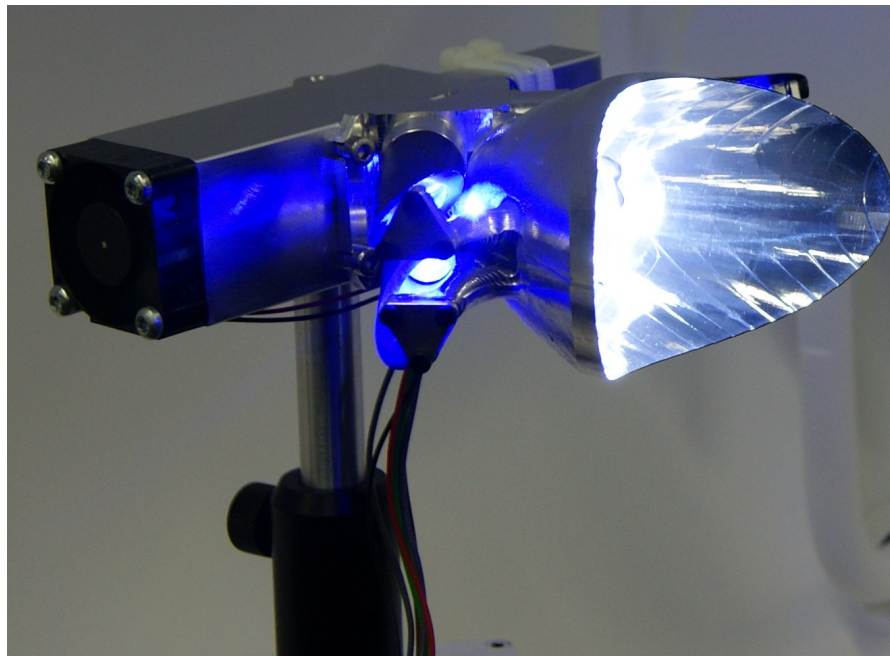


Vermessung und Optimierung eines Laserscheinwerfermoduls

Measurement and optimization of a laser
headlight module



Bachelorarbeit B-wlf-0110

Verfasser: Tobias Grabe
Matrikelnummer: 2777860

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. R. Lachmayer
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. G. Poll
Betreuer: Dipl.-Ing. A. Wolf

Bachelorarbeit

Herr Tobias Grabe, Matr.-Nr. 2777860

Vermessung und Optimierung eines Laserscheinwerfermoduls

Allgemeines:

Helle, weiße LEDs kommen zunehmend in Neuentwicklungen von Fahrzeugscheinwerfern als Ersatz für klassische Xenon- und Halogen-Lichtquellen zum Einsatz. Einen nächsten Schritt in dieser Entwicklung stellen Lichtquellen auf Basis von Laserdioden in Verbindung mit „Remote Phosphor“ (laseraktiviertem Leuchtstoff) zur Frequenzkonversion dar. Dieser Ansatz bietet insbesondere im Hinblick auf Leuchtdichte, Effizienz und Designflexibilität ein hohes Potenzial. In Verbindung mit Laserdioden können kleinere strahlformende Elemente zum Einsatz kommen, so dass neue Konzepte für adaptive Scheinwerfersysteme möglich werden.

Zur Verbesserung der Fahrbahnausleuchtung wird das klassische Fernlicht in vielen Scheinwerfersystemen durch ein zusätzliches Lichtmodul ergänzt. Diese Funktion wird mit einer laserbasierten Lichtquelle platzsparend umgesetzt.

Aufgabe:

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein bestehendes prototypisches Laser-Fernlichtmodul hinsichtlich der optischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten sowie des Langzeitverhaltens von Laserdioden und Leuchtstoff untersucht werden. Hieraus sollen Ansätze zur Optimierung des Systems abgeleitet werden.

Daraus ergeben sich insbesondere die folgenden Aufgabenpunkte:

- Vermessung der optischen Parameter des existierenden Systems
- Analyse des Langzeitverhaltens von Laserdioden und Leuchtstoff
- Erarbeitung von Optimierungsmöglichkeiten des Lasermoduls

Ausgabe der Aufgabenstellung: 25.09.2014

Betreuer: Alexander Wolf

.....

(Prof. Dr.-Ing. R. Lachmayer)

.....

(Bearbeiter)

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Passagen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ich versichere weiterhin, dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorliegt. Mit der Übermittlung meiner Arbeit auch an externe Dienste zur Plagiatsprüfung durch Plagiatssoftware erkläre ich mich einverstanden.

Tobias Grabe
Hannover, den 20. Mai 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Der Laser	3
2.1.1	Aufbau und Funktionsweise	3
2.1.2	Lasertypen	5
2.1.3	Klassifizierung nach EN 60825-1:	6
2.2	Lumineszenz	7
2.3	Lichttechnische Größen	8
2.3.1	Radiometrische Größen	8
2.3.2	Fotometrische Größen	9
2.3.3	Weitere Größen	10
2.4	Definition des Wirkungsgrades	10
2.5	Messtechnik	12
2.5.1	Spektrometer	12
2.5.2	Ulbricht'sche Kugel	12
2.5.3	Goniophotometer	13
2.5.4	Laserleistungsmessgerät	13
3	Aufbau des Laserscheinwerfermoduls	15
3.1	Das Scheinwerfermodul	15
3.2	Die Kühleinheit	15
4	Bestimmung der Leistungsparameter des Scheinwerfermoduls	17
4.1	Aufbau der Versuche	18
4.1.1	Messung mit der Ulbricht'schen Kugel	18
4.1.2	Messung mit dem Goniophotometer	18
4.2	Durchführung der Versuche	19
4.2.1	Messung mit der Ulbricht'schen Kugel	19
4.2.2	Messung mit dem Goniophotometer	19
4.3	Auswertung der Versuche	20
4.3.1	Strahlungsausbeute η_e	20
4.3.2	Lichtausbeute η_V	22
4.3.3	Beleuchtungsstärke E	24
4.3.4	Farbortbestimmung im CIE-Normfarbsystem	25

5	Bestimmung der Leistungsparameter der Einzelkomponenten	30
5.1	Die Laserdioden	31
5.2	Reflektionsgrad der verwendeten Spiegel	34
5.3	Transmissionsgrad der Kollimationslinsen	38
5.4	Die Scheinwerferlinse	40
5.5	Eigenschaften der Lumineszenzschicht	41
5.5.1	Quantitative Beurteilung der Laserstrahlung an der Lumineszenzschicht	42
5.5.2	Einfluss des Einstrahlwinkels α	44
5.5.3	Einfluss der Laserfokussierung	50
5.6	Der Streulichtverlust	54
5.6.1	Quantitative Analyse	55
5.6.2	Einfluss der Farbe der Abschirmung	57
5.7	Sonstige Leistungsverluste	60
6	Zusammenfassung der Ergebnisse	64
6.1	Technische Daten	64
6.2	Optimierungspotentiale	67
7	Fazit und Ausblick	73
	Literaturverzeichnis	75
	Anhang	77
A	Auszug aus DIN 5031-Teil 3	77
B	Auszug aus dem Osram Datenblatt der Laserdiode PL TB450B [OSRA13]	78

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vier-Energie-Niveau-Schema typischer Laser	4
2.2	Schematischer Aufbau eines Lasers	5
2.3	Definintion des Raumwinkels	10
2.4	Schematische Darstellung der Ulbricht'schen Kugel	13
2.5	a) Laserleistungsmessgerät b) Beleuchtete Sensorfläche	14
3.1	Aufbau des Scheinwerfermoduls.	16
4.1	Versuchsaufbau zur Vermessung des Scheinwerfermoduls in der Ulbricht'schen Kugel - das Größenverhältnis zwischen Scheinwerfermodul und Ulbricht'scher Kugel wird nicht maßstabsgetreu dargestellt.	18
4.2	In der Ulbricht'schen Kugel erfasster Strahlungsfluss $\Phi_e(\lambda)$ bei $I_E = 600 \text{ mA}$ und $\vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	21
4.3	Radiometrischer Wirkungsgrad $\eta_e(I_E)$ in Abhängigkeit vom Diodenstrom bei $\vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	22
4.4	Lichtfluss $\Phi_e(\lambda)$ bei $I_E = 600 \text{ mA}$ und $\vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	23
4.5	Lichtausbeute $\eta_e(I_E)$ in Abhängigkeit vom Diodenstrom bei $\vartheta_{Case}=35 \text{ }^\circ\text{C}$.	24
4.6	Beleuchtungsstärke bei $I_E = 0,6 \text{ A}$ auf einem 25 m entfernten Testbildschirm.	24
4.7	Farbort in Ulbricht'sche Kugel und Goniophotometer im Vergleich bei $I_E = 0,6 \text{ A}$ und $\vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	27
4.8	Verteilung der Farbtemperaturen bei $I_E = 0,6 \text{ A}$	28
4.9	a) Strahlengang der zu Farbtemperaturextrema führt. - b) Strahlengang der zur thermischen Schädigung des Diode führen kann.	28
4.10	a) Reflektionen an der Außenfläche des Reflektors. - b) Reflektionen an den Bohrungen (siehe Abb. 4.9 a).	29
5.1	Schematische Darstellung der Leistungsverluste im Scheinwerfermodul. . .	31

5.2	Aus dem Scheinwerfermodul entnommene Laserdiode PL TB450B.	31
5.3	Zugeteilte Nummern der Laserdioden im Scheinwerfermodul.	32
5.4	Versuchsaufbau zur Erfassung der Laserleistung.	33
5.5	Wirkungsgrade der eingesetzten Laserdioden $D_1 - D_4$ im Vergleich zum Wirkungsgrad einer neuen Diode D_{Neu}	33
5.6	a) Auf Halter befestigter Umlenkspiegel. - b) Umlenkspiegel im eingebauten Zustand unter Verwendung der markierten Halterungs- und Justageschrauben.	34
5.7	Versuchsaufbau zur Bestimmung der vom Spiegel reflektierten Strahlungsenergie bei kollimiertem Laserlicht der Wellenlänge $\lambda = 450 \text{ nm}$ ($\alpha = 18^\circ$).	35
5.8	Versuchsaufbau zur Erfassung der optischen Laserleistung der Referenzdiode.	36
5.9	Reflektionsgrad der Spiegel 1 - 4 bei $\vartheta_{Case} = 30^\circ\text{C}$ und 35°C sowie dem Mittelwert der beiden Messreihen.	38
5.10	Im Scheinwerfermodul eingesetzte einstellbare Kollimationslinse.	38
5.11	Transmissionsgrad der Kollimationslinsen.	39
5.12	a) Position der Scheinwerferlinse im Reflektor (schematisch). - b) Scheinwerferlinse im ausgebauten Zustand. - c) Scheinwerferlinse im Reflektor.	40
5.13	Durch Scheinwerferlinse verursachter Lichtverlust.	41
5.14	a) Im Scheinwerfermodul eingesetzte Lumineszenzschicht auf Trägerplatte - b) Darstellung der partiellen diffusen und spiegelnden Reflektion des auftreffenden Laserlichtes an der Lumineszenzschicht	42
5.15	Schematische Darstellung zum Versuchsaufbau zur Erfassung des Strahlungsflusses auf der Lumineszenzschicht mit Kennzeichnung der Messabschnitte 1 - 3 und $\alpha=30^\circ$	43
5.16	Relative optische Verlustleistungen zwischen den Dioden (nach Kollimation) und der Lumineszenzschicht.	45
5.17	Versuchsaufbau zur Vermessung des Winkeleinflusses.	46
5.18	Lichtausbeute der Lumineszenzschicht in Abhängigkeit vom Winkel im Bezug zur optischen Ausgangsleistung der Referenzdiode.	47
5.19	Radiometrischer Wirkungsgrad der Lumineszenzschicht in Abhängigkeit vom Winkel im Bezug zur optischen Ausgangsleistung der Referenzdiode.	48
5.20	Farbwerte in Abhängigkeit vom Winkel in Zeitraum von 545 Sekunden nach Einschalten der Referenzdiode.	49

5.21	Farbwerte in Abhängigkeit vom Winkel und der Zeit.	50
5.22	Draufsicht auf die Lumineszenzschicht bei Verwendung von Fokus 1 und Fokus 2	51
5.23	Lichtausbeute in Abhängigkeit von der Laserfokussierung.	51
5.24	Radiometrischer Wirkungsgrad der Lumineszenzschicht in Abhängigkeit vom Winkel und der Zeit.	52
5.25	Farbwerte in Abhängigkeit von der Laserfokussierung.	53
5.26	Beispiele zur Optimierung der Laserfokussierung.	53
5.27	Stellen, an denen Laserlicht diffus in den Raum reflektiert wird. (1: An der Außenseite des Reflektors. - 2: An der Spiegelhalterung. - 3: An den Reflektorbohrungen.)	54
5.28	Detailansicht der auffälligsten, diffusen Reflektionen (1: An der Außenseite des Reflektors - 2: An der Spiegelhalterung - 3: An den Reflektorbohrungen).	55
5.29	Abstufungen der radiometrischen Lichtleistung beim Versuch aus Abbildung 5.15 des Abschnittes 5.5.1.	56
5.30	Streulichtverlust im Bezug auf die Lichtleistung nach Kollimationslinsentransmission.	57
5.31	Einfluss der Farbe der Abschirmungen auf die optische Leistung, die die Lumineszenzschicht erreicht und die optische Leistung, die als Streulichtverlust gemessen wird (Leistungen nach Verfahren der Abschnitte 5.5.1 und 5.6 bei $\vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C}$ ermittelt).	58
5.32	Lichtausbeute des Scheinwerfermoduls bei transparenten und schwarzen Abdeckungen (Messdaten aus Abschnitt 5.4 entnommen ($\vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C}$)).	58
5.33	Strahlengang der Laserstrahlung innerhalb der Abschirmungen. - a) schwarze Abschirmung - b) transparente Abschirmung	59
5.34	Einfluss der Farbe der Abschirmungen auf die Farbwerte im CIE-Normfarbsystem nach DIN 5033-3.	60
5.35	Anteil der sonstigen nicht näher klassifizierten radiometrischen Leistungsverluste des Scheinwerfers nach Auftreffen der Laserstrahlung aus die LS (LS=Lumineszenzschicht - SL=Scheinwerferlinse).	61
5.36	Anteil der sonstigen nicht näher klassifizierten fotometrischen Leistungsverluste des Scheinwerfers nach Auftreffen der Laserstrahlung aus die LS (LS=Lumineszenzschicht - SL=Scheinwerferlinse).	62

5.37	Beispiele für sonstige Verluste: a) Reflektion der Laserstrahlung an der Lumineszenzschicht mit anschließendem Austritt aus dem Reflektor. b) I Beschädigung an der Reflektorinnenseite.- II Diffuse Reflektionen am Rand der Bohrungen.	62
6.1	Farbtemperaturen und Beleuchtungsstärke auf einer 25 m entfernten virtuellen Testwand	66
6.2	Zusammenfassung der optischen radiometrischen Lichtleistungen an den Messpunkten des vorliegenden Scheinwerfermoduls bei $\vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C}$	67
A.1	V-Lambda-Kurve	77
A.2	Tristimuluskurven	77

Tabellenverzeichnis

2.1	Lasertypen (Auswahl)	6
2.2	Laserklassen	7
4.1	In der Ulbricht'schen Kugel gemessene Farborte bei $I_E=0,15\dots 1\text{A}$ und $\vartheta_{Case}=35\text{ }^\circ\text{C}$	26
5.1	Zusammenfassung der Diodenparamteter.	33
5.2	Strahlungsleistung nach Reflektion durch die Spiegel.	37
5.3	Leistungserfassung zum Transmissionsgrad der Kollimationslinsen bei $\vartheta_{Case}=35\text{ }^\circ\text{C}$	39
5.4	Zusammenfassung der Messergebnisse (LS = Lumineszenzschicht).	44
5.5	Zusammenfassung der Streulichtverluste bei $I_E=0,6\text{ A}$ und $\vartheta_{Case}=35\text{ }^\circ\text{C}$	56
6.1	Zusammenfassung der Leistungsdaten des Scheinwerfermoduls.	66
6.2	Zusammenfassung der quantifizierten Optimierungspotentiale.	70
6.3	Auswahl an optimierten Systemen, bei denen keine konstruktive Änderungen notwendig sind.	71
6.4	Auswahl an optimierten Systemen, bei denen konstruktive Änderungen notwendig sind.	72

1 Einleitung

Konventionelle Lichtquellen werden bei der Entwicklung von Scheinwerfern zunehmend durch effizientere und platzsparende LED-Systeme verdrängt. In den letzten Jahren konnte die Beleuchtungsstärke stark gesteigert werden, so dass im Hinblick auf zukünftige adaptive Beleuchtungssysteme eine Steigerung der Leuchtdichte, der Designflexibilität und der Abbildungsschärfe zunehmend von Bedeutung ist. Der Einsatz von Laserdioden in Verbindung mit einem laseraktivierten Leuchtstoff zur Frequenzkonversion bietet im Bezug auf diese Eigenschaften ein hohes Potential. Insbesondere ermöglicht die konstruktive Trennung der monochromatischen Lichtemission und der Konversion in ein breites Frequenzspektrum eine flexiblere Anordnung der Scheinwerferkomponenten. Dies begünstigt neben einer hervorragenden Gestaltungsfreiheit ein effizientes Thermomanagement.

Ziel dieser Arbeit ist die Vermessung der optischen Parameter und die Bestimmung von Optimierungspotentialen eines zuvor im *Institut für Produktentwicklung* konstruierten, in einer vorangegangenen Untersuchung [Lach14] vorgestellten und als Zusatzfernlicht eingesetzten prototypischen Laserscheinwerfermoduls. Hierbei sollen, nach Aufnahme der technischen Daten des vorliegenden Moduls, die eingesetzten Komponenten auf ihre Eignung untersucht und eine Analyse des Langzeitverhaltens der Laserdioden und des Leuchtstoffes vorgenommen werden.

Die Arbeit gliedert sich im Anschluss an die Einleitung in sechs weitere Kapitel.

Zunächst wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik gegeben. Hierbei soll insbesondere auf den Aufbau und die Funktionsweise von Lasern, die Definition der lichttechnischen Größen sowie die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Messtechnik eingegangen werden.

Im dritten Kapitel wird der Aufbau und die Funktionsweise des prototypischen Laser-

scheinwerfermoduls und der dazugehörigen Komponenten erläutert.

Die Analyse des Scheinwerfermoduls hinsichtlich der Strahlungs- und Lichtausbeute bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen sowie der Beleuchtungsstärke erfolgt im vierten Kapitel. Nach einer Sichtprüfung des Scheinwerferlichtes erfolgt die Untersuchung der farblichen Homogenität. Daher wird bei dem vorliegenden Prototyp die Bestimmung des richtungsabhängigen Farbortes mithilfe eines Goniophotometers vorgenommen. Es erfolgt ein Vergleich dieser Eigenschaften mit der für Scheinwerfer geltenden ECE-113 Regelung.

Zur Ermittlung der Optimierungspotentiale findet im fünften Kapitel eine schrittweise Demontage des Moduls statt. Hierbei werden die einzelnen Bestandteile vermessen und auf ihre Eigenschaften hinsichtlich ihrer materialspezifischen und konstruktiven Eignung für einen Einsatz im vorliegenden Laserscheinwerfermodul überprüft. Insbesondere wird eine Analyse des Langzeitverhaltens des Leuchtstoffes bzw. der Lumineszenzschicht und eine Quantifizierung der verschleißbedingten Schädigung der zum Einsatz kommenden Laserdioden vorgenommen.

Die technischen Daten des Moduls und der Einzelkomponenten sowie die ermittelten Optimierungspotentiale werden im sechsten Kapitel zusammengefasst.

Abschließend erfolgt im siebten Kapitel die Zusammenfassung und die Bewertung der Ergebnisse dieser Arbeit.

2 Stand der Technik

2.1 Der Laser

Der Begriff *Laser* setzt sich aus den englischen Wörtern „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“ zusammen. Dies bedeutet frei übersetzt *Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung*. Ein Laser kann einen intensiven monochromatischen Lichtstrahl erzeugen. Dieser besteht aus kohärenten, also in einer festen Phasenbeziehung zueinander stehenden Photonen und weist bei einer entsprechenden Konfiguration eine sehr geringe Divergenz auf.[Eich06][Tipl09]

2.1.1 Aufbau und Funktionsweise

Ein Laser besteht im Allgemeinen aus einem aktiven Lasermaterial, einem Resonator und einer elektronischen, optischen oder chemischen Energiequelle, die im aktiven Lasermaterial eine spontane Emission von Photonen anregt.

Wie dem Namen zu entnehmen ist, arbeitet ein Laser nach dem Prinzip der stimulierten Emission. Hierbei werden, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, in dem aktiven Lasermaterial Atome von ihrem Grundzustand E_0 auf ein höheres Energieniveau E_3 gebracht. Der Sprung auf ein höheres Niveau wird durch Zuführen von optischer, elektronischer oder chemischer Energie im Lasermedium angeregt. Im Anschluss erfolgt zunächst ein strahlungsloser Übergang auf ein mittleres Niveau E_2 .

Von da aus fällt das Atom auf E_1 zurück und emittiert hierbei ein Lichtquant, dessen Energie der Differenz zwischen E_2 und E_1 entspricht. Wenn dieser Quantensprung auf ein niedrigeres Niveau zufällig und ohne äußeren Einfluss stattfindet, wird er als *spontane Emission* bezeichnet. Wird dieser jedoch durch ein Photon angeregt, handelt es sich um

eine *induzierte Emission*. Abschließend fällt das Atom strahlungsfrei auf E_0 zurück.

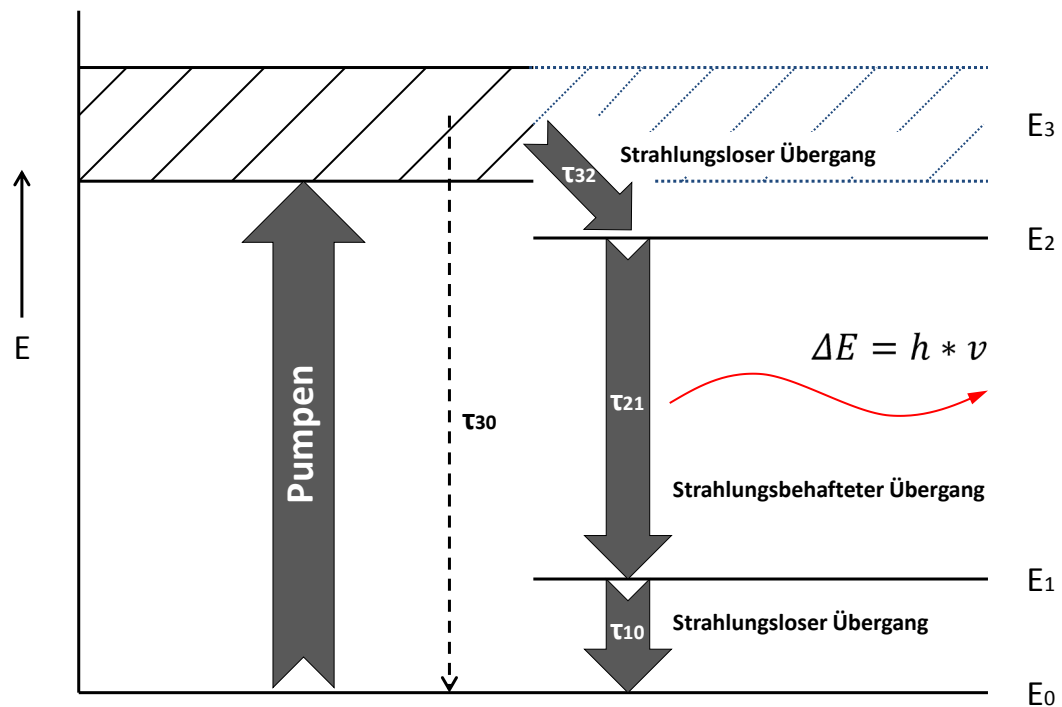


Abbildung 2.1: Vier-Energie-Niveau-Schema typischer Laser [Tipl09][Lach13].

Damit dieser Prozess zu einer Verstärkung führen kann, ist eine Inversion der Besetzung der Zustände erforderlich, d.h. die Atomdichte auf dem oberen Niveau muss höher sein als auf dem unteren. Andernfalls wird die entstandene Strahlung durch die Atome auf dem Grundniveau E_0 wieder absorbiert. Der in Abb. 2.1 beschriebene Vorgang findet in einem 4-Niveau Laser statt. Bei einem 3-Niveau-Laser, z. B. einem Rubin-Laser, entfällt der letzte Übergang. [Eich06] [Eich14] [Tipl09]

Da die einzelnen Niveaus in einem Medium diskret sind und die in einem Quant enthaltene Energie ausschließlich von der Frequenz und der Planck'schen Konstante abhängt, stellt sich eine exakt definierte Wellenlänge bei der emittierten Strahlung ein.

Das aktive Lasermaterial befindet sich in einem Resonator (Abb. 2.2), der aus einem teil- und einem undurchlässigen Spiegel besteht. Diese sind so angeordnet, dass das emittierte Licht mehrfach durch das Gebiet zwischen ihnen geleitet wird. Hierbei wird ein Teil der Strahlenenergie durch den teildurchlässigen Spiegel ausgekoppelt, während die restlichen Photonen im Resonator verbleiben und für die induzierte Emission weiterer Lichtquanten zur Verfügung stehen. [Eich06] [Lach13]

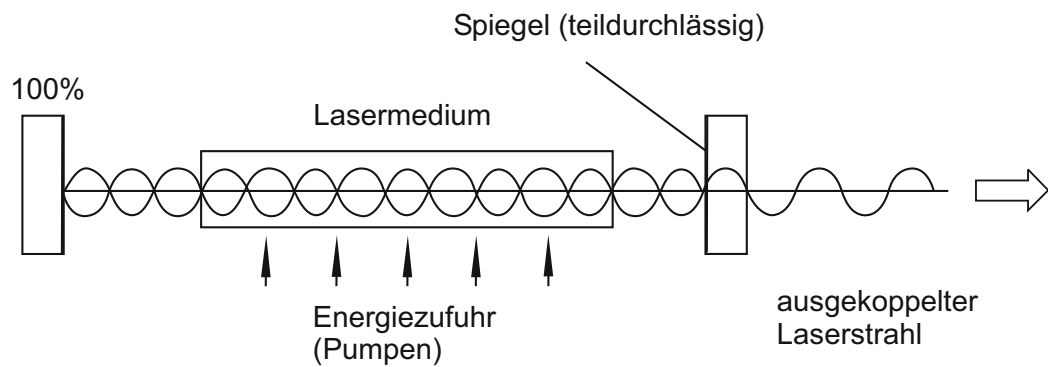


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Lasers [Eich14].

2.1.2 Lasertypen

Lasere werden basierend auf ihrem aktiven Lasermedium und dessen Aggregatzustand unterschieden und in folgende Typen eingeteilt: In der Tabelle 2.1 sind die Daten einiger

- Gas-Laser
- Farbstoff-Laser
- Festkörper-Laser
- Freie-Elektronen-Laser (FEL)

Lasere-Systeme aufgelistet. Der Freie-Elektronen-Laser wird hier nicht betrachtet, da dieser kein aktives Lasermedium hat und die Parameter je nach Quelle stark voneinander abweichen. [Eich06]

Lasertyp	Anregung	Lasermaterial	Wichtige Wellenlängen in nm	Typische Leistung bzw. Energie	Anwendungsbeispiel
Gas-Laser					
HeNe-Laser	Gasentladung	Ne	632,8	cw: 0,1...100mW	Messtechnik
Argon-Ionenlaser	Gasentladung	Ar+	488,2; 514,5	cw: 5...100mW	Holographie, Spektroskopie, Lithographie
Excimer-Laser	Elektronenstrahl, Gasentladung	Xe++, KrF+, XeCl+	172,2; 248; 308	Puls: 0,1...400J; 10TW	Halbleiterlithographie, nichtlineare Optik
CO ₂ -Laser	Gasentladung, Hochfrequenz	Co ₂	9400...10800	cw:<20kW	Materialbearbeitung
Festkörper-Laser					
Neodym-YAG-Laser	Entladungslampe, Laserdioden	Nd ⁺⁺	1064	cw: 2kW Puls:10 GW	Materialbearbeitung
Rubin-Laser	Entladungslampe, Laserdioden	Cr ⁺⁺⁺	694,3	cw: 2W Puls:100 GW	Lidar (optische Geschwindigkeits- und Abstandsmessung, Medizintechnik)
Titan-Saphir	Laser	Ti ⁺⁺⁺	7000...900	Puls: 5J	durchstimmbarer Laser (Frequenz kann verändert werden), Durchstimmbereich: 180nm
Halbleiter-Laser	elektrisch, im Fernen IR auch optisch	z.B. GaAs, InP, InAs, GaN, PbS, PbTe	260...30000	cw: <5W Puls:10 kW	Nachrichtentechnik, Pump-Laser, Materialbearbeitung, Datenspeicher (CD, DVD), für IR-Spektroskopie in engen Grenzen durchstimmbare
Faser-Laser	Laser, Blitzlampen	z.B. Nd,Er,Th	250...1800	1...5W	Materialbearbeitung, nichtlineare Optik
Farbstoff-Laser					
Farbstoff-Laser	Laser, Entladungslampe	Farbstoffe wie Rhodamin, Cyanin	217...1100	cw: 5W Puls:2 MW	durchstimmbarer Laser für Fluoreszenz- und Ramanspektroskopie sowie Schadstoffüberwachung

Tabelle 2.1: Lasertypen (Auswahl) nach [Lach13] [Eich06].

2.1.3 Klassifizierung nach EN 60825-1:

Gemäß der *DIN EN 60825-1* werden die Laser entsprechend der Gefährlichkeit in die Geräteklassen 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B und 4 unterteilt. Das Symbol M bei den Klassen 1M und 2M ist eine Abkürzung für *magnification* (Vergrößerung). Bei der Klasse 3R steht das R für *relaxiert*. Diese Einteilung erfolgt entsprechend der Unfallverhütungsvorschrift *Laserstrahlung BGV B2*. Nach dieser ist u. a. beim Betrieb von Lasereinrichtungen der Klassen 3R bis 4 darauf zu achten, dass ein Laserschutzbeauftragter bestellt wird. [Eich06] [IEC60825]

Die einzelnen Laserklassen werden in der Tabelle 2.2 kurz erläutert.

Klasse:	Beschreibung:
1	- Die zugängliche <u>Laserstrahlung ist ungefährlich</u>
Anmerkung:	- Die Grenzwerte der zugänglichen Strahlung ist nach <i>DIN EN 60825-1</i> im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1400 nm zur Klassifizierung eines Lasers ist zwischen 100 s und 30000 s identisch
1M	- Die Laserstrahlung ist <u>ungefährlich, sofern keine optischen Instrumente benutzt werden</u> , die den Strahlquerschnitt einengen
Anmerkung:	- Häufig Laser oder LED's mit divergenten Strahlen - Systeme mit kollimierten Strahlen mit großem Querschnitt sind in diese Klasse eingeschlossen.
2	- Diese Klasse ist nur im Sichtbaren definiert (400–700 nm) - Die Leistungsgrenze liegt für CW-Laser bei 1mW
Anmerkung:	- Laser dieser Klasse sind bei einer Bestrahlung < 0,25 s (Lidschlussreflex) ungefährlich
2M	- Siehe Klasse 2, sofern <u>keine optischen Instrumente benutzt werden</u> , die den Strahlquerschnitt einengen
Anmerkung:	- Diese Klasse ist nur im Sichtbaren definiert (400–700 nm)
3R	- Im sichtbaren Spektralbereich sind die Ausgangswerte (Bestrahlungszeit < 0,25 s) zwischen 1 - 5mW für Dauerstrichlaser
Anmerkung:	- Im nicht sichtbaren Bereich sind die Ausgangswerte bei einer Bestrahlungszeit < 100 s bis zu 5-fach höher als die bei einem Laser der Klasse 1
3B	- Für Dauerstrichlaser mit Wellenlängen > 315nm beträgt die obere Leistungsgrenze 0,5 W
Anmerkung:	- Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge und in besonderen Fällen für die Haut
4	- CW-Laser mit Leistungen über 0,5W (Wellenlängen > 315 nm) gehören zur Klasse 4
Anmerkung:	- Die Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge und die Haut - Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich werden - Die Laserstrahlung kann Brand- und Explosionsgefahren hervorrufen

Tabelle 2.2: Laserklassen nach [IEC60825].

2.2 Lumineszenz

Bei Anregung einer Lumineszenzschicht durch eine optische Quelle wird durch spontane Emission ein materialspezifisches Spektrum an Wellenlängen freigesetzt, das in der Regel niederfrequenter als die Ausgangsfrequenz ist. Das Grundprinzip der Lumineszenz ist den im Abschnitt 2.1.1 erklärten Vorgängen der spontanen Emission im aktiven Lasermaterial sehr ähnlich.

Hierbei werden ebenfalls die Atome innerhalb des Lumineszenzmaterials durch optische, chemische oder elektrische Energie in einen angeregten Zustand versetzt. Führt der Quantensprung über mehrere Niveaus hinweg, kann nun die Energie in mehreren Stufen abgegeben werden. Aus dem Energieerhaltungssatz folgt, dass diese emittierten Photonen bei jedem Abwärtssprung nur einen Teil der anfangs absorbierten Energie enthalten. Folglich

ist jede einzelne Wellenlänge im Emissionsspektrum größer als die zur Anregung verwendete.

