

Methodische Entwicklung eines opto-mechatronischen Systems am Beispiel eines hochadaptiven Fahrzeugscheinwerfers

Methodical development of an opto-mechatronic system using the example of a highly adaptive vehicle headlight

Marvin Knöchelmann, Peer-Phillip Ley, Dr.-Ing. Gerolf Kloppenburg, Dr.-Ing. Iryna Mozgova, Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer

Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, 30167 Hannover, Deutschland, knochelmann@ipeg.uni-hannover.de

Kurzfassung

Für die Entwicklung optomechatronischer Produkte aus dem Bereich der Beleuchtungstechnik für Fahrzeuge kann das V-Modell der VDI 2206 angewandt werden. Als Anwendungsbeispiel wird die methodische Entwicklung eines hochadaptiven Scheinwerfers betrachtet. Aus dem Beispiel wird ein angepasstes V-Modell abgeleitet, mit dem Beleuchtungssysteme entwickelt werden können. Da die Hauptfunktion *hochadaptive Ausleuchtung des Verkehrsraumes* lichtbasiert ist, spielt die optische Auslegung im Vergleich zu den anderen Domänen eine herausragende Rolle. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie der Systementwurf mit analytischen Modellen durchgeführt werden kann, sodass vorerst kein numerisches Modell für eine optische Simulation mittels Raytracing erforderlich ist. Das Ziel des Systementwurfs in dem betrachteten Beispiel ist die Eingrenzung von Parametern des optischen Systems. Mit dem erstellten numerischen Simulationsmodell und dem aufgebauten Prototyp wird die dargestellte Vorgehensweise validiert.

Abstract

For the development of optomechatronic products from the field of lighting technology for vehicles, the V-model of the VDI 2206 can be applied. As an application example, the methodical development of a highly adaptive headlight is considered. From the example, an adapted V-model is derived, with which lighting systems can be developed. Since the main function *highly adaptive illumination of the traffic area* is light-based, the optical design plays an outstanding role compared to the other domains. This article shows how the system design can be performed with analytical models, so that in the early development phase no numerical model for optical simulation by means of ray tracing is required. The goal of the system design in the considered example is to derive parameters of the optical system. The proposed procedure is validated with a numerical simulation and a headlamp prototype.

1 Einleitung

Die Beleuchtungssysteme im Bereich der Fahrzeugtechnik unterliegen aktuell einem enormen Wandel. Im Bereich der Scheinwerfer werden konventionelle Systeme, bestehend aus einer Lichtquelle und einem Reflektor oder einer Linse, zunehmend durch Systeme, bestehend aus LED-Arrays und aufwendigen optischen Systemen, ersetzt. Treiber dieser Entwicklung ist die Verbesserung der Verkehrssicherheit. Die aus den neuen Technologien resultierende Freiheit im Fahrzeugdesign ist eine weitere Motivation dieser Entwicklungen.

Mit hochauflösenden Scheinwerfern können individuell angepasste Lichtverteilungen erzeugt werden, um eine optimale Ausleuchtung des Verkehrsraumes zu erreichen. Die Lichtverteilung der Scheinwerfer besteht aus einer Vielzahl von Bildpunkten, ähnlich wie bei Projektoren in der Unterhaltungsindustrie. Je nach verwendeter Technologie zur Bilderzeugung und Umsetzung des optischen Systems sind verschieden viele Pixel realisierbar, wodurch ein variabler Funktionsumfang resultiert. Während eine geringe Pixelanzahl die individuelle Ausleuchtung des Verkehrsraums



Abbildung 1 Informationsprojektion auf der Straße

ohne Blendung anderer Verkehrsteilnehmer gestattet, kann bei größerer Anzahl von Pixeln auch die Informationsprojektion auf der Straße umgesetzt werden (Abbildung 1). Hochauflösende Scheinwerfersysteme weisen deutliche Unterschiede zu bisherigen Scheinwerfern auf, wodurch neue Herausforderungen bei der Entwicklung dieser Systeme resultieren.

2 Hochadaptive Scheinwerfer als optomechatronische Systeme

Um die konkreten Herausforderungen bei der Entwicklung hochauflösender Scheinwerfersysteme herzuleiten, wird zunächst der Systemaufbau eines aktuellen adaptiven Scheinwerfers (Englisch: Advanced Frontlighting System / AFS) sowie der eines hochauflösenden Scheinwerfers beschrieben und verglichen.

