtlinie ECE123 genutzt, in der Lichtverteilungen für unterschiedliche Bedingungen definiert sind. In Tabelle 6.4 sind die Werte der Beleuchtungsstärke in 25 m der ECE123 den Ergebnissen des Prototypen

gegenübergestellt. Zur Verifikation wird mit dem Prototypen eine rechteckige Lichtverteilung projiziert, die eine ideal scharfe Grenze zwischen dem oberen dunklen und dem unteren hellen Bereich aufweist. In Konfiguration 1 wird die Intensität so moduliert, dass die Grenze der maximalen Intensität am Punkt E_{max} eingehalten wird. Die Anforderungen an den Punkten 50V und 50L werden eingehalten. Am Punkt B50L, der die ungefähre Kopfposition des Fahrers eines entgegenkommenden Fahrzeugs beschreibt, wird die maximal erlaubte Beleuchtungsstärke deutlich überschritten. In Konfiguration 2 wird die maximale Intensität so moduliert, dass die minimale Beleuchtungsstärke am Punkt E_{max} gerade noch erreicht wird. Auch in dieser Konfiguration werden die Anforderungen an den Punkten 50V und 50L erfüllt. Am Punkt B50L wird der Grenzwert zwar leicht überschritten, es kann aber davon ausgegangen werden, dass dadurch keine erhöhte Gefährdung des Straßenverkehrs durch gelegentliche Fahrten mit den prototypischen Scheinwerfern resultiert.

Tabelle 6.4: Vergleich zwischen Prototypen und Anforderungen nach ECE123 bezüglich eines Abblendlichts für Klasse E (Roadways)

Punkt	Position	ECE123 Klasse E	1	2
E_{max}		Min. 27,0 lx Max. 126,9 lx	126,9 lx	27 lx
50V	H=0° V=-0,86°	Min. 16,2 lx	126,3 lx	26,9 lx
B50L	H=-3,43° V=0,57°	Min. 0,1 lx Max. 1 lx	5,5 lx	1,2 lx
50L	H=-3,43° V=-0,86°	Min. 10,9 lx	81,7 lx	17,4 lx

6.5.3 Integration in das Zielsystem

Im letzten Integrationsschritt werden die beiden adaptiven Scheinwerfer in das Zielsystem, im beschriebenen Projekt ein Versuchsfahrzeug, integriert (vgl. Abbildung 6.30). Dazu gehört auch die Integration der Energieversorgung sowie der elektrischen Komponenten und Leitungen im Versuchsfahrzeug. Eine der Herausforderungen bei der Integration in das Zielsystem ist, dass die mechanischen Schnittstellen bei dem Systementwurf nicht vollständig feststehen und daher bei der Integration Anpassungen erforderlich sind. Außerdem ist eine präzise Justierung der Scheinwerfer nach dem Einbau erforderlich. Diese wird realisiert, indem mit beiden Scheinwerfern ein Kreuz projiziert wird. Mithilfe einer Projektionsleinwand vor dem Fahrzeug

kann damit die vertikale und die horizontale Ausrichtung der Scheinwerfer eingestellt werden. Abschließend werden die Funktionen des Systems getestet und ein Bedienerhandbuch erstellt, in dem der Systemaufbau, die Benutzerschnittstelle und Möglichkeiten zur Fehlerbehebung dokumentiert sind. Für das Versuchsfahrzeug mit adaptiven Scheinwerfern wird eine Zulassung durch den TÜV ausgestellt, sodass physiologische Studien im realen Verkehrsraum möglich sind.



Abbildung 6.30: Versuchsfahrzeug mit integriertem Scheinwerfer

Zusammenfassend wird festgehalten, dass mit dem System adaptive Lichtverteilungen mit hoher Auflösung und Symbole vor dem Fahrzeug erzeugt werden können. Die spezifizierten Anforderungen werden mit Ausnahme des Ein-/Ausblendkontrasts voll erfüllt. Der Kontrast kann verbessert werden, wenn eine Anpassung der Projektionsoptik an die tatsächlichen Winkel der Beleuchtungsoptik des Systems erfolgt. Mit dem System können statische und dynamisch veränderliche Symbole vor dem Fahrzeug projiziert werden. Um statische Versuche durchführen zu können, können die adaptiven Scheinwerfer über 120 min bei Stillstand des Fahrzeugs betrieben werden. In dynamischen Studien kann der Versuchsleiter die adaptiven Scheinwerfer während der Fahrt bedienen.

6.5.4 Validierung der Entwicklungsziele

Mit dem vorherigen Arbeitsschritt ist die Entwicklung des Systems auf der technischen Ebene abgeschlossen. Die adaptiven Scheinwerfer sind in das Versuchsfahrzeug integriert, alle Funktionen sind getestet und die Systemeigenschaften anhand der Anforderungsliste verifiziert. Der letzte Arbeitsschritt beinhaltet die Validierung des Systems und umfasst die Frage, ob mit dem System die Entwicklungsziele erreicht werden. Die Entwicklungsziele des Systems sind (vgl. Abschnitt 6.1):

- Erzeugen von hochauflösten Lichtverteilungen, die bezüglich Öffnungswinkel, Lichtstrom und Beleuchtungsstärke mit Lichtverteilungen von aktuellen Serienscheinwerfern vergleichbar sind oder diese übersteigen
- Erzeugen von kontrastreichen Projektionen vor dem Fahrzeug
- Integrieren des Systems in einen mobilen Versuchsträger zur Evaluation neuartiger Lichtverteilungen im Verkehrsraum unter realen Umgebungsbedingungen

Mit dem System können hochauflöste Lichtverteilungen erzeugt werden, die bezüglich Öffnungswinkel, Lichtstrom und Beleuchtungsstärke deutlich über die geforderte Lichtverteilung hinausgehen. Das System ist geeignet, um adaptive Verteilungen zu erzeugen und beispielsweise auch ein digitales Kurvenlicht mit $\pm 3^\circ$ umzusetzen (vgl. Abbildung 6.26 oben). Die Lichtverteilungen können vor einer Versuchsfahrt erstellt und während der Fahrt durch den Versuchsleiter passend zur Verkehrssituation ausgewählt werden. Eine Erweiterung des System ist möglich und erlaubt die Integration von Sensorik zur Erfassung von Verkehrsobjekten in der Umgebung. Die Programmelemente zur Berechnung der Lichtverteilungen können entsprechend erweitert werden. In Abbildung 6.31 sind vier beispielhafte Projektionen vor dem Fahrzeug gezeigt.