Ist die Lebensdauer der angeregten Zustände geringer als 10 Nanosekunden, so wird der Vorgang *Fluoreszenz* genannt, andernfalls wird dieser als *Phosphoreszenz* bezeichnet. Der Oberbegriff zu beiden ist *Lumineszenz*. [Hart14]

2.3 Lichttechnische Größen

Das sichtbare Licht ist nach *DIN 5031* elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von ca. 380-780 nm. Das menschliche Auge nimmt in diesem Spektrum Helligkeits- und Farbunterschiede wahr. Für den messtechnischen Umgang sind folgende lichttechnische Größen zu nennen: [DIN5031][Heri14]

2.3.1 Radiometrische Größen

Radiometrische Größen sind nicht auf die menschliche Wahrnehmung angepasst. Sie beschreiben die physikalischen Eigenschaften eines Strahlungsempfängers bzw. -senders. Die Formelzeichen enthalten nach *DIN 5031* den Index “e” (energetisch). [DIN5031][Heri14]

Strahlungsfluss:

Der *Strahlungsfluss* ist die Leistung der elektromagnetischen Strahlung. [DIN5031][Heri14]

- **Einheit:** Watt (W) = $\frac{J}{s}$
- **Formelzeichen:** Φ_e

Strahlstärke:

Die *Strahlstärke* ist eine senderseitige Größe und als Quotient aus Strahlungsleistung und Raumwinkel definiert. [DIN5031][Heri14]

- **Einheit:** $\frac{W}{sr}$
- **Formelzeichen:** I_e

Bestrahlungsstärke:

Die *Bestrahlungsstärke* ist eine empfängerseitige Größe. Sie beschreibt den Quotienten

aus Strahlungsleistung und bestrahlter Fläche. [DIN5031][Heri14]

- **Einheit:** $\frac{W}{m^2}$
- **Formelzeichen:** E_e

2.3.2 Fotometrische Größen

Die fotometrischen Größen sind eine Annäherung der physikalischen Größen an das photopische (Hell-adaptierte) Helligkeitsempfinden des Menschen. Die Formelbuchstaben enthalten nach *DIN 5031* den Index "V". [DIN5031][Heri14]

Lichtstrom:

Der Lichtstrom beschreibt die Strahlenleistung einer Lichtquelle im Raum, indem die Lichtenergie pro Zeiteinheit betrachtet wird. [DIN5031][Heri14]

- **Einheit:** Lumen (lm)
- **Formelzeichen:** Φ_v

Lichtstärke:

Die Lichtstärke ist eine der sieben SI-Basiseinheiten. Mit ihr wird der richtungsabhängige Lichtstrom einer Lichtquelle beschrieben, dabei ist die Größe der Lichtquelle unerheblich. [DIN5031][Heri14]

- **Einheit:** Candela (cd) = $\frac{lm}{sr}$
- **Formelzeichen:** I_v

Beleuchtungsstärke:

Die Beleuchtungsstärke gibt den Lichtstrom bezogen auf die Fläche an. [DIN5031] [Heri14]

- **Einheit:** Lux (lx)
- **Formelzeichen:** E_v

Leuchtdichte:

Die Leuchtdichte gibt die Lichtstärke bezogen auf die Fläche an [DIN5031] [Heri14]

- **Einheit:** Candela pro Quadratmeter
 cd/m^2
- **Formelzeichen:** L_v

2.3.3 Weitere Größen

Raumwinkel:

Wird wie in Abb. 2.3 um einen strahlenden Punkt P eine Kugel mit Radius r beschrieben und wird auf der Kugeloberfläche eine Figur mit der Fläche A bestrahlt, so tritt die Strahlung im Raumwinkel $\Omega = \frac{A}{r^2}$ aus.[DIN5031][Heri14]

- **Einheit:** Steradian (sr)
- **Formelzeichen:** Ω oder ω

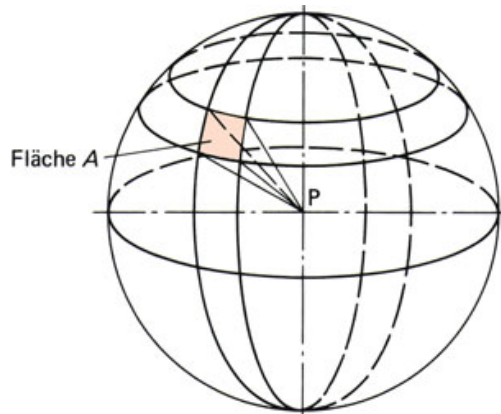


Abbildung 2.3: Definition des Raumwinkels [Heri14].

Das maximale fotometrische Strahlungsäquivalent:

Die Konstante K_m wird als Maximalwert des fotometrischen Strahlungsäquivalents bezeichnet und ist eng verknüpft mit der SI-Basiseinheit für die Lichtstärke, der Candela. Es gilt $K_m = 683 \frac{lm}{W}$. [DIN5031][Heri14]

2.4 Definition des Wirkungsgrades

Das Ziel dieser Arbeit ist es den Wirkungsgrad des betrachteten Scheinwerfermoduls zu steigern. Hierbei werden radio- und photometrische Ausgangsgrößen ermittelt und mit den Eingangsgrößen in Zusammenhang gebracht. Im Folgenden wird gemäß der DIN

5031 $\Delta\lambda$ im sichtbaren Spektralbereich von 380 - 780 nm definiert. Der Strahlungsfluss außerhalb des definierten Bereichs wird nach [Naum14] als Verlust betrachtet. Die hier verwendeten Wirkungsgrade sind folgende:

Strahlungsausbeute, bzw. radiometrischer Wirkungsgrad η_e :

$$\eta_e = \frac{\Phi_e(\Delta\lambda)}{P} \quad (2.1)$$

Die Strahlungsausbeute ist das Verhältnis zwischen dem erzeugten Strahlungsfluss $\Phi_e(\Delta\lambda)$ und der verbrauchten Leistung P . Beide Größen werden in Watt [W] angegeben. Daher ist η_e dimensionslos.[Naum14]

Optischer Nutzeffekt η_{eV} :

$$\eta_{eV} = \frac{\Phi_e(\Delta\lambda)}{\Phi_{e,ges}} \quad (2.2)$$

Beim optischen Nutzeffekt wird der Anteil der erzeugten sichtbaren Strahlung mit der gesamten Strahlung ins Verhältnis gesetzt.

Lichtausbeute η_V :

$$\eta_V = \frac{\Phi_V}{P} \quad (2.3)$$

Der in der Einheit Lumen [lm] angegebene erzeugte Lichtstrom Φ_V wird im Verhältnis zur Eingangsleistung P betrachtet.[Naum14]

Reflektions- bzw. Transmissionsgrad ϱ_e bzw. τ_e :

$$\varrho_e = \frac{\Phi'_e}{\Phi_e} \quad (2.4)$$

$$\tau_e = \frac{\Phi'_e}{\Phi_e} \quad (2.5)$$

Der Reflektions- und der Transmissionsgrad sind durch dem Quotienten aus Ausgangsstrahlung Φ'_e (nach Reflektion oder Transmission) und der Eingangsstrahlung Φ_e (vor Reflektion oder Transmission) definiert. [Naum14]

2.5 Messtechnik

2.5.1 Spektrometer

In einem Spektrometer wird der wellenlängenabhängige Strahlungsfluss des einfallenden Lichts ermittelt. Ein optisches Gitter zerlegt die einfallenden Strahlen in seine spektralen Wellenlängen. Durch anschließende Fokussierung auf einen CCD-Sensor, bei dem einzelne Pixel ein schmalbandiges Frequenzband erfassen, können die vorliegenden Wellenlängen und der dazugehörige Strahlungsfluss $\Phi_{e\lambda}$ ermittelt werden. Bei einer Messung mit diesem Gerät ist darauf zu achten, dass der CCD-Chip ein thermisches Rauschen aufweist und daher zu Beginn der Messungen kalibriert werden muss. Ein Spektrometer wird in den folgenden Versuchen zusammen mit einer Ulbricht'schen Kugel eingesetzt.[Naum14]

2.5.2 Ulbricht'sche Kugel

Eine Ulbricht'sche Kugel wird u. a. eingesetzt, wenn der ausgesendete Lichtstrom Φ_V einer Lichtquelle bestimmt werden soll.

Die Kugel ist auf der Innenseite mit einer mattweißen Beschichtung versehen, die auftretendes Licht unabhängig vom Auftreffwinkel diffus reflektiert. Durch mehrfache Reflektion wird so ein nahezu homogene Beleuchtungsstärke E_K an der gesamten Kugeloberfläche erzeugt, der proportional zum Lichtstrom der Lichtquelle ist. Diese Eigenschaft ermöglicht es mit einem einzelnen Messpunkt an der Innenseite der Ulbricht'schen Kugel den gesamten Lichtstrom der Quelle zu bestimmen.

Bedingt durch die Absorptions- bzw. Reflektionseigenschaften des Messobjektes nimmt dies Einfluss auf die Messung. Dieser Einfluss wird in einem Proportionalitätsfaktor zusammengefasst. Die Ermittlung des Faktors erfolgt vor der Versuchsdurchführung mit einer Absorptionskorrekturlampe. Hierbei wird das Messobjekt mittig in der Kugel platziert und die Hilfslampe nach Verschluss der Kugel eingeschaltet. Mit dem Spektrometer wird die Spektralverteilung und die Helligkeit in der Kugel gemessen. Da die spektralen Eigenschaften der Absorptionskorrekturlampe bekannt sind, kann nun anhand der Abweichung die durch das Messobjekt verursacht wird, eine Bestimmung des Proportionalitätsfaktors vorgenommen werden.

Im Anschluss wird die zu vermessende Lichtquelle eingeschaltet und bei verschlossener Kugel und ausgeschalteter Absorptionskorrekturlampe mit dem Spektrometer analysiert. [Naum14].

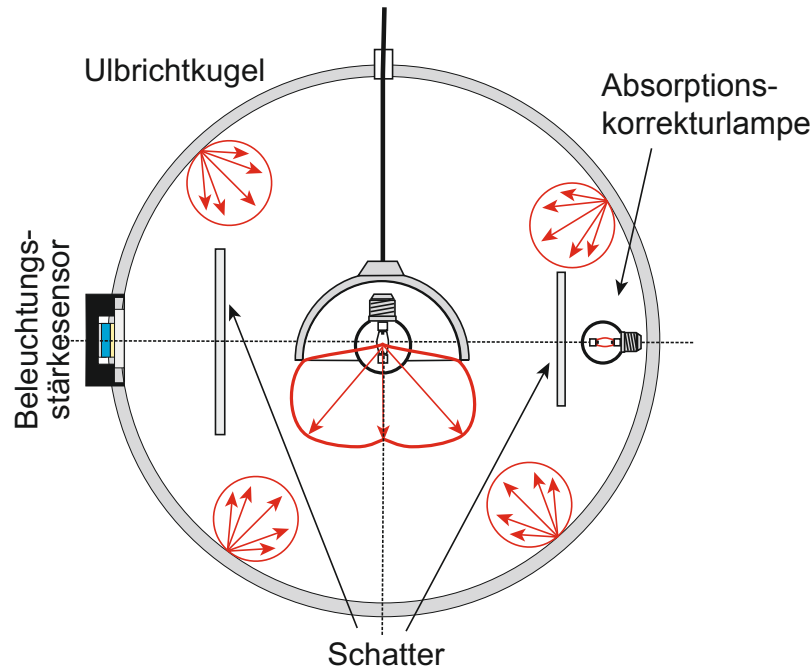


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Ulbricht'schen Kugel nach [Naum14].

2.5.3 Goniophotometer

Zur Bestimmung der Abstrahlcharakteristik einer Lichtquelle werden Goniophotometer eingesetzt. Wird die Lichtquelle auf das Goniophotometer gerichtet, misst dieses die Leuchtdichte und ggf. den dazugehörigen Farbwert. Im Anschluss findet eine Drehung und eine Aufnahme des nächsten Messpunktes statt. Alle Daten zusammen erfassen die Summe der ausgesendeten Lichtstrahlen der Lichtquelle. Neben der winkelabhängigen Beleuchtungsstärke kann, wenn ein geeignetes Farbfiltersystem integriert ist, die winkelabhängige Verteilung der Farben bestimmt werden.

2.5.4 Laserleistungsmessgerät

Ein Laserleistungsmessgerät dient der Erfassung hoch energetischer, monochromatischer und stark fokussierter Strahlungsenergie.

Hierbei wird ein thermischer Sensor eingesetzt, der die optische Leistung absorbiert und dadurch eine Erwärmung erfährt. Der Sensor wird durch eine Kühleinheit in einem thermisch stationären Zustand gehalten. Die zur Wärmeabfuhr benötigte elektrische Leistung entspricht der optischen Ausgangsleistung der zu vermessenden Strahlungsquelle.

Im Rahmen dieser Arbeit hat die Justierung der Messvorrichtung und des Messobjektes einen großen Einfluss auf das Messergebnis. Daher werden zur Minimierung des durch die Justierung bedingten Messfehlers für jedes Ergebnis fünf Versuche mit unterschiedlicher Justierung durchgeführt und aus den ermittelten Werten der arithmetische Mittelwert bestimmt. Innerhalb eines Versuchs werden 100 Messwerte im Abstand von $\Delta t = 0,1\text{s}$ aufgenommen und daraus der ebenfalls der arithmetische Mittelwert berechnet.

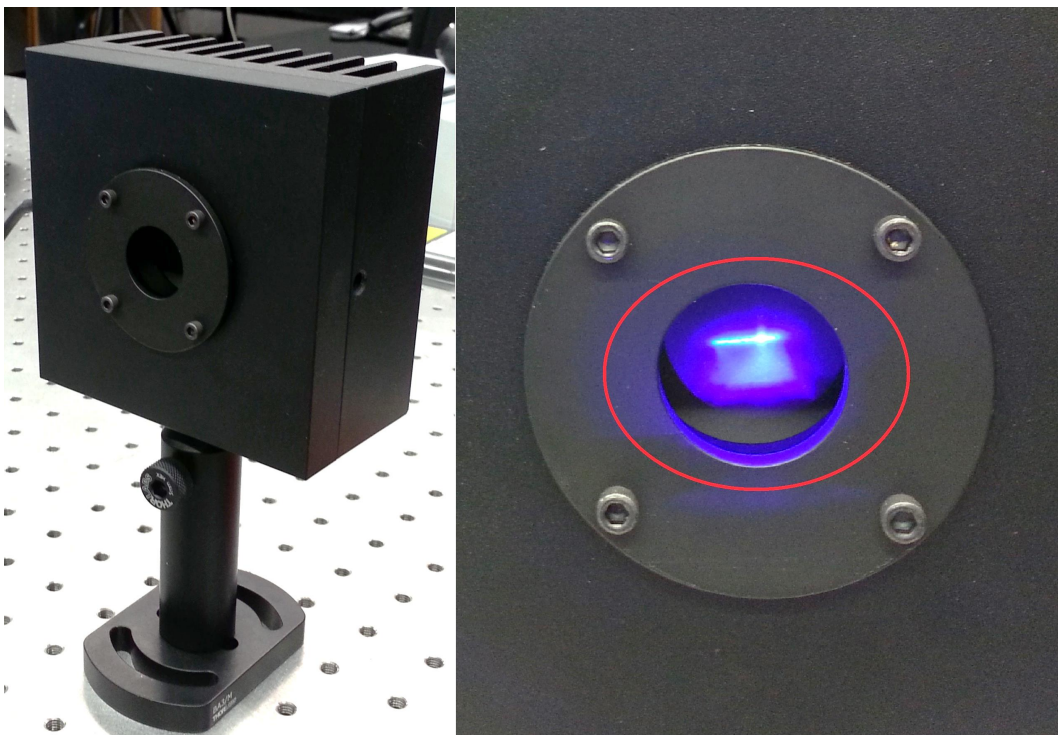


Abbildung 2.5: a) Laserleistungsmessgerät
b) Beleuchtete Sensorfläche

3 Aufbau des Laserscheinwerfermoduls

Das Laserscheinwerfermodul wird im Rahmen dieser Arbeit in zwei Hauptkomponenten unterteilt. Die erste Komponente ist das Scheinwerfermodul (Abschnitt 3.1) und dient der Emission, Konversion und der Steuerung von Licht. Die zu bestimmenden technischen Daten sind, mit Ausnahme der auf die Kühlleistung bezogenen Werte, ausschließlich auf dieses Modul bezogen. Die zweite Komponente ist der aktive Kühlkörper (Abschnitt 3.2).

3.1 Das Scheinwerfermodul

Das Scheinwerfermodul ist wie in Abbildung 3.1 dargestellt aufgebaut. Als Lichtquelle werden vier in Reihe geschaltete Laserdioden vom Typ PL TB450B mit einem maximalen Eingangsstrom von $I_{E_{MAX}} = 1,6$ A eingesetzt. Das dazugehörige Datenblatt befindet sich im Abschnitt B des Anhangs. Das Laserlicht der Dioden mit einer Wellenlänge von $\lambda \approx 450$ nm wird zunächst durch eine Abschirmung hindurch auf einen kommerziellen beschichteten Spiegel und von dort durch eine Bohrung ($\varnothing \approx 3$ mm) hindurch auf eine reflektive Lumineszenzschicht gelenkt. Anschließend bündelt eine aus Polymethylmethacrylat (PMMA) gefertigte plankonvexe Linse und der Reflektor das abgegebene Licht. Das Material der Lumineszenzschicht wird vom Hersteller Intematrix angeboten. Eine genaue Zusammensetzung des Materials ist nicht bekannt, da es sich um einen speziell für die vorliegende Anwendung angefertigtes Muster handelt.

3.2 Die Kühleinheit

Die Wärme, die beim verlustbehafteten Betrieb entsteht, wird über einen Kühlkörper durch erzwungene Konvektion an die Umgebungsluft abgeführt. Dieser ist mit dem Schein-

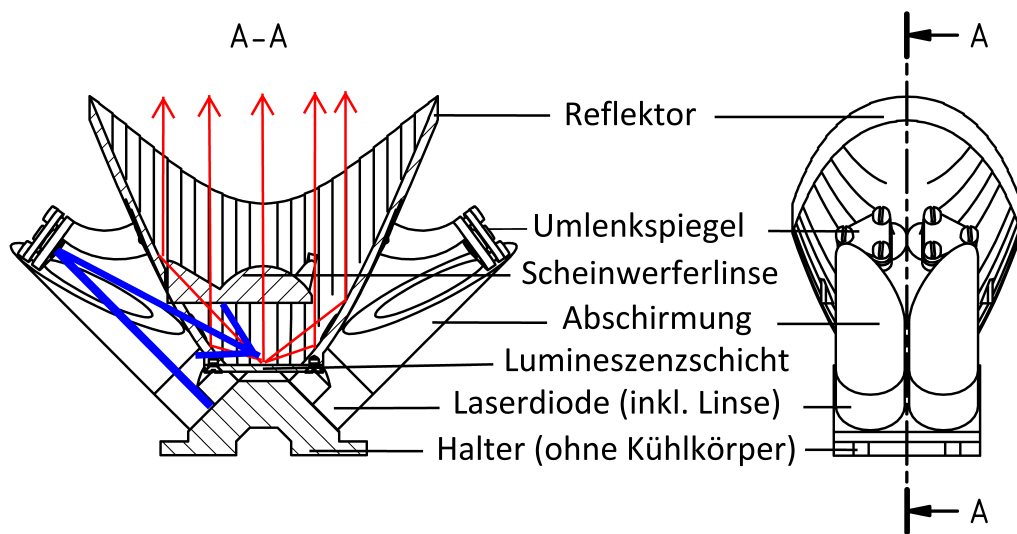


Abbildung 3.1: Aufbau des Scheinwerfermoduls.

werfermodul verschraubt und besteht aus einem quadratischen Aluminiumhohlprofil mit Lamellen auf der Innenseite. Zur verbesserten Wärmeübertragung wird Wärmeleitpaste auf die Kontaktfläche zwischen Halter und Kühlkörper aufgetragen. Ein elektrisch angetriebener Lüfter mit einer maximalen elektrischen Leistung von 0,72 W ist am Kühlkörper befestigt und führt Umgebungsluft zur Kühlung durch das Hohlprofil.

4 Bestimmung der Leistungsparameter des Scheinwerfermoduls

Im Folgenden werden die Leistungsparameter des in Abschnitt 3 beschriebenen Scheinwerfermoduls im montierten Zustand ermittelt. Die experimentell ermittelten Parameter werden genutzt um Informationen über die technischen Daten und den Optimierungsbedarf des vorliegenden Systems zu erhalten. Betrachtet werden insbesondere die folgenden Parameter:

- Der wellenlängenabhängige Strahlungsfluss $\Phi_e(\lambda)$
- Der radiometrischer Wirkungsgrad $\eta_e(I_E)$
- CIE-Farbort
- Der wellenlängenabhängige Lichtstrom $\Phi_V(\lambda)$
- Die Lichtausbeute $\eta_V(I_E)$
- Der einstellbare Eingangsstrom I_E
- Die Abhängigkeit der Parameter von der Gehäusetemperatur der Dioden ϑ_{Case}

Die Erfassung der Parameter erfolgt mithilfe von zwei Versuchsaufbauten. Ein Aufbau, bestehend aus einer Ulbricht'schen Kugel und einem Spektrometer, wird genutzt, um die spektralen Leistungsparameter des Moduls bei unterschiedlichen Eingangsleistungen zu vermessen. Der zweite Aufbau dient der Erfassung der Beleuchtungsstärkeverteilung in 25 m Entfernung zur Lichtquelle nach ECE-Richtlinie 113. Neben der Helligkeitsverteilung auf der ECE-Testwand wird die Streuung der auftretenden Farborte und deren räumliche Aufteilung analysiert.

4.1 Aufbau der Versuche

4.1.1 Messung mit der Ulbricht'schen Kugel

Zunächst wird das Scheinwerfermodul in der Mitte der Ulbricht'schen Kugel (siehe Abschnitt 2.5.2) platziert. Die Messung erfolgt mit einem Spektrometer (siehe Abschnitt 2.5.1), das über einen Computer ausgelesen wird. Auf diesem erfolgt die Auswertung der experimentell gewonnenen Ergebnisse. Zur Erfassung der Temperatur am Diodengehäuse ϑ_{Case} ist ein NTC-Widerstand mit einer der Laserdioden verbunden. Dieser wird mit einem Multimeter in Echtzeit ausgelesen. Das Scheinwerfermodul hat eine aktive Kühlvorrichtung, bestehen aus einem Aluminiumkörper und einem Lüfter. Die Versorgung der Laserdioden erfolgt durch ein Netzteil mit integrierter Messvorrichtung.

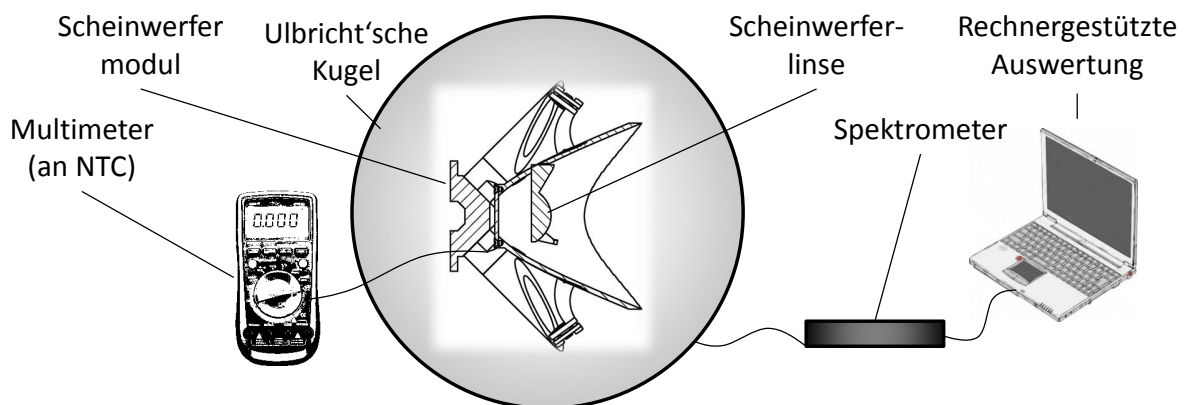


Abbildung 4.1: Versuchsaufbau zur Vermessung des Scheinwerfermoduls in der Ulbricht'schen Kugel - das Größenverhältnis zwischen Scheinwerfermodul und Ulbricht'scher Kugel wird nicht maßstabsgetreu dargestellt.

4.1.2 Messung mit dem Goniophotometer

Das Scheinwerfermodul ist in einer computergesteuerten 3-Achs-Halterung eingespannt. Im Abstand von 25 m ist die Messeinheit zur Bestimmung der Leuchtdichte E positioniert. Im Abstand von $\sqrt{10}$ m $\approx 3,16$ m zur Lichtquelle befindet sich die Messeinheit zur Bestimmung der Farbverteilung. Beide Einheiten sind mit einem Computer verbunden. Der Messvorgang erfolgt aufgrund der hohen Lichtempfindlichkeit der Sensoren bei nahezu vollständiger Vermeidung von externem Lichteinfall.

4.2 Durchführung der Versuche

4.2.1 Messung mit der Ulbricht'schen Kugel

Zu Beginn wird eine Dunkelstrommessung durchgeführt, damit das Rauschen des CCD-Chips im Spektrometer korrigiert wird. Im Anschluss wird die Absorptionskorrekturlampe eingeschaltet und eine Korrekturmessung durchgeführt, um die im Abschnitt 2.5.2 genannte Proportionalitätskonstante C zu ermitteln. Nach dieser Vorbereitung wird die Messreihe aufgenommen. Der wellenlängenabhängige Lichtstrom wird bei einem einstellbaren Eingangsstrom I_E von 150-1000 mA in der verschlossenen Ulbricht'schen Kugel vermessen. Während des Vorganges wird die Temperatur der Laserdioden mithilfe eines NTC-Widerstandes kontrolliert. Dieser ist an eine der vier Dioden des Scheinwerfermoduls gekoppelt und wird kontinuierlich mit einem Multimeter auf seinen elektrischen Widerstand geprüft. Aus diesem kann mit einer Referenztabelle die Gehäusetemperatur der Diode bestimmt werden.

Die Gehäusetemperatur der Dioden bei Aufnahme der Messwerte beträgt $\vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ und kann mit einer aktiven Kühlvorrichtung mit einer maximalen Kühlleistung von $P_{Kühl} = 0,72 \text{ W}$ beeinflusst werden. Zum Vergleich wird eine weitere Messreihe mit $\vartheta_{Case}=30 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgenommen. Von besonderem Interesse ist der bei einer Umgebungstemperatur von $\vartheta_{Umgebung}=20 \text{ }^\circ\text{C}$ für den Dauerbetrieb festgelegte thermisch stabile Betriebspunkt bei $I_E = 600 \text{ mA}$ und $\vartheta_{Case}=35 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.2.2 Messung mit dem Goniophotometer

Gemäß der ECE-113 Regelung ist zur Prüfung der vom Scheinwerfer erzeugten Beleuchtungsstärke E ein Messschirm zu verwenden, der in 25 m Entfernung vor dem Scheinwerfer senkrecht zu seiner Achse aufgestellt ist.

Zur optimalen Ausrichtung des Scheinwerfermoduls wird vor der Messung der Winkel mit der maximalen Beleuchtungsstärke gesucht. Im Anschluss erfolgt die Aufnahme der Messpunkte. Die untersuchten Winkel sind basierend auf dem zuvor ermittelten Maximum E_{Max} so eingestellt, dass sich die maximale Beleuchtungsstärke in der Mitte des untersuchten Bereiches liegt:

- Horizontal: $-15^\circ \leq H_E \leq 15^\circ$
- Vertikal: $-6^\circ \leq V_E \leq 4^\circ$

Die Messpunkte werden in Winkelabständen von $p_{EH} = p_{EV} = 0,25^\circ$ in horizontaler und vertikaler Richtung aufgenommen.

Die Farbmessung erfolgt nach dem gleichen Schema. Hier wird die Auflösung $p_{CH} = p_{CV} = 1^\circ$ geringer gewählt, da der Messvorgang für jeden Messpunkt einen längeren Zeitraum in Anspruch nimmt. Bei einem zu langen Messzeitraum könnten thermische Effekte im Scheinwerfermodul dazu führen, dass die Ergebnisse einer Messreihe nicht mehr vergleichbar sind.

4.3 Auswertung der Versuche

Im Folgenden soll eine Auswertung der in den vorherigen Abschnitten erläuterten Versuche vorgenommen werden. Bei dieser werden ausschließlich die Werte im sichtbaren Spektralbereich von 380-780 nm betrachtet.

4.3.1 Strahlungsausbeute η_e

Der wellenlängenabhängige Strahlungsfluss $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ wird vom Spektrometer der Ulbricht'schen Kugel mit einer Auflösung $\lambda = 1$ nm aufgenommen und wie im Abschnitt 2.5.2 (Ulbricht'sche Kugel) beschrieben korrigiert. Da der CCD-Chip in der Ulbricht'schen Kugel bei der Messung einem Rauschen unterliegt werden bei der Auswertung der Messergebnisse alle fälschlich erfassten negativen Werte eliminiert.

Die experimentell ermittelten Werte sind für den stationären Betriebspunkt $I_E = 600$ mA in Abbildung 4.2 dargestellt.

Auffällig ist die hohe Amplitude bei $\lambda=450$ nm. Diese setzt sich aus dem von der Lumineszenzschicht reflektierten Laserlicht und dem Streulicht der Laserdiode, das nicht auf die Lumineszenzschicht gelenkt wurde, zusammen.

Die radiometrische Ausgangsleistung ist der Strahlungsfluss in Abhängigkeit vom Eingangsstrom $\Phi_{e\lambda}(I_E)$. Im sichtbaren Bereich kann $\Phi_{e\lambda}$ nach [Naum14] mit der Gleichung 4.1 ermittelt werden.

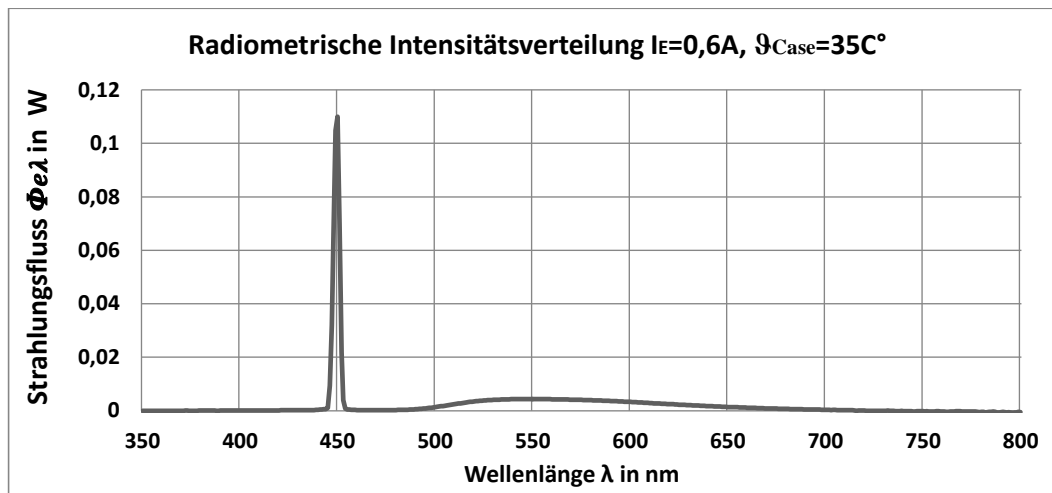


Abbildung 4.2: In der Ulbricht'schen Kugel erfasster Strahlungsfluss $\Phi_e(\lambda)$ bei $I_E = 600 \text{ mA}$ und $\vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$\Phi_{e\lambda} = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (4.1)$$

Beim Betriebspunkt $I_E = 0,6 \text{ A}$ ergibt die Auswertung $\Phi_e(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,91 \text{ W}$ bzw. $\Phi_e(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 30 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,99 \text{ W}$. Weiterhin liegt an den in Reihe geschalteten Laserdioden eine Eingangsspannung von $U_E(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 17,40 \text{ V}$ bzw. $U_E(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 17,59 \text{ V}$ an. Die Berechnung der elektrischen Leistung P_E erfolgt nach [Heri14] mit der folgenden Gleichung 4.2.

$$P_E = U_E \cdot I_E \quad (4.2)$$

Für den Betriebspunkt ergibt die Messung eine Leistung von $P_E(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 10,41 \text{ W}$ und $P_E(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 30 \text{ }^\circ\text{C}) = 10,53 \text{ W}$. Die eingangsstromabhängige Strahlungsausbeute $\eta_e(I_E)$ kann nun nach [Naum14] mit der Gleichung 2.1 bestimmt werden. Diese beträgt beim Betriebspunkt $\eta_e(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 8,72 \text{ } \%$.

Bei $\vartheta_{Case} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ wird eine Strahlungsausbeute von $\eta_e(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 30 \text{ }^\circ\text{C}) = 9,40 \text{ } \%$ gemessen. Demnach kann bei einer Absenkung der Diodengehäusetemperatur von $\Delta\vartheta_{Case} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ eine Steigerung der Strahlungsausbeute um $7,8 \text{ } \%$ erreicht werden. Die weiteren Wirkungsgrade werden ebenfalls mit diesen Gleichungen ermittelt und sind in Abbildung 4.3 dargestellt.