Als AFS-Scheinwerfer (Abbildung 2) werden Systeme bezeichnet, die unterschiedliche Lichtverteilungen wie Abblendlicht, Stadtlicht, Autobahnlicht, Schlechtwetterlicht, jeweils horizontal schwenkbar als dynamisches Kurvenlicht, erzeugen können [9, 10]. Die Wahl der passenden Lichtverteilung erfolgt automatisch und ist abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Lenkwinkel. Beispielsweise ist die Aktivierung des Schlechtwetterlichts von der Nutzung des Scheibenwischers abhängig.

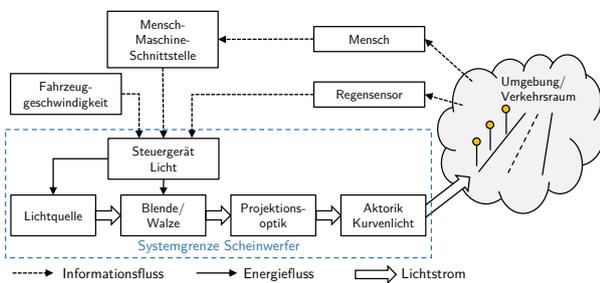


Abbildung 2 Systemaufbau eines AFS-Scheinwerfers

Die notwendigen Daten zur Auswahl der aktuell passenden Lichtverteilung werden von dem Steuergerät Licht, das direkt im Scheinwerfer oder außerhalb angeordnet sein kann, ausgewertet. Der Fahrer nimmt Informationen aus der Umgebung auf und verarbeitet diese zu Fahrmanövern. Über die Mensch-Maschine-Schnittstelle kann der Fahrer bspw. Assistenzfunktionen steuern. Die unterschiedlichen Lichtfunktionen können z.B. über eine spezielle Walze realisiert werden. Je nach gewünschter Lichtfunktion wird die Walze gedreht, sodass diese als adaptive Blende im Strahlengang wirkt. Mit der Projektionsoptik wird die Kontur der Walze im Straßenraum abgebildet [7]. Der Lichtpfad (Lichtquelle, Blende, Projektionsoptik) ist drehbar gelagert und kann sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung geschwenkt werden, sodass ein dynamisches Kurvenlicht realisiert werden kann. Als Lichtquellen kommen überwiegend Xenon-Brenner zum Einsatz [7].

In Abbildung 3 sind die Komponenten eines hochauflösenden Scheinwerfers gezeigt. Informationen über die Umgebung, also Anzahl und Position anderer Verkehrsteilnehmer, Position von Fahrstreifen, Verkehrschildern etc., werden von einer Frontkamera, Lidar- und Radarsensoren aufgenommen. Weitere Sensoren nehmen den aktuellen Fahrzeugzustand, wie die Geschwindigkeit, Beschleunigungen und den Lenkwinkel auf. Durch die funkbasierte Vernetzung des Fahrzeugs mit anderen Fahrzeugen, der Infrastruktur oder dem Internet (Car2X) können weitere Informationen bezogen werden. Die gesammelten Informatio-

nen werden auf einem Steuergerät zur zentralen Informationsverarbeitung zusammengeführt. Das Resultat sind Steuerbefehle, um in der jeweiligen Fahrsituation eine angepasste Lichtverteilung in den Verkehrsraum zu projizieren. Das optische Grundsystem dient zur Erzeugung und Modellierung sichtbaren Lichts sowie zur Projektion des entstandenen Bildes auf die Straße.

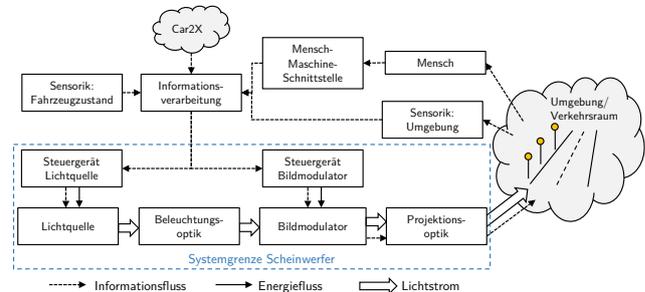


Abbildung 3 Systemaufbau eines hochadaptiven Scheinwerfer

Eine Art von Bildmodulatoren sind Digitale Mikrospiegel Arrays (DMDs), die aus einigen hunderttausend schaltbaren Spiegeln bestehen und je nach Stellung das emittierte Licht der Lichtquelle auf einen Absorber oder in die Projektionsoptik lenken. Die einzelnen Spiegel werden so zu Pixeln eines hochauflösten Bildes. Eine Übersicht über geeignete Technologien für hochauflösende Scheinwerfer und deren Eigenschaften ist in [5] zu finden.