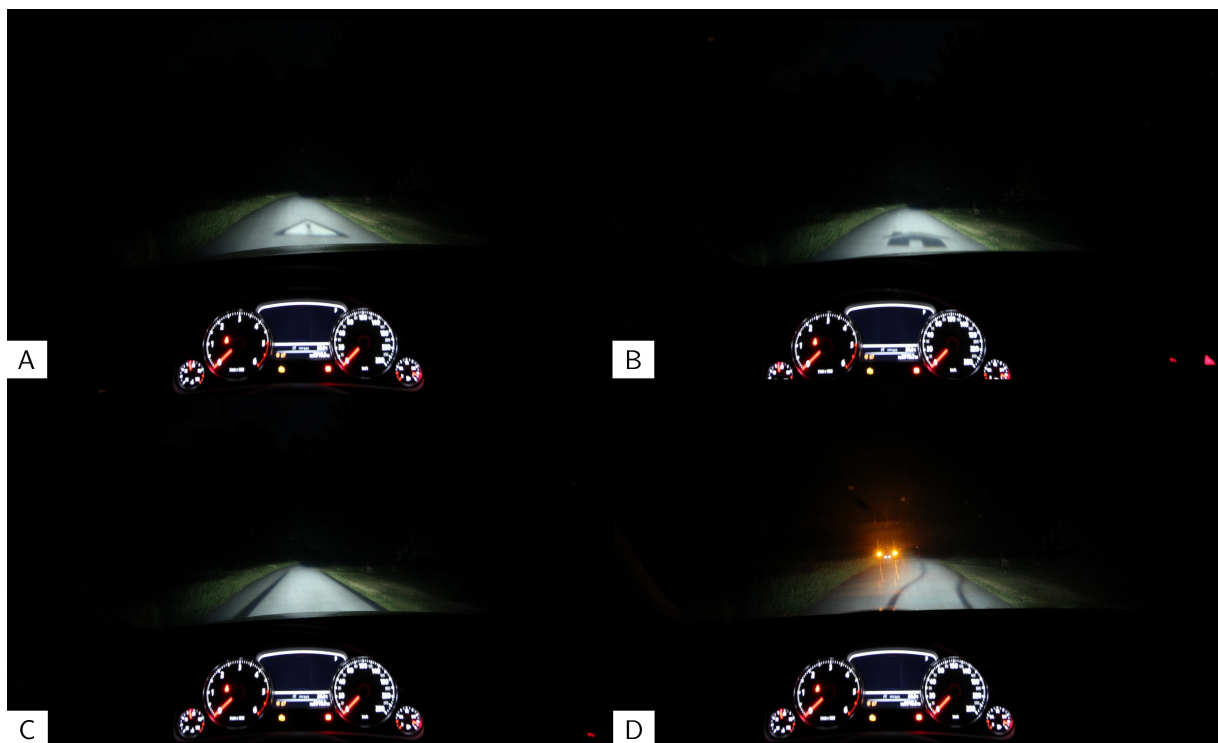


Abbildung 6.31: Projektion unterschiedlicher Symbole mit dem Prototypen aus Sicht des Fahrers; A: Erhöhung des Kontrastes durch Füllung des Zeichens *Achtung*; B: Einbetten des Symbols *Haus* in ein Abblendlicht; C: Projektion der Fahrzeugbreite; D: Projektion der Fahrspur mit Vorbeiführung an Gefahrenstelle

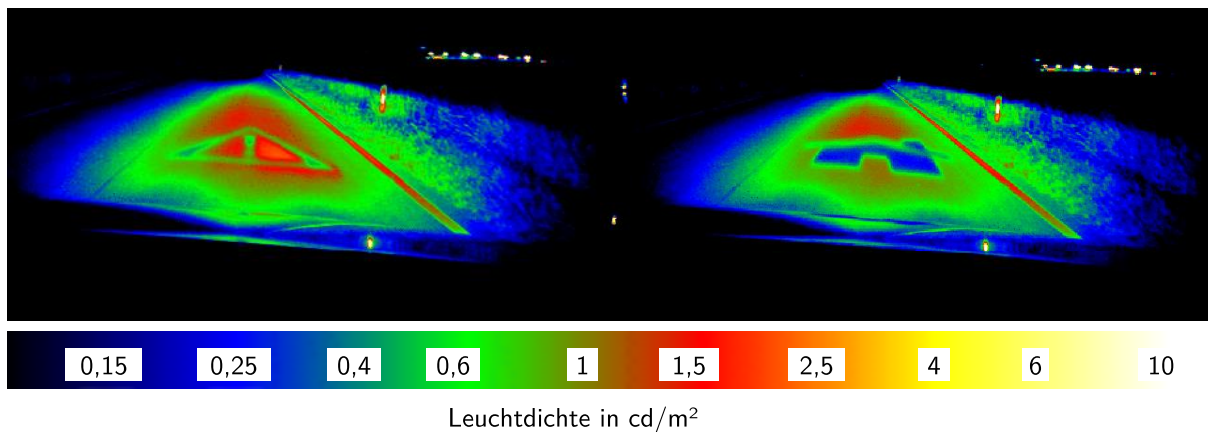


Abbildung 6.32: Leuchtdichteverteilungen von zwei der projizierten Symbole aus Abbildung 6.31; Links: Symbol *Achtung*; Rechts: Symbol *Haus*; Skala der Leuchtdichte logarithmisch zur Basis 2

In Abbildung 6.32 sind zu zwei der beispielhaften Projektionen Leuchtdichteverteilungen dargestellt. Die Symbole werden jeweils von dem rechten Scheinwerfer projiziert, um unerwünschte Effekte bei der Überlagerung zu vermeiden. Die Leuchtdichte bei der Projektion *Achtung* ist daher im rechten Bereich etwas höher als im linken Bereich des Symbols. Der Kontrast nach Weber (vgl. Gleichung 2.3 in Unterabschnitt 2.1.3) beträgt auf der linken Seite des Symbols etwa $K_W = 2$ und auf der rechten Seite des Symbols etwa $K_W = 3,4$. Der Kontrast des Symbols *Haus* ist homogener und beträgt etwa $K_W = 2,3$. Die erreichten Werte des Kontrasts liegen damit deutlich über der Grenze der Erkennbarkeit (vgl. Abbildung 6.6 in Unterabschnitt 6.2.2).

Das System ist vollständig in ein Versuchsfahrzeug integriert und steht für Studien im Verkehrsraum zu neuen Lichtverteilungen und Symbolprojektionen vor dem Fahrzeug bereit, sodass die Entwicklungsziele damit erfüllt sind. Zu untersuchende Fragestellungen betreffen beispielsweise die konkrete Gestaltung der Symbole oder die Ablenkung anderer Verkehrsteilnehmer im realen Verkehrsraum durch Projektionen auf der Straße.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel erfolgt ein Rückblick auf die vorliegende Arbeit. Es wird diskutiert, in welchem Umfang die wissenschaftlichen Fragestellungen, die zu Beginn der Arbeit in Abschnitt 1.3 aufgestellt wurden, beantwortet werden konnten. Weiterhin findet ein Rückblick auf die Anforderungen an den Prozess aus Abschnitt 4.2 statt. Darüber hinaus werden Anwendungspotenziale des Prozesses diskutiert und im Ausblick Aspekte für weitergehende Forschungen aufgezeigt.

7.1 Zusammenfassung und Diskussion

Mit der vorliegenden Arbeit wird ein Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme vorgestellt. Da die möglichen Anwendungsfelder optomechatronischer Systeme vielfältig sind, wurde zu Beginn der Arbeit eine Eingrenzung auf Systeme mit bestimmten Eigenschaften vorgenommen. Im Fokus steht dabei die Wirkung optischer Strahlung auf den Menschen. Die betrachteten optomechatronischen Hauptfunktionen, die in Abschnitt 1.2 vorgestellt wurden, sind daher *Beleuchten* und *Informationen anzeigen*. Bei Systemen mit der Hauptfunktion *Messen* kann ebenfalls eine Wirkung auf Menschen erfolgen. Bei allen genannten Funktionen wird Strahlung über die Systemgrenze transportiert.

In Kapitel 2 wurde die Domäne Optik von zwei Seiten betrachtet. Neben technischen Definitionen, Eigenschaften von optischen Systemen und optischen Wirkprinzipien und Bauelementen wurden Vorgehensmodelle vorgestellt, mit denen optische Systeme gestaltet werden können. Ausgewählte Elemente der drei beschriebenen Vorgehensmodelle sind in den vorgestellten Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme eingeflossen. Anschließend wurden in Kapitel 3 unterschiedliche Prozesse vorgestellt, mit denen technische Systeme, welche Elemente unterschiedlicher Technikdisziplinen enthalten, entwickelt werden können. Das V-Modell ist für diese Art der Entwicklung besonders geeignet und wurde daher in verschiedenen Varianten vorgestellt. Der Anwendungsbereich des V-Modells liegt primär auf mechatronischen Systemen.