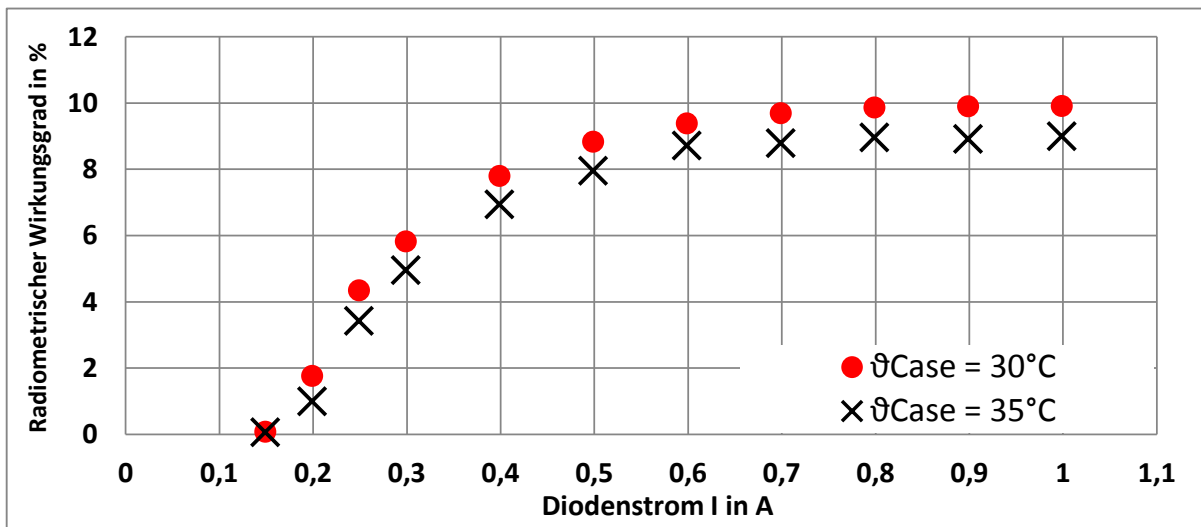


Abbildung 4.3: Radiometrischer Wirkungsgrad $\eta_e(I_E)$ in Abhängigkeit vom Diodenstrom bei $\vartheta_{Case} = 35^\circ\text{C}$.

Der radiometrische Wirkungsgrad erfährt mit $\vartheta_{Case}=35^\circ\text{C}$ bei $\eta_e(I_E = 0,8\text{ A}, \vartheta_{Case} = 35^\circ\text{C}) = 9,0\%$ eine Sättigung. Diese Sättigung tritt bei $\vartheta_{Case}=30^\circ\text{C}$ bei $\eta_e(I_E = 0,8\text{ A}, \vartheta_{Case} = 30^\circ\text{C}) = 10,0\%$ auf. Dies entspricht einer Steigerung um ca. 11,1%. Mit Überschreitung der im Datenblatt der Dioden angegebenen Laserschwelle von $I_E = 0,2\text{ A}$ [OSRA13] steigt der Wirkungsgrad bei beiden Gehäusetemperaturen sprunghaft an.

Bei diesen Angaben ist zu beachten, dass die zum Kühlen benötigte Leistung ($P_{Kühl} = 0,72\text{ W}$) keine Berücksichtigung findet. Unter Einbezug der Kühlleistung sinkt der radiometrische Wirkungsgrad im Betriebspunkt auf $\eta_e(I_E = 0,6\text{ A}, \vartheta_{Case} = 35^\circ\text{C}) = 8,01\%$ bzw. $\eta_e(I_E = 0,6\text{ A}, \vartheta_{Case} = 30^\circ\text{C}) = 8,80\%$.

4.3.2 Lichtausbeute η_V

Für die Lichtausbeute η_V werden die im Abschnitt 4.3.1 (Strahlungsausbeute η_e) ermittelten Daten für die Eingangsleistung $P_E(I_E)$ und den Strahlungsfluss $\Phi_e(I_E)$ herangezogen. Die Gleichung zur Berechnung des Lichtstromes Φ_V ist nach [Naum14]:

$$\Phi_V = K_m \cdot \int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (4.3)$$

Das maximale fotometrische Strahlungsequivalent K_m (siehe Abschnitt 2.3.3) und der spektrale Helligkeitsempfindlichkeitsgrad für Tagsehen $V(\lambda)$ sind in DIN 5031-3 [DIN5031]

definiert und im Anhang in Abbildung A.1 dargestellt.

In Abb. 4.4 ist der wellenlängenabhängige Lichtstrom $\Phi_{V\lambda}(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C})$ dargestellt. Für den Lichtstrom ergibt sich folglich bei $\vartheta_{Case}=35 \text{ }^\circ\text{C}$ $\Phi_V(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 241,0 \text{ lm}$ und bei $\vartheta_{Case}=30 \text{ }^\circ\text{C}$ $\eta_e(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 30 \text{ }^\circ\text{C}) = 255,5 \text{ lm}$.

Mit einer Eingangsleistung von $P_E(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 10,41 \text{ W}$ und $P_E(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 30 \text{ }^\circ\text{C}) = 10,53 \text{ W}$ ist die Lichtausbeute nach Gleichung 2.3 $\eta_V(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 23,16 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ bzw. $\eta_V(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 30 \text{ }^\circ\text{C}) = 24,27 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$. Demnach kann bei einer Absenkung der Diodengehäusetemperatur $\Delta\vartheta_{Case}=5 \text{ }^\circ\text{C}$ eine Steigerung der Lichtausbeute um 4,8 % erreicht werden.

Der fotometrische Wirkungsgrad erfährt mit $\vartheta_{Case}=35 \text{ }^\circ\text{C}$ bei $\eta_e(I_E = 0,8 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 23,9 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ eine Sättigung. Diese Sättigung verschiebt sich bei $\vartheta_{Case}=30 \text{ }^\circ$ auf $\eta_e(I_E = 0,8 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 30 \text{ }^\circ\text{C}) = 25,5 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$. Dies entspricht einer Steigerung um ca. 6,7 %.

Bei diesen Angaben ist zu beachten, dass die zum Kühlen benötigte Leistung ($P_{Kühl}=0,72 \text{ W}$) keine Berücksichtigung findet. Unter Einbezugnahme der Kühlleistung sinkt die Lichtausbeute im Betriebspunkt auf $\eta_V(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}) = 21,65 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ bzw. $\eta_e(I_E = 0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case} = 30 \text{ }^\circ\text{C}) = 22,71 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$.

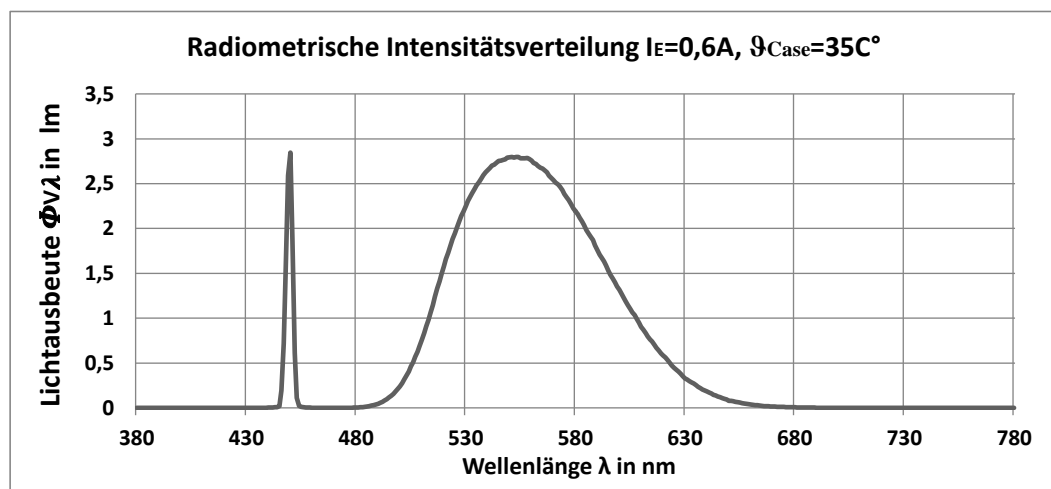
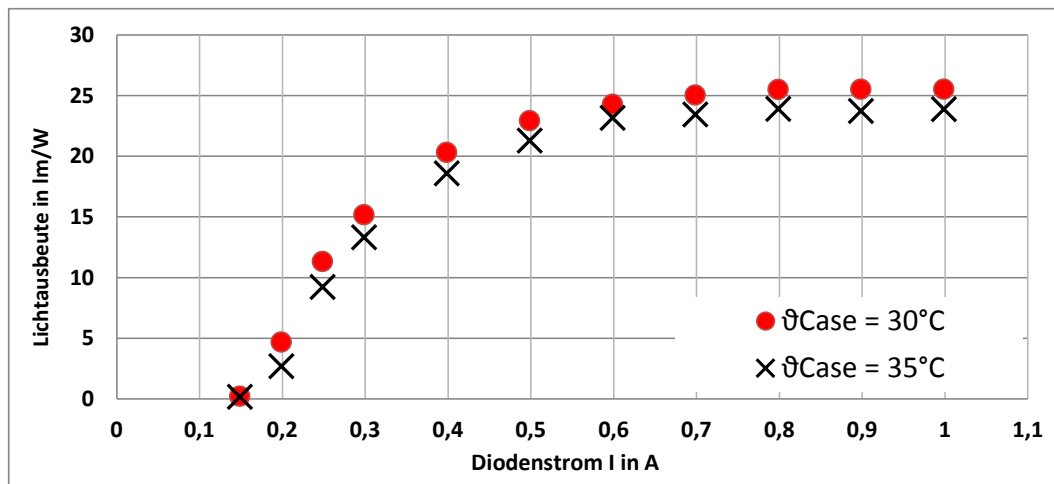
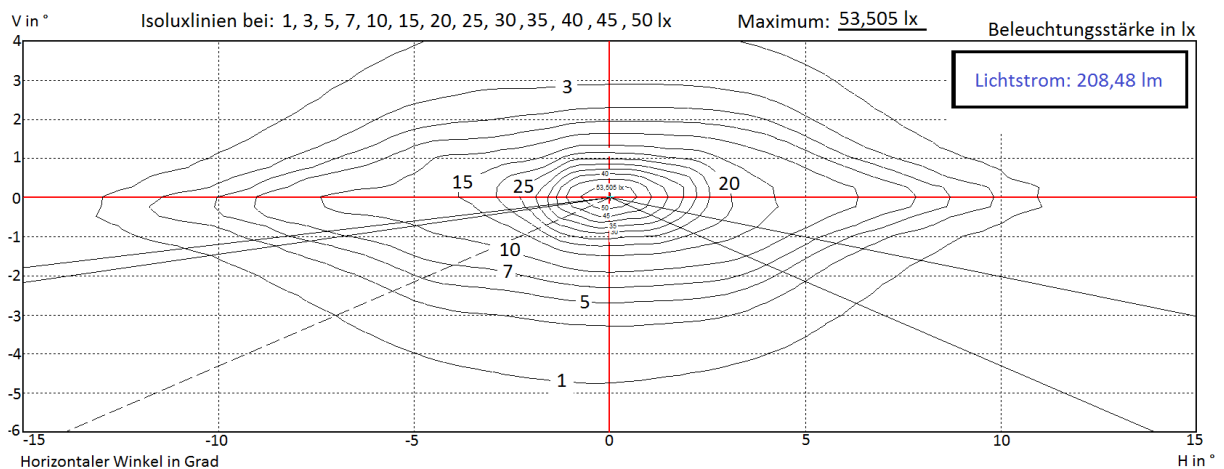


Abbildung 4.4: Lichtfluss $\Phi_e(\lambda)$ bei $I_E = 600 \text{ mA}$ und $\vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Abbildung 4.5: Lichtausbeute $\eta_e(I_E)$ in Abhängigkeit vom Diodenstrom bei $\vartheta_{Case}=35^\circ\text{C}$

4.3.3 Beleuchtungsstärke E

Die Vermessung des Scheinwerfermoduls im Goniophotometer ergibt die in Abbildung 4.6 dargestellte winkelabhängige Beleuchtungsstärke. Die experimentell ermittelte maximale Beleuchtungsstärke beträgt $E_{MAX} = 53,505 \text{ lx}$. Der erfasste Lichtstrom von $\Phi_V = 208,48 \text{ lm}$ ist deutlich kleiner als der in der Ulbricht'schen Kugel erfasste Wert von $\Phi_V(I_E = 0,6 \text{ A}) = 241,0 \text{ lm}$. Dies ist vor allem auf zwei Ursachen zurückzuführen. Zum Einen wird nicht der gesamte Lichtstrom vom Goniophotometer erfasst. Da die 1-Isoluxlinie das Diagramm bei $V = (-5^\circ, 4^\circ)$ und $V = (4^\circ, 4^\circ)$ schneidet, ist ersichtlich, dass nicht der gesamte beleuchtete Bereich auf der Testwand erfasst wird. Weiterhin entsteht durch Licht, das zwischen dem Rand der Scheinwerferlinse und dem Reflektor hindurch

Abbildung 4.6: Beleuchtungsstärke bei $I_E = 0,6 \text{ A}$ auf einem 25 m entfernten Testbildschirm.

gelangt, ein ringförmiger Lichtkegel, der aufgrund des großen Winkels gegenüber der optischen Achse ebenfalls nicht erfasst wird. Zum Anderen liegt die Temperatur an der Laserdiode während des Messvorganges mit $\vartheta_{Case} \approx 35 \text{ }^\circ\text{C}$ leicht über der in Abschnitt 4.3.2 eingestellten Temperatur. So ist auch ein geringerer Wirkungsgrad und folglich ein geringerer Lichtstrom zu erwarten.

Aus der Verteilung der Isoluxlinien lässt sich schließen, dass nahezu das gesamte emittierte Licht auf eine kleine Fläche fokussiert und so eine hohe Abbildungsschärfe erzielt wird. Die maximale Beleuchtungsstärke und die Abbildungsschärfe sind bei der vorliegenden Konfiguration (siehe Abschnitt 5.1) mit einem in [Lach14] vermessenen handelsüblichen Zusatzfernlicht vergleichbar.

4.3.4 Farbortbestimmung im CIE-Normfarbsystem

Das CIE-Normfarbsystem ist in der DIN 5033-3 festgelegt und wird im Rahmen dieser Arbeit zur Farbdarstellung verwendet. In diesem Abschnitt wird der Farbort des Scheinwerfermoduls bestimmt und mit der ECE-Richtlinie 113 verglichen.

Zur Berechnung des Farbortes werden die mit der Ulbricht'schen Kugel erfassten Ergebnisse für $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ herangezogen. Im ersten Berechnungsschritt werden nach [Naum14] die Gleichungen 4.4, 4.5 und 4.6 verwendet.

$$X = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e\lambda} \cdot \bar{x} \cdot d\lambda \quad (4.4)$$

$$Y = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e\lambda} \cdot \bar{y} \cdot d\lambda \quad (4.5)$$

$$Z = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e\lambda} \cdot \bar{z} \cdot d\lambda \quad (4.6)$$

Gemäß [DIN5031] sind die Werte der im Anhang in Abbildung A.2 dargestellten Tristimuluskurven in einer Wellenlängenauflösung von fünf Nanometern angegeben. Da die experimentell ermittelten Ergebnisse mit einer Auflösung von einem Nanometer erfasst vorliegen, werden die Literaturwerte für \bar{x} , \bar{y} und \bar{z} linear interpoliert. Die Koordinaten

des Farbpunktes in der CIE-1931-XYZ-Normfarbtafel werden anschließend nach [Naum14] mit den Gleichungen 4.7, 4.8 und 4.9 berechnet und in der Tabelle 4.1 zusammengefasst.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (4.7)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (4.8)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (4.9)$$

Eingangsstrom I in A:	CIE _x :	CIE _y :	CIE _z :
0,15	0,252	0,222	0,526
0,20	0,268	0,235	0,497
0,25	0,269	0,235	0,496
0,30	0,268	0,234	0,498
0,40	0,267	0,233	0,500
0,50	0,266	0,232	0,502
0,60	0,267	0,233	0,500
0,70	0,264	0,230	0,506
0,80	0,264	0,230	0,506
0,90	0,262	0,228	0,510
1,00	0,262	0,229	0,509

Tabelle 4.1: In der Ulbricht'schen Kugel gemessene Farborte bei $I_E=0,15\dots1A$ und $\vartheta_{Case}=35\text{ }^\circ\text{C}$.

Der Messpunkt bei $I_E = 0,15\text{ A}$ findet im Folgenden keine Beachtung mehr, da bei diesem Wert die Laserschwelle noch nicht erreicht wird. Die vom Eingangsstrom abhängigen Farborte liegen bei $\vartheta_{Case} = 35\text{ }^\circ\text{C}$ in einem Bereich von $0,262 \leq x \leq 0,268$ und $0,228 \leq y \leq 0,235$. Der Farbort tendiert bei steigendem Eingangsstrom $I_E = 0,2 - 1,0\text{ A}$ zu niedrigeren x-,y-Werten. Die auftretende Differenz beträgt $\Delta x = -0,0070$; $\Delta y = -0,0071$.

Daraus kann geschlossen werden, dass die Lumineszenzschicht einen relativ konstanten Anteil des Laserlichtes transformiert. Jedoch liegt keiner der gemessenen Werte im ECE-Weißbereich, der in der ECE-Regelung 113 [ECE113] festgelegt ist. Nach dieser Regelung sind die unteren Grenzwerte mit $x \geq 0,31$ und $y \geq 0,285$ festgelegt.

Die Messung erfasst zu dem emittierten weißen Licht auch das nicht transformierte blaue Licht der Laserdioden, das an der Lumineszenzschicht bzw. dem Trägermaterial reflektiert wird. Diese partielle Reflektion des Laserlichtes ist erwünscht, da dieser Blauanteil zur

weißen Farbgebung des Scheinwerferlichtes beiträgt.

Es tritt blaues, in den Raum gestreutes Laserlicht auf (siehe Abbildung 4.10 a), das nicht auf die Lumineszenzschicht trifft. In der Ulbricht'schen Kugel führt die Erfassung dieses Streulichtes zu einer Verschiebung der gemessenen Farbwerte. Daher wird zur Eliminierung diesen Anteils eine zweite Messung mit dem Goniophotometer im Betriebspunkt $I_E = 0,6 A$ vorgenommen.

Der Vergleich der mit dem in der Ulbricht'schen Kugel bestimmte Farbort ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Es tritt eine Streuung der x, y-Werte auf. Die Farborte liegen ausschließ-

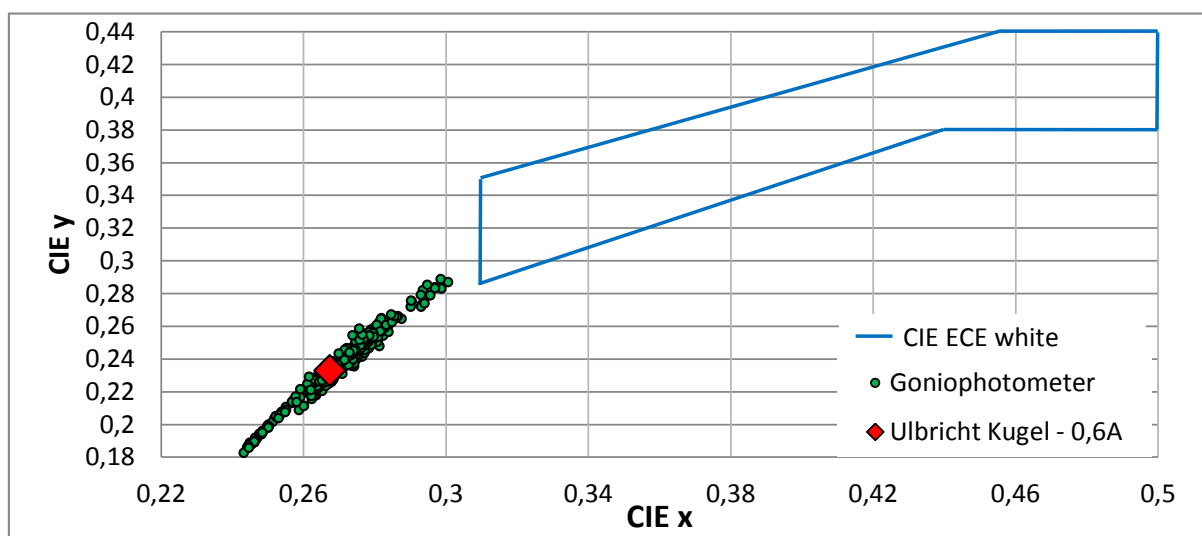


Abbildung 4.7: Farbort in Ulbricht'sche Kugel und Goniophotometer im Vergleich bei $I_E = 0,6 A$ und $\vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

lich außerhalb des in der [ECE113] definierten Weißbereiches. Diese sind auf einer Linie in einem Bereich von $0,243 \leq x \leq 0,301$ und $0,183 \leq y \leq 0,289$. Weiterhin ist aufgrund der großen Streuung der Farborte eine differenzierte Betrachtung der örtlichen Verteilung der Farborte auf dem ECE-Testbildschirm notwendig.

Bei einer Sichtprüfung des Scheinwerferlichtes ist zu erkennen, dass eine Winkelabhängigkeit der Farborte vorliegt. Für eine Bewertung werden die Farbtemperaturen $T_{CCT}(H, V)$ in Abbildung 4.8 in Abhängigkeit vom Winkel dargestellt. Je dunkler die Einfärbung eines Bereiches, desto niedriger ist die gemessene Farbtemperatur. Die Messpunkte niedriger Farbtemperaturen liegen in der Nähe der maximalen Beleuchtungsstärke, während die höheren Werte am Rand auftreten. Die niedrigste Farbtemperatur wird bei $(H; V) = (-1; 0)$ und $(H; V) = (1; 0)$ mit $T_{CCT} \leq 8400 K$ gemessen. Besonders auffällig ist der sehr dunkle Messbereich beim Punkt $(H; V) = (-7; 0)$, der von einem Feld

mit sehr hoher Farbtemperatur umgeben ist. Dieser Bereich weist sehr niedrige x , y -Werte im CIE-Normfarbsystem auf, sodass dieser in der Skala der Farbtemperaturen nicht mehr erfasst wird. Beim Punkt $(H; V) = (6; 0)$ wird ebenfalls ein Wert von $T_{CCT} \geq 20000 \text{ K}$ gemessen. Die symmetrische Verteilung der Extrema kann in Abbildung 4.9 anhand der Bauart des Scheinwerfers erläutert werden.

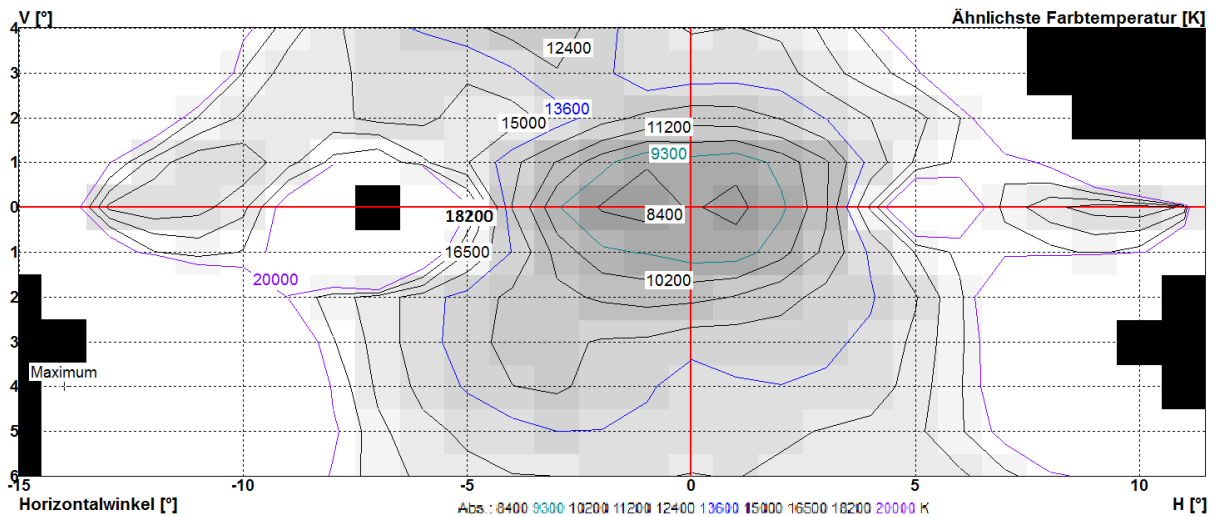


Abbildung 4.8: Verteilung der Farbtemperaturen bei $I_E = 0,6 \text{ A}$.

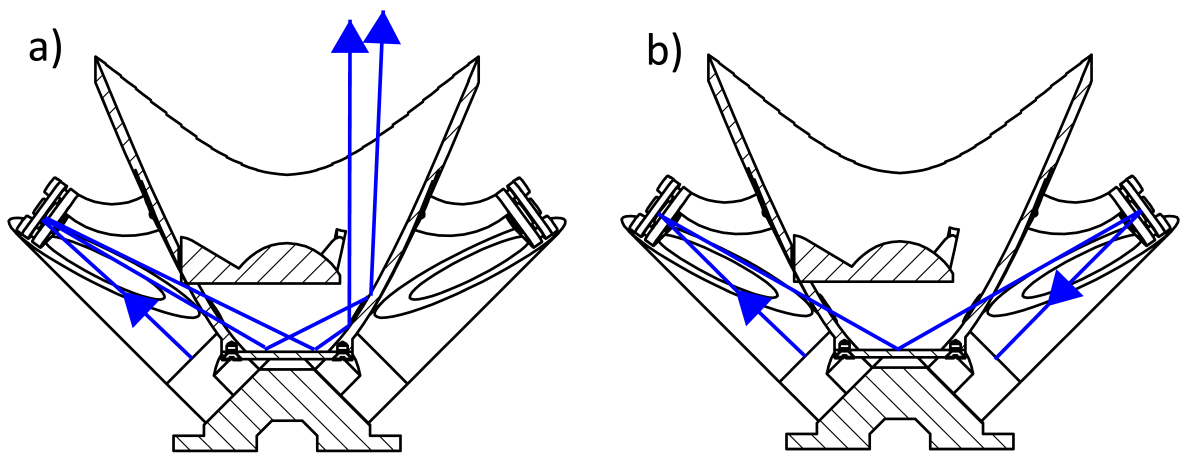


Abbildung 4.9: a) Strahlengang der zu Farbtemperaturextrema führt. - b) Strahlengang der zur thermischen Schädigung des Diode führen kann.

Ein Teil des Laserlichtes wird wie in Abbildung 4.9 a) dargestellt an der Lumineszenzschicht und am Reflektor reflektiert. Auf diesem Pfad hat das Licht eine Wellenlänge von $\lambda = 450 \text{ nm}$ und ist die Ursache für diese extrem hohen Farbtemperaturen. Die

Abbildung 4.10 b) zeigt den Blick in den Reflektor während des Betriebs. Hier ist eine Reflektion entlang der Bohrungen deutlich zu erkennen. Zur Verminderung dieser Reflektionen sind die Ränder der Bohrungen dunkel eingefärbt. Dies soll die Ausprägungen der Farbtemperaturextrema, die aus der Abbildung 4.8 hervorgehen, dämpfen. Ein weiterer Teil der Laserstrahlung wird ebenfalls reflektiert und erreicht, wie in Abbildung 4.9 b) dargestellt, aufgrund des symmetrischen Reflektoraufbaus die gegenüberliegende Laserdiode. Dort erzeugt diese einen zusätzlichen thermischen Wärmeeintrag. Die Quantität des Wärmeeintrags wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher bestimmt. Zudem ist außerhalb des Messbereiches blaues Streulicht zu sehen, das wie in Abbildung 4.10 a) zu sehen, seitlich austritt. Auch tritt durch die Scheinwerferlinse bedingt eine chromatische Aberration auf, die hier nicht näher betrachtet wird.

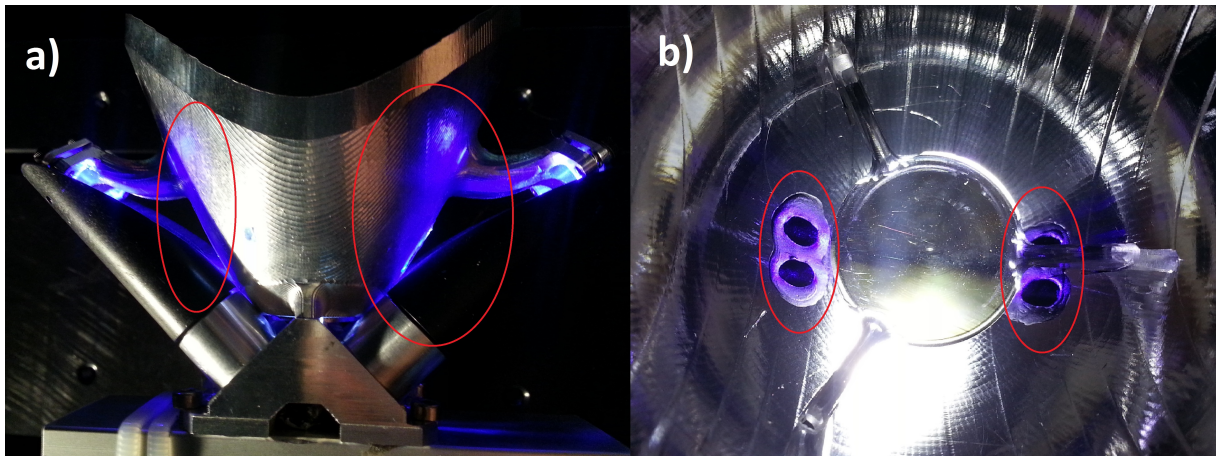


Abbildung 4.10: a) Reflektionen an der Außenfläche des Reflektors. - b) Reflektionen an den Bohrungen (siehe Abb. 4.9 a).

5 Bestimmung der Leistungsparameter der Einzelkomponenten

Nach der Aufnahme der Leistungsparameter des vollständig montierten Scheinwerfermoduls wird nun zur Analyse der Optimierungspotentiale eine Betrachtung der Einzelkomponenten vorgenommen. Es erfolgt eine Einteilung in folgende verlustbehaftete Bereiche:

1. Die Laserdioden
2. Die Kollimationslinsen
3. Die Umlenkspiegel
4. Die Scheinwerferlinse
5. Die Lumineszenzschicht
6. Die Streulichtverluste
7. Sonstige Leistungsverluste

Anhand dieser Einteilung können nun die in Abbildung 5.1 dargestellten Wirkungsgrade sowie der *Streulichtverlust*, d. h. die nicht bauteilbezogene Verlustleistung vor Auftreffen des Laserlichtes auf die Lumineszenzschicht, untersucht werden. Weiterhin findet eine Quantifizierung der *sonstigen Verluste* statt. Diese treten nach Auftreffen des Laserlichtes auf die Frequenzkonverktionsschicht im Reflektor auf und sind keiner bestimmten Komponente zugeordnet.

Weiterhin wird die von den Dioden aufgenommene elektrische Leistung, die optische Leistung der Laser nach der Kollimation, die auf die Lumineszenzschicht auftreffende Laserleistung, der vom Scheinwerfermodul ausgehende Strahlungsfluss sowie der erzeugte Lichtstrom des Systems direkt am eingeschalteten Modul im stationären Zustand vermessen. Basierend auf diesen Messpunkten können, mithilfe der separat zu analysierenden Komponenten, die auftretenden Leistungsverluste rechnerisch bestimmt werden.

Die Messungen werden ausschließlich bei einer Diodengehäusetemperatur von $\vartheta_{Case}=35\text{ °C}$ vorgenommen. Die zur Temperaturregelung benötigte Leistung findet, sofern nicht explizit angegeben, keine Berücksichtigung.

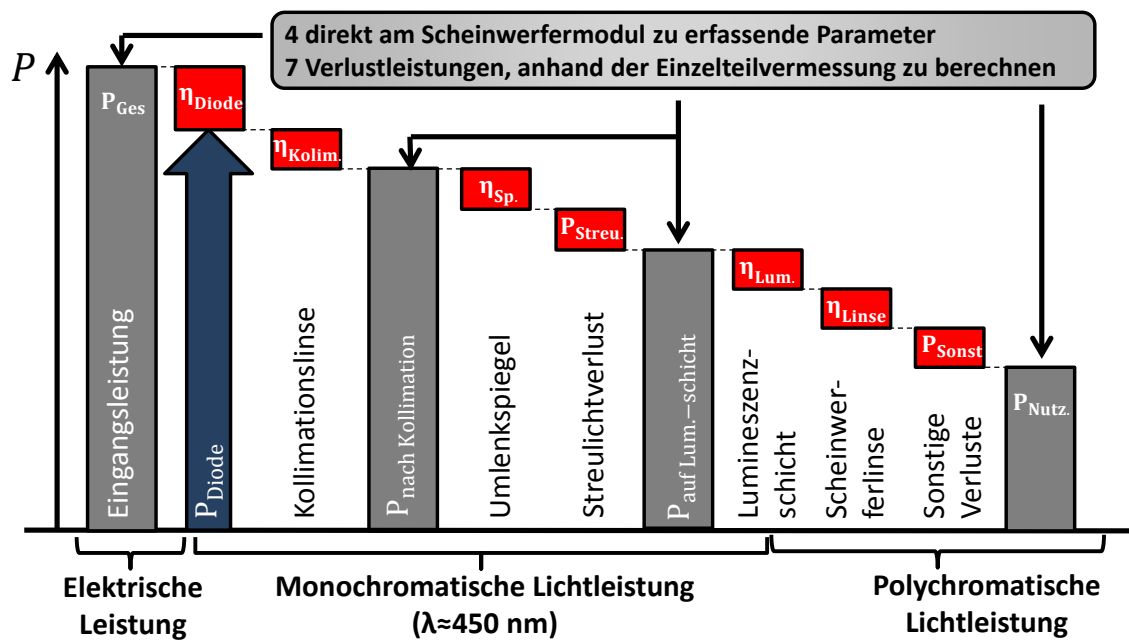


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Leistungsverluste im Scheinwerfermodul.

5.1 Die Laserdioden

Der Wirkungsgrad der Laserdioden ist maßgeblich für den Gesamtwirkungsgrad des Scheinwerfermoduls. Daher erfolgt in diesem Abschnitt eine Betrachtung der Dioden. Diese werden zur Unterscheidung und um Verwechslungen zu vermeiden, wie in Abbildung 5.3 dargestellt, mit $D_1 - D_4$ bezeichnet.