Der Vergleich beider Systemaufbauten zeigt, dass die Vernetzung der Komponenten und die Anzahl genutzter Umgebungs- und Fahrzeugdaten deutlich zunimmt. Im Systemaufbau des hochauflösenden Scheinwerfers ist für die Informationsverarbeitung ein gesonderter Block dargestellt, der z.B. der zentrale Fahrzeugrechner sein kann. Innerhalb der Systemgrenze des Scheinwerfers kommt der Bildmodulator als neue Komponente hinzu, der eine präzise Justage und geeignete Ansteuerung erfordert. Da hochauflösende Scheinwerfersysteme in der Lage sind ein digitales Kurvenlicht ohne bewegliche Komponenten umzusetzen, entfällt die Aktorik und die drehbare Aufhängung des optischen Pfades. Aufgrund ihrer hohen Effizienz und Langlebigkeit kommen zur Lichterzeugung in hochauflösenden Systemen fast ausschließlich LEDs zum Einsatz. Zusammengefasst sind die Neuerungen hochauflösender Scheinwerfer im Vergleich zu AFS-Scheinwerfern:

Zunehmende Vernetzung Die zunehmende Vernetzung wie mit der Fahrzeugkamera und anderen Sensoren erfordert eine frühzeitige Definition von Daten und Schnittstellen und bedingt einen häufigen Austausch der domänenspezifischen Entwicklerteams oder die Entwicklung in interdisziplinären Teams.

Integration optomechatronischer Modulatoren

Bildmodulatoren zur Generierung der hohen Auflösung der Lichtverteilung werden erstmals in Scheinwerfern und teilweise generell erstmals in der Fahrzeugtechnik eingesetzt.

Einsatz von Halbleiterlichtquellen Lichtquellen wie Halogenlampen und Xenon-Brenner werden vollständig verdrängt und durch LEDs und teilweise durch Laserdioden ersetzt. Diese Lichtquellen unterscheiden sich bezüglich der Ansteuerung, des Betriebsverhaltens und der notwendigen Kühlung deutlich von bisherigen Lichtquellen.

3 Methodischer Systementwurf

Die beschriebenen Unterschiede konventioneller und hochadaptiver Scheinwerfer bedingen eine technische Neuentwicklung von Scheinwerfern. Um die Entwicklung für unterschiedliche Anforderungen, z.B. Ausstattungsvarianten in unterschiedlichen Fahrzeugklassen, effizient durchzuführen, ist ein methodisches Vorgehen unabdingbar. Das Ziel des vorgestellten methodischen Systementwurfs ist es die Komponenten des optischen Pfades früh im Entwicklungsprozess auszuwählen und zu dimensionieren, um die Anzahl an Problemlösezyklen (vgl. [8]) in der Entwicklung zu reduzieren. Der Fokus liegt dabei auf dem optischen Pfad, da mit diesem wichtige Eigenschaften des Gesamtsystems festgelegt werden und diese Eigenschaften einen direkten Einfluss auf viele andere Komponenten des Systems haben. Konkrete Einflüsse sind nachfolgend aufgelistet.

Die Auflösung der Lichtverteilung beeinflusst:

- Rechenleistung der Bildverarbeitung;
- Schnittstellen der Informationsverarbeitung;
- Fertigungstoleranzen und Justage;
- Toleranzen bei der Kalibrierung.

Das Konzept der Projektionsoptik beeinflusst:

- Rechenleistung der Bildverarbeitung zur Korrektur möglicher Verzeichnung;
- Bauraum.

Die optische Effizienz / der notwendiger Lichtstrom beeinflusst:

- Leistungstreiber der Lichtquelle;
- Kühlung (aktiv/passiv).