Mit zwei weiteren Vorgehensmodellen, die einen expliziten Bezug zur Domäne Optik haben, wurde der Stand der Forschung zu Entwicklungsprozessen erweitert.

Die erste wissenschaftliche Fragestellung bezieht sich auf den Einfluss der Domäne Optik auf die Entwicklung mechatronischer Systeme. Daher wurden zu Beginn des Kapitels 4, in dem der vorgestellte Prozess konzipiert wurde, die Besonderheiten der Domäne Optik im Vergleich zur Mechanik und Elektronik als klassische Disziplinen der Mechatronik herausgestellt. Nach der Analyse von Anforderungen an den Prozess wurden die vorgestellten Entwicklungsprozesse anhand dieser Anforderungen bewertet.

Anforderung 1 Anwendbarkeit für Systementwicklungen

Anforderung 2 Verknüpfung von Prozesselementen der Mikro- und Makrologik

Anforderung 3 Berücksichtigung der konzeptbestimmenden Anforderungen der Optik

Anforderung 4 Berücksichtigung von Wirkungen auf Menschen

Als Ergebnis der Bewertung wurde das allgemeine V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 als geeignete Basis für den entwickelten Prozess identifiziert. Das V-Modell ist explizit für Systementwicklungen geeignet (Anforderung 1). In der VDI-Richtlinie werden für mechatronische Entwicklungen operative Arbeitsschritte den übergeordneten Phasen des Vorgehensmodells zugeordnet. Dieser Ansatz zur Verknüpfung von Prozesselementen der Mikrologik (operative Arbeitsschritte) mit der Makrologik (übergeordnetes Vorgehensmodell) wurde auch bei dem Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme angewandt (Anforderung 2). Die Besonderheiten der Domäne Optik (Anforderung 3) sowie Wirkungen auf den Menschen (Anforderung 4) sind nicht Bestandteil des allgemeinen V-Modells. Die operativen Arbeitsschritte zur Detaillierung des V-Modells wurden daher so entworfen, dass diese Aspekte berücksichtigt werden.

Das Konzept des Prozesses, das in Abschnitt 4.4 vorgestellt wurde, zeigt die vier Phasen des Prozesses im Überblick. In Kapitel 5 wurden die Phasen anschließend detailliert beschrieben und damit die zweite wissenschaftliche Fragestellung beantwortet. In Phase 1 werden die Anforderungen an das zu entwickelnde System erhoben, wobei ein Fokus auf der Analyse der Wechselwirkungen zwischen dem System und dem Nutzer sowie der Umgebung liegt. Im Systementwurf (Phase 2) werden Funktionen des Systems analysiert und für diese Funktionen prinzipielle Lösungen erarbeitet. Die Besonderheit des in dieser Arbeit vorgestellten Prozesses im Vergleich zu dem allgemeinen V-Modell ist, dass bereits in der Phase des Systementwurfs Teilaspekte der Gestaltung der optischen Elemente stattfinden. Dies ist notwendig, da der Optikentwurf einen großen Einfluss auf das Lösungskonzept des Gesamtsystems hat. In der dritten

Phase des Prozesses, dem domänenspezifischen Entwurf, sind zu Beginn die Domänen Optik und Mechanik nicht vollständig getrennt. Dies ist darin begründet, dass die mechanischen Komponenten zur Fixierung und Justierung der optischen Elemente einen großen Einfluss auf die Funktionalität haben. In Phase 4, der Systemintegration, werden alle realisierten Systemelemente zuerst zu Subsystemen und dann zum Gesamtsystem integriert. Da die Validierung von Systemen mit Wirkungen auf Menschen typischerweise als Probandenstudien unter realen Umgebungsbedingungen durchgeführt wird, wurden entsprechende Arbeitsschritte bei der Eigenschaftsabsicherung vorgesehen. Den operativen Arbeitsschritten wurden in den beschriebenen Phasen Methoden zugeordnet und diese an geeigneten Stellen an den Kontext optomechatronischer Systeme angepasst. Damit ist die dritte wissenschaftliche Fragestellung beantwortet. Um den entwickelten Prozess zu veranschaulichen, wurde ein Beispiel aus dem Bereich der Fahrzeuglichttechnik ausgewählt. Die Entwicklung der adaptiven Scheinwerfer eignet sich dafür besonders, da zwei der betrachteten optomechatronischen Hauptfunktionen, *Beleuchten* und *Informationen anzeigen*, abgedeckt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 so durch operative Arbeitsschritte angepasst werden kann, dass eine Entwicklung von optomechatronischen Systemen zielführend möglich ist. Die Erfahrungen, auf denen der Prozess basiert, stammen aus dem universitären Umfeld, sodass eine Übertragbarkeit auf Entwicklungsprozesse der Industrie genau geprüft werden muss. Zwar ist das V-Modell der VDI-Richtlinie auch in der Industrie weit verbreitet, allerdings in Versionen, die auf den jeweiligen Kontext adaptiert und angepasst sind. Bei der Übertragung auf industrielle Entwicklungen ist weiterhin zu beachten, dass abhängig von der Produktkomplexität typischerweise mehrere Teams von Entwicklern die Entwicklungstätigkeiten ausführen. Der Systementwurf erfolgt dann durch Systemarchitekten, die kein tiefgehendes technisches Wissen der beteiligten Domänen haben müssen. Der im Prozess geforderte frühe Entwurf der konzeptbestimmenden optischen Subsysteme kann in diesem Fall berücksichtigt werden, indem ein enger Austausch mit der Fachabteilung der Optikentwicklung bereits in der Phase des Systementwurfs vorgesehen wird.

Der vorgestellte Prozess basiert auf Erfahrungen aus Forschungsprojekten, bei denen die wesentlichen Herausforderungen in der Entwicklung den optischen Pfad betreffen. Dies zeigt sich auch im dargestellten Anwendungsbeispiel. Typische Herausforderungen, die bei der Entwicklung mechatronischer Systeme auftreten, wie eine zuverlässige Regelung des Systemverhaltens, stehen dagegen nicht im Fokus. Bei der Entwicklung von Systemen mit vielfältigen mechatronischen Funktionen ist daher die Anwendbarkeit des Prozesses zu prüfen.

Der Prozess wurde mit dem Ziel entwickelt, anwendbar für eine bestimmte Art von optomechatronischen Systemen zu sein. Die betrachteten Systeme mit den Hauptfunktionen *Beleuchten* und *Informationen anzeigen* stehen dabei im Fokus. Hier spielen Wirkungen von optischer Strahlung auf Menschen eine wichtige Rolle, die entsprechend im Prozess berücksichtigt werden. Für Systeme mit der Hauptfunktion *Messen* ist das Vorgehen ebenfalls anwendbar. Bei allen drei betrachteten Hauptfunktionen wird optische Strahlung über die Systemgrenze transportiert. Die Übertragbarkeit auf optomechatronische Systeme mit anderen optomechatronischen Hauptfunktionen wie *Daten übertragen* oder *Materialien be-/ verarbeiten* ist nur eingeschränkt möglich, da der Systemaufbau deutlich von den betrachteten Systemen abweicht.