Weiterhin wird eine Referenzdiode D_{Ref} und zum Vergleich eine neuwertige Diode D_{Neu} verwendet. Alle verwendeten Laserdioden sind vom selben Typ und tragen die Bezeichnung PL TB450B.

Die Dioden $D_1 - D_4$ werden vor Durchführung dieser Versuchsreihen im vorliegenden Scheinwerfermodul montiert und bereits in einem Fahrzeug eingesetzt. Die Referenzdiode

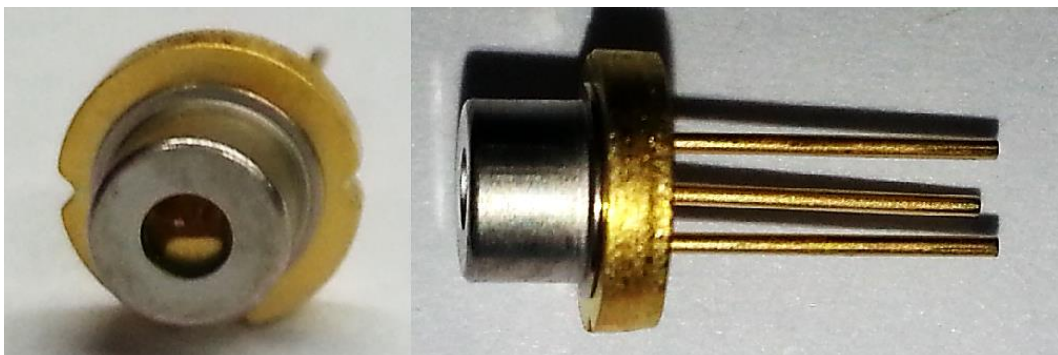


Abbildung 5.2: Aus dem Scheinwerfermodul entnommene Laserdiode PL TB450B.

D_{Ref} wurde zuvor im Labor über einen nicht bekannten Zeitraum genutzt. Der Grad einer potentiellen thermischen und alterungsbedingten Schädigung dieser Dioden ist unbekannt. Daher werden diese Dioden in dieser Arbeit als *gebraucht* bezeichnet und mit einer zuvor nicht genutzten, neuen Diode verglichen.

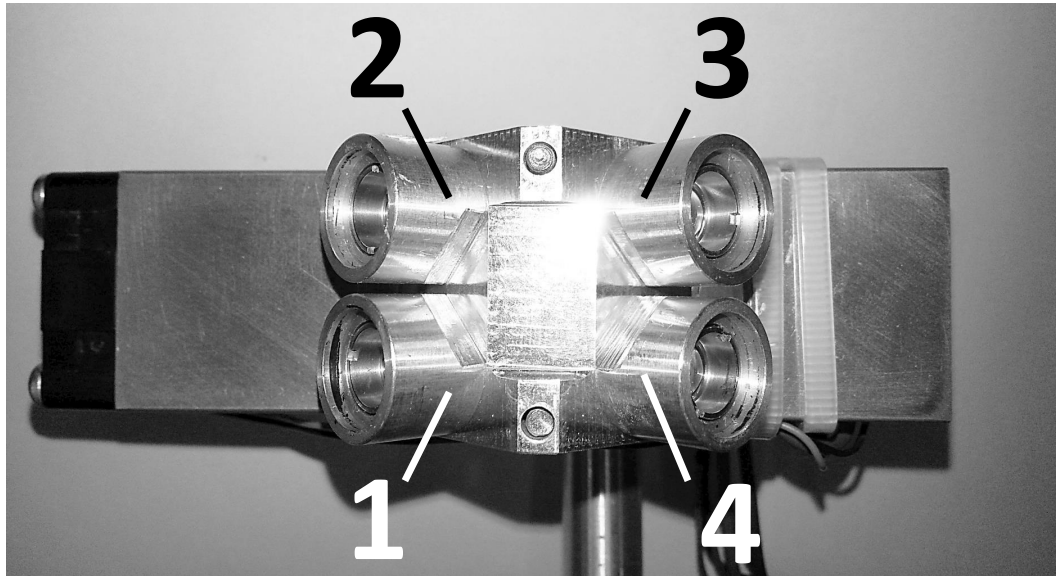


Abbildung 5.3: Zugeteilte Nummern der Laserdioden im Scheinwerfermodul.

Wirkungsgrad der Laserdioden

Der radiometrische Wirkungsgrad der Laserdioden kann mit der Gleichung 2.1 berechnet werden. Die Erfassung der benötigten Parameter erfolgt über den in Abbildung 5.4 dargestellten Versuchsaufbau. Hierbei ist es möglich die Eingangsleistung P_E am Labornetzteil abzulesen und den Eingangsstrom $I_E = 0,6$ A einzustellen, während der Strahlungsfluss Φ_e vom Laserleistungsmessgerät erfasst und an die Auswertesoftware übermittelt wird. Die Messung wird mit einer Diodengehäusetemperatur von $\vartheta_{Case} = 35$ °C mit den Dioden D_1 , D_2 , D_3 , D_4 und D_{Ref} durchgeführt.

Da die Justierung der Messvorrichtung und des Messobjektes einen großen Einfluss auf das Messergebnis hat, wird bei jeder Messung nach dem im Abschnitt 2.5.4 (Laserleistungsmessgerät) beschriebenen Ablauf verfahren. Da die Laserdiode stark divergentes Licht emittiert, ist für die Erfassung der Ausgangsleistung der Messabstand $L = 0$ cm erforderlich. Hierbei kann nicht die gesamte Lichtleistung der Laserdiode erfasst werden, da die Sensorfläche des Laserleistungsmessgerätes keine ausreichend große Fläche bietet. Zur

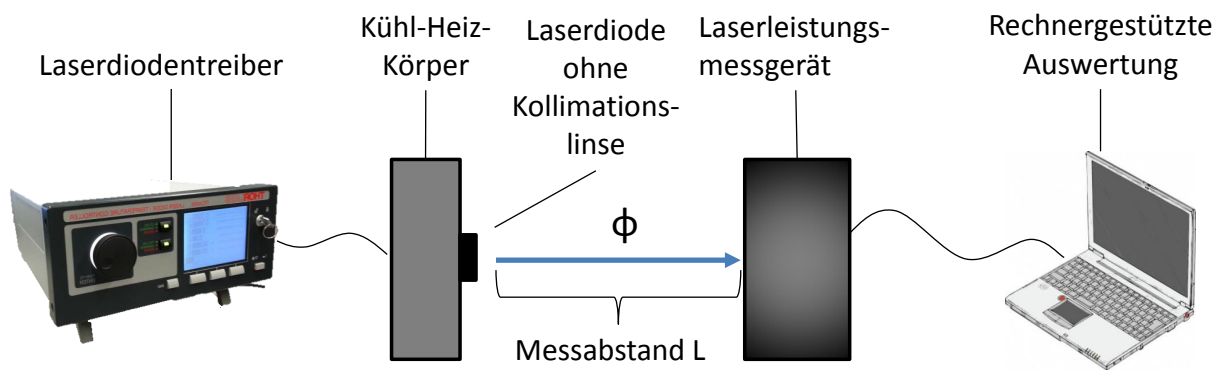
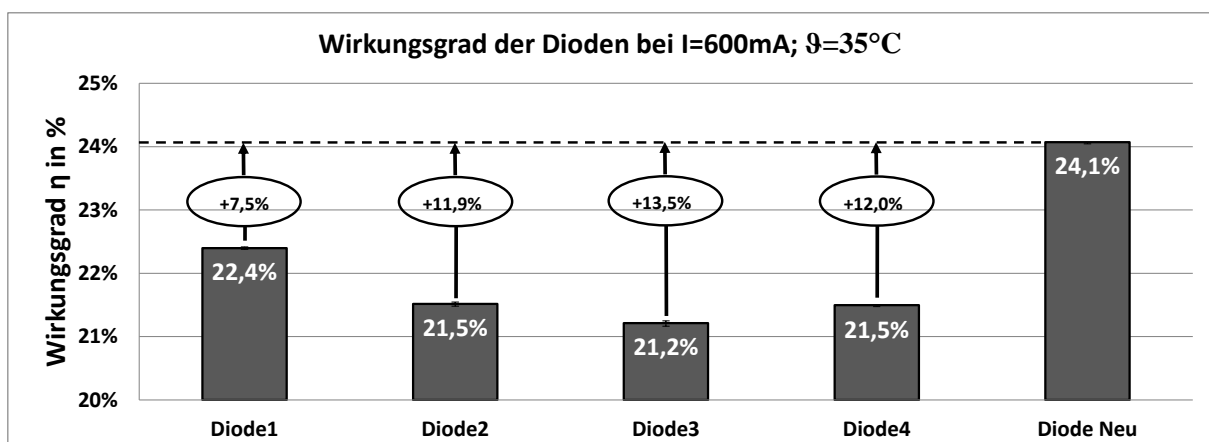


Abbildung 5.4: Versuchsaufbau zur Erfassung der Laserleistung.

Abschätzung der Genauigkeit dieser Messung wird der erfasste Wert der neuen Diode mit dem aus dem Datenblatt (siehe Anhang) verglichen. Dieser wird mit 650 mW angegeben und liegt damit 28,8 mW bzw. 4,4 % über dem gemessenen Wert. Da diese relative Abweichung bei jeder Messung ohne Kollimationslinse auftritt, wird im Rahmen dieser Arbeit von einer Vergleichbarkeit der Ergebnisse und von einem hinreichend genauen Messergebnis ausgegangen. Die resultierenden Wirkungsgrade werden im folgenden Diagramm in Abb. 5.5 veranschaulicht. Keine der gebrauchten Dioden erreicht erwartungsgemäß den Wirkungsgrad einer neuen Diode. Es wird eine Strahlungsausbeute von $\eta_e=21,2 - 22,4$ % erreicht. Zusammengefasst beträgt der Wirkungsgrad der vier Dioden 21,7 %. Die neue Diode hat hingegen eine größere Strahlungsausbeute von 24,1 %.

	Diode1	Diode2	Diode3	Diode4	Σ	Diode Neu
Eingangsleistung in mW	2598	2581	2625	2630	10435	2581
Optische Ausgangsleistung in mW	582	555	557	565	2259	621
η -Diode	22,4%	21,5%	21,2%	21,5%	21,7%	24,1%

Tabelle 5.1: Zusammenfassung der Diodenparamteter.

Abbildung 5.5: Wirkungsgrade der eingesetzten Laserdioden $D_1 - D_4$ im Vergleich zum Wirkungsgrad einer neuen Diode D_{Neu} .

Es liegt eine thermische bzw. alterungsbedingte Schädigung der gebrauchten Dioden vor. Das Verbesserungspotential, das durch einen Einsatz neuer Laserdioden abgerufen werden kann, liegt demnach bei $D_1 - D_4$ in einem Bereich von 7,5 - 13,5 %. Durch einen Austausch der gebrauchten Laserdioden durch neuwertige ist eine Leistungssteigerung der gesamten Laserleistung von 2259 mW um 225 mW auf 2485 mW, bei Verringerung der aufgenommenen elektrischen Leistung von 10,44 W auf 10,32 W, zu erwarten. Dies entspricht einer Steigerung der optischen Leistung von 10,0 % bei einer 1,1 % niedrigeren Leistungsaufnahme.

Die Lichtausbeute der Laserdioden beträgt bei einer Wellenlänge von $\lambda=450$ nm $\eta_{V,Diode}=5,7 \frac{lm}{W}$. Der erzeugte Lichtstrom durch die vier gebrauchten Laserdioden beträgt bei $\vartheta_{Case}=35$ °C $\Phi_{V,Dioden}(0,6 A)=59,6$ lm.

5.2 Reflektionsgrad der verwendeten Spiegel

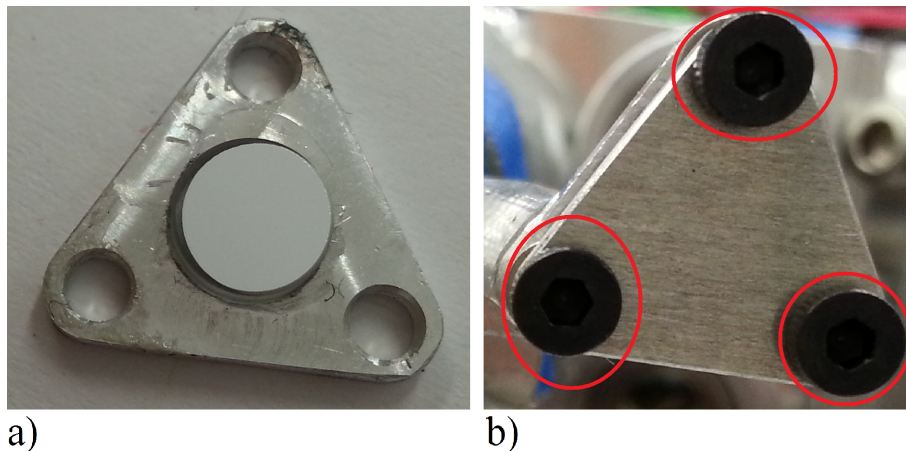


Abbildung 5.6: a) Auf Halter befestigter Umlenkspiegel. - b) Umlenkspiegel im eingebauten Zustand unter Verwendung der markierten Halterungs- und Justageschrauben.

Im Folgenden werden die eingesetzten Spiegel, ihrem Einsatzbereich entsprechend, auf ihren Reflektionsgrad bei kollimierten, polarisierten Laserlicht bei einer Wellenlänge von $\lambda \approx 450$ nm bei einem Einstrahlwinkel $\alpha = 18^\circ$ untersucht. Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 5.7 beschrieben.

Jeder der vier eingesetzten Spiegel reflektiert das Licht von einer der vier im Abschnitt 5.1 (Die Laserdioden) untersuchten Laserdioden. Zur Unterscheidung werden die Spiegel nach

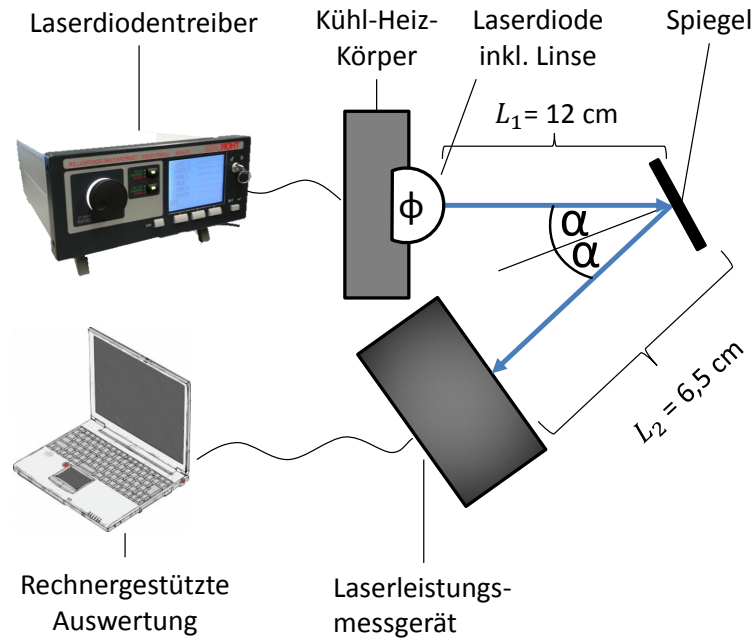


Abbildung 5.7: Versuchsaufbau zur Bestimmung der vom Spiegel reflektierten Strahlungsenergie bei kollimiertem Laserlicht der Wellenlänge $\lambda = 450 \text{ nm}$ ($\alpha = 18^\circ$).

den Laserdioden nummeriert, deren Licht sie umlenken. Der Winkel α wird entsprechend dem im Scheinwerfermodul angewendeten gewählt. Die Summe der Strecken L_1 und L_2 ergibt sich aus dem eingestellten Winkel und den räumlichen Abmessungen der verwendeten Labortechnik. Hier wird die Referenzdiode D_{Ref} verwendet und für Bestimmung ihrer Ausgangsleistung separat vermessen.

Die Messung wird nach dem gleichen Verfahren wie bei der Erfassung der Laserleistung im Abschnitt 5.1 (Die Laserdioden) durchgeführt. Bei dem Versuch ist zu beachten, dass nicht bekannt ist, ob die verwendeten Spiegel einen von der Polarisierung abhängigen Reflektionsgrad aufweisen. Daher wird hier bei jedem Spiegel nach drei von fünf Messungen die Diode um 90° um die eigene Achse gedreht. So ist die Beobachtung oder der Ausschluss einer möglichen Polarisationsabhängigkeit möglich.

Da bei diesem Versuchsaufbau die Justierung der einzelnen Komponenten einen sehr starken Einfluss auf das Ergebnis hat, werden für jeden Spiegel zwei Messreihen nach dem genannten Schema aufgenommen. Diese Reihen sind nach den dazugehörigen Gehäuseteperaturen ($\vartheta_{Case} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ und $\vartheta_{Case} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$) der Referenzdiode, die während des Messvorganges eingestellt werden, benannt. Die Veränderung der Gehäusetemperatur bewirkt nach dem im Anhang B zitierten Datenblatt eine geringfügig kleinere Wellenlänge ($\Delta\lambda \approx -1 \text{ nm}$) bei der von D_{Ref} emittierten Laserstrahlung.

Zur Angabe des relativen Reflektionsgrades ist eine Bestimmung der verlustfreien Reflexion erforderlich. Für diese wird die optische Ausgangsleistung der Referenzdiode wie in Abbildung 5.8 beschrieben in einem Abstand von $L_1 + L_2 = L = 18,5$ cm bestimmt. Die Kollimation, die Gehäusetemperatur und die Eingangsleistung sind hierbei identisch mit den Parametern, die bei der in Abbildung 5.7 beschriebenen Messung mit D_{Ref} verwendet werden.

Für die optische Ausgangsleistung von D_{Ref} liegen zwei Werte vor, da zwischen der Vermessung von den Spiegeln 1 und 2 ein neues Setup des Versuchsaufbaus genutzt wird.

So werden bei den Messungen mit Spiegel 1 und Spiegel 2 $P(\vartheta_{Case} = 30\text{ °C}) = 563,2$ mW und $P(\vartheta_{Case} = 35\text{ °C}) = 541,4$ mW und bei den Versuchen mit Spiegel 3 und Spiegel 4 $P(\vartheta_{Case} = 30\text{ °C}) = 606,2$ mW und $P(\vartheta_{Case} = 35\text{ °C}) = 586,0$ mW als optische Diodenausgangsleistung bestimmt.

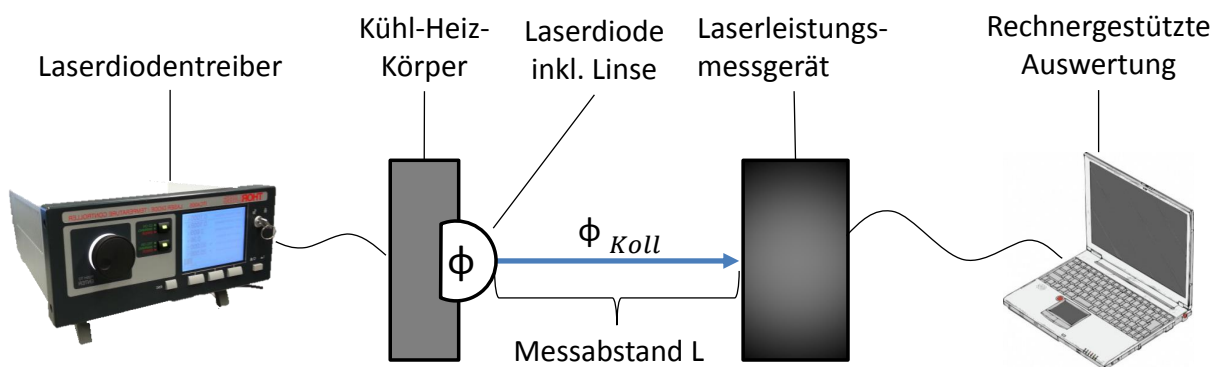


Abbildung 5.8: Versuchsaufbau zur Erfassung der optischen Laserleistung der Referenzdiode.

In Tabelle 5.2 sind als Beispiel die Strahlungsleistungen nach Reflexion durch die jeweiligen Spiegel für die Messreihe mit einer Gehäusetemperatur von $\vartheta = 35\text{ °C}$ aufgelistet. Die Versuche 4 und 5 werden mit der gedrehten Laserdiode durchgeführt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Polarisation des Laserlichtes keinen messbaren Einfluss auf den Reflektionsgrad hat.

Die resultierenden Wirkungsgrade werden im Diagramm der Abbildung 5.9 zusammengefasst. Zur Veranschaulichung sollen hier die Messreihen $\vartheta_{Case} = 30\text{ °C}$ und $\vartheta_{Case} = 35\text{ °C}$ separat dargestellt, sowie der Mittelwert dieser Reihen betrachtet werden. Es treten, wie im Diagramm dargestellt, relativ große Abweichungen bei den einzelnen Messpunkten auf. Aus der separaten Betrachtung der beiden Messreihen geht hervor, dass der Mittelwert

Leistungsmessung nach Spiegelung - Messreihe $\vartheta=35^{\circ}\text{C}$
 alle Angaben in mW

P Referenzdiode	541,39	541,39	586,03	586,03
Versuch	Spiegel 1	Spiegel 2	Spiegel 3	Spiegel 4
1	512,99	520,69	541,74	553,94
2	512,52	521,73	541,98	552,83
3	515,03	518,46	543,36	552,93
	Drehung der Diode um 90°			
4	511,81	520,39	538,23	555,46
5	513,55	520,69	540,59	554,11
\emptyset	513,18	520,39	541,18	553,85

Tabelle 5.2: Strahlungsleistung nach Reflektion durch die Spiegel.

der Messpunkte trotz der relativ großen Abweichungen ein hinreichend genaues Ergebnis wiedergibt. Nach [Naum14] beträgt der spektrale Reflektionsgrad einer Spiegelschicht aus Silber bei einer Wellenlänge von $\lambda = 450 \text{ nm}$ und senkrechtem Lichteinfall $\varrho_{e,opt}=97,1 \%$. Erwartungsgemäß wird dieser ideale Wert nicht erreicht und wird daher als Richtwert für den idealen Spiegel herangezogen. So weisen der Spiegel 1 mit $\varrho_{e,Sp.1}=95,0 \%$ und der Spiegel 2 mit $\varrho_{e,Sp.2}=96,4 \%$ ein geringes Optimierungspotential auf. Ebenso ist der Spiegel 4 mit $\varrho_{e,Sp.3}=94,5 \%$ nah am Optimum nicht maßgeblich verbessert werden. Der Spiegel 3 weist mit $\varrho_{e,Sp.3}=92,4 \%$ den niedrigsten Reflektionsgrad auf.

Kumuliert erreichen die eingesetzten Umlenkspiegel einen Gesamtreflektionsgrad von $\varrho_{e,Ges}=94,6 \%$. Durch einen Austausch der vier Spiegel durch neuwertige eine Steigerung der reflektierten optischen Leistung um $2,7 \%$ zu erwarten.

Diese Angaben sind unter Berücksichtigung der Fehlerindikatoren zu betrachten, da das Licht nicht senkrecht auf den Spiegel trifft und zudem die Beschichtung der Spiegelflächen und daher das tatsächlich erreichbare Maximum unbekannt ist.

Die Hauptursache für einen verringerten Reflektionsgrad ist eine Verunreinigung der Spiegel durch Staubpartikel oder sonstiger Rückstände auf der Spiegeloberfläche. Daher ist eine Optimierung durch eine Reinigung oder durch einen Austausch der Spiegel zu erreichen.

Die Auswahl von silberbeschichteten Spiegeln sollte aufgrund der guten Reflektionseigenschaften, die Silber im Vergleich mit anderen handelsüblichen Materialien in diesem Wellenlängenbereich aufweist, beibehalten werden.

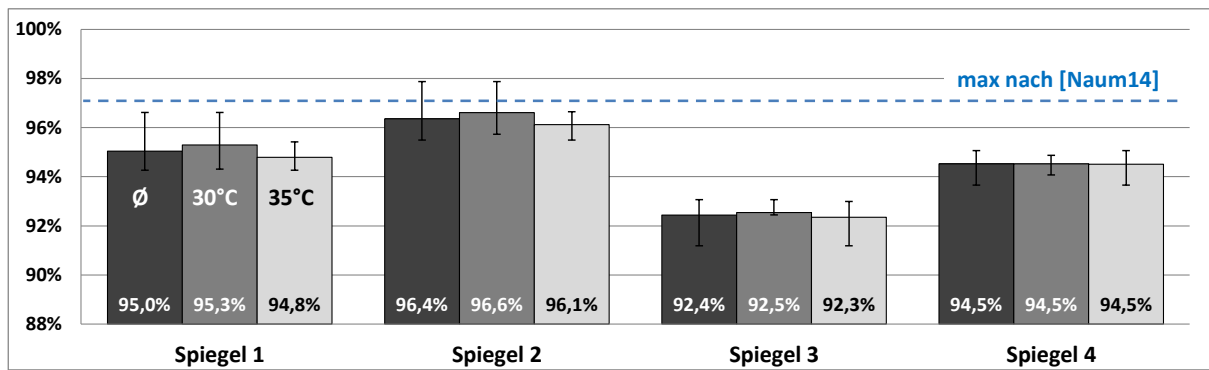


Abbildung 5.9: Reflektionsgrad der Spiegel 1 - 4 bei $\vartheta_{Case} = 30^\circ\text{C}$ und 35°C sowie dem Mittelwert der beiden Messreihen.

5.3 Transmissionsgrad der Kollimationslinsen

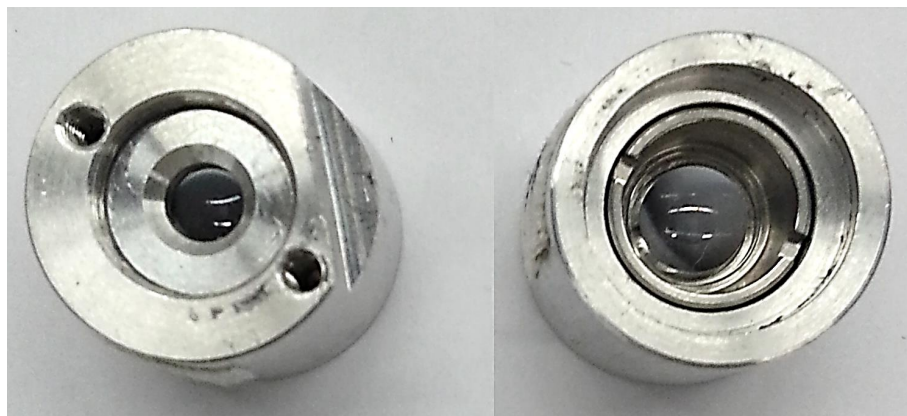


Abbildung 5.10: Im Scheinwerfermodul eingesetzte einstellbare Kollimationslinse.

Die vier Kollimationslinsen fokussieren das stark divergent emittierte Laserlicht der Dioden. Da dieser Vorgang verlustbehaftet ist, wird in diesem Abschnitt eine Quantifizierung der Transmissionsgrade vorgenommen. Hierfür ist eine Bestimmung der radiometrischen Größen vor und nach der Transmission notwendig. Für die erreichten Leistungen vor der Transmission werden die im Abschnitt 5.1 (Die Laserdioden) erfassten Ausgangswerte der Laserdioden aus Tabelle 5.1 herangezogen. Zur Messung der Leistungen nach der Kollimation findet ein Betrieb im Scheinwerfermodul bei demontiertem Reflektor statt. Die Nutzung von Blenden, die das Laserlicht von drei der vier Dioden absorbieren und vom Laserleistungsmessgerät abschirmen, ermöglicht eine Einzelmessung der optischen kollimierten Diodenleistung. Die Ergebnisse werden in der folgenden Tabelle 5.3 zusammengefasst. Mit diesen Daten kann die Gleichung 2.5 zur Bestimmung der in Abbildung 5.11 dargestellten Transmissionsgrade herangezogen werden.

Optische Leistung in mW	Diode1	Diode2	Diode3	Diode4	Σ
Ohne Kollimationslinse	581,88	555,33	556,82	565,40	2259,42
Mit Kollimationslinse	535,41	531,29	524,52	514,05	2105,27
Verlust	46,47	24,05	32,29	51,35	154,15

Tabelle 5.3: Leistungserfassung zum Transmissionsgrad der Kollimationslinsen bei $\vartheta_{Case}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

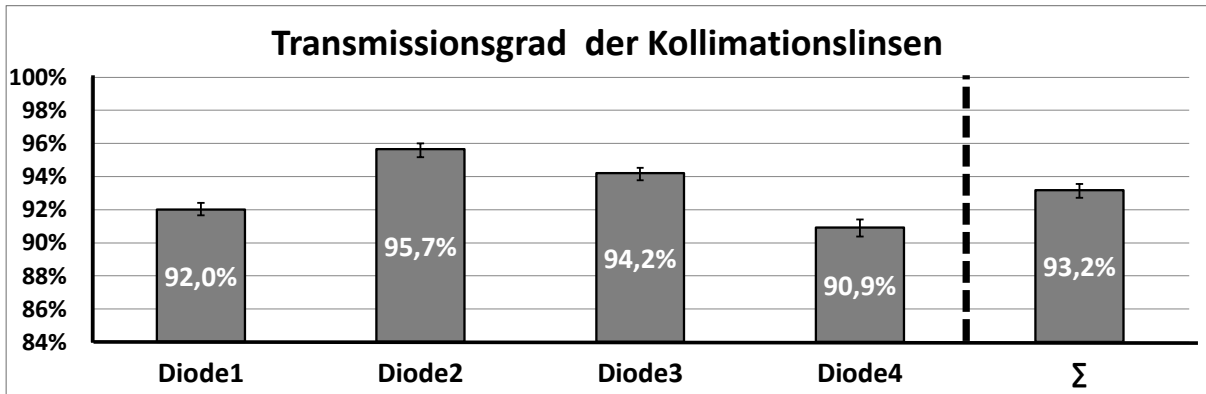


Abbildung 5.11: Transmissionsgrad der Kollimationslinsen.

Anhand des geringen Verlustes von weniger als 5 %, der durch die Kollimationslinse an D_2 bedingt ist, wird hier angenommen, dass die Linse prinzipiell geeignet ist. Auffällig ist der geringe Transmissionsgrad bei D_1 und D_4 . Bei einer Sichtprüfung wird festgestellt, dass die Oberfläche dieser Linsen Verunreinigungen aufweisen. Hierdurch wird vermutlich ein Teil der transmittierten Leistung absorbiert.

Aus der Kollimation der vier Linsen resultiert beim Betrieb des Scheinwerfermoduls bei einem Eingangsstrom von $I_E = 0,6\text{ A}$ und einer Diodengehäusetemperatur von $\vartheta_{Case} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ein Leistungsverlust von $\Delta P_{Kollimation} = 154\text{ mW}$. Dies entspricht einem zusammengefassten Transmissionsgrad von $\eta_{Kollimationslion} = 93,2\text{ }%$.

Da keine Daten für einen idealen Transmissionsgrad vorliegen wird als untere Abschätzung davon ausgegangen, dass die zu den Dioden 1,3 und 4 zugeordneten Kollimationslinsen einen Transmissionsgrad von 95,7 % erreichen können. Dies entspricht dem Transmissionsgrad der zu Diode 2 zugeordneten Linse. Basierend auf dieser Annahme kann durch eine Erneuerung der Linsen die optische Laserleistung nach der Kollimation von 2105,3 mW um 2,7 % auf 2162,3 mW gesteigert werden.

5.4 Die Scheinwerferlinse

Im Reflektor befindet sich zur Bündelung des Scheinwerferlichtes die plankonvexe, aus Polymethylmethacryl (PMMA) bestehende Scheinwerferlinse. Durch die Fokussierung soll eine hohe Abbildungsschärfe und Beleuchtungsichte gewährleistet werden.

Im eingeschalteten Zustand trifft das Laserlicht zunächst auf die Lumineszenzschicht und wird dort zum einen Teil in langwelligeres Licht konvergiert und zu einem anderen Teil von dieser Schicht reflektiert. Dieses Licht trifft nicht vollständig auf die Scheinwerferlinse und wird daher, wie in Abbildung 5.12 a) dargestellt, nur teilweise beeinflusst. Es wird eine

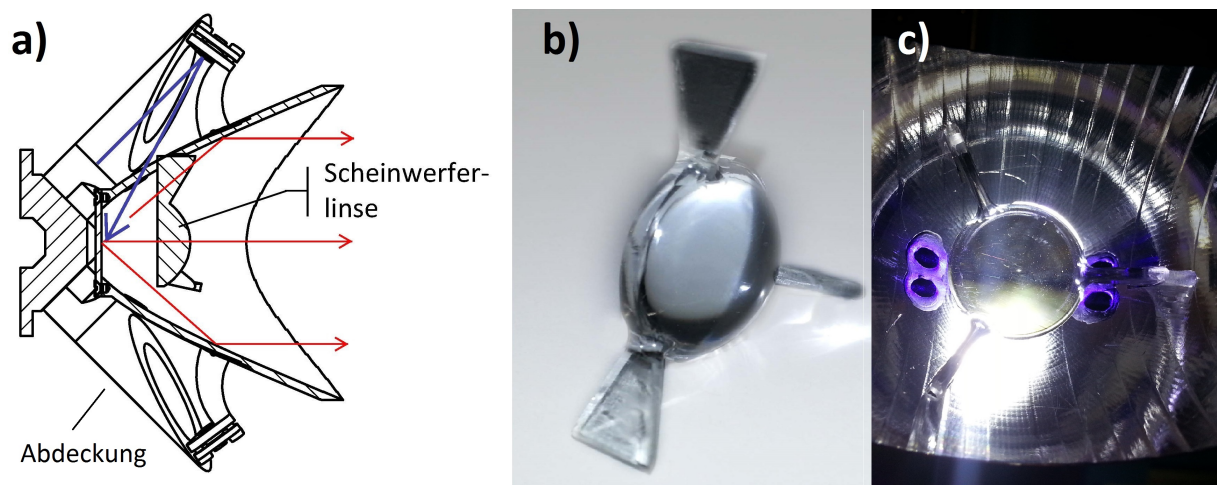


Abbildung 5.12: a) Position der Scheinwerferlinse im Reflektor (schematisch). - b) Scheinwerferlinse im ausgebauten Zustand. - c) Scheinwerferlinse im Reflektor.