3.1 Anforderungen und Modelle

Das vorgeschlagene Vorgehen ist in Abbildung 4 gezeigt. Die Anforderungen an das System werden während des Entwurfs detailliert und an die technische Umsetzung angepasst. Nach der Untersuchung des Gesamtsystems in dem analytischen Modell erfolgt der Einstieg in die im V-Modell beschriebene domänenspezifische Entwicklung. Die Schritte des Vorgehens werden anhand des Beispiels der Lichtfunktion einer Spurmarkierung beschrieben. Die Zielsetzung lautet in diesem Fall: Empfinden des Fahrers für die Fahrzeugbreite und die aktuelle Fahrspur unterstützen (Tabelle 1).

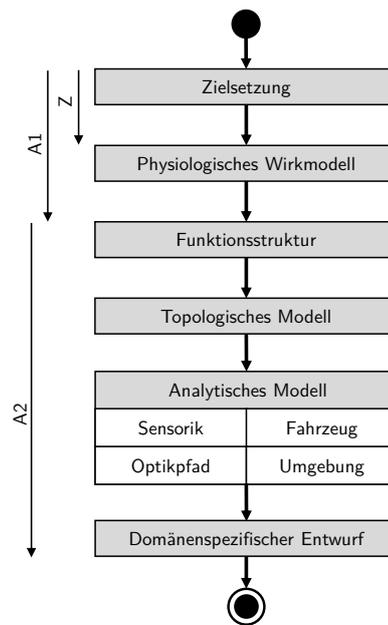


Abbildung 4 Vorgehen zum methodischen Systementwurf eines adaptiven Beleuchtungssystems (Z: Ziel, A: Anforderung)

Die Umsetzung als Lichtfunktion kann entsprechend die Projektion der Spurbreite des Fahrzeuges sein. Das physiologische Wirkmodell berücksichtigt die Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung (vgl. [4]), um lichttechnische Anforderungen an die Lichtfunktion abzuleiten (Auflösung, Kontrast, Geometrie der Projektion, etc.). Basierend auf den Anforderungen A1 wird eine Funktionsstruktur erzeugt. Diese bildet die Grundlage für die Erstellung des topologischen Modells, das in Kapitel 2 in Abbildung 3 dargestellt ist. Das topologische Modell enthält die notwendigen Komponenten zur Realisierung aller Funktionen der Funktionsstruktur und deren Verbindung untereinander, beschreibt aber noch keine speziellen Technologien zur Umsetzung.

Das analytische Modell bildet alle Aspekte der in Abbildung 3 gezeigten Komponenten ab. Das Ziel des analytischen Modells ist es Lichtfunktionen zu spezifizieren und virtuell zu testen. Untersucht werden kann z.B. die geeignete Größe der Ausblendung eines Fußgängers, die während der Fahrt stark von der Latenz des Gesamtsystems, also der zeitlichen Differenz von der Erkennung des Fußgängers bis das adaptive Lichtbild erzeugt ist, abhängt. Bei dem Beispiel der Spurmarkierung kann untersucht werden an welcher Position der Lichtverteilung welcher Lichtstrom benötigt wird, um einen zuvor definierten Kontrast zu erreichen. Die virtuelle Untersuchung dient auch dazu die Funktionen hinsichtlich der Vereinbarkeit mit gesetzlichen Rahmenbedingungen zu prüfen.

Die Sensorik kann im Rahmen des Systementwurfs als Quelle für Informationen über die Umgebung betrachtet werden. Unter Berücksichtigung der Latenz und Fehlern durch die Diskretisierung analoger Signale werden die Position und Größe von Objekten, z.B. anderer Verkehrsteilnehmer, der weiteren Informationsverarbeitung zur Verfü-

Tabelle 1 Anforderungen an die Funktion: Projektion der Spurbreite (Z: Ziel, A: Anforderung)