Die Anwendbarkeit des Prozesses ist daher insbesondere bei Projekten mit Forschungscharakter gegeben, bei denen eine oder mehrere der drei betrachteten optomechatronischen Hauptfunktionen im Fokus stehen. Beispiele dafür sind vielfältige Projekte, die in den letzten Jahren am IPeG als industriefinanzierte Forschungen und im Rahmen des Promotionsprogramms *Tailored Light* durchgeführt worden sind:

Kontrastadaptiver Scheinwerfer Konzeptionelle Entwicklung eines neuartigen Scheinwerfers, der die Helligkeit im Verkehrsraum an die Umgebung und die Adaptation des Fahrers anpasst [JÜR15]

Laserscheinwerfer für Kraftfahrzeuge Entwicklung eines neuartigen Scheinwerfers, in dem Laserdioden als Lichtquelle verwendet werden [WOLF17a]

Projektionssystem für die Fahrzeugfrontprojektion Entwicklung eines laserbasierten Projektionssystems, mit dem Symbole vor dem Fahrzeug in Farbe projiziert werden können [KLOP17]

Augmented Reality Projektor für medizinische Anwendungen Entwicklung eines Projektors, mit dem während Operationen adaptiv Gefäße auf Organe projiziert werden können [KAHR18]

Autonomes optisches Sensormodul Entwicklung eines autonomen Moduls, das unabhängig von einer externen Energieversorgung Daten übertragen kann [DUDK19]

Hochauflösender LED-Scheinwerfer Entwicklung eines neuartigen Scheinwerfers, bei dem eine LED-Lichtquelle mit 1024 einzeln schaltbaren Pixeln eingesetzt wird [HELD20]

Kontaktloses Dermatoskop Entwicklung eines Dermatoskops, dessen Funktionsprinzip auf optischer Kohärenztomographie basiert [FRIC19]

Hochauflösender LCoS Scheinwerfer Entwicklung eines neuartigen hochauflösenden Scheinwerfers, bei dem ein Bildmodulator eingesetzt wird (LCoS), dessen Funktionsprinzip ähnlich zu LCDs ist [LI20]

Bei Projekten, bei denen Herausforderungen bezüglich der Fertigung bestehen, kann der vorgestellte Prozess genutzt werden, um darauf basierende Systeme zu entwickeln. Dabei ist zu prüfen, ob durch das jeweilige spezielle Fertigungsverfahren Anpassungen der operativen Arbeitsschritte erforderlich sind. Beispiele aus dem Promotionsprogramm *Tailored Light* und dem Exzellenzcluster *PhoenixD* sind:

Additive Fertigung von Reflektoren Erforschung des Potenzials der additiven Fertigung zur Herstellung von optischen Reflektoren [LEUT18]

Diffraktive optische Elemente für Fahrzeugrückleuchten Erforschung des Potenzials eines kostengünstigen Herstellungsverfahrens für diffraktive optische Elemente für Fahrzeugrückleuchten [KHAN18]

Additive Fertigung von Silikonoptiken Erforschung des Potenzials der additiven Fertigung zur Herstellung von Silikonoptiken [BIER20]

Die Eingrenzung des Prozesses auf bestimmte optomechatronische Funktionen sowie der Fokus auf Wirkungen auf den Menschen führen dazu, dass der vorgestellte Prozess für die Entwicklung einiger optomechatronischer Systeme nicht geeignet ist. Dies betrifft beispielsweise mikroskalierte Systeme aus dem Promotionsprogramm *Tailored Light* und dem Exzellenzcluster *PhoenixD*:

Mikro-LED-Array Erforschung von Herstellungsverfahren für pixelierte Lichtquellen [KUSC17]

Polymerbasierte photonische Netzwerke und Detektoren Erforschung des Potenzials von gedruckten photonischen Komponenten und Leitern [REZE18]

Nano LED-Array für Beleuchtung und Detektion Erforschung von nanoskalierten LED-Lichtquellen [MARI19]

Optoakustischer Detektor Erforschung eines speziellen optischen Detektors [BLUM19]

Zum Abschluss der Diskussion wird festgehalten, dass mit dem erarbeiteten Prozess ein V-Modell zur Verfügung steht, anhand dessen optomechatronische Systeme methodisch entwickelt werden können. Der Prozess ist für eine Vielzahl von Projekten anwendbar, wobei eine direkte Anwendbarkeit für Forschungsprojekte gegeben ist, in denen Systeme mit den betrachteten optomechatronischen Hauptfunktionen entwickelt werden und die eine Wirkung auf Menschen haben.

7.2 Ausblick

Es bestehen weitere Forschungsmöglichkeiten hinsichtlich der Anpassung des Prozess auf weitere optomechatronische Hauptfunktionen. In der vorgestellten Version des Prozesses ist eine Anwendbarkeit für die drei Funktionen *Beleuchten*, *Informationen anzeigen* und *Messen* gegeben. Eine Erweiterung z.B. hinsichtlich der Funktion *Materialien be- und verarbeiten* würde weitere Anwendungspotenziale mit sich bringen. Wie zuvor diskutiert, kann es außerdem sinnvoll sein, Randbedingungen von speziellen Fertigungsverfahren der optischen Elemente in den Prozess einzubeziehen. Damit würde sichergestellt, dass das Lösungskonzept aus dem Systementwurf mit neuartigen Fertigungsverfahren tatsächlich realisiert werden kann.

Weiterhin wurde diskutiert, dass der vorgestellte Prozess primär für Entwicklungen im Bereich von Forschungsprojekten einsetzbar ist. Für Produktentwicklungen in Unternehmen ist die Anwendbarkeit in der vorgestellten Version nur eingeschränkt gegeben. Hier wäre eine Anpassung des Prozesses erforderlich, um diesen in den typischerweise vorhandenen unternehmensspezifischen Entwicklungsprozess einzuordnen. In diesem Zuge kann es sinnvoll sein, anstelle des ausgewählten V-Modells der VDI-Richtlinie 2206 das V-Modell des MBSE zu nutzen, da der Fokus des MBSE bereits auf der Integration in Unternehmensprozesse liegt.

Außerdem ist zu empfehlen, dass der Prozess als digitales Tool aufbereitet wird, um so nachhaltiger nutzbar zu sein. Dies ist insbesondere dann erforderlich, wenn eine Integration in bestehende Entwicklungsprozesse von Unternehmen erfolgen soll, da diese typischerweise in umfangreiche Tools zum Daten- und Prozessmanagement integriert sind.

Der vorgestellte Prozess basiert auf Erfahrungen konkreter Forschungsprojekte aus dem Bereich des optischen Gerätebaus am IPeG. Das als Anwendungsbeispiel genutzte Projekt ist dabei die Basis der aufgezeigten Erkenntnisse. Es ist zu empfehlen, bei der Nutzung des Prozesses in zukünftigen Projekten Herausforderungen und spezifische Anpassungen zu dokumentieren und verfügbar zu machen. Dies kann beispielsweise erfolgen, indem Erfahrungen aus weiteren Projekten als kompakte Anwendungsbeispiele aufbereitet werden (Best Practice). Durch die Anwendung des vorgestellten Prozesses in zukünftigen Vorhaben kann dieser bezüglich eingesetzter Methoden weiter verbessert und ausgebaut werden.