Vermessung des vollständig montierten Scheinwerfermoduls in der Ulbricht'schen Kugel in der folgenden Reihenfolge vorgenommen.

1. Reflektor mit eingebauter Scheinwerferlinse.
2. Reflektor ohne Scheinwerferlinse.

Bei den beiden Versuchen liegt zum Messzeitpunkt eine stabile Gehäusetemperatur der Dioden von $\vartheta_{Case} = 35 \text{ °C}$ vor.

Die Ergebnisse der Messungen werden in der folgenden Abbildung 5.13 zusammengefasst.

Die aufgenommene elektrische Leistung beträgt bei allen Versuchen $P_E = 10,42 \text{ W}$. Bei Verwendung der schwarzen Abdeckungen wird ohne Linse ein Lichtstrom von $\Phi_{V,o.L.} = 238,1 \text{ lm}$ und mit Linse $\Phi_{V,m.L.} = 228,0 \text{ lm}$ gemessen. Hieraus kann nach Gleichung 2.1 eine Strahlungsausbeute von $\eta_{Vw,o.L.} = 22,86 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ und $\eta_{V,m.L.} = 21,89 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ berechnet

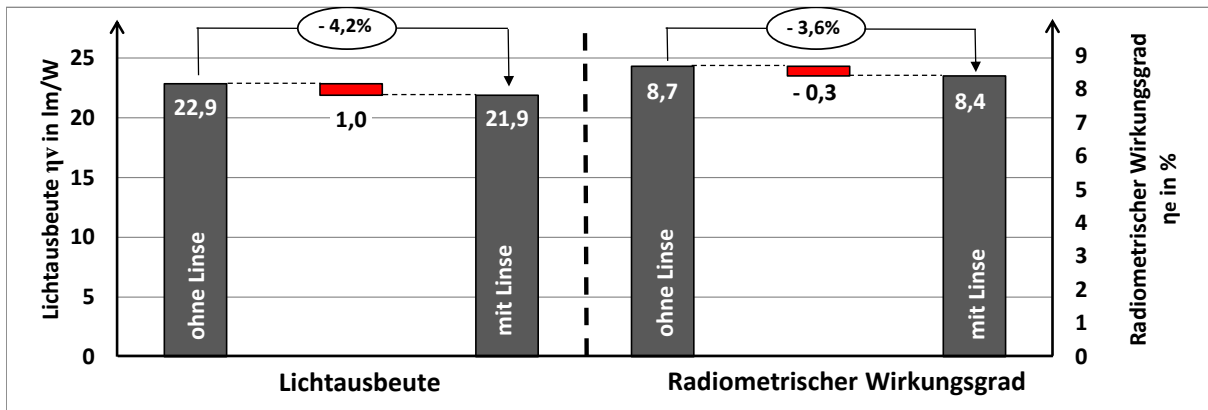


Abbildung 5.13: Durch Scheinwerferlinse verursachter Lichtverlust.

werden. Dies entspricht einer geringeren Lichtausbeute von $\Delta\eta_V = 0,97 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$. Demnach führt hier der Einsatz der Scheinwerferlinse zu einem Verlust von 4,2 %.

Die in der Ulbricht'schen Kugel erfassten Farbwerte werden in Abbildung 5.34 im CIE-Normfarbsystem dargestellt. Es werden die CIE-x, CIE-y Werte mit $CIE - xy_{o.L.}(x/y) = (0,255/0,207)$ und $CIE - xy_{m.L.}(x/y) = (0,256/0,208)$ gemessen. Der Einbau der Linse hat keinen messbaren Einfluss auf den Farbwert. Die gemessene Abweichung liegt innerhalb der Toleranz der Messtechnik. So kann davon ausgegangen werden, dass die Linse 4-5 % des gesamten Lichtstromes absorbiert.

5.5 Eigenschaften der Lumineszenzschicht

In diesem Abschnitt findet eine nähere Betrachtung der Eigenschaften der Lumineszenzschicht statt.

Ziel der folgenden Versuche ist es Ansätze für die Steigerung der Effizienz beim Einsatz dieses Modulelementes zu erarbeiten. Hierbei wird u. a. untersucht wie viel Laserleistung die reflektive Konversationsschicht erreicht, wie hoch die thermischen Verluste dieser Schicht sind, und welche Farbwerte bei Anregung durch das Laserlicht ($\lambda = 450 \text{ nm}$) emittiert werden. Zusätzlich soll der Einfluss des Einstrahlwinkels und der Fokussierung, mit dem der Laserstrahl auf die Lumineszenzschicht trifft, analysiert werden.

Bei einer Sichtprüfung sind thermische und mechanische Schäden an der Beschichtung zu erkennen. Diese Beschädigungen können die Effektivität der Lumineszenzschicht beeinträchtigen. Da im Rahmen dieser Arbeit kein Vergleich mit einer neuwertigen Schicht

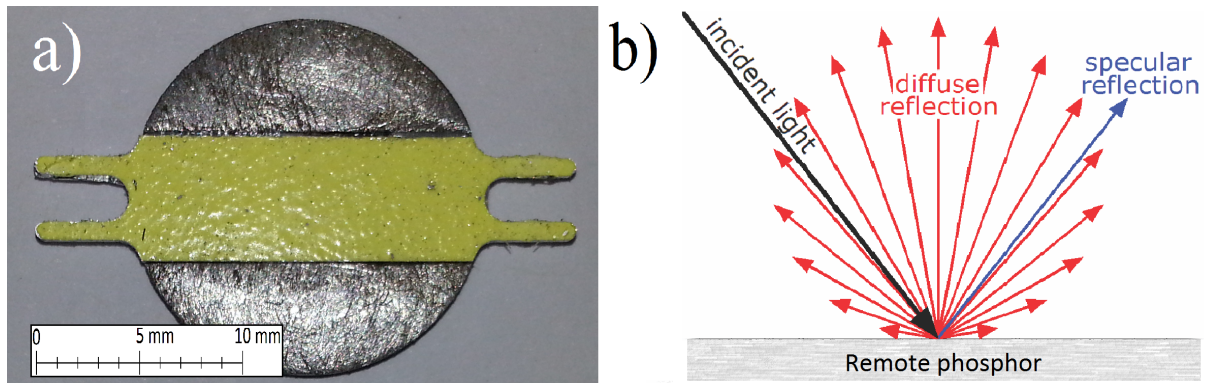


Abbildung 5.14: a) Im Scheinwerfermodul eingesetzte Lumineszenzschicht auf Trägerplatte. - b) Darstellung der partiellen diffusen und spiegelnden Reflexion des auftreffenden Laserlichtes an der Lumineszenzschicht nach [Inte14].

möglich ist, wird eine Quantifizierung dieser Einflussgröße nicht vorgenommen.

Da die Lumineszenzschicht während der folgenden Versuche in der Ulbricht'schen Kugel als separates Einzelteil untersucht wird und keine aktive Kühlung erfährt, sollen in den Abschnitten 5.5.2 und 5.5.3) Tendenzen und keine exakten im Scheinwerfermodul auftretenden Werte benannt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die in diesen Abschnitten gemessenen Parameter eine Näherung an die Verhältnisse im vollständig montierten Scheinwerfermodul darstellen.

5.5.1 Quantitative Beurteilung der Laserstrahlung an der Lumineszenzschicht

Zur Beurteilung der Effektivität der Lumineszenzschicht und des Optimierungspotentials der Spiegel soll im Folgenden der Strahlungsfluss an der Lumineszenzschicht gemessen werden. Hierfür ist es erforderlich die in den Reflektor einfallenden Lichtstrahlen mithilfe eines Spiegels, wie in Abbildung 5.15 dargestellt, auf ein Laserleistungsmessgerät zu lenken. Die gesamte Messstrecke setzt sich aus drei Teilabschnitten zusammen.

- Abschnitt 1: 4 cm
- Abschnitt 2: 4,5 cm
- Abschnitt 3: 10 cm
- Reflektionswinkel $\alpha = 15^\circ$

Die gesamte Länge der Messstrecke beträgt wie im Abschnitt 5.2 (Reflektionsgrad der verwendeten Spiegel) $L = 18,5$ cm. Auch hier erfolgt eine Mittelwertbildung der mit dem

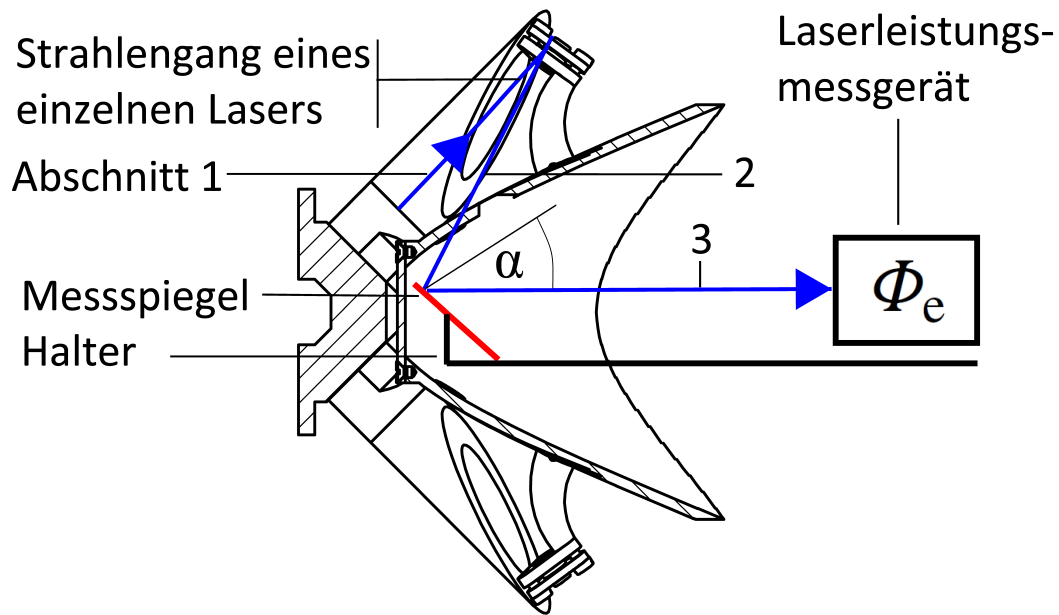


Abbildung 5.15: Schematische Darstellung zum Versuchsaufbau zur Erfassung des Strahlungsflusses auf der Lumineszenzschicht mit Kennzeichnung der Messabschnitte 1 - 3 und $\alpha=30^\circ$.

Laserleistungsmessgerät erfassten Daten nach dem Schema der vorangegangenen Abschnitte. Damit die Laserdioden einzeln gemessen werden können ist eine weitere Modifizierung des Versuchsaufbaus erforderlich. Die emittierten, gebündelten Lichtstrahlen von drei der vier Dioden werden mit Blenden abgeschirmt, so dass die Erfassung der einzelnen Leistungen nacheinander möglich ist. Nun kann unter Berücksichtigung des Reflektionsgrades des Messspiegels $\eta_{\text{Spiegel4}} = 0,945$ eine quantitative Bestimmung der Lichtleistung an der Lumineszenzschicht $\Phi_{e,D_i,Lum}$ vorgenommen werden. Auf Basis der in Tabelle 5.3 zusammengefassten Messergebnisse für die Lichtleistungen der Dioden $D_1 - D_4$ nach der Kollimation $\Phi_{e,D_i,Koll}$ findet die Berechnung für die Verlustleistung P_{Verlust} in den Abschnitten 1 und 2 nach Gleichung 5.1 für $i = 1 - 4$ statt.

$$P_{\text{Verlust}} = (\Phi_{e,D_i,Koll} - \Phi_{e,D_i,Lum}) * \eta_{\text{Spiegel4}} \quad (5.1)$$

Durch die Verlustleistung kann das Verhältnis von der optischen Ausgangsleistung der Dioden nach Kollimation und der optischen Leistung, die die Konversationschicht erreicht, beschrieben werden. Die Mittelwerte der Messungen sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

Hieraus geht hervor, dass bei Verwendung der schwarzen Abschirmung die Lumineszenzschicht mit einer Lichtleistung von 1,778W angeregt wird. Dies entspricht einem Leistungsverlust von 15,5% auf den in Abbildung 5.15 gekennzeichneten Abschnitten 1 und

2. Ein Teil dieser Verluste kann durch die verlustbehaftete Reflektion der Umlenkspiegel in Scheinwerfermodul begründet werden.

Bei Betrachtung der einzelnen Dioden und den dazugehörigen Leistungsverlusten auf den genannten Abschnitten fällt auf, dass die Leistung der Diode 3 am stärksten abfällt. Dies kann nicht vollständig durch den etwas niedrigen Reflektionsgrad des dazugehörigen Spiegel 3 mit 92,4% begründet werden. Daher ist hier von einer ungenügenden Justierung des dazugehörigen Umlenkspiegels auszugehen. Hierdurch bedingt wird die optische Laserleistung nicht ideal auf die Lumineszenzschicht reflektiert und trifft stattdessen auf Außenseite des Reflektors. Aus Diagramm 5.16 kann die Messungenauigkeit anhand der Fehlerindikatoren, die die größte und die kleinste gemessene Verlustleistung markieren, abgelesen werden. Hier wird von einem ausreichend genauen Ergebnis ausgegangen, da die Werte der Messpunkte eine relativ geringe Streuung aufweisen. Als Beispiel sollen die zur Diode 1 gehörigen Verlustleistungswerte genannt werden. Der Mittelwert der Messungen mit der schwarzen Abschirmung beträgt hier 71,8 mW. Der größte berechnete Wert, der sich aus der kleinsten gemessenen Strahlungsleistung am Abschnitt 1 und der größten gemessenen Strahlungsleistung beim Abschnitt 3 ergibt, beträgt 74,4 mW. Der geringste gemessene Verlust beträgt 68,8 mW. Dies entspricht einer Abweichung von 2,6 mW zum größten und von 3,0 mW zum kleinsten Einzelwert. Damit liegt zwischen der größten und der kleinsten Verlustleistung eine maximale Differenz von 5,6 mW vor.

Optische Leistung in mW	Diode1	Diode2	Diode3	Diode4	Σ
Diodenleistung (nach Kollimation)	535,41	530,29	524,53	514,05	2104,28
Optische Leistung an LS	463,65	474,94	406,31	432,74	1777,64
Verlust	71,76	56,35	118,21	81,31	327,63

Tabelle 5.4: Zusammenfassung der Messergebnisse (LS = Lumineszenzschicht).

5.5.2 Einfluss des Einstrahlwinkels α

Mit dem folgenden Versuch sollen die Abstrahlcharakteristiken der Frequenzkonvergenzschicht hinsichtlich der Strahlungsabbeute $\eta_{e,\alpha}$ und der Lichtausbeute $\eta_{V,\alpha}$, sowie den emittierten Farbwerten auf die Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel α überprüft werden.

Der Einstrahlwinkel α wird nach Abbildung 5.17 so definiert, dass dieser den Winkel mit der das Laserlicht auf die Lumineszenzschicht trifft, beschreibt. Trifft das Laserlicht

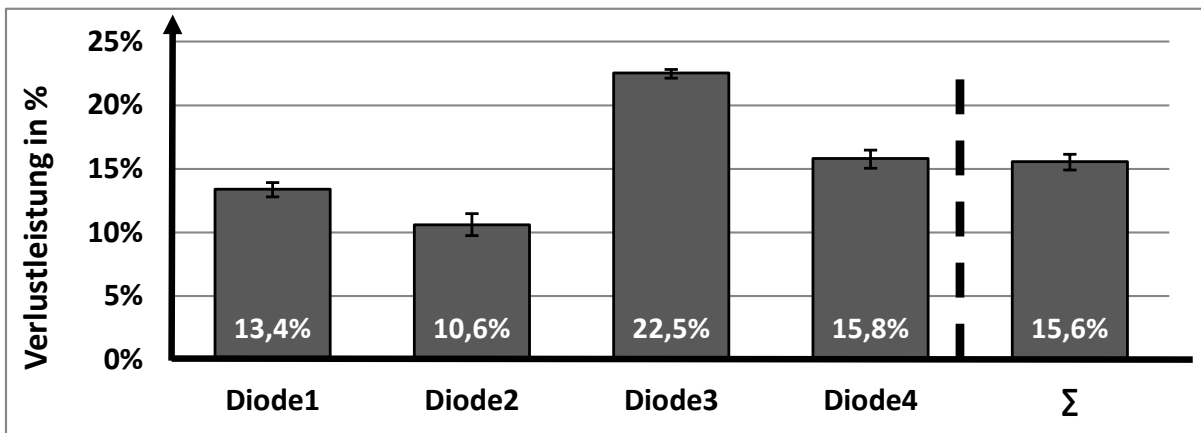


Abbildung 5.16: Relative optische Verlustleistungen zwischen den Dioden (nach Kollimation) und der Lumineszenzschicht.

senkrecht auf, so gilt $\alpha = 90^\circ$. Im Scheinwerfermodul gilt $\alpha = 30^\circ$.

Zur Erfassung der oben genannten Parameter wird die phosphorbeschichtete Platte in der Mitte der Ulbricht'schen Kugel platziert. Diese ist, wie bei den vorherigen Versuchen, über ein Spektrometer mit einem Computer verbunden. Außerhalb der Kugel wird die Referenzdiode D_{Ref} so platziert, dass der gewünschte Winkel α eingestellt werden kann. Der Versuch wird mit einem Eingangsstrom von $I_{Ref,E} = 0,6$ A durchgeführt. Die Kollimation wird so eingestellt, dass die Fokussierung dem Fokus 1 aus Abbildung 5.22, also der Beleuchtung einer minimalen Fläche entspricht. Während des Versuches wird die Kollimation konstant gehalten. Aufgrund der Punktfokussierung findet bei Veränderung des Einstrahlwinkels keine sichtbare Größenveränderung der beleuchteten Fläche statt. Durch die Bündelung des Laserlichtes auf einen Punkt soll verhindert werden, dass bei einem flachen Einstrahlwinkel ein Teil des Laserlichtes die Phosphorschicht verfehlt.

Die Laserdiode ist in einem, über ein Laserdiodentreiber gesteuerten und mit Strom versorgten Kühl-Heiz-Körper mit integrierter Stromversorgung montiert. So kann die Gehäusetemperatur $\vartheta_{Case} = 35$ °C und der Eingangsstrom der Diode mit $I_E=0,6$ A konstant eingestellt werden.

Bedingt durch die Geometrie der Ulbricht'schen Kugel können Messungen im Bereich $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ durchgeführt werden. Daher erfolgt die Durchführung von vier Einzelmessungen bei $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 35^\circ$, $\alpha_3 = 45^\circ$, $\alpha_4 = 60^\circ$. Da die Lumineszenzschicht bei diesem Versuchsaufbau keiner gesonderten Kühlung unterliegt und so eine Erwärmung

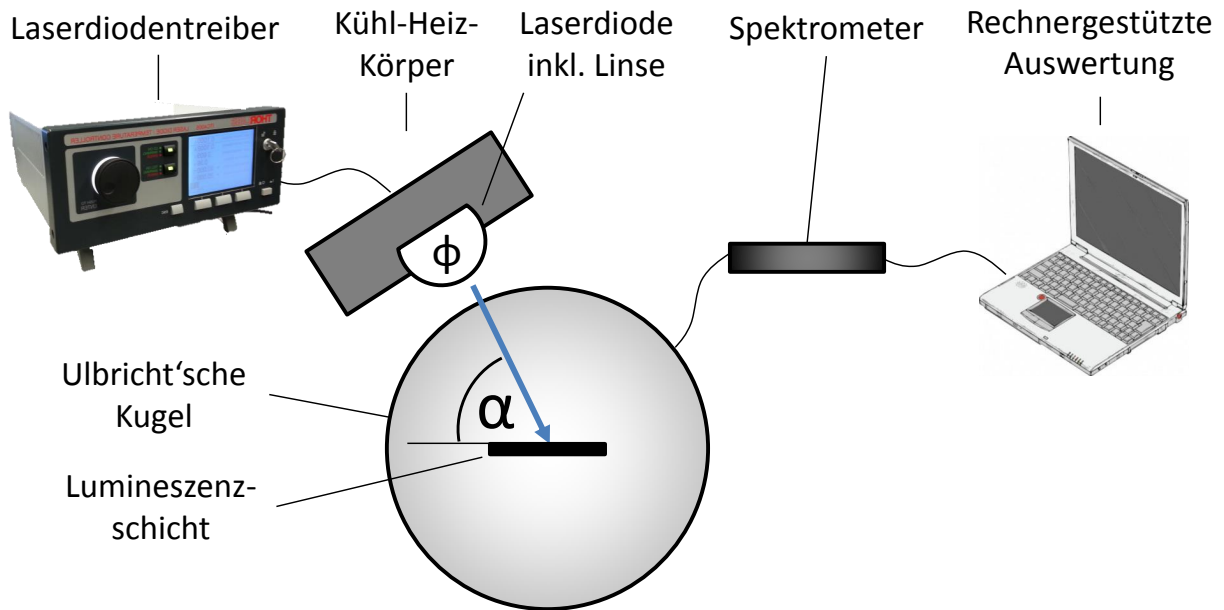


Abbildung 5.17: Versuchsaufbau zur Vermessung des Winkeinflusses.

im Betrieb zu erwarten ist, kann zugleich das thermische Verhalten der Phosphorschicht beobachtet werden. Der gewählte Beobachtungszeitraum beträgt hier 545 s und die Messung startet 5 Sekunden nach dem Einschalten der Diode.

Einfluss auf die Lichtausbeute

Die Referenzdiode wird bei einem Eingangsstrom von $I_{E,Ref} = 600$ mA mit einer konstanten Eingangsleistung von $P_{E,Ref} = 2,578$ W am Labornetzteil betrieben. Hierbei beträgt die eingestellte Gehäusetemperatur der Diode $\vartheta_{Case} = 35$ °C. Die radiometrische Ausgangsleistung wird separat mit dem Versuchsaufbau nach Abbildung 5.8 vermessen und beträgt 504,0 mW. Zusammen mit den Ergebnissen des Versuchs wird nach Gleichung 2.3 die Lichtausbeute in Abhängigkeit zur Betriebszeit $\eta_{V,\alpha}(t)$ und zur optischen Ausgangsleistung der Referenzdiode bestimmt. Die Ergebnisse sind im Diagramm Abbildung 5.18 dargestellt.

Die Lichtausbeute nimmt bei allen Winkeleinstellungen mit der Zeit exponentiell ab. Dieser Effekt ist auf eine Erwärmung der Lumineszenzschicht, die nach [Lach14] auf die Abwärme der Frequenzkonversion, sowie auf die Erwärmung der Emissionsschicht der Laserdiode bei gleichbleibender Gehäusetemperatur zurückzuführen. Da die Diode nach wenigen Sekunden ein thermisches Gleichgewicht erreicht und die Lumineszenzschicht sich allmählich erwärmt, kann anhand des Verlaufes über 545 Sekunden eine sinkende Licht-

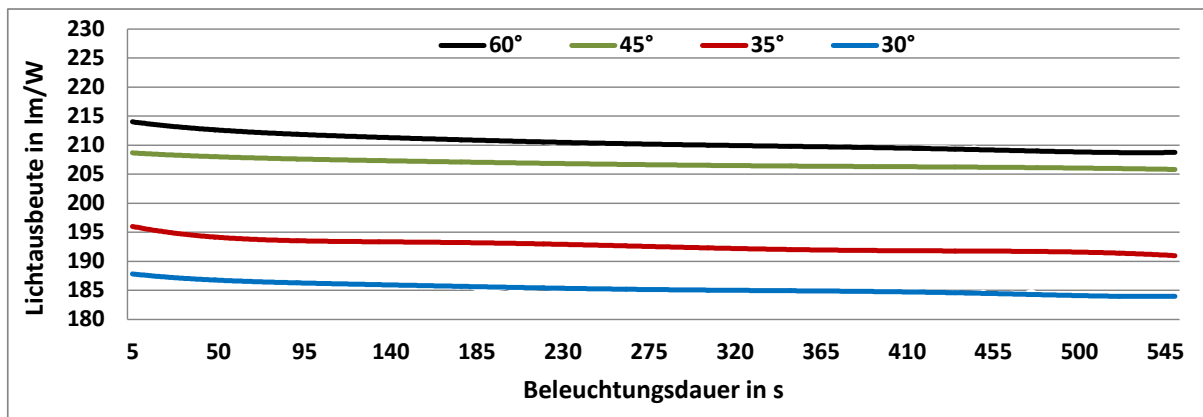


Abbildung 5.18: Lichtausbeute der Lumineszenzschicht in Abhängigkeit vom Winkel im Bezug zur optischen Ausgangsleistung der Referenzdiode.

ausbeute beobachtet werden. Folglich nimmt die Effizienz des Phosphors mit steigender Temperatur ab.

Es wird angenommen, dass sich nach 545 Sekunden näherungsweise ein Gleichgewicht zwischen Wärmezufuhr und Abfuhr eingestellt hat, sodass die einzelnen Messreihen miteinander vergleichbar sind. So wird nach 545 s mit $\eta_{V,\alpha(60^\circ)}(545\text{ s}) = 209,5 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ bei $\alpha = 60^\circ$ die größte und mit $\eta_{V,\alpha(30^\circ)}(545\text{ s}) = 183,4 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ bei $\alpha = 30^\circ$ die kleinste Lichtausbeute gemessen. Dies entspricht einer Differenz von $25,8 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ und einer Steigerung der Lichtausbeute um 14,0 %. Bei $\alpha = 35^\circ$ beträgt $\eta_{V,\alpha(35^\circ)}(545\text{ s}) = 191,3 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ und bei $\alpha = 45^\circ$ beträgt $\eta_{V,\alpha(45^\circ)}(545\text{ s}) = 205,8 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$. Dies entspricht einer Differenz von $7,6 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ bzw. $22,1 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ und damit einer relativen Steigerung um 4,1 % bzw. um 12,0 % gegenüber den Werten, die bei einem Winkel von 30° Grad erreicht werden.

Bei einer Winkelveränderung von 30° auf 45° wird eine größere Leistungssteigerung gemessen als bei der Winkelveränderung von 45° auf 60° . Hier wird lediglich eine Steigerung von $3,7 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$, dies entspricht einer Erhöhung um 1,8 %. Daher ist bei der Optimierung dieses Parameters darauf zu achten, dass kein lineares Verhalten vorliegt. Eine Veränderung des Einstrahlwinkels von $\alpha = 30^\circ$ auf $\alpha = 45^\circ$ stellt bei der vorliegenden Konstruktion einen Kompromiss zwischen Leistungsoptimierung und dem Umfang der hierfür notwendigen konstruktiven Anpassungen dar.

Einfluss auf die Strahlungsausbeute

Im Diagramm der Abbildung 5.19 ist der radiometrische Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel dargestellt.

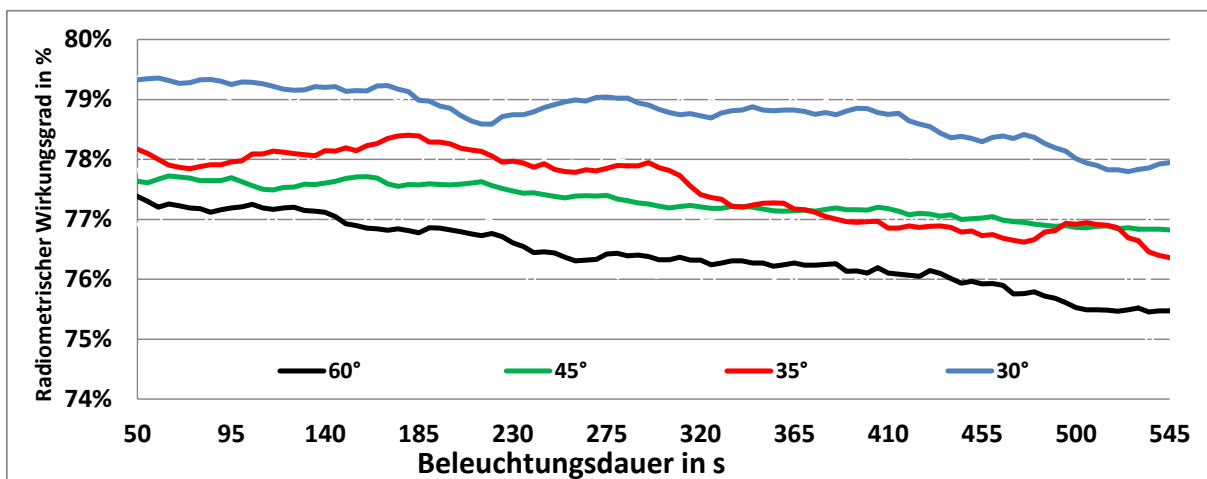


Abbildung 5.19: Radiometrischer Wirkungsgrad der Lumineszenzschicht in Abhängigkeit vom Winkel im Bezug zur optischen Ausgangsleistung der Referenzdiode.

Beim radiometrischen Wirkungsgrad liegt ebenfalls eine thermisch Abhängigkeit vor. Bei steigender Beleuchtungsdauer der Lumineszenzschicht nimmt die Strahlungsausbeute exponentiell ab. Erkennbar wird bei keiner der Versuchsreihen ein idealer stationärer Zustand erreicht. Die Veränderung die nach einer Beleuchtungsdauer der Lumineszenzschicht von mehr als 500 Sekunden beim radiometrischen Wirkungsgrad auftritt beträgt weniger als 1 %. Daher wird hier im Rahmen dieser Arbeit von einer hinreichenden Genauigkeit für eine Analyse ausgegangen. Aus den Verläufen der Graphen bei $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 60^\circ$ geht die Tendenz hervor, dass bei einem größerem Einstrahlwinkel ein geringerer radiometrischer Wirkungsgrad erreicht wird. Hierbei erreicht die Lumineszenzschicht nach 500 Sekunden bei einem Einstahlwinkel von $\alpha = 60^\circ$ $\eta_{e,60^\circ} = 75,5 \%$ und bei $\alpha = 30^\circ$ $\eta_{e,30^\circ} = 78,0 \%$. Bei $\alpha = 35^\circ$ (nach 545 s = 76,4 %) und $\alpha = 45^\circ$ (nach 545 s = 76,9 %) geht aus dem Diagramm keine eindeutige Tendenz bezüglich der Winkelabhängigkeit hervor. Als Ursache hierfür können u. a. durch die Justage bedingte Abweichungen bestimmt werden. So ist dem vorliegenden Versuchsaufbau ist eine exakt reproduzierbare Ausrichtung des Laserlichtes auf die Lumineszenzschicht bei Veränderung der Winkeleinstellung schwer erreichbar.

Bei einem Vergleich mit den Werten aus Abbildung 5.18 wird deutlich, dass eine Vergrößerung des Winkels α zu einer erhöhten Lichtausbeute bei einer geringeren Strahlungsausbeute führt. Dieser Zusammenhang kann anhand der emittierten Farbwerte erläutert werden.

Einfluss auf die Farbwerte

In Abbildung 5.20 werden alle Farborte im CIE-Normfarbsystem dargestellt. Es ist mit Vergrößerung des Einstahlwinkels eine Verschiebung der Farborte in Richtung höherer CIE-x, CIE y Werte zu sehen.

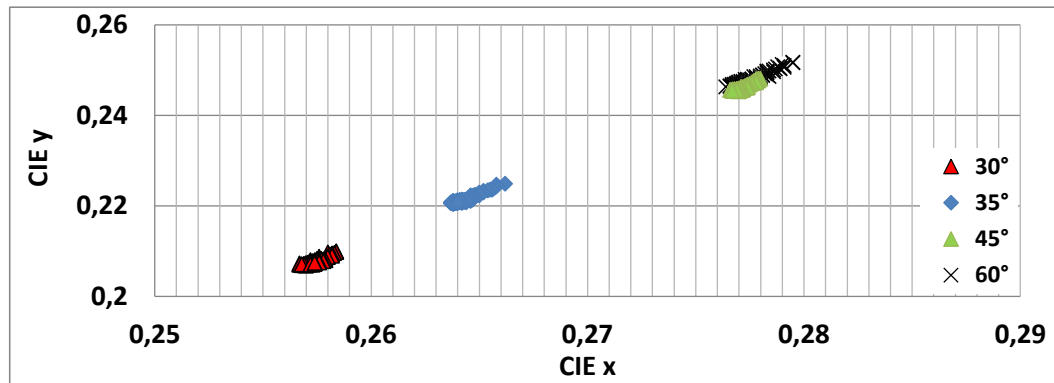


Abbildung 5.20: Farbwerte in Abhängigkeit vom Winkel in Zeitraum von 545 Sekunden nach Einschalten der Referenzdiode.

Bei der Beurteilung dieser Werte ist zu beachten, dass das Auftreten von Streulicht die Farbtemperatur nach oben verschiebt und dass der jeweilige Farbort aus der Summe aller auftretenden Farben und deren Anteile besteht. Daher sollen hier Tendenzen benannt werden.