Z	<ul style="list-style-type: none"> • Empfinden des Fahrers für die Fahrzeugbreite und die aktuelle Fahrspur unterstützen
A1	<ul style="list-style-type: none"> • Projektion der Spurbreite • Länge der Streifen abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit • Minimaler Kontrast • Minimale Auflösung • Breite der Spuren variabel • Sensorik Fahrzeugumgebung • Sensorik Fahrzeugzustand
A2	<ul style="list-style-type: none"> • Bildmodulator: DMD 0.7" 1024x768 Pixel • Lichtquelle: 4x LEDs Typ A 1000 lm • Projektionsoptik: 2 Linsen, Länge 150 mm • Projektionsoptik: Verzeichnungskurve • Kontrast $K(\alpha_v, \alpha_h)$ • Intensität $I(\alpha_v, \alpha_h)$ • Datenaustausch: LAN, OpenCV Matrix • ...

gung gestellt. Im Rahmen des Systementwurfs können die Umgebungsinformationen in Form von Objektlisten mit den genannten Eigenschaften oder auch als Video einer realen Fahrsituation implementiert werden.

Das Modell des Fahrzeugs kann ein lineares Längsdynamikmodell sein, um den Einfluss von Beschleunigungen und Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche auf den Nickwinkel des Fahrzeugs und die damit einhergehende Veränderung des abgegebenen Lichts zu bestimmen. Im ersten Schritt der Entwicklung reicht es aus den Fahrzeugzustand statisch mit konstanter Geschwindigkeit und konstantem Lenkwinkel zu beschreiben.

Das Modell der Umgebung beinhaltet ein Reflektionsmodell des Straßenbelags, um die resultierende Leuchtdichte am Augpunkt des Fahrers oder anderer relevanter Verkehrsteilnehmer zu bestimmen. Ein validiertes Reflektionsmodell für Straßenbeläge ist z.B. in [3] zu finden.

Das Modell des Optikpfades beinhaltet bei hochauflösenden Scheinwerfern die Lichtquelle, den Bildmodulator und die Projektionsoptik. Das analytische Modell des Optikpfades kann für eine erste Dimensionierung der notwendigen Komponenten genutzt werden. Um dieses erste Konzept abzusichern, ist der Aufbau eines numerischen Modells des Optikpfades notwendig, um z.B. die Durchmesser der optischen Elemente und die Gesamtlänge des optischen Systems abzuschätzen und außerdem den Einfluss optischer Fehler wie chromatische oder sphärische Aberration zu untersuchen.

Mit dem vollständigen analytischen Modell können vorhandene Lichtfunktionen hinsichtlich der Umsetzbarkeit mit dem gewählten optischen Pfad geprüft werden. Es ist außerdem möglich für vorhandene Lichtfunktionen ein möglichst effizientes optisches System zu entwerfen.

Das Ergebnis des methodischen Systementwurfs ist ein durch Simulation validiertes optisches Konzept des Schein-

werfers, das auf die umzusetzenden Lichtfunktionen angepasst ist. Mit den konkretisierten Anforderungen der optischen Komponenten und aller notwendigen Schnittstellen wird eine Anforderungsliste (A2) als Basis für den domänenspezifischen Entwurf der Einzelkomponenten aufgestellt.

3.2 Einordnung des Vorgehens in das V-Modell

Die Entwicklung mechatronischer Geräte kann nach dem V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 durchgeführt werden [8]. Das Vorgehen besteht aus den Schritten des Systementwurfs, des domänenspezifischen Entwurfs und der Systemintegration. Das vorgestellte Beispiel und andere mechatronische Produkte zeichnen sich durch eine zunehmende Komplexität in der Produktentwicklung aus, weshalb eine Überarbeitung des V-Modells angestrebt wird [2]. Als Forderungen für ein überarbeitetes V-Modell werden ein durchgängiges Anforderungsmanagement, eine umfassende Modellbildung und -analyse sowie die Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus genannt [1].

Anhand des beschriebenen Beispiels aus der Beleuchtungstechnik wird erläutert wie optomechatronische Systeme nach dem V-Modell entwickelt werden können. Dafür wird ein angepasstes V-Modell beschrieben.

Die Funktion hochauflösender Scheinwerfer und anderer Beleuchtungssysteme basiert auf sichtbarer optischer Strahlung und ist daher inhärent mit der Physiologie des Menschen verknüpft. Daraus ergeben sich Unterschiede in der Entwicklung im Vergleich zu klassischen mechatronischen Systemen. Einige Subsysteme optomechatronischer Produkte können nicht vollständig in Komponenten zerlegt werden, die ausschließlich einer Domäne zugeordnet werden können.