Literaturverzeichnis

- [ANGE19] ANGERMEIER, Daniel; BARTELT, Christian; BAUER, Otto; BENEKEN, Gerd; BERGNER, Klaus; BIROWICZ, Ulrich; BLISS, Thomas; BREITENSTROM, Christian; CORDES, Nils; CRUZ, David; DOHRMANN, Patrick; FRIEDRICH, Jan; GNATZ, Michael; HAMMERSCHALL, Ulrike; HIDVEGI-BARSTORFER, Istvan; HUMMEL, Helmut; ISRAEL, Dirk; KLINGENBERG, Thomas; KLUGSEDER, Klaus; KÜFFER, Inga; KUHRMANN, Marco; KRANZ, Michael; KRANZ, Wolfgang; MEINHARDT, Hans-Jürgen; MEISINGER, Michael; MITTRACH, Sabine; NEUSSER, Hans-Joachim; NIEBUHR, Dirk; PLÖGERT, Klaus; RAUH, Doris; RAUSCH, Andreas; RITTEL, Thomas; RÖSCH, Winfried; SAAS, Erik; SCHRAMM, Joachim; SIHLING, Marc; TERNITÉ, Thomas; VOGEL, Sascha; WEBER, Bernd; WITTMANN, Marion: *V-Modell XT 2.3*. München: Verein zur Weiterentwicklung des V-Modell XT e.V, 2019. – ISBN 978–3–540–58019–5.
- [BARC19] BARCO: *Datenblatt: 30.000 Lumen, WUXGA, 3-Chip-DLP-Laser-Phosphor-Projektor mit Standard FLEX Helligkeit*. 2019.
- [BEND05] BENDER, Klaus (Hrsg.): *Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. – ISBN 978–3–540–22995–7.
- [BENS17] BENSEL, Silvia: *Messtechnische Bewertung weißer LED-Leuchten: Goniospektralradiometrische Untersuchung räumlicher Farbunterschiede*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2017.
- [BENZ04] BENZ, Stefan: *Eine Entwicklungsmethodik für sicherheitsrelevante Elektroniksysteme im Automobil*. Karlsruhe, Universität Friedericiana Karlsruhe, Dissertation, 2004.
- [BHAK15] BHAKTA, Vikrant R.; BALLARD, Brian: High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP® technology. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978–3–8316–4482–7, S. 483–494.

- [BIER20] BIERMANN, Tobias; GRABE, Tobias; LEY, Peer-Phillip; HÜCHTING, Jasper; LACHMAYER, Roland: Potentials and challenges of additive manufacturing using highly transparent silicone materials. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK (Hrsg.): *DGaO-proceedings 121. Jahrestagung*, 2020.
- [BLUM10] BLUM, Michael: *Patent: Beleuchtungseinrichtung eines Kraftfahrzeugs*. 2010.
- [BLUM19] BLUMENRÖTHER, Elias; MELCHERT, Oliver; KANNGIESSER, Jonas; WOLLWEBER, Merve; ROTH, Bernhard: Single Transparent Piezoelectric Detector for Optoacoustic Sensing—Design and Signal Processing. In: *Sensors* 19 (2019), Mai, Nr. 9, S. 2195.
- [BRAU05] BRAUN, Thomas: *Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld*. München, Technische Universität München, Dissertation, 2005.
- [BUDA19] BUDANOW, Marina; NEUMANN, Cornelius: Road projections as a new and intuitively understandable human-machine interface. In: *Advanced Optical Technologies* 8 (2019), Februar, Nr. 1, S. 77–84.
- [BUND10] BUNDESREGIERUNG: *Optische Technologien: Jahrhundert des Photons*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/optische-technologien-jahrhundert-des-photons-438922>. 2010.
- [CHAT20] CHATZIZYRLI, Elisavet; WIENKE, Andreas; LACHMAYER, Roland; NEUMANN, Jörg; KRACHT, Dietmar: Opto-thermal simulation framework for the investigation of phosphor materials in laser-based lighting systems. In: WITZIGMANN, Bernd (Hrsg.); OSINSKI, Marek (Hrsg.); ARAKAWA, Yasuhiko (Hrsg.): *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXVIII* Bd. 11274 International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2020, S. 181 – 188.
- [CHO02] CHO, Hyungsuck (Hrsg.): *Opto-Mechatronic Systems Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2002. – ISBN 978-0-429-12057-2.
- [CHO05a] CHO, Hyungsuck (Hrsg.): *Optomechatronics: Fusion of Optical and Mechatronic Engineering*. 1. Boca Raton: CRC Press, 2005. – ISBN 0-8493-1969-2.
- [CHO05b] CHO, Hyungsuck; KIM, Min Y.: Optomechatronic technology: the characteristics and perspectives. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 52 (2005), Nr. 4, S. 932–943. – ISSN 0278-0046.

- [CORT17] CORTIGIANI, Fabrizio; LOGIUDICE, Andrea: *Patent: High efficiency digital light processing engine*. 2017.
- [CZIC19] CZICHOS, Horst: *Mechatronik*. 3. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019. – ISBN 978-3-658-09950-3.
- [DUDK19] DUDKO, Uliana; PFLIEGER, Keno; OVERMEYER, Ludger: Optical autonomous sensor module communicating with a smartphone using its camera. In: LEE, El-Hang (Hrsg.); HE, Sailing (Hrsg.): *Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XXI*, SPIE, März 2019.
- [EIGN14] EIGNER, Martin; MUGGEO, Christian; DICKOPF, Thomas; FAISST, Karl-Gerhard: An approach for a model based development process of cybertronic systems. In: *Shaping the Future by Engineering: Proceedings ; 58th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau* 58 (2014).
- [EIGN17] EIGNER, Martin (Hrsg.); KOCH, Walter (Hrsg.); MUGGEO, Christian (Hrsg.): *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme*. Springer-Verlag, 2017. – ISBN 978-3-662-55123-3.
- [FELD13] FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-H: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Berlin: Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978-3-642-29568-3.
- [FISC05] FISCHER, Carsten: *Geometrische Optik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, S. 1–34. – ISBN 978-3-540-26709-6.
- [FISC07] FISCHER, Robert E.; TADIC-GALEB, Biljana; YODER, Paul R.: *Optical Systems Design*. 2. McGraw-Hill Professional, 2007. – ISBN 0-07-147248-7.
- [FRAN13] FRANK, Timo; ECKERT, Karin; HADLICH, Thomas; FAY, Alexander; DIEDRICH, Christian; VOGEL-HEUSER, Birgit: Erweiterung des V-Modells® für den Entwurf von verteilten Automatisierungssystemen. In: *at - Automatisierungstechnik* 61 (2013), Februar, Nr. 2, S. 79–91.
- [FRIC19] FRICKE, Dierk; DENKER, Evgeniia; HERATIZADEH, Annice; WERFEL, Thomas; WOLLWEBER, Merve; ROTH, Bernhard: Non-Contact Dermatoscope with Ultra-Bright Light Source and Liquid Lens-Based Autofocus Function. In: *Applied Sciences* 9 (2019), Nr. 11, S. 2177.
- [FRÖL05] FRÖLICH, Dieter: *Wellenoptik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, S. 35–68. – ISBN 978-3-540-26709-6.

- [GOME17] GOMEZ-VIEYRA, Armando; MALACARA-HERNANDEZ, Daniel: *Optical Design and Aberrations*. CRC Press, November 2017, S. 165–189. – ISBN 978–1–315–11998–4.
- [GOTT16] GOTTWALD, Philipp: *Prozess einer generationsübergreifenden Produktentwicklung durch technische Vererbung*. Hannover, Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2016.
- [GRAE18] GRAESSLER, Iris; HENTZE, Julian; BRUCKMANN, Tobias: V-Models for Interdisciplinary Systems Engineering. In: *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia, The Design Society, Glasgow, UK, 2018.
- [GRAE20] GRAESSLER, Iris; HENTZE, Julian: The new V-Model of VDI 2206 and its validation. In: *at - Automatisierungstechnik* 68 (01 May. 2020), Nr. 5, S. 312 – 324.
- [GROE17] GROETSCH, Stefan; ROTHNEICHNER, Julia: *Patent: Pixel light source*. 2017.
- [GUT14] GUT, Carsten; ROTSCHOLL, Ingo; NEUMANN, Cornelius: Theoretische Leistungs- und Effizienzanalyse laserbasierter Pixellichtsysteme. In: VDI (Hrsg.): *6. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik // Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* Bd. 2221. Düsseldorf: VDI-Verl., 2014. – ISBN 978–3–18–092221–8, S. 15–29.
- [GÜNT10] GÜNTHER, Alexander: *Entwicklung eines aktiven Kraftfahrzeugscheinwerferkonzepts mit DMD-Array*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2010.
- [HAMM18] HAMM, Michael; HUHNS, Wolfgang; RESCHKE, Johannes: Ideas for Next Lighting Generations in Digitalization and Autonomous Driving. In: *SAE Technical Paper*, SAE International, 04 2018.
- [HATH04] HATHEWAY, Alson: Error budgets for optomechanical modeling. In: KAHAN, Mark A. (Hrsg.): *Optical Modeling and Performance Predictions* Bd. 5178 International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2004, S. 1 – 13.
- [HEIJ18] HEIJMANS, Jeroen; MÜLLER, Michael; HOLZLÖHNER, Ronald: Combined Optomechanical analysis for modern optical instruments. In: ANGELI, George Z. (Hrsg.); DIERICKX, Philippe (Hrsg.): *Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VIII* Bd. 10705 International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2018, S. 746 – 756.