Je größer der Winkel α ist, desto größer ist der CIE-x und der CIE-y Wert. Dies entspricht einer Verschiebung in Richtung des in der ECE-Regelung 113 für Kraftfahrzeugscheinwerfer festgelegten CIE ECE-Weißbereiches. Bei genauerer Betrachtung der Farborte, die zu den Winkel $\alpha = 45^\circ$ und $\alpha = 60^\circ$ zugeordnet werden, gibt es einen Bereich, in dem sich die Werte überschneiden. Hier tritt die Verschiebung des Farbortes vermindert auf.

Im Folgenden wird die zeitliche Veränderung der Farbtemperatur betrachtet.

Der Verlauf wird in Abbildung 5.21 über einen Zeitraum von 545 Sekunden für die Winkel $\alpha = 45^\circ$ und $\alpha = 60^\circ$ dargestellt. Beide Graphen haben ein exponentielles Verhalten. Für $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 35^\circ$ fehlen die Werte der Farbtemperaturen, da in diesem Farbwertbereich keine Definition der Farbtemperatur vorliegt.

Die Farbtemperatur ist bei $\alpha = 60^\circ$ stets kleiner als bei $\alpha = 45^\circ$. Dies bestätigt die zuvor getroffene Aussage bezüglich der Winkelabhängigkeit der Farborte. Weiterhin ist hier ein thermischer Effekt zu erkennen. Die beiden Graphen nähern sich an, da die Farbtemperatur bei $\alpha = 60^\circ$ schneller ansteigt als bei $\alpha = 45^\circ$. Es ist bekannt, dass sich die Lumineszenzschicht im ungekühlten Betrieb erwärmt. Aus den Verläufen der

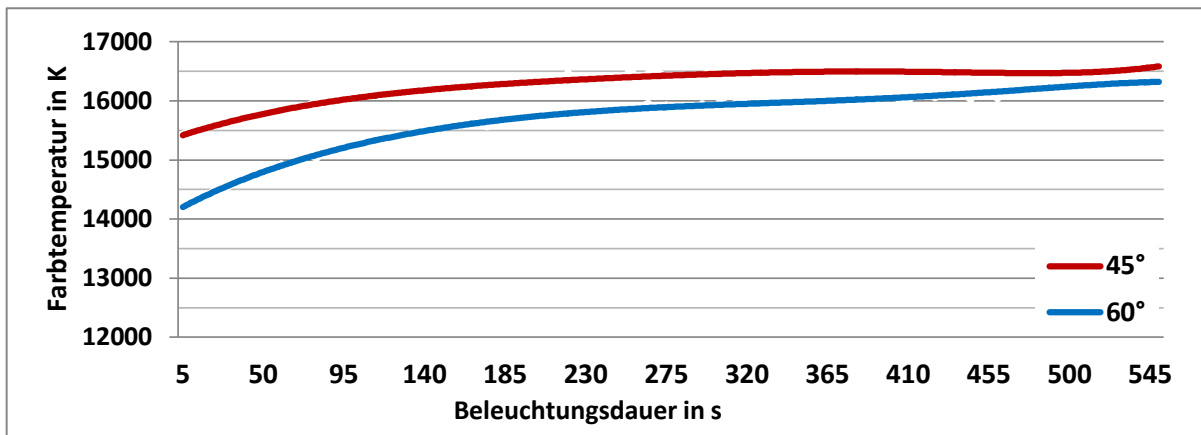


Abbildung 5.21: Farbwerte in Abhängigkeit vom Winkel und der Zeit.

beiden Graphen kann daher geschlossen werden, dass bei einem größeren Winkel eine stärkere Wärmeentwicklung verursacht wird. Dies kann mit der größeren Lichtausbeute und einem damit verbundenen niedrigeren Reflektionsgrad erklärt werden. Demnach ist bei der Nutzung eines größeren Winkels eine größere Lichtausbeute und eine niedrigere Farbtemperatur zu erwarten. Jedoch ist dies mit einer verstärkten Wärmeentwicklung an der Lumineszenzschicht verbunden.

5.5.3 Einfluss der Laserfokussierung

Der Fokus der Laser kann mit den Kollimationslinsen, die unmittelbar vor den Dioden angebracht sind, eingestellt werden. Da eine Vielzahl von Fokussierungen möglich ist, findet im Rahmen dieser Arbeit die Betrachtung von zwei Extremen statt, welche in Abbildung 5.22 zu sehen sind.

- Fokus 1: Fokussierung auf einen Punkt
- Fokus 2: Fokussierung auf die Fläche

Für die folgenden Versuche wird der Versuchsaufbau nach Abbildung 5.17 aus dem vorherigen Abschnitt 5.5.2, in dem der Einfluss des Einstrahlwinkels α betrachtet wird, verwendet.

Die beiden Fokussierungen werden jeweils bei $\alpha=30^\circ$ und $\alpha=60^\circ$ eingestellt. Die Referenzdiode wird bei einem Eingangsstrom von $I_{E,Ref}=600$ mA mit einer konstanten Eingangsleistung von $P_{Ref,Ein}=2,578$ W am Labornetzteil betrieben. Die geregelte Gehäusetemperatur der Diode beträgt $\vartheta_{Case}=35$ °C. Mit Gleichung 2.3 kann die Lichtausbeute

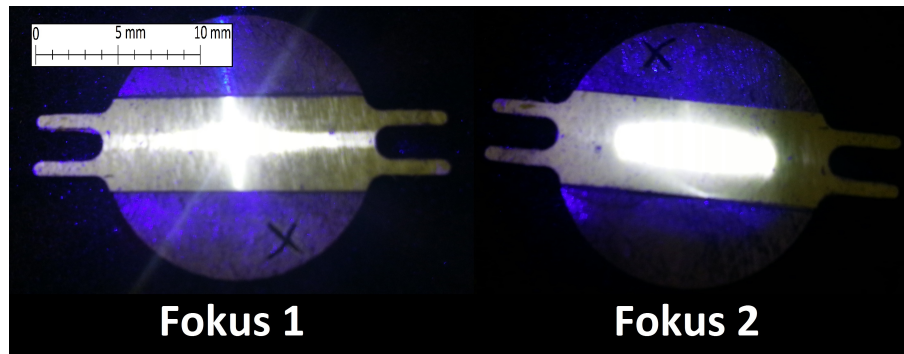


Abbildung 5.22: Draufsicht auf die Lumineszenzschicht bei Verwendung von Fokus 1 und Fokus 2

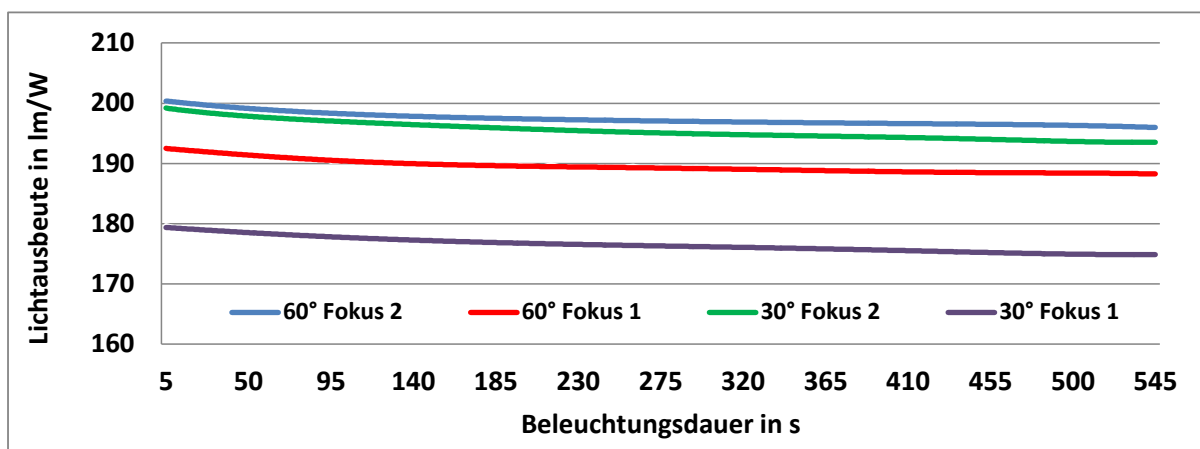


Abbildung 5.23: Lichtausbeute in Abhängigkeit von der Laserfokussierung.

im Bezug auf die Diodenausgangsleistung nach Transmission durch die Kollimationslinse bestimmt werden. Die Werte sind in Abbildung 5.23 dargestellt.

Der Verlauf aller Graphen ist exponentiell fallend. Die Lichtausbeute ist nach 545 Sekunden bei $\alpha=60^\circ$ mit $\eta_{V,Fokus1}(545\text{ s}) = 188,0 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ und $\eta_{V,Fokus2}(545\text{ s}) = 196,1 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ bei beiden Fokussierungen größer als bei $\alpha = 30^\circ$ mit $\eta_{V,Fokus1}(545\text{ s}) = 174,8 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ und $\eta_{V,Fokus2}(545\text{ s}) = 193,4 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$.

Im vorliegenden Scheinwerfermodul wird näherungsweise der Fokus 1 bei einem Einstahlwinkel von 30° angewandt. Daher wird im Folgenden für die Lumineszenzschicht im eingebauten Zustand eine Lichtausbeute von $174,8 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ angegeben.

Bei einem Winkel von 60° ist die Lichtausbeute bei der Fokussierung 2 um $8,1 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ größer als bei der Fokussierung 1. Dies entspricht einer Differenz von 4,3 %. Bei einem Winkel von $\alpha = 30^\circ$ tritt beim Fokus 2 eine um $18,6 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ und somit um 10,6 % erhöhte Lichtausbeute auf. Dieses Verhalten kann anhand der Abbildung 5.24 erläutert werden.

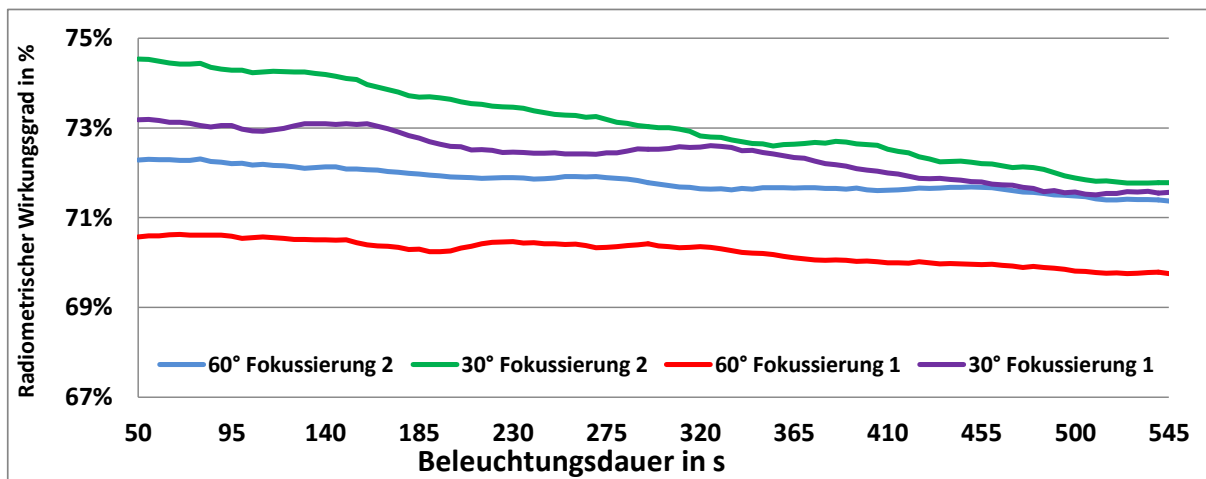


Abbildung 5.24: Radiometrischer Wirkungsgrad der Lumineszenzschicht in Abhängigkeit vom Winkel und der Zeit.

In Abbildung 5.24 wird die nach Gleichung 2.1 berechnete Strahlungsausbeute der Lumineszenzschicht bei den oben genannten Einstellungen, in einem Zeitraum von 545 Sekunden nach dem Einschalten der Diode dargestellt. Diese fällt bei allen Konfigurationen im zeitlichen Verlauf exponentiell ab und stabilisiert sich nach ca. 500 Sekunden. Bei $\alpha=30^\circ$ mit Fokus 2 beträgt der Wirkungsgrad nach 545 Sekunden $\eta_{e,Fokus2}=71,6\%$ und ist minimal größer als bei gleichem Winkel mit der Fokussierung 1 $\eta_{e,Fokus1}=71,5\%$.

Bei $\alpha=60^\circ$ beträgt der radiometrische Wirkungsgrad $\eta_{e,Fokus1}=69,4\%$. Bei der vorliegenden Konstruktion liegt ein Winkel von $\alpha=30^\circ$ bei Verwendung der Fokussierung 2 vor. Daher wird im Folgenden ein radiometrischer Wirkungsgrad von 72 % und damit ein Verlust von 28 % der optischen Leistung angegeben.

Im Folgenden wird die zeitliche Veränderung der Farbtemperatur in Abhängigkeit von der Fokussierung betrachtet.

Für $\alpha=30^\circ$ liegen keine Farbtemperaturen vor, da die gemessenen Farbwerte aufgrund von zu niedrigen CIE-x und CIE-y Werten nicht als Temperatur definiert sind. Daher können lediglich die Farbtemperaturen für $\alpha=60^\circ$ bei den Fokussierungen 1 und 2 ausgewertet werden. Die bei $\alpha = 60^\circ$ in der Ulbricht'schen Kugel auftretenden Farbtemperaturen werden in Abbildung 5.25 im Bezug auf die Beleuchtungsdauer dargestellt.

Die Farbtemperatur nähert sich bei $\alpha=60^\circ$ bei beiden Fokussierungen mit zunehmender Beleuchtungsdauer einem Maximum an. Dieses liegt bei der Fokussierung 1 bei $CCT_{Fokus1}(545\text{ s}) = 17800\text{ K}$ und bei Fokussierung 2 bei $CCT_{Fokus2}(545\text{ s}) = 14200\text{ K}$, während nach 5 Sekunden für $CCT_{Fokus1}(5\text{ s}) = 14700\text{ K}$ und $CCT_{Fokus1}(545\text{ s}) =$

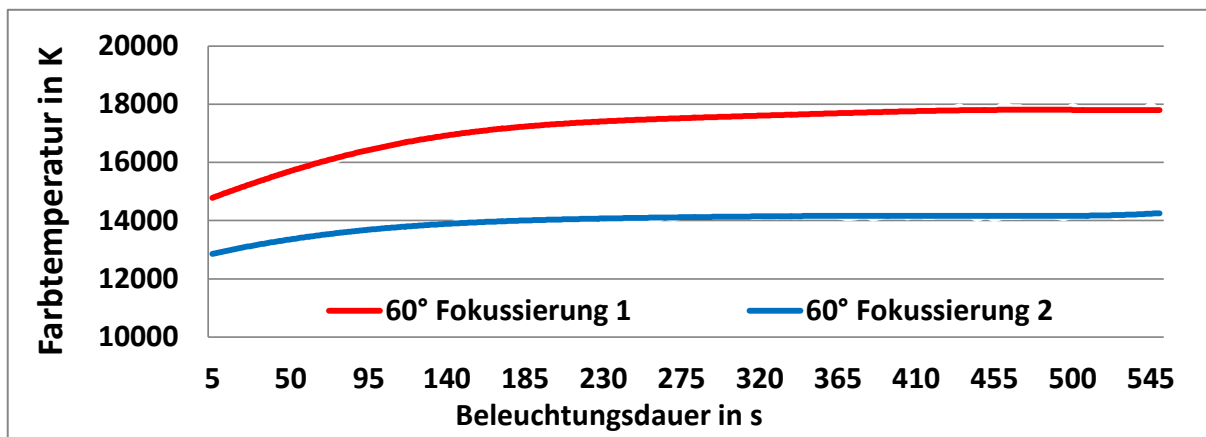


Abbildung 5.25: Farbwerte in Abhängigkeit von der Laserfokussierung.

12900 K erfasst werden.

Neben der größeren Farbtemperatur nach 545 Sekunden weist die Messkurve bei der Fokussierung 1 besonders im Bereich von $t = 5 - 230$ s eine größere Steigung als die der Fokussierung 2 auf. Demnach wird beim Fokus 1 ein geringer Anteil des auftreffenden Laserlichtes bei gleichzeitig erhöhter Wärmebelastung des betroffenen Bereiches der Lumineszenzschicht konvertiert.

Zusammenfassend liegt bei Fokussierung 1 eine höhere Farbtemperatur und eine geringere Lichtausbeute vor als bei Anwendung der Fokussierung 2.

Bei Verwendung des Fokus 2 verringert sich gegenüber dem Einsatz von Fokus 1 die Abbildungsschärfe. Daher ist eine Einstellung zwischen den beiden Fokussierungen zu empfehlen. In Versuchen zeigt sich, dass eine geringfügige Aufweitung des Laserstrahls, wie in Abbildung 5.26 zu sehen optimal ist.

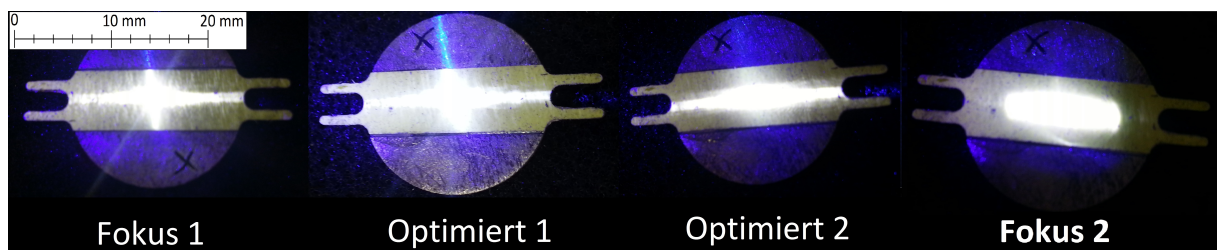


Abbildung 5.26: Beispiele zur Optimierung der Laserfokussierung.

5.6 Der Streulichtverlust

Nur ein Teil der optischen Leistung der Laserdioden erreicht die Lumineszenzschicht. Die bekannten Leistungsverluste, die den optischen Bauteilen wie z. B. den Spiegeln 1 - 4 zuzuordnen sind, werden in den vorangegangenen Abschnitten betrachtet. Als Streulicht wird im Rahmen dieser Arbeit die Leistungsdifferenz zwischen der kollimierten, optischen Ausgangsleistung der Dioden und der Laserleistung, die die Lumineszenzschicht erreicht, abzüglich der bekannten Verluste, bezeichnet.

In der Abbildung 5.27 werden nach einer Sichtprüfung beispielhaft einige auffällige diffuse Reflektionen markiert. So trifft ein Teil des Laserlichtes auf den reflektorseitigen Abschnitt der Umlenkspiegelhalterung (1) und ein weiterer Teil unmittelbar neben dem Umlenkspiegel an dessen Halterung auf (2). Weiterhin ist im Bereich der Reflektorbohrungen, durch die das Laserlicht in den Reflektor gelangt, deutlich eine Reflektion erkennbar (3). In Abbildung 5.28 sind diese Stellen im Detail dargestellt.

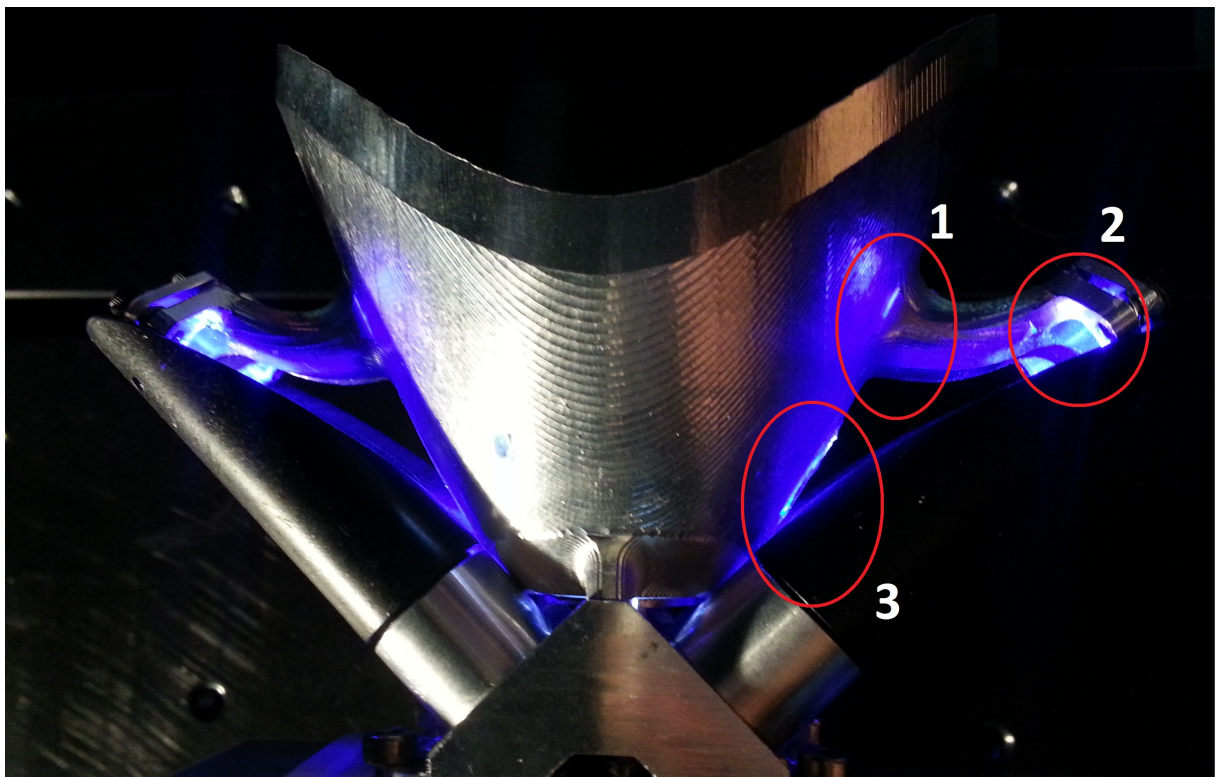


Abbildung 5.27: Stellen, an denen Laserlicht diffus in den Raum reflektiert wird. (1: An der Außenseite des Reflektors. - 2: An der Spiegelhalterung. - 3: An den Reflektorbohrungen.)

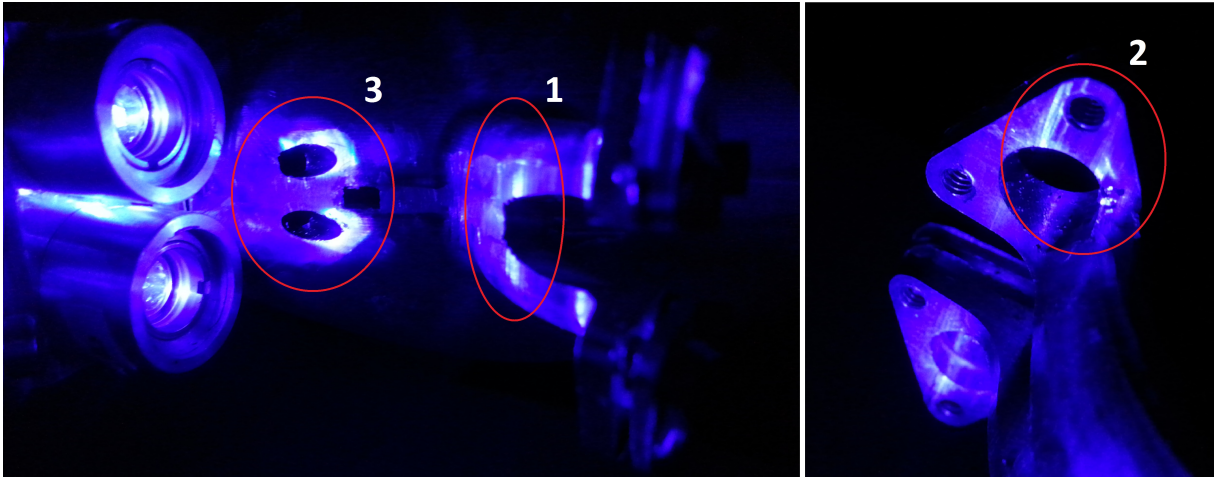


Abbildung 5.28: Detailansicht der auffälligsten, diffusen Reflexionen (1: An der Außenseite des Reflektors - 2: An der Spiegelhalterung - 3: An den Reflektorbohrungen).

5.6.1 Quantitative Analyse

Dieser Verlust der nutzbaren optischen Laserleistung soll hier quantifiziert werden. Im Abschnitt 5.2 wird der Reflektionsgrad der Umlenkspiegel $\eta_{Sp,1} - \eta_{Sp,4}$ bestimmt und in Abbildung 5.9 dargestellt. Weiterhin werden die Daten aus der Tabelle 5.4 des Abschnittes 5.5.1 herangezogen. Dort wird die Differenz zwischen der optischen Ausgangsleistung der Dioden $\Phi_{Koll,1} - \Phi_{Koll,4}$ und der dazugehörigen optischen Leistung, welche die Lumineszenzschicht erreicht $\Phi_{Lum,1} - \Phi_{Lum,4}$, angegeben. Hieraus wird nach Gleichung 5.2 die Streulichtleistung Φ_{Streu} bestimmt. Die Ergebnisse werden in Tabelle 5.5 und im Diagramm der Abbildung 5.30 zusammengefasst.

$$P_{Streu,i} = \Phi_{Koll,i} - \frac{\Phi_{Lum,i}}{\eta_{Sp,i}} \text{ für } i = 1, 2, 3, 4 \quad (5.2)$$

Der Leistungsverlust durch das Streulicht beträgt insgesamt $V_{Streu,Ges}=10,3\%$. Hierbei ist der Verlust bei der zu Diode 2 gehörenden Laserstrahlung mit $P_{Streu,2}=7,1\%$ am geringsten und bei der zu Diode 3 gehörenden mit $V_{Streu,3}=16,2\%$ am größten. Die Fehlerindikatoren des Diagrammes kennzeichnen die maximalen bzw. die minimalen Abweichungen, die während der Messungen auftreten. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Justage der Kollimationslinsen und der Umlenkspiegel einen erheblichen Einfluss auf die Lichtausbeute des Schweinwerfermoduls haben. So ist der erhöhte Verlust der optischen Leistung bei der zur Diode 3 gehörenden Laserstrahlung auf eine unzureichende Fokussierung und

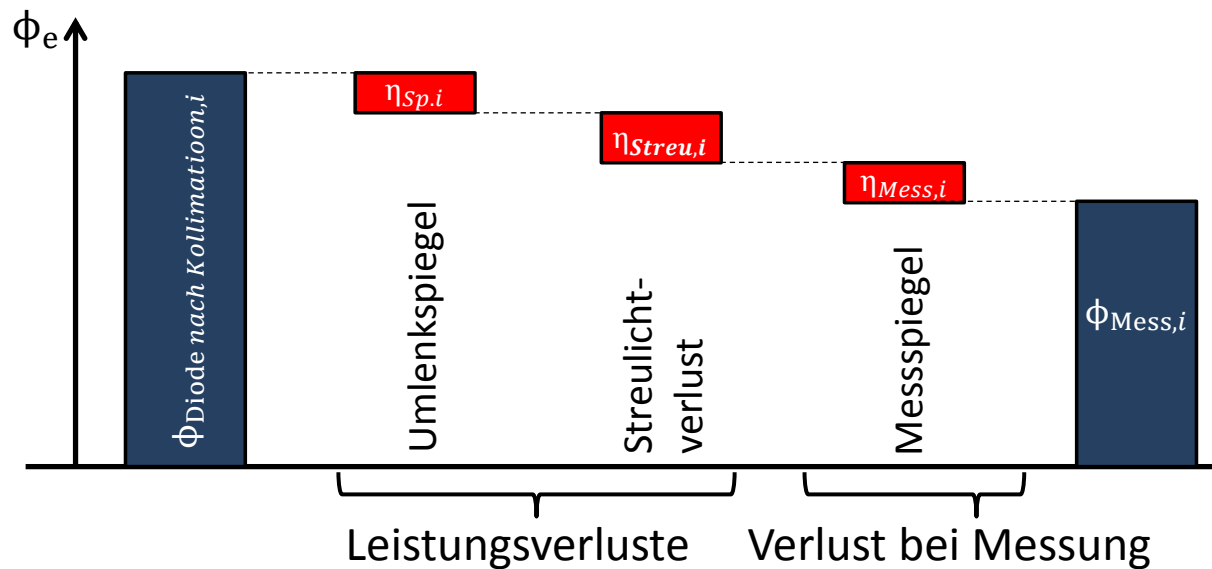


Abbildung 5.29: Abstufungen der radiometrischen Lichtleistung beim Versuch aus Abbildung 5.15 des Abschnittes 5.5.1.

Ausrichtung der Laserstrahlung und eine nicht optimale Einstellung der Umlenkspiegel zurückzuführen.

Bei der vorliegenden Konstruktion ist eine Optimierung nur eingeschränkt möglich. So ist für die Justage der Umlenkspiegel lediglich ein geringer Einstellwinkel vorgesehen, sodass eine exakte Ausrichtung des fokussierten Laserstrahls durch die Reflektorbohrungen hindurch auf die Lumineszenzschicht nicht möglich ist. Daher wäre hier ein vergrößerter Spielraum bei der Justage der Umlenkspiegel von großem Nutzen. Weiterhin ist es erforderlich Reflektionen an den Halterungen der Umlenkspiegel, wie in Abbildung 5.28 (mit Markierung 2 dargestellt), zu vermeiden. Hierfür wäre eine Einstellmöglichkeit zur Ausrichtung der Dioden erforderlich, die derzeit noch nicht in der vorliegenden Konstruktion vorgesehen ist.

Optische Leistung in mW	Diode1	Diode2	Diode3	Diode4	Σ
Diodenleistung (nach Kollimation)	535,41	531,29	524,52	514,05	2105,27
Optische Leistung an LS - Verlustleistung des Messspiegels + Verlustleistung der Umlenkspiegel	487,85	492,85	439,53	468,12	1888,36
Streulichtverlust	47,56	38,43	84,99	45,93	216,91

Tabelle 5.5: Zusammenfassung der Streulichtverluste bei $I_E=0,6$ A und $\vartheta_{Case}=35$ °C.

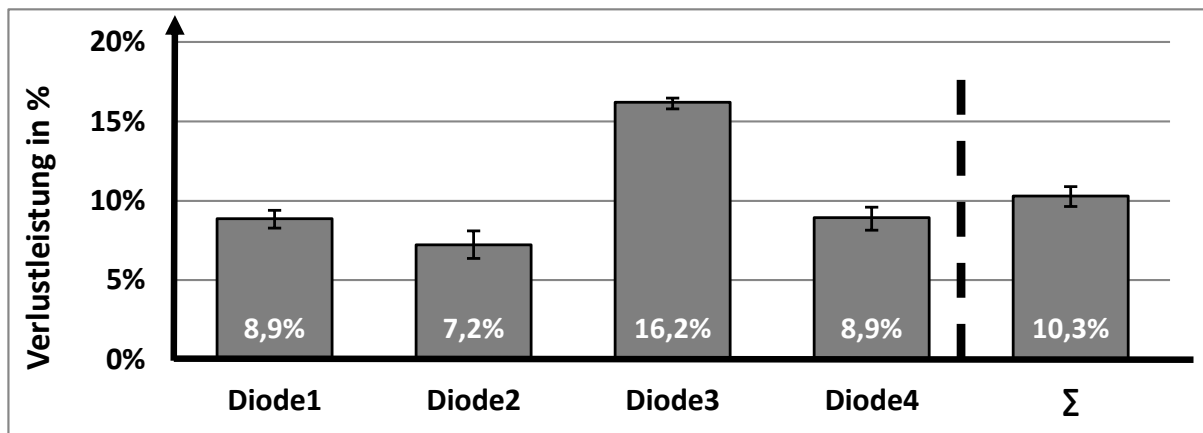


Abbildung 5.30: Streulichtverlust im Bezug auf die Lichtleistung nach Kollimationslinsentransmission.

5.6.2 Einfluss der Farbe der Abschirmung

In der vorliegenden Konstruktion des Scheinwerfermoduls wird aus Sicherheitsgründen das Laserlicht mit Kunststoffröhrchen (siehe Abbildung 5.33 am Ende des Abschnittes) abgeschirmt. Beim vorliegenden Scheinwerfermodul wird ursprünglich eine schwarz eingefärbte Abschirmung verwendet, die nicht optimal ausgerichtete Lichtstrahlen überwiegend absorbiert. Im Rahmen dieser Arbeit werden in einigen Versuchen auch nicht eingefärbte, transparente Abschirmungen eingesetzt und der Einfluss auf das Gesamtsystem bestimmt. So wird die optische Leistung bestimmt, die die Lumineszenzschicht beim Einsatz von transparenten und schwarzen Abschirmungen erreicht. Weiterhin findet eine Betrachtung des Einflusses der beiden verschiedenfarbigen Abschirmungen auf den Streulichtverlust des Scheinwerfermoduls statt. Im Diagramm der Abbildung 5.31 wird der Einfluss auf die beiden Parameter dargestellt.

Als Bezug wird hier die Summe der optischen Leistung aller vier Dioden herangezogen. Die auftreffende optische Laserleistung an der Lumineszenzschicht erreicht bei Verwendung der alternativen, transparenten Abschirmungen einen 0,6 % höheren Wert. Der Streulichtverlust fällt mit transparenten Abschirmungen um 5,2 % niedriger aus.

Das Scheinwerfermodul wird mit und ohne Scheinwerferlinse bei Verwendung von schwarzen und transparenten Abschirmungen in der Ulbricht'schen Kugel gemessen. Aus den hier erfassten Messdaten kann der Einfluss der Farbe der Abschirmung auf die Lichtausbeute des Scheinwerfermoduls bestimmt und in Abbildung 5.32 dargestellt werden.