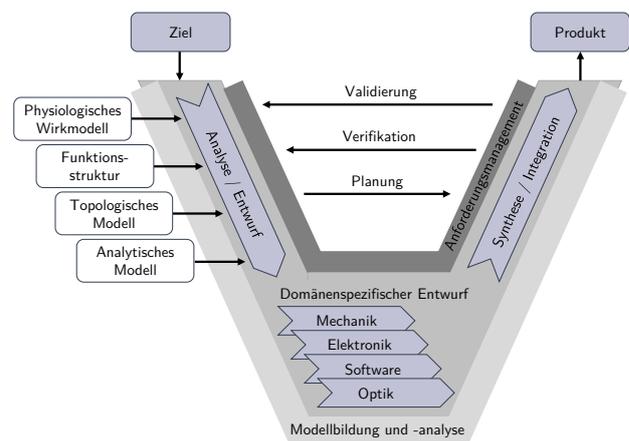


Abbildung 5 Angepasstes V-Modell für die Entwicklung adaptiver Beleuchtungssysteme

In Abbildung 5 ist ein an das vorgestellte Vorgehen angepasste V-Modell für die Entwicklung von Beleuchtungssystemen für Fahrzeuge dargestellt. Abweichend von dem aktuellen V-Modell aus der VDI2206 [8] ist der Ausgangspunkt für die Entwicklung ein abstrakt formuliertes Ziel (vgl. Tabelle 1). Die Anforderungen werden im

Laufe des Entwurfs konkretisiert und durch ein Anforderungsmanagement verwaltet. Die verschiedenen Abstraktionsebenen und Modelle des vorgestellten Vorgehens finden sich im Bereich der Analyse wieder. Im ersten Schritt wird das übergeordnete Ziel durch eine physiologische Betrachtung in konkrete technische Anforderungen überführt. Dafür sind Modelle der menschlichen Wahrnehmung notwendig, die eine modellbasierte Betrachtung ab dem Beginn der Entwicklung erfordern. Das Aufstellen der Funktionsstruktur unterstützt das Entwicklerteam bei dem Entwurf der Systemarchitektur, die in einem topologischen Modell festgehalten wird. Mit dem analytischen Modell erfolgt ein domänenübergreifender Entwurf des Systems bevor die Dekompensation des Systems in Subsysteme erfolgt. Die Besonderheit optomechatronischer Systeme ist dabei, dass einige Komponenten interdisziplinär entwickelt werden müssen. Eine vollständige Dekomposition ist dann nicht möglich. Neben den klassischen Domänen mechatronischer Systeme wird die Domäne Optik in dem vorgestellten V-Modell ergänzt. Während der Synthese bzw. der Systemintegration werden Subsysteme sukzessive zu dem Produkt integriert. Als Verifikation wird der Abgleich der technischen Eigenschaften der Subsysteme und des Produktes mit den zuvor definierten technischen Anforderungen bezeichnet. Die Validierung bezieht sich auf den Abgleich der erreichten Funktion des Produktes mit dem zuvor definierten Ziel. Im betrachteten Beispiel kann die physiologische Wirkung z.B. durch eine Probandenstudie getestet werden. Mit einem weiteren Pfeil von links nach rechts wird angedeutet, dass die Verifikation und Validierung bereits während der Analysephase geplant werden sollte, also welche Tests mit welchen Subsystemen durchzuführen sind. Das hier betrachtete optomechatronische System kann nach dem vorgestellten angepassten V-Modell entworfen werden. Die in [1] gestellten Forderungen für die Überarbeitung des V-Modells können anhand des Beispiels bestätigt werden.