- [HEIN13] HEINZE, Georg; HUBRICH, Christian; HALFMANN, Thomas: Stopped Light and Image Storage by Electromagnetically Induced Transparency up to the Regime of One Minute. In: *Phys. Rev. Lett.* 111, 033601 (2013).
- [HELD20] HELD, Marcel P.: *Hochauflösende LED-Scheinwerfer für Kraftfahrzeuge*, Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2020.
- [HOFF03] VON HOFFMANN, Alexander: *Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnen*, TU Ilmenau, Dissertation, 2003.
- [HOFF14] HOFFMANN, Ingo; SCHMIDT, Christian: Toolkette zum Volladaptiven Scheinwerfer. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: 6. VDI-Tagung, Karlsruhe*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2014 (VDI-Berichte). – ISBN 978-3-18-092221-8, S. 71–82.
- [HUTH20] HUTH, Tobias; VIETOR, Thomas: Systems Engineering in der Produktentwicklung: Verständnis, Theorie und Praxis aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht. In: *Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO)* 51 (2020), Februar, Nr. 1, S. 125–130.
- [ISER08] ISERMANN, Rolf: *Integrierte mechanisch-elektronische Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, S. 1–44. – ISBN 978-3-540-32512-3.
- [JAHN16] JAHN, Patric: Auflösungskriterien adaptiver Scheinwerfersysteme. In: VDI (Hrsg.): *7. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik // Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* Bd. 2278. Düsseldorf: VDI-Verl., 2016. – ISBN 978-3-18-092278-2.
- [JAHN17] JAHN, Patric; CRISTEA, Iulia; NEUMANN, Cornelius: High-Resolution Light-Based Driver-Assistance – Optimal Contrast for Symbols. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *12th International Symposium on Automotive Lightning - ISAL 2017 - Proceedings of the Conference*. München: Herbert Utz Verlag, 2017 (Darmstädter Lichttechnik). – ISBN 978-3-8316-4672-2, S. 43–52.
- [JAHN19] JAHN, Patric; NEUMANN, Cornelius: Ablenkpotenzial eines Baustellenlichtes auf andere Verkehrsteilnehmer. In: *Lux Junior 2017. 14. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, Dörnfeld an der Ilm*, 2019.
- [JANS93] JANSEN, Dirk: *Optoelektronik*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 1993. – ISBN 978-3-528-04714-6.

- [JÜR15] JÜRGENS, Christian: *Der kontrastadaptive Scheinwerfer*. Hannover, Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2015.
- [KAHR18] KAHR, Lüder A.; ORTMAIER, Tobias; KNÖCHELMANN, Marvin; WOLF, Alexander; LACHMAYER, Roland; ILANGO, Shivaraman: User evaluation study on illumination requirements to design an augmented reality projector for open liver surgery. In: KIDGER, Tina E. (Hrsg.); DAVID, Stuart (Hrsg.): *Illumination Optics V*, SPIE, Mai 2018.
- [KAUS06] KAUSCHKE, Rainer: *Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern*. Paderborn, Universität Paderborn, Dissertation, 2006.
- [KHAN15] KHANH, Tran Q.; HUHN, Wolfgang: Sichtverbesserungssysteme. In: WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); LOTZ, Felix (Hrsg.); SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Berlin: Springer Vieweg, 2015. – ISBN 978-3-658-05734-3.
- [KHAN18] KHAN, Muhammad S.; RAHLVES, Maik; LACHMAYER, Roland; ROTH, Bernhard: Polymer-based diffractive optical elements for rear end automotive applications: design and fabrication process. In: *Applied Optics* 57 (2018), Nr. 30, S. 9106.
- [KLOP17] KLOPPENBURG, Gerolf: *Scannende Laser-Projektionseinheit für die Fahrzeugfrontbeleuchtung*, Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2017.
- [KNÖC18a] KNÖCHELMANN, Marvin; KLOPPENBURG, Gerolf; LACHMAYER, Roland: Headlamp innovations: optical concepts for fully adaptive light distributions. In: DOUGLASS, Michael R. (Hrsg.); LEE, Benjamin L. (Hrsg.): *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications X*, SPIE, Februar 2018.
- [KNÖC18b] KNÖCHELMANN, Marvin; WOLF, Alexander; KLOPPENBURG, Gerolf; LACHMAYER, Roland: Aktiver Scheinwerfer mit DMD-Technologie zur Erzeugung vollständiger Lichtverteilungen. In: VDI (Hrsg.): *8. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik // Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* Bd. 2323. Düsseldorf: VDI-Verl., 2018. – ISBN 978-3-18-092323-9, S. 61–78.
- [KNÖC19a] KNÖCHELMANN, Marvin; HELD, Marcel P.; KLOPPENBURG, Gerolf; LACHMAYER, Roland: High-resolution headlamps – technology analysis and system design. In: *Advanced Optical Technologies* 8 (2019), Nr. 1, S. 33 – 46.
- [KNÖC19b] KNÖCHELMANN, Marvin; LEY, Peer-Phillip; KLOPPENBURG, Gerolf; MOZGOVA, Iryna; LACHMAYER, Roland: Methodische Entwicklung eines opto-

- mechatronischen Systems am Beispiel eines hochadaptiven Fahrzeugscheinwerfers. In: *Tagungsband der VDI Fachtagung Mechatronik 2019* (2019).
- [KRAH17] KRAHNSTÖVER, Anna Z.: *Licht führt!?* Wiesbaden: Springer-Verlag, 2017. – ISBN 978-3-658-17160-5.
- [KUSC17] KUSCH, Alexander; WURZ, Marc; HELD, Marcel P.; LEY, Peer-Phillip; WOLF, Alexander; LACHMAYER, Roland: LED packaging with optimized heat dissipation for a micro LED array. In: OTTO, T. (Hrsg.): *Smart Systems Integration*, 2017. – ISBN 978-3-95735-057-2, S. 399–402.
- [KÖLP11] KÖLPER, Christopher; BERGBAUER, Werner; STRASSBURG, Martin; LINDER, Norbert: Die Licht(r)evolution. Weiße LEDs für die Allgemeinbeleuchtung. In: *Physik in unserer Zeit* 42 (2011), März, Nr. 2, S. 92–98.
- [LACH14] LACHMAYER, Roland; WOLF, Alexander; KLOPPENBURG, Gerolf: System efficiency of laser-based white light. In: *Advanced Optical Technologies* 3 (2014), Nr. 5-6, S. 523–530.
- [LACH17] LACHMAYER, Roland; KNÖCHELMANN, Marvin; LEY, Peer-Phillip; KLOPPENBURG, Gerolf; WOLF, Alexander: Autonomes Fahren und Beleuchtung : Sind heutige Scheinwerfer gut genug für selbstfahrende Autos? In: *Unimagazin* 3 (2017).
- [LACH20] LACHMAYER, Roland; ROTH, Bernhard; WOLF, Alexander: *Spacially, Temporally and Spectrally Adapted Light for Applications*. Garbsen: TEWISS Verlag, 2020.
- [LEE11] LEE, Taewon; PARK, Gunwoo; KIM, Hongseok; PARK, Inheum; LEE, Kyung-hoon; AHN, Byoungsuk: The Development of the Automotive Headlamp using the DMD. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 9th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 14. München: Herbert Utz Verlag, 2011. – ISBN 3-8316-4093-9, S. 524–534.
- [LEUT18] LEUTERITZ, Georg; LACHMAYER, Roland: Additive manufacturing of reflective optics: evaluating finishing methods. In: HELVAJIAN, Henry (Hrsg.); PIQUÉ, Alberto (Hrsg.); GU, Bo (Hrsg.): *Laser 3D Manufacturing V*, SPIE, Februar 2018.
- [LEY17] LEY, Peer-Phillip; HELD, Marcel P.; WOLF, Alexander; LACHMAYER, Roland-mayer: Konzepte für hochauflösende Fahrzeugscheinwerfer unter Berücksichtigung der Etendue. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK (Hrsg.): *DGaO-proceedings 118. Jahrestagung*, 2017.