Bei Einsatz der transparenten Abdeckungen wird ohne Linse ein Lichtstrom von

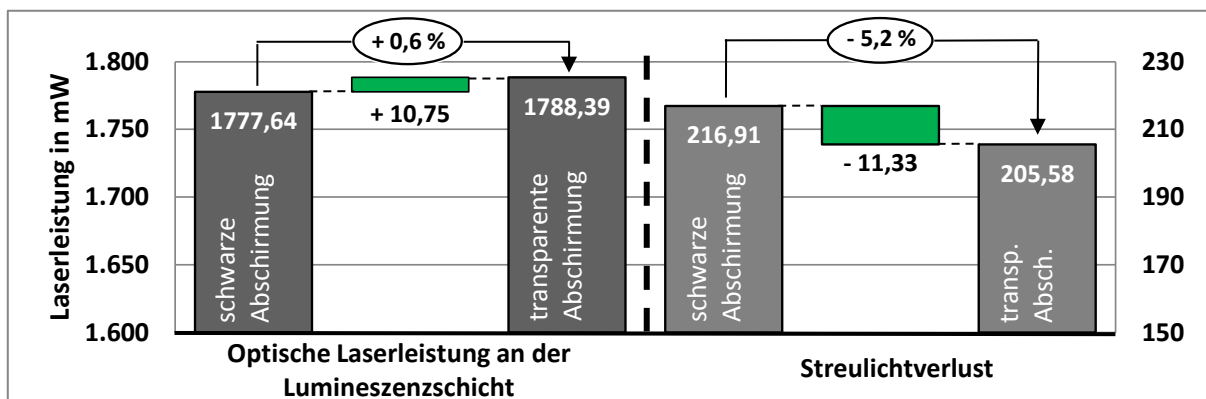


Abbildung 5.31: Einfluss der Farbe der Abschirmungen auf die optische Leistung, die die Lumineszenzschicht erreicht und die optische Leistung, die als Streulichtverlust gemessen wird (Leistungen nach Verfahren der Abschnitte 5.5.1 und 5.6 bei $\vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C}$ ermittelt).

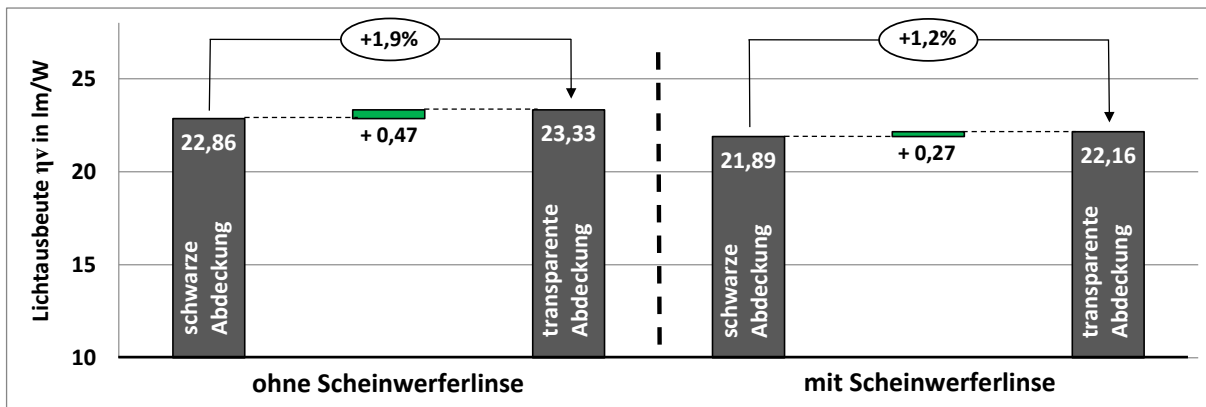


Abbildung 5.32: Lichtausbeute des Scheinwerfermoduls bei transparenten und schwarzen Abdeckungen (Messdaten aus Abschnitt 5.4 entnommen ($\vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C}$)).

$\Phi_{V,trans,o.L.}=243,1$ lm und mit Linse $\Phi_{V,trans,m.L.}=230,8$ lm gemessen. Hierbei wird eine elektrische Leistung von $10,42\text{W}$ aufgenommen. Die Lichtausbeute beträgt $\eta_{V,trans,o.L.}=23,33 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ und $\eta_{V,trans,m.L.}=22,86 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$.

Als Vergleich werden die im Abschnitt 5.4 bestimmten Messdaten, die mit den schwarzen Abdeckungen bestimmt werden, herangezogen. Diese betragen $\eta_{V,schw,o.L.}=22,86 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ und $\eta_{V,schw,m.L.}=21,89 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$.

Das Scheinwerfermodul erreicht bei fehlender Scheinwerferlinse beim Einsatz transparenter Abschirmungen eine 2,1 % höhere Lichtausbeute als beim Betrieb mit den zuvor verwendeten schwarzen Abschirmungen. Durch den Einbau der Scheinwerferlinse in den Reflektor verringert sich die Lichtausbeute. So wird bei dem vollständig montierten Scheinwerfermodul eine um 1,2 % gesteigerte Lichtausbeute durch die veränderten

Abschirmungen erfasst.

Da das Licht der Dioden nicht ideal fokussiert werden kann, treten die Lichtstrahlen nicht exakt parallel in die Abschirmung ein. Zudem erzeugt die Kollimationslinse, die sich unmittelbar vor den Laserdioden befindet, einen Lichtkranz, der ebenfalls auf die Innenseite der Abschirmungen trifft. Ursache für diese Differenz zwischen den Werten bei der Verwendung der unterschiedlichen Abschirmungen ist der geringere Absorptionsgrad der transparenten gegenüber den schwarzen Abdeckungen. Dadurch bedingt gibt es bei der transparenten Abschirmung, wie in Abbildung 5.33 dargestellt, einen erhöhten Anteil reflektierter Laserstrahlung, die zunächst auf die Umlenkspiegel trifft, anschließend die Leuchtschicht erreicht und dadurch den Systemwirkungsgrad steigert.

Die in der Ulbricht'schen Kugel erfassten Farbwerte werden in Abbildung 5.34 im CIE-Normfarbsystem dargestellt. Bei schwarzen Abdeckungen sind die CIE-x, CIE-y Werte mit $CIE - xy_{schw.,o.L.}(x/y)=(0,255/0,207)$ und $CIE - xy_{schw.,m.L.}(x/y)=(0,256/0,208)$ größer als bei den transparenten mit $CIE - xy_{trans.,o.L.}(x/y)=(0,269/0,234)$ und $CIE - xy_{trans.,m.L.}(x/y)=(0,270/0,235)$. Es werden demnach bei Verwendung der transparenten Abschirmungen niedrigere x, y-Farbwerte im CIE-Normfarbsystem gemessen. Dies ist auf die Lichtdurchlässigkeit der Abschirmwand zurückzuführen. So gelangt ein Teil des blauen Laserlichtes in die Ulbricht'sche Kugel, der bei Verwendung der schwarzen Abschirmungen absorbiert wird.

Insgesamt wird davon ausgegangen, dass beim Einsatz der transparenten Abschirmungen weniger Laserlicht absorbiert wird. Diese Differenzleistung wird partiell durch die Innenseite der Abschirmung auf die Spiegel reflektiert und erhöht so den Systemwirkungsgrad. Ein weiterer Teil tritt durch die Abschirmwand aus und erhöht so den Streulichtanteil.

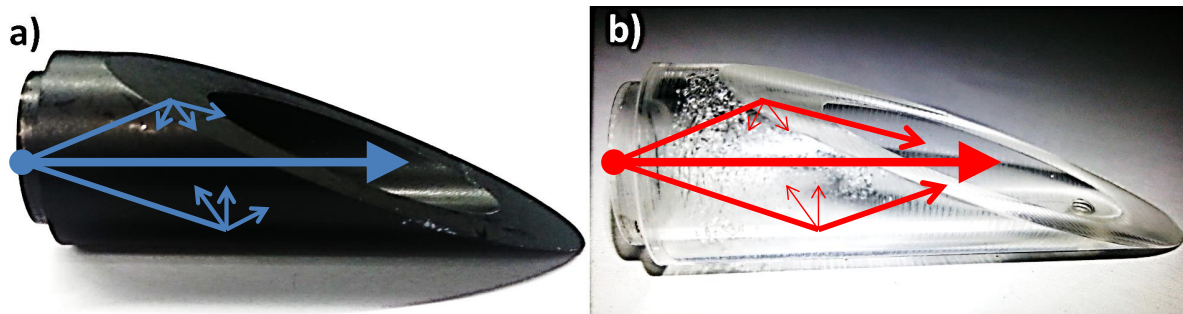


Abbildung 5.33: Strahlengang der Laserstrahlung innerhalb der Abschirmungen. - a) schwarze Abschirmung - b) transparente Abschirmung

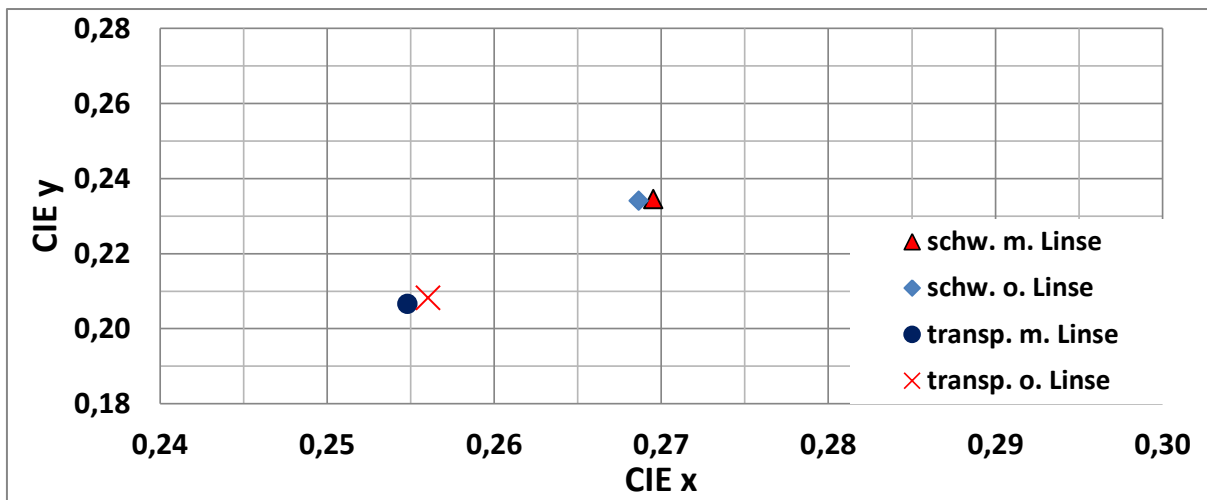


Abbildung 5.34: Einfluss der Farbe der Abschirmungen auf die Farbwerte im CIE-Normfarbsystem nach DIN 5033-3.

5.7 Sonstige Leistungsverluste

Zum Abschluss werden die nicht erfassten Leistungsverluste, die nach dem Auftreffen der Laserstrahlung auf die Lumineszenzschicht auftreten, quantifiziert.

Hierbei ist zu beachten, dass in diesen Verlusten der Reflektionsgrad des Reflektors enthalten ist. Dieser Reflektionsgrad wird nicht separat betrachtet. Dieses Element bildet eine Einheit mit den Haltern der Reflektionsspiegel. Daher ist ein Referenzwert der vom Modul emittierten optischen Leistung ohne Einfluss des Reflektors nicht zu erfassen. Auch eine Berechnung des Reflektorreflektionsgrades wäre sehr unzuverlässig, da sowohl die quantitative Lichtleistung als auch der Winkel, mit dem das Licht auf die Reflektorinnenseite trifft, unbekannt ist. Zudem ist nach den vorherigen Versuchen bekannt, dass die räumliche Verteilung der emittierten Wellenlängen inhomogen ist. So wird eine theoretische Bestimmung des Reflektionsgrades der Reflektorinnenseite erheblich erschwert.

In Abschnitt 5.5.1 wird die optische Leistung, die die Lumineszenzschicht erreicht, mit $P_{aufLS}=1777,6$ mW angegeben und in Abschnitt 5.5 der radiometrische Wirkungsgrad der Lumineszenzschicht mit $\eta_{LS}=72,0$ % bestimmt. Weiterhin ist aus Abschnitt 5.4 der Einfluss der Scheinwerferlinse auf die radiometrische Ausgangsleistung des Scheinwerfermoduls mit $\eta_{SL}=96,36$ % bekannt. Dem Abschnitt 4.3.1 wird die radiometrische Ausgangsleistung des Scheinwerfermoduls $P_{Nutz}=908,1$ mW entnommen. Mit diesen Daten wird die sonstige Verlustleistung nach Gleichung 5.3 bestimmt und im Diagramm der

Abbildung 5.35 dargestellt.

$$\Delta P_{Sonst} = P_{aufLS} * \eta_{LS} * \eta_{SL} - P_{Nutz} \quad (5.3)$$

Es tritt eine Differenz von $\Delta P_{Sonst}=325,2$ mW auf.

Nach dem gleichen Verfahren wird der Verlust des Lichtstromes nach Auftreffen auf die Lumineszenzschicht bestimmt. Hier werden aus den oben genannten Abschnitten für die Lichtausbeute der Lumineszenzschicht $\eta_{V,LS}=174,8 \frac{lm}{W}$ und $\eta_{V,SL}=95,8 \%$ und $\Phi_{Nutz}=241,1$ lm aus Abschnitt 4.3.2 entnommen. Mit diesen Daten kann zunächst mit $P_{aufLS}=1777,6$ mW der von der Konversationsschicht emittierte Lichtstrom von 310,7 lm berechnet und nach Gleichung 5.4 $\Delta\Phi_{Sonst}=56,6$ lm bestimmt werden. Im Diagramm 5.36 sind die Ergebnisse dargestellt.

$$\Delta\Phi_{Sonst} = P_{aufLS} * \eta_{V,LS} * \eta_{V,SL} - \Phi_{Nutz} \quad (5.4)$$

Die Ursachen für diese Verluste sind u. a. Verunreinigungen oder Beschädigungen der Reflektorinnenseite. An der Innenseite der Bohrungen treten diffuse Reflektionen auf, die aufgrund der dunklen Einfärbung der Ränder einen erhöhten Verlust aufweisen. Da die vier Bohrungen in der Reflektorwand symmetrisch verteilt sind und Laserstrahlung partiell an der Lumineszenzschicht reflektiert wird, tritt ein unbestimmter Anteil durch die Bohrungen aus dem Reflektor aus. Dieses Laserlicht wird zum Einen von der Konstruktion absorbiert und zum Anderen in Streulicht in den Raum abgegeben. Ein Teil dieser Verlustleistungen kann durch eine Reinigung bzw. eine Politur der Reflektorinnenseite

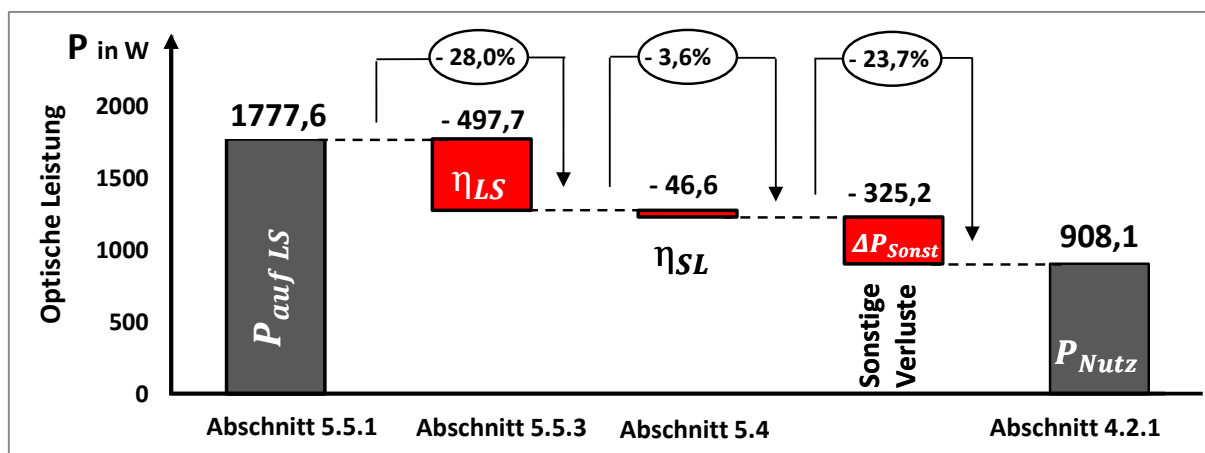


Abbildung 5.35: Anteil der sonstigen nicht näher klassifizierten radiometrischen Leistungsverluste des Scheinwerfers nach Auftreffen der Laserstrahlung aus die LS(LS=Lumineszenzschicht - SL=Scheinwerferlinse).

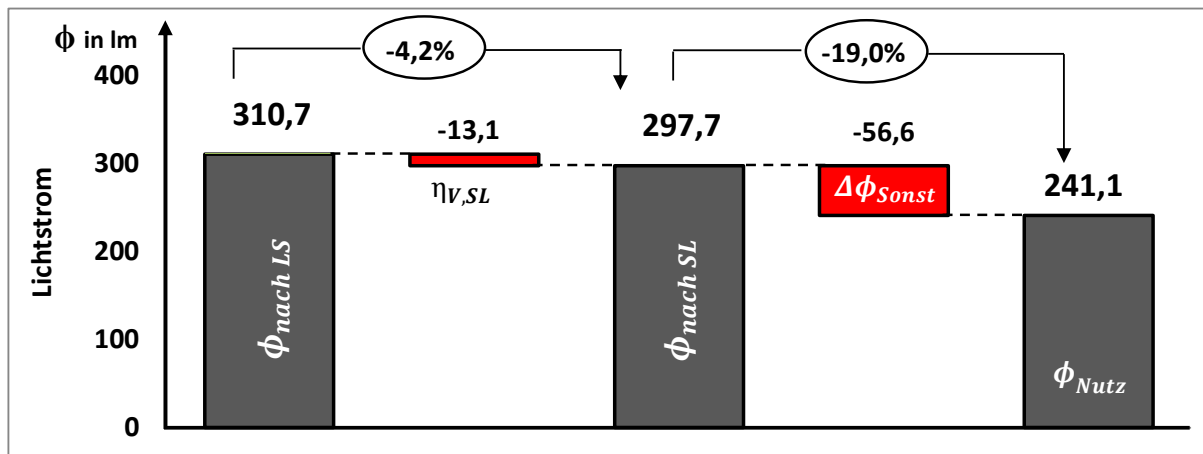


Abbildung 5.36: Anteil der sonstigen nicht näher klassifizierten fotometrischen Leistungsverluste des Scheinwerfers nach Auftreffen der Laserstrahlung auf die LS (LS=Lumineszenzschicht - SL=Scheinwerferlinse).

kompensiert werden. Die Umrandung der Bohrungen im Reflektor bietet ebenfalls ein Optimierungspotential, da diese dunkel eingefärbt ist und einen Teil der optischen Leistung absorbiert. Es ist bei einer Sichtprüfung zu erkennen, dass ein Anteil des blauen Laserlichtes von der Lumineszenzschicht reflektiert wird und auf die gegenüberliegenden Bohrungen trifft. Dieser Effekt wird bereits im Abschnitt 4.3.4 beschrieben. Durch die dunkle Einfärbung soll eine zu starke Schwankung der Farbwerte vermieden werden. An dieser Stelle kann die Konstruktion zugunsten des Wirkungsgrades optimiert werden. Das Potential dieser Maßnahmen wird jedoch nicht im Rahmen dieser Arbeit quantifiziert.

An dieser Stelle wird die Empfehlung gegeben, die im Reflektor auftretenden Effekte

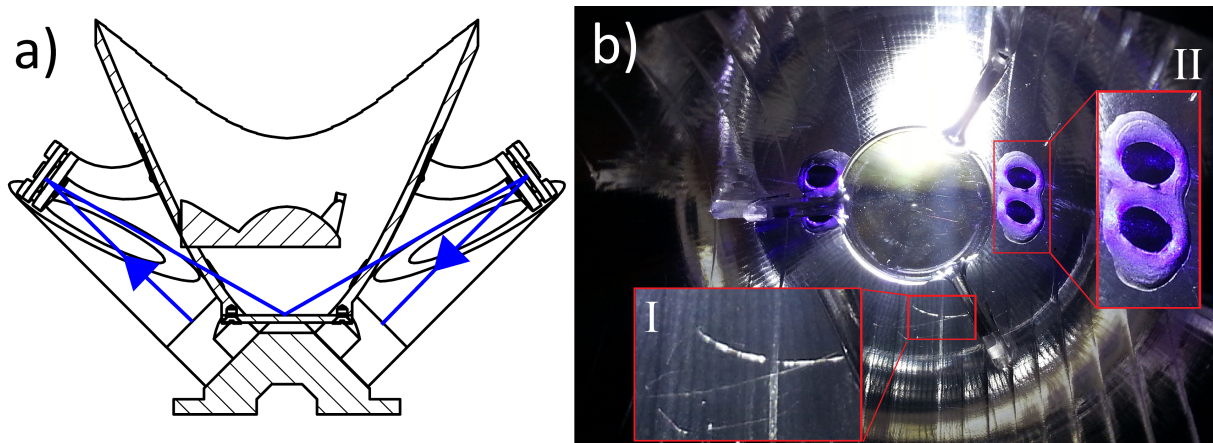


Abbildung 5.37: Beispiele für sonstige Verluste: a) Reflektion der Laserstrahlung an der Lumineszenzschicht mit anschließendem Austritt aus dem Reflektor. b) I Beschädigung an der Reflektorinnenseite.- II Diffuse Reflektionen am Rand der Bohrungen.

nachfolgend genauer zu untersuchen, da hier ein erheblicher Verlust von 23,7 % der radiometrischen und 19,0 % der fotometrischen Leistung auftritt.

6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die folgenden Angaben sind, sofern nicht anders genannt, auf eine Diodengehäusetemperatur von $\vartheta_{Case}=35\text{ °C}$ und einen Eingangsstrom von $I_E=0,6\text{ A}$ bezogen. Die Kühlleistung beträgt $P_{Kühl}=0,72\text{ W}$ bei einer Umgebungstemperatur von $\vartheta_{Umgebung}=20\text{ °C}$.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Erkenntnisse aus den Versuchen und deren Ergebnissen:

6.1 Technische Daten

Die Betriebstemperatur der Diodengehäuse von $\vartheta_{Case}=35\text{ °C}$ und der Eingangsstrom von $I_E=0,6\text{ A}$ werden gewählt, da mit diesen Parametern bei Verwendung der dazugehörigen Kühleinheit, mit einer Leistung von $P_{Kühl}=0,72\text{ W}$ ein thermisch stationärer Betrieb bei einer Umgebungstemperatur von $\vartheta_{Umgebung}=20\text{ °C}$ möglich ist.

Das Scheinwerfermodul erreicht bei einem Eingangsstrom $I_E(\vartheta_{Case}=35\text{ °C})=0,6\text{ A}$ und einer Eingangsleistung von $P_E=10,41\text{ W}$ (ohne Kühlleistung) eine Lichtausbeute von $\eta_V(I_E=0,6\text{ A})=23,2\frac{\text{lm}}{\text{W}}$. Hierbei erreicht die eingesetzte Lumineszenzschicht bei einer großflächigen Verteilung des Laserlichtes und einem Einstrahlwinkel von $\alpha=30^\circ$ eine Lichtausbeute von $\Phi_V=175\text{-}200\frac{\text{lm}}{\text{W}}$.

Der radiometrische Wirkungsgrad ist hierbei $\eta_e=8,7\%$ bei einer optischen Ausgangsleistung von $P_{Nutz}=908,1\text{ mW}$. Die maximale Beleuchtungsstärke auf der virtuellen ECE-Testwand in 25 m Abstand zum Scheinwerfermodul beträgt $E_V=53,5\text{ lx}$.

Bei der Beleuchtung werden Farbunregelmäßigkeiten gemessen, die im CIE-Normfarbsystem in einem Bereich von $0,24 \leq x \leq 0,30$ und $0,18 \leq y \leq 0,29$ liegen. Sämtliche x,y-Farbwerte weisen niedrigere als die nach der ECE 113 für den CIE ECE-

Weißbereich festgelegten Werte auf. Sowohl die Farbverteilung als auch die Beleuchtungsstärke sind horizontal und vertikal symmetrisch verteilt. In Abbildung 6.1 sind die Farbtemperatur und die Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit vom Winkel auf der oben genannten virtuellen Testwand dargestellt.

Die technischen Daten des vollständig montierten Moduls sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Die Analyse der Einzelkomponenten ergibt die folgende Leistungsverluste:

Die Analyse der Einzelkomponenten erfolgt ebenfalls bei $\vartheta_{Umgebung}=20\text{ °C}$ und $\vartheta_{Case}=35\text{ °C}$. Hierbei wird die zur Kühlung erforderliche Leistung nicht einbezogen.

Der größte Leistungsverlust wird durch die Laserdioden bei der Umwandlung der elektrischen in optische Energie verursacht. Der Wirkungsgrad der vier Dioden beträgt insgesamt $\eta_{Diode}=21,7\%$. Die Laserdioden weisen jeweils unterschiedliche radiometrische Wirkungsgrade in einem Bereich von $\eta_{Diode,Einzel}=21,2 - 22,4\%$ auf.

Bei der Kollimation tritt ein Verlust von $6,8\%$ auf. Dies entspricht einem Transmissionsgrad der Linsen von $\eta_{Kollimationslinse}=93,2\%$. Die Transmissionsgrade der vier Kollimationslinsen liegen in einem Bereich von $\eta_{Kollimationslinse,Einzel}=90,9 - 95,7\%$.

Die vier Umlenkspiegel reflektieren zusammen $\eta_{Umlenkspiegel}=94,6\%$ der optischen Leistung und weisen in der Einzelbetrachtung einen Reflektionsgrad von $\eta_{Umlenkspiegel,Einzel}=92,4 - 96,4\%$ auf.

Auf der Strecke zwischen den Kollimationslinsen und der Lumineszenzschicht tritt ein Verlust von $P_{Streu}=217\text{ mW}$ auf. Dies entspricht einem Verlust von $10,3\%$ der radiometrischen Laserleistung. Die relativen Verlustleistungen liegen in einem Bereich von $P_{Streu,Einzel}=7,2 - 16,2\%$. Der größte Verlust tritt bei dem zum Diode 3 gehörenden Lichtpfad auf.

Die Lumineszenzschicht weist einen radiometrischen Wirkungsgrad von $\eta_{LS}=72\%$ auf. Hierbei werden von 1778 mW auftreffender optischer Laserleistung 500 mW in Wärme umgewandelt. Ein Anteil von 1280 mW wird reflektiert oder in langwelligeres Licht ($\lambda > 450\text{ nm}$) konvergiert. Beim oben genannten Betriebspunkt wird bei einer Lichtausbeute von $174,8\frac{\text{lm}}{\text{W}}$ eine Lichtleistung von $310,7\text{ lm}$ emittiert.

Durch den Einsatz der Scheinwerferlinse tritt ein Verlust von 3,6 % bzw. $\Delta P_{Linse} = -47 \text{ mW}$ der radiometrischen, optischen Leistung des Scheinwerfermoduls auf. Die Lichtausbeute des Moduls wird durch diese Linse um 4,2 % gesenkt.

Nach Abzug aller näher betrachteten Verlustleistungen verbleibt eine Leistungsdifferenz zur optischen Ausgangsleistung des Scheinwerfermoduls von $\Delta P_{Sonst} = 325,2 \text{ mW}$ und $\Delta \Phi_{Sonst} = 56,6 \text{ lm}$. Diese Verlustleistung kann auf die Effekte im Reflektor nach Auftreffen des Laserlichtes auf die Lumineszenzschicht eingegrenzt werden. Durch diese Verlustleistungen wird die radiometrische Leistung des Moduls um 23,7 % und der Lichtstrom um 19,0 % gesenkt.

Die radiometrische optische Ausgangsleistung des Scheinwerfermoduls beträgt 908,1 mW, der Lichtstrom 241,1 lm.

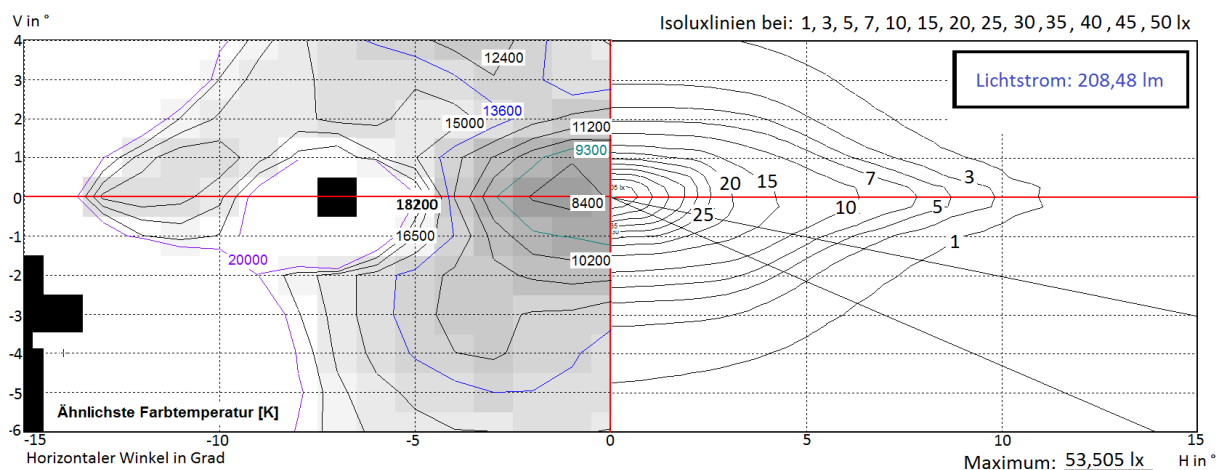


Abbildung 6.1: Farbtemperaturen und Beleuchtungsstärke auf einer 25 m entfernten virtuellen Testwand, Maximale Beleuchtungsstärke bei 53,51 lx/ TCC \approx 8400 K.

Eingangsstrom	I_E	0,6 A
Eingangsleistung	P_E	10,41 W
Gehäusetemperatur der Laserdioden	ϑ_{Case}	35 °C
max. Kühlleistung (Lüfterleistung)	$P_{Kühl}$	0,72 W
Strahlungsfluss	Φ_e	0,908 W
Radiometrischer Wirkungsgrad (ohne Kühlleistung)	η_e	8,7%
Lichtstrom	Φ_V	241,1 lm
Lichtausbeute (ohne Kühlleistung)	η_V	$23,2 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$
Lichtausbeute der Lumineszenzschicht	$\eta_{V,Lum}$	$175 - 200 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$
Max. Beleuchtungsstärke auf ECE Testbildschirm (25m)	E_V	53,5 lx
Fabwerte im CIE-Normfarbsystem nach DIN 5033-3	CIE-x	$0,24 \leq x \leq 0,30$
	CIE-y	$0,18 \leq y \leq 0,29$

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Leistungsdaten des Scheinwerfermoduls.

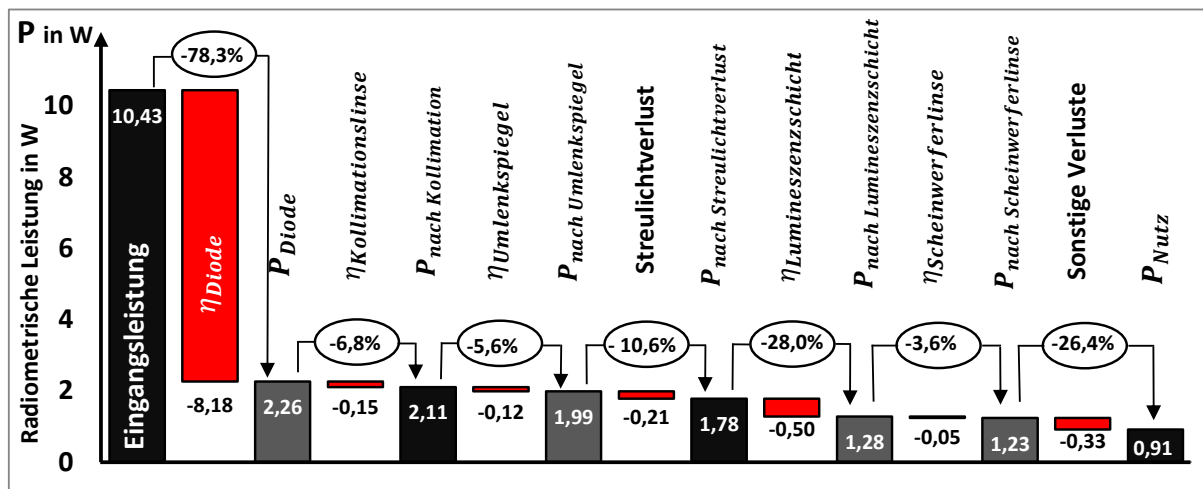


Abbildung 6.2: Zusammenfassung der optischen radiometrischen Lichtleistungen an den Messpunkten des vorliegenden Scheinwerfermoduls bei $\vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C}$ (schwarze Balken \rightarrow direkt am Scheinwerfer im stationären Betrieb aufgezeichnete Parameter).