3.3 Modellierung

Dem Optikpfad kommt wegen der beschriebenen Abhängigkeiten eine besondere Bedeutung zu und wird daher detaillierter betrachtet. In optischen Systemen treten eine Vielzahl physikalischer Effekte auf, die in einer Modellierung berücksichtigt werden können. Vor der Modellbildung ist zu prüfen, welche Effekte einen maßgeblichen Einfluss auf das untersuchte Problem haben. Z.B. wirken die regelmäßigen Strukturen der Mikrospiegel eines DMDs, der als Bildmodulator in hochauflösenden Scheinwerfern eingesetzt werden kann, als Beugungsgitter. Für das gesamte optische System sind die Auswirkungen des Effektes jedoch klein, weshalb die Vereinfachungen der geometrischen Optik verwendet werden und Licht als lineare Strahlen modelliert wird. Für die Simulation von Licht als Strahlen wird der Monte-Carlo Algorithmus verwendet, der zufällig generierte Strahlen durch das optische System verfolgt. Für ein genaues Simulationsergebnis müssen eine große Anzahl von Strahlen (z.B. $> 10^6$ pro Lichtquelle) simuliert werden. In der Phase des Systementwurfs konkurriert das

Ziel eines präzisen Simulationsergebnisses mit dem Ziel einer frühzeitigen Dimensionierung zentraler Komponenten des optischen Systems. Um diesen Widerspruch aufzulösen, wird ein analytisches Modell des optischen Systems erstellt, mit dem unterschiedliche Varianten des optischen Systems in kurzer Zeit verglichen werden können. Für die Validierung des Modells wird eine numerische Simulation mit dem Monte-Carlo Verfahren durchgeführt.

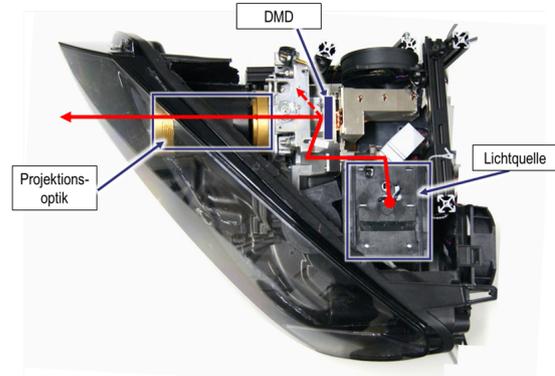


Abbildung 6 Prototyp eines hochauflösenden Scheinwerfers. Rot-durchgezogen: Optischer Pfad in "An"-Position eines Mikrospiegels. Rot-gestrichelt: Optischer Pfad in "Aus"-Position eines Mikrospiegels (Absorption)

Die Projektionsoptik des Scheinwerfers hat einen großen Einfluss auf die resultierende Lichtverteilung und muss daher besonders genau modelliert werden. Die Modellierung unterschiedlicher Abbildungsbedingungen der Projektionsoptik kann über einen veränderlichen Abbildungsmaßstab erfolgen [6].

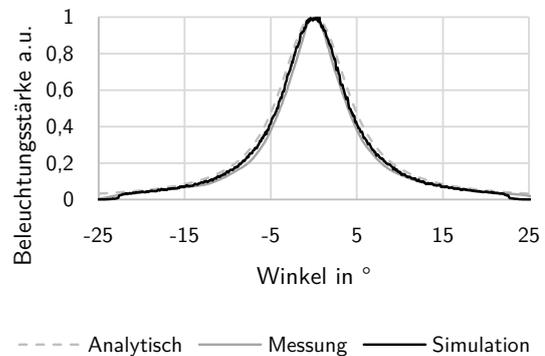


Abbildung 7 Validierung des Modells der Projektionsoptik

Im Rahmen eines Forschungsprojektes zu hochauflösenden Scheinwerfern wurde der in Abbildung 6 gezeigte Prototyp eines hochauflösenden Scheinwerfers aufgebaut und damit das erstellte analytische und das numerische Modell der Projektionsoptik validiert (siehe Abbildung 7). Systeme mit ähnlichen Anforderungen können mit diesem Wissen in kürzerer Zeit dimensioniert werden.