- [LEY19a] LEY, Peer-Phillip; KNÖCHELMANN, Marvin; KLOPPENBURG, Gerolf; LACHMAYER, Roland: Development Methodology for Optomechatronic Systems Using the Example of a High-Resolution Projection Module. In: *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1* (2019), Juli, Nr. 1, S. 2547–2556.
- [LEY19b] LEY, Peer-Phillip; LACHMAYER, Roland: Imaging and non-imaging illumination of DLP for high resolution headlamps. In: DOUGLASS, Michael R. (Hrsg.); EHMKE, John (Hrsg.); LEE, Benjamin L. (Hrsg.): *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications XI* Bd. 10932 International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2019, S. 133 – 142.
- [LI19] LI, Yang; KNÖCHELMANN, Marvin; LACHMAYER, Roland: Concepts of inhomogeneous illumination of area-based light modulators for high-resolution headlamps. In: DOUGLASS, Michael R. (Hrsg.); LEE, Benjamin L. (Hrsg.); EHMKE, John (Hrsg.): *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications XI*, SPIE, 2019.
- [LI20] LI, Yang; KNÖCHELMANN, Marvin; LACHMAYER, Roland: Beam Pre-Shaping Methods Using Lenslet Arrays for Area-Based High-Resolution Vehicle Headlamp Systems. In: *Applied Sciences* 10 (2020), Juli, Nr. 13, S. 4569.
- [LIN14] LIN, Psang D.: *New Computation Methods for Geometrical Optics*. Singapur: Springer-Verlag, 2014. – ISBN 978–981–4451–78–9.
- [LIND09] LINDEMANN, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. 3. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – ISBN 978–3–642–01422–2.
- [LIU97] LIU, Kexing: *Applications of Photonics Technology 2*. Bosten: Springer, 1997, S. 145–147. – ISBN 978–1–4757–9252–2.
- [LÖFF20] LÖFFLER-MANG, M.; NAUMANN, H.; SCHRÖDER, G.: *Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2020. – ISBN 978–3–446–46126–0.
- [MARI19] MARIANA, Shinta; GÜLINK, Jan; HAMDANA, Gerry; YU, Feng; STREMPER, Klaas; SPENDE, Hendrik; YULIANTO, Nursidik; GRANZ, Tony; PRADES, Joan D.; PEINER, Erwin; WASISTO, Hutomo S.; WAAG, Andreas: Vertical GaN Nanowires and Nanoscale Light-Emitting-Diode Arrays for Lighting and Sensing Applications. In: *ACS Applied Nano Materials* 2 (2019), Mai, Nr. 7, S. 4133–4142.

- [MESC08] MESCHEDE, Dieter (Hrsg.): *Optik, Licht und Laser*. Vieweg+Teubner, 2008. – ISBN 978-3-8351-0143-2.
- [MIEM15] MIEMIETZ, Stefan; MEYER, Benjamin; LIEBEHENSCHHEL, Daniel: *Patent: Leuchtvorrichtung mit Mikrosiegeln für ein Kraftfahrzeug und Verfahren zur Steuerung der Leuchtvorrichtung*. 2015.
- [MOIS15] MOISEL, Jörg: Requirements for Future High Resolution ADB Modules. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* Bd. 16. München: Herbert Utz Verlag, 2015. – ISBN 978-3-8316-4481-0.
- [MOZG15] MOZGOVA, Iryna; LACHMAYER, Roland; GOTTWALD, Philipp: Formulations of Paradigms of Technial Inheritance. In: CHRISTIAN WEBER, Gaetano Cascini Marco CantaMESsa Dorian Marjanovic Francesca M. (Hrsg.): *Proceedings of ICED 2015, the 20th International Conference on Engineering Design*. Milano, Italien, 2015. – ISBN 978-1-904670-71-1.
- [OPTO15] OPTOMA: *Datenblatt: Optoma X605*. 2015.
- [OSRA19] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS: *Datenblatt: OSRON Boost HL LED (KW CULNM1.TG)*. 2019.
- [PFUL17] PFULLMANN, Nils; THIEL, A.; THAMM, Mathias; PLÖGER, R.; KLOPPENBURG, G.; WOLF, A.; LACHMAYER, R.: From mechanical ADB systems to high resolution head lamps - new opportunities of novel headlight systems. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* Bd. 17. München: Herbert Utz Verlag, 2017. – ISBN 978-3-8316-4671-5.
- [PIAG40] PIAGGIO, H. T. H.: The Mathematical Theory of Huygens' Principle. In: *Nature* 145 (1940), April, Nr. 3675, S. 531-532.
- [PÜTS16] PÜTSCH, Oliver: *Aktive und adaptive Strahlformungssysteme für die Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung*. Aachen, RWTH Aachen, Dissertation, 2016.
- [RAHM19] RAHMAN, Tauheed u.; RAZA, Safdar; SAEED, Mazhar; JAMEEL, Shahzad: An Emerging White LED Technology and associated Thermal Issues – A Review. In: *Journal of Applied and Emerging Sciences* (2019), Dezember, S. 106-120.
- [RAUS09] RAUSCHENBEUTEL, Arno: Eine Flasche für Licht. In: *Physik in unserer Zeit* 40 (2009), Nr. 6, S. 276-277.

- [REIS16] REISINGER, Bettina; WINTERER, Nina; REINPRECHT, Markus: Auf der Suche nach der Auflösung – Searching for (re)solution. In: VDI (Hrsg.): *7. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik // Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* Bd. 2278. Düsseldorf: VDI-Verl., 2016. – ISBN 978-3-18-092278-2.
- [REZE18] REZEM, Maher; GÜNTHER, Axel; KHAN, Muhammad S.; REITHMEIER, Eduard; RAHLVES, Maik; KELB, Christian; ROTH, Bernhard: Towards fabrication and application of polymer based photonics networks and sensors. In: PIYAWATTANAMETHA, Wibool (Hrsg.); PARK, Yong-Hwa (Hrsg.); ZAPPE, Hans (Hrsg.): *MOEMS and Miniaturized Systems XVII*, SPIE, Februar 2018.
- [RICH16] RICHTER, Timo; INKERMANN, David; VIETOR, Thomas: Product Architecture Design as a Key Task within Conceptual Design. In: *Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference*, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia, The Design Society, Glasgow, UK, 2016. – ISSN 1847-9073.
- [RIVE16] RIVERO, Jose Roberto V.; GUT, Carsten; REIM, Johannes: *Patent: Beleuchtungseinrichtung für ein Fahrzeug und zugehöriges Betriebsverfahren*. 2016.
- [ROTH00] ROTH, KARLHEINZ: *Konstruktionslehre*. Bd. 1: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 1: Konstruktionslehre*. 3. Braunschweig: Springer Verlag, 2000. – ISBN 978-3-642-62099-7.
- [SANF15] SANFORD FRIEDENTHAL, Rick S.: *A Practical Guide to SysML*. Elsevier, 2015. – ISBN 978-0-12-800202-5.
- [SCHM11] SCHMIDT, Robert F. (Hrsg.); LANG, Florian (Hrsg.); HECKMANN, Manfred (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. – ISBN 978-3-642-01651-6.
- [SCHU05] SCHUHMANN, Rainer: *Entwicklung optischer Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, S. 95–126. – ISBN 978-3-540-26709-6.
- [SEIT17] SEITZ, Mihel: *Patent: Device and method for projecting a light pattern*. 2017.
- [SHAN97] SHANNON, Robert R.: *The Art and Science of Optical Design*. Cambridge University Press, 1997. – ISBN 978-0-521-58868-3.
- [STIN19] STINY, Leonhard: *Halbleiterdioden*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 77–216. – ISBN 978-3-658-24752-2.