6.2 Optimierungspotentiale

Basierend auf den Versuchen können folgende Optimierungspotentiale benannt werden:

Durch eine Erhöhung des Eingangsstromes von $I_E=0,6\text{ A}$ auf $I_E=0,8\text{ A}$ kann bei $\vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C}$ eine Steigerung der Lichtausbeute von $\eta_V(0,6\text{ A}, \vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C})=23,2\frac{\text{lm}}{\text{W}}$ auf $\eta_V(0,8\text{ A}, \vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C})=23,9\frac{\text{lm}}{\text{W}}$ erzielt werden. Dies entspricht einer um 3,2 % erhöhten Lichtausbeute. Die Strahlungsausbeute steigt hierbei ebenfalls von $\eta_e(0,6\text{ A}, \vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C})=8,7\%$ auf $\eta_e(0,8\text{ A}, \vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C})=9,0\%$ um 3,2 %. Eine weitere Steigerung des Eingangsstromes bewirkt keine messbare Steigerung der Effizienz des Systems.

Der Betrieb des Systems bei einer um $\Delta\vartheta=-5^{\circ}\text{C}$ abgesenkten Diodengehäusetemperatur ermöglicht eine Erhöhung der Lichtausbeute von $\eta_V(0,6\text{ A}, \vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C})=23,2\frac{\text{lm}}{\text{W}}$ auf $\eta_V(0,6\text{ A}, \vartheta_{Case}=30^{\circ}\text{C})=24,3\frac{\text{lm}}{\text{W}}$ um 4,7 %. Die Strahlungsausbeute steigt von $\eta_e(0,6\text{ A}, \vartheta_{Case}=35^{\circ}\text{C})=8,7\%$ auf $\eta_e(0,6\text{ A}, \vartheta_{Case}=30^{\circ}\text{C})=9,4\%$ und erreicht somit einen um 7,8 % erhöhten Wert.

Durch den Austausch der gealterten durch neue Dioden ist eine Steigerung der kumulierten optischen Ausgangsleistung der vier eingesetzten Laserdioden um 10% von $P_{Dioden,alt}=2,26\text{ W}$ auf $P_{Dioden,neu}=2,48\text{ W}$ möglich. Zugleich sinkt die aufgenommene

elektrische Leistung insgesamt um 1,1 %, sodass das Verhältnis von aufgenommener elektrischer Leistung und der radiometrischen Ausgangsleistung der vier Laserdioden zusammengefasst von 21,7 % auf 24,1 % erhöht werden kann.

Die Erneuerung der vier Kollimationslinsen führt insgesamt zu einem um 2,7 % gesteigerten Transmissionsgrad. Durch diese Maßnahme kann die kumulierte Transmissivität aller Linsen von 93,2 % auf 95,7 % erhöht werden.

Ein Austausch der vier eingesetzten Umlenkspiegel durch neuwertige erhöht potentiell den kumulierten Reflektionsgrad um 2,6 % von $\varrho_{e,Ges}=94,6$ % auf $\varrho_{e,opt}=97,1$ %.

Der Streulichtverlust von $P_{Streu}(I_E=0,6 \text{ A}, \vartheta_{Case}=35 \text{ °C})=0,21 \text{ W}$ kann bei verbesserter Kollimierung und einer optimierten Ausrichtung der Laserdioden reduziert werden. Die verbesserte Ausrichtung der Dioden ist erforderlich, da ein Teil der optischen Leistung auf die Halterung der Umlenkspiegel trifft und nicht gerichtet reflektiert wird. Weiterhin ist eine Vergrößerung des Justagewinkels der Umlenkspiegel von Vorteil, da das reflektierte Laserlicht nicht optimal auf die Durchgangsbohrungen im Reflektor ausgerichtet werden kann. So wird ein unbestimmter Anteil der optischen Leistung an der Außenwand des Reflektors diffus reflektiert und trifft nicht auf die Lumineszenzschicht.

Die Farbe der verwendeten Abschirmungen kann zur Senkung des Streulichtverlustes beitragen. Als Streulichtverlust wird im Rahmen dieser Arbeit die Differenz zwischen der kollimierten optischen Diodenleistung und der optischen Leistung, die die Lumineszenzschicht erreicht, abzüglich der durch die Umlenkspiegel verursachten Reflektionsverluste, bezeichnet. Durch die Verwendung von transparenten statt schwarzer Abschirmungen lässt sich dieser Streulichtverlust um 5,2 % senken, während die Lichtleistung, die die Lumineszenzschicht erreicht um 0,6 % zunimmt. Die Lichtleistung des Scheinwerfermoduls kann so um 1,2 % gesteigert werden.

Die Nutzung der Lumineszenzschicht kann durch einen vergrößerten Einstrahlwinkel der Laserstrahlung optimiert werden. Bei der vorliegenden Konstruktion beträgt der Einstrahlwinkel $\alpha=30^\circ$. Bei Vergrößerung dieses Winkels auf $\alpha=45^\circ$ tritt eine um 4,8 % erhöhte Lichtausbeute im Bezug auf die auftreffende optische Laserleistung auf. Diese kann durch einen Einstrahlwinkel von $\alpha=60^\circ$ um 7,6 % gegenüber der ursprünglichen Lichtausbeute bei $\alpha=30^\circ$ gesteigert werden. Weiterhin tritt bei vergrößertem Winkel eine Verschiebung der Farbwerte zu größeren x,y-Werten

im CIE-Normfarbsystem in Richtung des in der ECE-Regelung 113 definierten Weißbereiches auf. Die emittierten Farbwerte liegen im CIE-Normfarbsystem bei $\alpha=30^\circ$ in einem Bereich von $(0,264 \leq x \leq 0,266)/(0,221 \leq y \leq 0,225)$. Die Vergrößerung des Einstrahlwinkels auf $\alpha=45^\circ$ führt zu $(0,277 \leq x \leq 0,278)/(0,245 \leq y \leq 0,248)$ und $\alpha=60^\circ$ zu $(0,277 \leq x \leq 0,280)/(0,246 \leq y \leq 0,252)$. Demnach ist ein größerer Einstrahlwinkel im Bezug auf die Lichtausbeute und den Farbort des emittierten Lichtes vorteilhaft. In den Versuchen zeigt sich bei Vergrößerung dieses Winkels eine erhöhte Wärmeentwicklung an der Lumineszenzschicht, die wiederum die Lichtausbeute vermindert und zu erhöhten Farbtemperaturen führt. Daher ist die Kühlung der Lumineszenzschicht dem erhöhten Wärmeeintrag entsprechend auszulegen.

Eine großflächige Verteilung der optischen Laserleistung auf der Lumineszenzschicht führt im Vergleich zu einer punktuellen Fokussierung zu einer 4,3-10,6 % erhöhten Lichtausbeute. Jedoch führt ein größerer Spot zu einer verringerten Abbildungsschärfe, sodass im Bezug auf die Spotgröße ein Kompromiss zwischen einer hohen Lichtausbeute und einer ausreichend präzisen Lichtverteilung erforderlich ist.

Weiterhin weist die Lumineszenzschicht an einigen Stellen sichtbare thermische und mechanische Beschädigungen auf. Daher ist ein Austausch dieser Schicht zu empfehlen.

In der folgenden Tabelle 6.2 sind die quantifizierten Optimierungspotentiale und deren Auswirkungen aufgeführt.

Zum Abschluss sind tabellarisch einige Beispiele für die Auswirkungen der gefundenen Potentiale auf die Leistungsparameter des Gesamtsystems aufgeführt. Die Berechnungen basieren auf der Annahme, dass sich die einzelnen Komponenten linear verhalten.

In Tabelle 6.3 sind theoretische Systeme aufgeführt, bei denen ein Austausch einzelner Komponenten, jedoch keine Änderung der Konstruktion, vorgesehen ist.

In Tabelle 6.4 sind theoretische Systeme, bei denen eine Veränderung vom Einstrahlwinkel des Laserlichtes auf die Lumineszenzschicht vorgenommen wird, aufgeführt. Für diese Veränderung ist ein Eingriff in die Konstruktion notwendig.

Maßnahme:	Nicht optimiert:	Optimiert:
Erhöhung des Eingangsstroms von 0,6 auf 0,8 A	0,6A	0,8A
Lichtausbeute des Moduls	23,16 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	23,90 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$
Relative Veränderung	+3,2%	
Radiometrischer Wirkungsgrad des Moduls	8,7%	9,0%
Relative Veränderung	+3,2%	
Senkung der Diodengehäusetemperatur von 35 °C auf 30 °C	35 °C	30 °C
Lichtausbeute des Moduls	23,16 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	24,26 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$
Relative Veränderung	+4,7%	
Radiometrischer Wirkungsgrad des Moduls	8,7%	9,4%
Relative Veränderung	+7,8%	
Austausch der Dioden	Gebraucht	Neu
Optische Leistung der Dioden (I = 0,6 A)	2,26 W	2,48 W
Relative Veränderung	+10,0%	
Wirkungsgrad der Dioden	21,7%	24,1%
Relative Veränderung	+11,1%	
Austausch der Spiegel	Gebraucht	Neu
Reflektierte optische Leistung	1,99 W	2,04 W
Relative Veränderung	+2,7%	
Reflektionsgrad	94,6%	97,1%
Relative Veränderung	+2,6%	
Austausch der Kollimationslinsen	Gebraucht	Neu
Transmittierte optische Leistung	2,11 W	2,16 W
Relative Veränderung	+2,7%	
Transmissionsgrad	93,2%	95,7%
Relative Veränderung	+2,7%	
Transparente statt schwarze Abschirmungen	Schwarz	Transparent
Streulichtverlust	0,214 W	0,203 W
Relative Veränderung	-5,2%	
Veränderung des Laserfokus auf LS bei $\alpha = 30^\circ$	Fokus 1 30°	Fokus 2 30°
Lichtausbeute der Lumineszenzschicht	174,8 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	193,4 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$
Relative Veränderung	+10,6%	
Veränderung des Laserfokus auf LS bei $\alpha = 60^\circ$	Fokus 1 60°	Fokus 2 60°
Lichtausbeute der Lumineszenzschicht	188 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	196,1 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$
Relative Veränderung	+4,3%	
Die folgenden Werte wurden mit neuem Versuchsaufbau erfasst und linear berechnet :		
Veränderung des LS Einstrahlwinkels auf 45°	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$
Lichtausbeute der Lumineszenzschicht	174,8 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	183,2 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$
Relative Veränderung	+4,8%	
Radiometrischer Wirkungsgrad der Lumineszenzschicht	72,0%	71,0%
Relative Veränderung	-1,4%	
Veränderung des LS Einstrahlwinkels auf 45°	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 60^\circ$
Lichtausbeute der Lumineszenzschicht	174,8 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	188,0 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$
Relative Veränderung	+7,6%	
Radiometrischer Wirkungsgrad der Lumineszenzschicht	72,0%	69,7%
Relative Veränderung	-3,2%	

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der quantifizierten Optimierungspotentiale.

Maßnahme: neue Laserdioden

		Vor Optimierung		Nach Optimierung
Eingangsleistung	P_E	10,43 W	-1,1%	10,32 W
Strahlungsfluss	ϕ_e	0,91 W	+10,1%	1,00 W
Radiometrischer Wirkungsgrad	η_e	8,7%	+11,3%	9,7%
Lichtstrom	ϕ_V	241,1 lm	+10,1%	265,5 lm
Lichtausbeute	η_V	23,11 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	+11,3%	25,72 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

Maßnahme: neue Kollimationslinsen

		Vor Optimierung		Nach Optimierung
Eingangsleistung	P_E	10,43 W	+0,0%	10,43 W
Strahlungsfluss	ϕ_e	0,91 W	+2,9%	0,93 W
Radiometrischer Wirkungsgrad	η_e	8,7%	+2,9%	9,0%
Lichtstrom	ϕ_V	241,1 lm	+2,9%	248,1 lm
Lichtausbeute	η_V	23,11 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	+2,9%	23,77 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

Maßnahme: neue Umlenkspiegel

		Vor Optimierung		Nach Optimierung
Eingangsleistung	P_E	10,43 W	+0,0%	10,43 W
Strahlungsfluss	ϕ_e	0,91 W	+2,8%	0,93 W
Radiometrischer Wirkungsgrad	η_e	8,7%	+2,8%	8,9%
Lichtstrom	ϕ_V	241,1 lm	+2,8%	247,9 lm
Lichtausbeute	η_V	23,11 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	+2,8%	23,76 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

Maßnahme: transparente statt schwarze Abschirmungen

		Vor Optimierung		Nach Optimierung
Eingangsleistung	P_E	10,43 W	+0,0%	10,43 W
Strahlungsfluss	ϕ_e	0,91 W	+0,6%	0,91 W
Radiometrischer Wirkungsgrad	η_e	8,7%	+0,6%	8,8%
Lichtstrom	ϕ_V	241,1 lm	+0,6%	242,6 lm
Lichtausbeute	η_V	23,11 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	+0,6%	23,25 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

Maßnahme: neue Laserdioden, neue Kollimationslinsen, neue Umlenkspiegel, transparente statt schwarze Abschirmung

		Vor Optimierung		Nach Optimierung
Eingangsleistung	P_E	10,43 W	-1,1%	10,32 W
Strahlungsfluss	ϕ_e	0,91 W	+16,8%	1,06 W
Radiometrischer Wirkungsgrad	η_e	8,7%	+18,1%	10,3%
Lichtstrom	ϕ_V	241,1 lm	+16,8%	281,6 lm
Lichtausbeute	η_V	23,11 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	+18,1%	27,28 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

Maßnahme: neue Laserdioden, neue Kollimationslinsen, neue Umlenkspiegel, transparente statt schwarze Abschirmungen, Fokus 2 statt Fokuss 1 auf Lumineszenzschicht

		Vor Optimierung		Nach Optimierung
Eingangsleistung	P_E	10,43 W	-1,1%	10,32 W
Strahlungsfluss	ϕ_e	0,91 W	+16,8%	1,06 W
Radiometrischer Wirkungsgrad	η_e	8,7%	+18,1%	10,3%
Lichtstrom	ϕ_V	241,1 lm	+29,2%	311,6 lm
Lichtausbeute	η_V	23,11 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	+30,6%	30,18 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

Tabelle 6.3: Auswahl an optimierten Systemen, bei denen keine konstruktive Änderungen notwendig sind.

Maßnahme: α von 30° auf 45° vergrößern

		Vor Optimierung		Nach Optimierung
Eingangsleistung	P_E	10,43 W	+0,0%	10,43 W
Strahlungsfluss	Φ_e	0,91 W	-1,4%	0,90 W
Radiometrischer Wirkungsgrad	η_e	8,7%	-1,4%	8,6%
Lichtstrom	Φ_V	241,1 lm	+4,8%	252,6 lm
Lichtausbeute	η_V	23,11 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	+4,8%	24,21 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

Maßnahme: α von 30° auf 60° vergrößern

		Vor Optimierung		Nach Optimierung
Eingangsleistung	P_E	10,43 W	+0,0%	10,43 W
Strahlungsfluss	Φ_e	0,91 W	-3,0%	0,88 W
Radiometrischer Wirkungsgrad	η_e	8,7%	-3,0%	8,4%
Lichtstrom	Φ_V	241,1 lm	+7,7%	259,8 lm
Lichtausbeute	η_V	23,11 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	+7,7%	24,89 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

Maßnahme: neue Laserdioden, neue Kollimationslinsen, neue Umlenkspiegel, Einstrahlwinkel α von 30° auf 45° vergrößern

		Vor Optimierung		Nach Optimierung
Eingangsleistung	P_E	10,43 W	-1,1%	10,32 W
Strahlungsfluss	Φ_e	0,91 W	+14,5%	1,04 W
Radiometrischer Wirkungsgrad	η_e	8,7%	+15,7%	10,1%
Lichtstrom	Φ_V	241,1 lm	+21,6%	293,3 lm
Lichtausbeute	η_V	23,11 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	+23,0%	28,41 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

Maßnahme: neue Laserdioden, neue Kollimationslinsen, neue Umlenkspiegel, transparente statt schwarze Abschirmungen, Einstrahlwinkel α von 30° auf 45° vergrößern

		Vor Optimierung		Nach Optimierung
Eingangsleistung	P_E	10,43 W	-1,1%	10,32 W
Strahlungsfluss	Φ_e	0,91 W	+15,2%	1,05 W
Radiometrischer Wirkungsgrad	η_e	8,7%	+16,4%	10,1%
Lichtstrom	Φ_V	241,1 lm	+22,4%	295,1 lm
Lichtausbeute	η_V	23,11 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	+23,7%	28,58 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

Maßnahme: neue Laserdioden, neue Kollimationslinsen, neue Umlenkspiegel, transparente statt schwarze Abschirmungen, Einstrahlwinkel α von 30° auf 60° vergrößern

		Vor Optimierung		Nach Optimierung
Eingangsleistung	P_E	10,43 W	-1,1%	10,32 W
Strahlungsfluss	Φ_e	0,91 W	+13,1%	1,03 W
Radiometrischer Wirkungsgrad	η_e	8,7%	+14,3%	9,9%
Lichtstrom	Φ_V	241,1 lm	+25,6%	302,9 lm
Lichtausbeute	η_V	23,11 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	+27,0%	29,34 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

Maßnahme: neue Laserdioden, neue Kollimationslinsen, neue Umlenkspiegel, transparente statt schwarze Abschirmungen, Einstrahlwinkel α von 30° auf 60° vergrößern, Fokus 2 statt Fokus 1 auf Lumineszenzschicht

		Vor Optimierung		Nach Optimierung
Eingangsleistung	P_E	10,43 W	-1,1%	10,32 W
Strahlungsfluss	Φ_e	0,91 W	+13,1%	1,03 W
Radiometrischer Wirkungsgrad	η_e	8,7%	+14,3%	9,9%
Lichtstrom	Φ_V	241,1 lm	+31,0%	315,9 lm
Lichtausbeute	η_V	23,11 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$	+32,4%	30,60 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

Tabelle 6.4: Auswahl an optimierten Systemen, bei denen konstruktive Änderungen notwendig sind.

7 Fazit und Ausblick

Basierend auf den experimentellen Untersuchungen des vorliegenden Moduls und der dazugehörigen Komponenten können die Leistungsdaten der Konstruktion bestimmt und eine Vielzahl an Optimierungspotentialen erarbeitet werden.

Das Scheinwerfermodul erreicht bei einer Leistungsaufnahme von 10,41 W eine Lichtausbeute von $23,2 \frac{lm}{W}$. Die maximale Beleuchtungsstärke auf einem 25 m entfernten Testbildschirm nach ECE-Regelung 113 beträgt 53,5 lm. Es tritt eine farbliche Inhomogenität auf, bei der die niedrigsten Farbtemperaturen (≈ 8400 K) und die maximale Beleuchtungsstärke sich überlagern.

Anhand Untersuchungen der optischen Scheinwerferkomponenten wird deutlich, dass die eingesetzten Linsen- und Spiegelmaterialien hinsichtlich ihrer Transmissions- und Reflexionseigenschaften für die Verwendung in dem Modul geeignet sind.

Die zuvor im Laserscheinwerfermodul eingesetzten Dioden weisen aufgrund einer thermischen Schädigung einen erheblich verringerten Wirkungsgrad auf. Ein Austausch der Laserdioden durch neuwertige führt zu einer um 11,1 % gesteigerten Lichtausbeute des Moduls. Weiterhin wird durch eine um 5 °C abgesenkte Diodengehäusetemperatur eine um 4,7 % gesteigerte Lichtausbeute erzielt. Dies zeigt, dass eine Überarbeitung des derzeit zum Einsatz kommenden Kühlsystems erforderlich ist.

Durch die Vergrößerung des Einstahlwinkels auf die Lumineszenzschicht von $\alpha = 30^\circ$ auf $\alpha = 60^\circ$ kann die Lichtausbeute um bis zu 7,6 % erhöht werden. Dieser Ansatz führt zur Emission von niedrigeren Farbtemperaturen bei gleichzeitig gesteigerter Wärmeentwicklung. Die großflächige Verteilung der optischen Laserleistung auf der Lumineszenzschicht führt im Vergleich zu einer punktuellen Fokussierung zu einer 4,3-10,6 % erhöhten Lichtausbeute. Jedoch führt ein größerer Spot zu einer verringerten Abbildungsschärfe.

Erhöhte Leistungsverluste sind häufig auf Verunreinigungen der eingesetzten optischen Bauteile, sowie einer nicht optimalen Strahlführung des Laserlichtes zurückzuführen. Insbesondere eine Erneuerung der Dioden, der Kollimationslinsen, sowie eine Reinigung der Umlenkspiegel sind zur Effizienzsteigerung des Laserscheinwerfermoduls erforderlich. Zur Reduzierung der Streulichtverluste ist eine Erweiterung des einstellbaren Justagewinkels der Umlenkspiegel zu empfehlen.

Das Potential der ermittelten Optimierungspotentiale für die keine Veränderung der vorliegenden Scheinwerferkonstruktion erforderlich ist beträgt im Bezug auf die Lichtausbeute 30,6 %.

Bei Vergrößerung des Winkels, mit der das Laserlicht auf die Lumineszenzschicht trifft ist eine konstruktive Änderung des Scheinwerfermoduls erforderlich. Mit dieser Maßnahme kann die Lichtausbeute um bis zu 32,4 % gesteigert werden.

Zur weiteren Leistungssteigerung des Laserscheinwerfermoduls ist eine detaillierte Analyse zur Minimierung der hohen Verluste im Hauptreflektor zu empfehlen.

Literaturverzeichnis

- [Eich06] EICHLER J., Eichler H. J.: *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [Eich14] EICHLER, Jürgen: *Physik für das Ingenieursstudium*. 5. Auflage. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014
- [Hart14] HARTEN, Ulrich: *Physik: Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer Vieweg, 2014
- [Heri14] HERING, K.; Gutekunst J.: *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer Vieweg, 2014
- [Inte14] INTEMATRIX, Corporation. *Mixing Chamber Design Considerations for ChromaLit Remote Phosphor Light Sources*. 14.August 2014
- [Lach13] LACHMAYER, Prof. Dr.-Ing. R.: *Konstruktion optischer Systeme - Optischer Gerätebau*. Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, April 2013
- [Lach14] LACHMAYER, Prof. Dr.-Ing. R.; Wolf, Dipl.-Ing. A.: *Lichtmodule auf Basis von laseraktiviertem Leuchtstoff für den Einsatz als Zusatzfernlicht*. Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, 2014
- [Naum14] NAUMANN, G.; Löffler-Mang M.: *Handbuch Bauelemente der Optik*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2014
- [OSRA13] OSRAM, Opto Semiconductors G.: *Blaue Laser Diode 1.6 W in TO56 Bauform*. 2013. – Forschungsbericht
- [Tipl09] TIPLER, M.; Mosca G. u.: *Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure*. Spektrum Akademischer Verlag, 2009

Normen, Richtlinien

- [DIN5031] *DIN 5031-Teil 3: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik.*
Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 1982
- [ECE113] *ECE-Regelung 113.* BVMI, 2005
- [IEC60825] *Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen (IEC 60825-1:2007).* Beuth-Verlag, 2008

Anhang

A Auszug aus DIN 5031-Teil 3

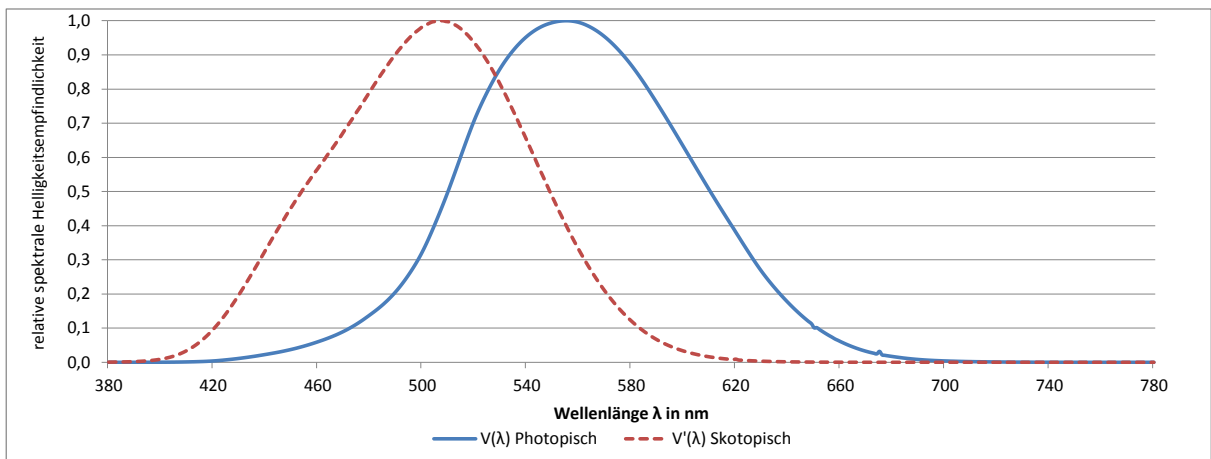


Abbildung A.1: V-Lambda-Kurve nach [DIN5031].

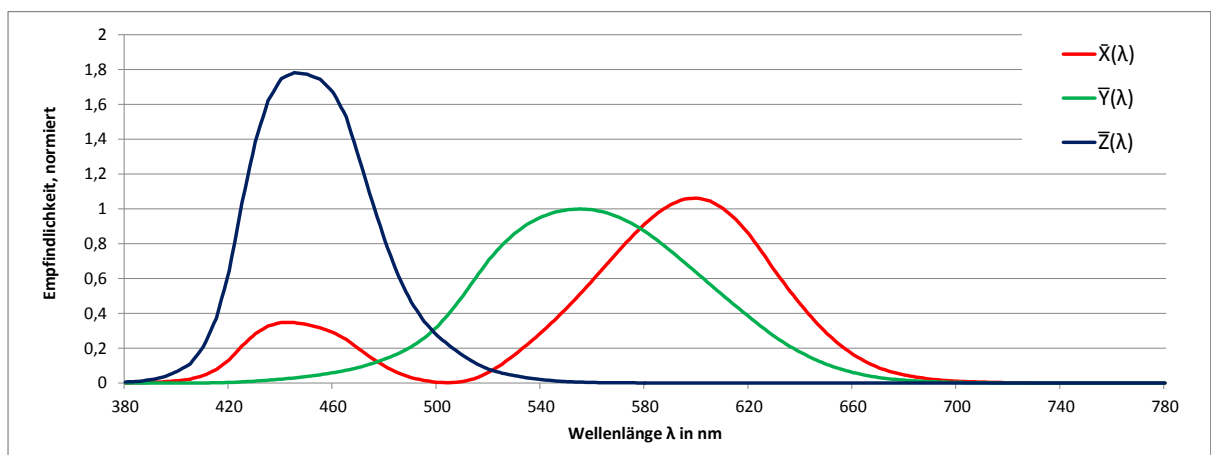


Abbildung A.2: Tristimuluskurven nach [DIN5031].

B Auszug aus dem Osram Datenblatt der Laserdiode PL TB450B [OSRA13]

Typ Type	Opt. Ausgangsleistung Optical Output Power P_{op} (W) (T_{case} 25°C)	Bestellnummer Ordering Code
PL TB450B	1.6	Q65111A3513

Grenzwerte

Betrieb außerhalb dieser Bedingungen kann das Bauteil schädigen

Maximum Ratings

Operation outside these conditions may damage the device

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Values		Einheit Unit
		min.	max.	
Betriebsstrom ($T_{Gehäuse}$ 25°C) ^{1) 2)} Operating Current (T_{Case} 25°C) ^{1) 2)}	I_F	–	1.6	A
Betriebstemperatur ^{1) 2)} Operating Temperature ^{1) 2)}	T_{Case}	- 20	+ 70	°C
Lagertemperatur Storage Temperature	T_{stg}	- 40	+ 85	°C
Sperrstrom Reverse Current	I_R	–	20	mA
Löttemperatur max. 10 sec. Soldering Temperature max. 10 sec.	T_{solder}	–	260	°C
Sperrschichttemperatur ^{1) 2)} Junction temperature ^{1) 2)}	T_j	–	150	°C

¹⁾ Der Betrieb bei den Grenzwerten reduziert die Lebensdauer. Für Langzeitbetrieb darf eine maximale Sperrschichttemperatur von 100°C nicht überschritten werden.
Operation at maximum ratings will reduce the life time. For long term operation a maximum junction temperature of 100°C may not be exceeded.

²⁾ Eine maximale optische Ausgangsleistung von 1.8W darf nicht überschritten werden.
A maximum optical output power of 1.8W may not be exceeded.

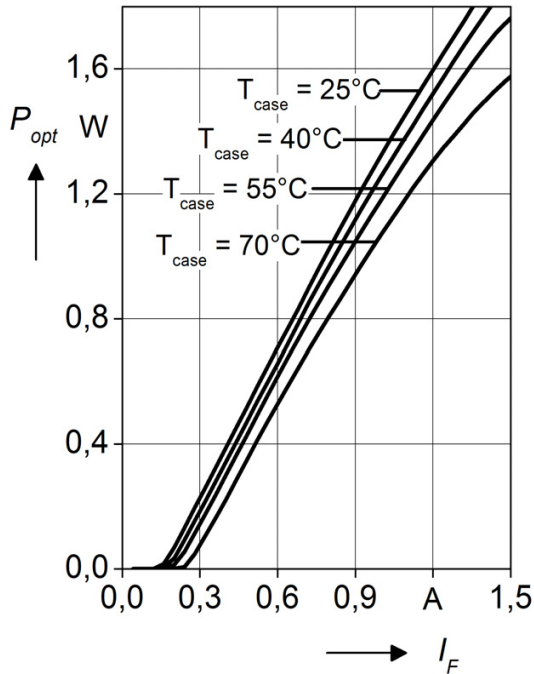
Laserkennwerte ($T_{\text{Gehäuse}} = 25\text{ °C}$)
Laser Characteristics ($T_{\text{case}} = 25\text{ °C}$)

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Values			Einheit Unit
		min.	typ.	max.	
Emissionswellenlänge ¹⁾ Emission Wavelength ¹⁾	λ_{peak}	440	450	460	nm
Schwellstrom Threshold Current	I_{th}	–	0.2	0.3	A
Optische Ausgangsleistung ($I_f = 1.2\text{ A}$) Optical output power ($I_f = 1.2\text{ A}$)	P_{op}	1.3	1.6	–	W
Betriebsstrom ($P_{\text{op}} = 1.6\text{ W}$) Operating Current ($P_{\text{op}} = 1.6\text{ W}$)	I_F	–	1.2	1.5	A
Betriebsspannung ($P_{\text{op}} = 1.6\text{ W}$) Operating Voltage ($P_{\text{op}} = 1.6\text{ W}$)	V_F	–	4.8	6.0	V
Strahldivergenz (FWHM) Beam Divergence (FWHM)	θ_{\parallel}	–	7	–	deg
Strahldivergenz (FWHM) Beam Divergence (FWHM)	θ_{\perp}	19	23	27	deg
Polarisation Verhältnis ¹⁾ Polarization Ratio ¹⁾	PR	–	100:1	–	TE:TM
Thermischer Widerstand (pn-Übergang zu Gehäuse) Thermal resistance (junction to case)	R_{th}	–	15	–	K/W

¹⁾ Standardbetriebsbedingungen beziehen sich auf $P_{\text{op}} = 1.6\text{ W}$ Ausgangsleistung.
Standard operating conditions refer for to an output power of $P_{\text{op}} = 1.6\text{ W}$.

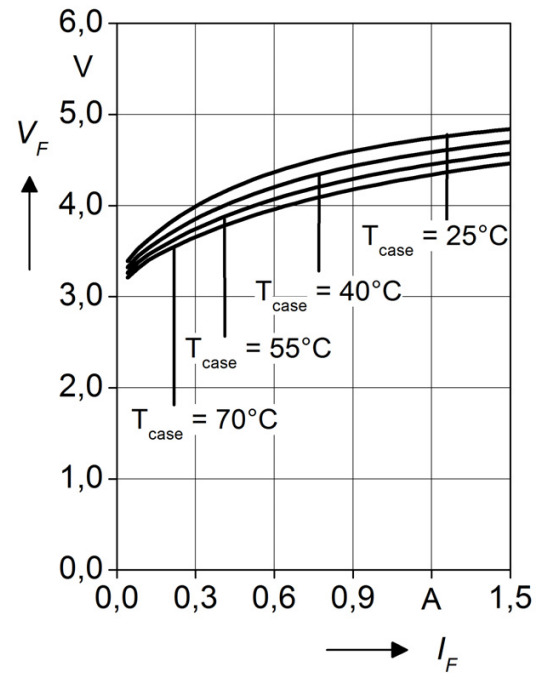
Optische Ausgangsleistung
Optical Output Power

$P_{op} = f(I_F)$



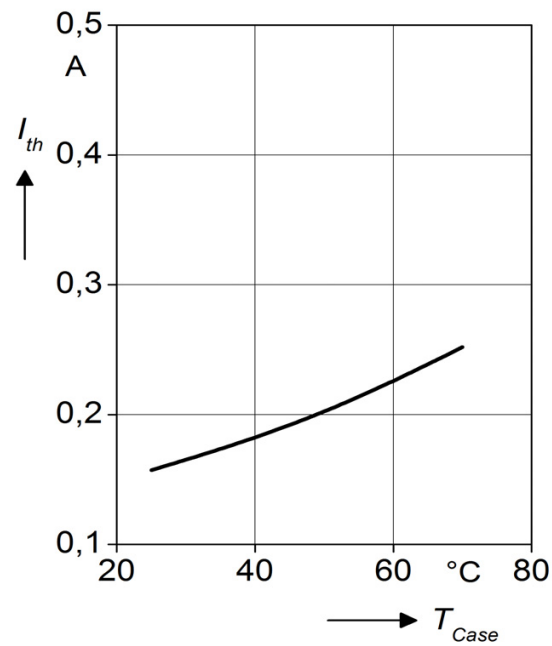
Betriebsspannung
Operating Voltage

$V_F = f(I_F)$



Schwellstrom
Threshold Current

$I_{th} = f(T_{Case})$



Emissionswellenlänge
Emission Wavelength

$\lambda = f(T_{Case})$