3.4 Zusammenfassung und Diskussion

Hochauflösende Scheinwerfer bieten das Potenzial die Beleuchtung von Fahrzeugen zu revolutionieren. Waren mit bisher eingesetzten Systemen nur wenige unterschiedliche Lichtverteilungen möglich, erlauben hochauflösende Bildmodulatoren eine präzise Adaption der Lichtverteilung abhängig von der Umgebungshelligkeit, der Verkehrssituation, dem Fahrzeugzustand und dem Fahrerwunsch. Die Freiheit bei der Gestaltung der Lichtfunktionen ist eng mit Herausforderungen bei der Entwicklung verknüpft. Da hochauflösende Scheinwerfer von bisherigen Systemen in mehreren Kernkomponenten deutlich voneinander abweichen, ist ein angepasstes methodisches Vorgehen bei der Produktentwicklung unumgänglich. Das beschriebene Vorgehen umfasst den Systementwurf ausgehend von einem physiologischen Ziel, das mit einer Lichtfunktion erreicht werden soll, bis hin zu der Definition konkreter Anforderungen mit denen der domänenspezifische Entwurf fortgeführt werden kann. Die Besonderheit des Vorgehens ist, dass der optische Pfad mit einem analytischen Modell dimensioniert werden kann, sobald dieses analytische Modell für die eingesetzte Art der Projektionsoptik validiert ist. Dieser Validierungsschritt wird anhand von Messungen an einem aufgebauten Prototyp gezeigt.

In dem analytischen Modell des optischen Pfades werden Effekte wie Beugung, chromatische Aberration und anderen Linsenfehler vernachlässigt. Dies ist für die betrachtete Anwendung erlaubt, da die Qualität einer Lichtfunktion im realen Verkehrsraum durch äußere Bedingungen wie z.B. die Straßenoberfläche stärker beeinflusst wird als durch die Qualität des optischen Systems des Scheinwerfers. Für ähnliche Systeme, wie Projektionsmodule für die direkte Darstellung von Informationen auf der Straße oder Systeme für die lichtbasierte Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern, kann diese Annahme ebenfalls gelten und das gezeigte Vorgehen angewandt werden. Für andere optomechatronische Produkte mit höheren Anforderungen an die Abbildungsqualität ist dies nicht ohne weitere Anpassungen möglich.

Es wurde gezeigt, dass in der Phase des Systementwurfs analytische Modelle genutzt werden können, um die Komponenten adaptiver Beleuchtungssysteme ohne numerische Simulationen zu dimensionieren. Nach dem Systementwurf erfolgt die detaillierte Entwicklung in den einzelnen Domänen mit etablierten Entwicklungstools. Das Vorgehen wurde für den speziellen Fall eines hochauflösenden Scheinwerfers umgesetzt und die eingesetzten Modelle anhand eines Prototypen validiert.

Das Vorgehen ist neben hochauflösenden Scheinwerfern auch anwendbar auf weitere adaptive Beleuchtungssysteme im Bereich des Fahrzeugs. Weitere Systeme können Projektionsmodule für die Darstellung von Informationen auf der Straße, adaptive Heckleuchten, Signalleuchten und Systeme zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern sein.

4 Literatur

- [1] Gräßler, Iris: A New V-Model for Interdisciplinary Product Engineering. In: *59th Ilmenau Scientific Colloquium* Bd. 59, 2017
- [2] Gräßler, Iris ; Hentze, Julian ; Bruckmann, Tobias: V-Models for Interdisciplinary Systems Engineering. In: Marjanovic, Dorian (Hrsg.) ; Storga, Mario (Hrsg.) ; Pavkovic, Neven (Hrsg.) ; Bojcetic, Nenad (Hrsg.) ; Skec, Stanko (Hrsg.): *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*. <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0333>, Mai 2018, S. 747–756
- [3] Hoffmann, Andreas v.: *Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen*. Ilmenau, TU Ilmenau, Diss., 2003
- [4] Jürgens, C.: *Der kontrastadaptive Scheinwerfer: Dissertation*. Hannover : TEWISS, 2015. – ISBN 978–3–95900–015–4
- [5] Kloppenburg, G.: *Scannende Laser-Projektionseinheit für die Fahrzeugfrontbeleuchtung*, Leibniz Universität Hannover, Diss., 2017
- [6] Knöchelmann, M. ; Wolf, A. ; Kloppenburg, G. ; Lachmayer, R.: 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
- [7] Lachmayer, Roland: Beleuchtung. In: Braess, Hans-Hermann (Hrsg.) ; Seiffert, Ulrich (Hrsg.): *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016
- [8] VDI2206, VDI-Richtlinie: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, 2004
- [9] Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen: *Regelung Nr. 123 der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von adaptiven Frontbeleuchtungssystemen (AFS) für Kraftfahrzeuge*, 24.08.2010
- [10] Wördenweber, B ; Lachmayer, R ; Witt, U: Intelligente Frontbeleuchtung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 98 (1996), Nr. 10