- [TEXA05] TEXAS INSTRUMENTS: *Single-Panel DLP Projection System Optics*. 2005.
- [TEXA15] TEXAS INSTRUMENTS: *DLP7000 DLP 0.7 XGA 2x LVDS Type A DMD*. 11 2015. – Rev. D.
- [TEXA18a] TEXAS INSTRUMENTS: *DLP3030-Q1 0.3 WVGA S450 DMD*. 03 2018. – Rev. A.
- [TEXA18b] TEXAS INSTRUMENTS: *DLP5530-Q1 0.3-inch 1.3 Megapixel DMD for Automotive Interior Display*. 03 2018. – Rev. E.
- [VAN 98] VAN KESSEL, Peter; HORNBECK, Larry J.; MEIER, R. E.; DOUGLASS, M. R.: A MEMS-based projection display. In: *Proceedings of the IEEE* 86 (1998), Aug, Nr. 8, S. 1687–1704. – ISSN 1558–2256.
- [VELZ14] VELZEL, Chris: *A Course in Lens Design*. Springer Netherlands, 2014. – ISBN 978–94–017–8684–3.
- [VIAL] VIALUX: *Datenblatt: Vialux Hi-Speed V-Module*.
- [WATT07] WATTY, Robert; BINZ, Hansgeorg: Methodology for the Development of Micro-Electro-Mechanical-Systems. In: BOCQUET, J.-C. (Hrsg.): *Proceedings of ICED 200, the 16th International Conference on Engineering Design*. Paris, France, 2007. – ISBN 1–904670–02–4.
- [WILH15] WILHELMY, Carsten: *Patent: Scheinwerfer für einen Kraftwagen sowie ein Kraftwagen*. 2015.
- [WOLF16a] WOLF, Alexander; KLOPPENBURG, Gerolf; DANOV, Roman; LACHMAYER, Roland: DMD Based Automotive Lighting Unit. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK (Hrsg.): *DGaO-proceedings 117. Jahrestagung*, 2016. – ISSN 1614–8436.
- [WOLF16b] WOLF, Alexander; LACHMAYER, Roland: Hybrid simulation of thermo-optical effects in laser-based white light sources. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK (Hrsg.): *DGaO-proceedings 117. Jahrestagung*, 2016.
- [WOLF17a] WOLF, Alexander: *Laserscheinwerfer für Kraftfahrzeuge*, Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2017.
- [WOLF17b] WOLF, Alexander; LACHMAYER, Roland; KLOPPENBURG, Gerolf: *Patent: Lighting module, lighting device and computer program*. 2017.

- [YODE05] YODER, Paul R.: *Opto-mechanical systems design*. 3rd ed., rev. and expanded. M. Dekker New York, 2005. – ISBN 978–0–429–11659–9.
- [ZYDE14] ZYDEK, Bastian; SCHILLER, Christoph; POLIN, Dmitrij; KHANH, Tran Q.: Bewertung von Scheinwerfern mit blendfreiem Fernlicht. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 116 (2014), Mai, Nr. 6, S. 64–69.

Verwendete Normen und Richtlinien

- [CIE1931] CIE 1931: *Standard Colorimetric Observer*. 1931, herunterladbarer Datensatz unter <http://cie.co.at/publications/colorimetry-part-1-cie-standard-colorimetric-observers-0>, letzter Zugriff 18.10.2020
- [DIN5031] DIN 5031: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik*. Beuth Verlag, Berlin, 2017
- [DIN11252] DIN EN ISO 11252: *Laser und Laseranlagen*. Beuth Verlag, Berlin, 2013
- [DIN12198] DIN EN 12198: *Sicherheit von Maschinen - Bewertung und Verminderung des Risikos der von Maschinen emittierten Strahlung*. Beuth Verlag, Berlin, 2008
- [DIN60825] DIN EN 60825: *Sicherheit von Lasereinrichtungen*. Beuth Verlag, Berlin, 2011
- [DIN62471] DIN EN 62471: *Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen*. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [ECE48] UNECE Vehicle Regulation 48: *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices*. United Nations Economic Commission for Europe, 2014
- [ECE123] UNECE Vehicle Regulation 123: *Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles*. United Nations Economic Commission for Europe, 2013
- [VDI2206] VDI-Richtlinie 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Beuth Verlag, Berlin, 2004

- [VDI2221] VDI-Richtlinie 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Beuth Verlag, Berlin, 1993
- [VDI2225] VDI-Richtlinie 2225: *Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Vereinfachte Kostenermittlung*. Beuth Verlag, Berlin, 1997
- [VDI2242] VDI-Richtlinie 2242: *Ergonomiegerechte Gestaltung technischer Erzeugnisse*. Beuth Verlag, Berlin, 2016

Anhang

A Betreute studentische Arbeiten

Tabelle A.1: Übersicht betreuter studentischer Arbeiten

Name	Titel der Arbeit
Hupe, Manuel	Entwicklung eines optischen Systems für DMD-basierte hochauflösende Scheinwerfer
Trütken, Merle	Überlagerung hochauflösender Scheinwerfer zur Projektion von Symbolen auf die Straße
Putter, Roman	Sichere Lichttechnik - Unfalldatenanalyse und Entwicklung einer hochauflösenden Lichtfunktion
Halt, Alexander	Entwicklung eines Matlab-Tools zur optischen Vorauslegung hochauflösender Fahrzeugscheinwerfer
Menze, Johannes	Konzeptionierung einer Vorrichtung zur herstellerübergreifenden Kalibrierung von Sensoren für Fahrerassistenzsysteme
Putter, Roman	Nutzbarmachung von Unfallvideoaufnahmen - Ausarbeitung eines Konzepts für videobasierte Verkehrsunfallanalyse
Yarcu, Ayten	Entwicklung eines Systems zur Verschmutzungsvermeidung der Kamera eines autonomen Roboters im Außeneinsatz
Lalkaka, Brandon	Light-based Driver Assistance and Path Projection
Fazlija, Florim	Methode zur Diagnose von elektronischen Fehlerfällen für sicherheitskritische Fahrzeugfunktionen unter Berücksichtigung der ISO26262

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Marvin Knöchelmann
Geburtsdatum	27. September 1988
Geburtsort	Hannover

Akademischer Werdegang

seit 2016	Doktorand an der Fakultät für Maschinenbau der Leibniz Universität Hannover
2009 - 2015	Maschinenbaustudium an der Technischen Universität München Vertiefung: Fahrzeugtechnik & Faserverbundtechnik Abschluss: Master of Science

Zivildienst

2008 - 2009	Heilpädagogische Tagesstätte Wichernzentrum München
-------------	---

Schulbildung

2001 - 2008	Marion-Dönhoff-Gymnasium Nienburg Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
-------------	---