



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Simulation des Bildaufbaus in einem Laserprojektionssystem für die automobile Frontbeleuchtung

Ausgeführt am Institut für

Analysis und Scientific Computing

der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Felix Breiteneker

durch

Nina Winterer

Buchleiten 162

A - 3312 Oed

10. September 2013

Danksagung und Widmung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die mich nicht nur bei der Erstellung meiner Diplomarbeit, sondern auch während meiner gesamten Studienzeit unterstützt haben.

Mein Dank gilt meinem Diplomarbeitsbetreuer Herrn Ao.Univ.Prof. Felix Breitenecker, der mir diese Industriediplomarbeit ermöglicht hat. Besonders möchte ich Frau Dipl.-Ing. Bettina Reisinger danken, die seitens der Firma ZKW als Betreuung zur Verfügung stand. Auch möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Friedrich Bauer und Herrn Dipl.-Ing. Andreas Moser bedanken, ohne die diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Allgemein gilt mein Dank dem gesamten ZKW-Projektteam für die gute Zusammenarbeit.

Für die stetige Unterstützung und Denkanstöße möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Heinzl und bei Herrn Univ.Lektor Dipl.-Ing. Nikolas Popper bedanken.

Außerdem möchte ich mich für die schöne Studienzeit herzlich bei meinen Studienkollegen und bei Herrn Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Andreas Körner bedanken.

Zudem danke ich meinen Freunden und Verwandten, die immer ein offenes Ohr für mich hatten und mich während meiner Diplomarbeitsphase unterstützt haben.

Ein sehr großer Dank gilt meinem Freund Florian, meinem Onkel Harald und Margit, die sowohl die Durchsicht und das Korrekturlesen auf sich nahmen, als auch mir stets den Rücken gestärkt haben.

Nicht zuletzt möchte ich mich herzlichst bei meinen Eltern, Geschwistern und Großeltern für die Unterstützung bedanken.

Ich widme diese Arbeit meinen Eltern, da sie mir dieses Studium ermöglicht und mich während meiner gesamten Studienzeit bedingungslos unterstützt haben.

10. September 2013

Kurzfassung

Die neueste Technik im Bereich der automobilen Frontbeleuchtung sind adaptive Scheinwerfersysteme, die ihre Lichtverteilung an die aktuelle Verkehrssituation anpassen. Dabei wird ständig mit Fernlicht gefahren, der Gegenverkehr wird ausgeblendet. Auch potentielle Gefahrenquellen können gezielt angeleuchtet werden. Mithilfe moderner Laserlichtquellen und MEMS-Scanner können effiziente und kompakte Systeme, die die Verkehrssicherheit bei Nacht deutlich erhöhen, entwickelt werden.

Die Firma ZKW - ZIZALA Lichtsysteme GmbH entwickelt zurzeit ein Konzept für ein Laserprojektionssystem, das als Zusatzfernlicht in einem Autofrontscheinwerfer eingesetzt werden soll. Dabei rastert ein fokussierter Laserstrahl, der über einen Mikrospiegel abgelenkt wird, eine fluoreszierende Keramikschiicht („Phosphor“ oder „Konverter“) ab. Der Laserstrahl regt den Phosphor lokal zum Leuchten an, sodass verschiedene Lichtverteilungen generiert werden können.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Bildaufbau auf dem Konverter, wobei zwei unterschiedliche Laserprojektionssysteme betrachtet werden. Zuerst wird ein 2D-Laserprojektionssystem, bei dem der Mikrospiegel in zwei Raumrichtungen resonant schwingt, analysiert. Durch die Spiegelschwingung wird auf dem Phosphor eine Lissajous-Figuren erzeugt. Für die Simulation der sich einstellenden Helligkeitsverteilung müssen dabei einige Effekte berücksichtigt werden, wie zum Beispiel Helligkeitsunterschiede, verschiedener Laserspotdurchmesser oder das Nachleuchten des Phosphors. Weiters werden auch die Intensitätswerte für das Dimmen des Lasers, um eine bestimmte Lichtverteilung erzeugen zu können, berechnet. Diese werden dann anhand eines Prototypen getestet. Die Simulationsergebnisse zeigen gute Übereinstimmung mit den vorgegebenen Lichtverteilungen. Beim zweiten System, dem 1D-Multi-Laserprojektionssystem, schwingt der Mikroscanner nur in eine Richtung, jedoch werden hier insgesamt sechs Laserdioden verwendet, die jeweils eine Zeile am Phosphor schreiben. Für dieses müssen ebenfalls einige Einflussfaktoren, wie die Parabelform der Zeilen und deren Schnittpunkte, beachtet werden. Auch hier sind die Ergebnisse plausibel.

Abstract

The latest technology in the field of automotive front lighting systems are adaptive vehicular headlamp systems, which adjust their light distribution to the current traffic situation. They are always driven with high beam, the oncoming traffic meanwhile is blinded out. In addition, potentially dangerous objects can be directly illuminated. Using modern laser light sources and MEMS micro-scanners allows developing efficient and compact systems, which significantly improve the road safety at night.

The company ZKW - ZIZALA light systems GmbH is developing a concept for a laser-based projection system, which will be used as additional high beam in a vehicular headlight. In this case a focused laser beam, which is deflected by a micro-mirror, scans a fluorescent ceramic layer („phosphor“ or „converter“). The laser beam locally excites the phosphor to glow. Therefore, different light distributions can be generated.

This thesis deals with the development of the image on the phosphor-coated surface, in which two different laser-based projection systems are considered. First a 2D laser-based projection system is analysed, in which the micro-mirror oscillates resonant in two spatial directions. Due to the fact that the mirror oscillates, Lissajous-figures are generated on the phosphor. In this case, some effects must be considered as far as the modelling is concerned, such as differences in brightness, diverse diameter of the laserspot or the phosphorescence of the converter. Furthermore, the intensity values to dim the laser are calculated for generating specific light distribution. Then these are tested on a prototype. The simulation results are in conformity with the predetermined light distributions. As far as the second system is concerned, namely the 1D multi-laser projection system, the micro-scanner oscillates in one direction only, but here a total of six laser diodes is used. Each of them writes one line on the phosphor. Some influencing factors, like the parabolic lines and their intersections, have to be considered as well. Here, the results are also feasible.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung und Widmung	i
Kurzfassung	ii
Abstract	iii
1 Einleitung	1
1.1 Lichtquellen	1
1.2 Motivation	3
1.3 Stand der Technik	3
1.3.1 Fahrerassistenzsysteme	4
1.3.2 Adaptive Scheinwerfersysteme	4
1.3.3 Blendfreies Fernlicht	7
1.3.4 Markierungslicht	7
1.4 Zukünftige Systeme	8
1.4.1 Matrix- / Pixel-Licht	8
1.4.2 Hochauflösende Systeme mit Mikroelektronik	9
1.4.2.1 DMD / DLP	9
1.4.2.2 Laser-Scanner-Systeme	10
1.5 Aufgabenstellung	11
2 Grundlagen	12
2.1 Lissajous-Figuren	12
2.2 Lasertechnik	14
2.2.1 Physikalische Grundlagen	15
2.2.2 Geschichte des Lasers	17
2.2.3 Aufbau des Lasers	17
2.2.4 Funktionsweise des Lasers	18

2.2.5	Eigenschaften des Laserlichts	19
2.2.6	Halbleiter-Laser (Laserdioden)	21
2.2.7	Lasertypen und Anwendungen	21
2.2.8	Gefahren des Lasers und Lasersicherheit	22
2.3	MEMS-Mikroscanner	24
2.4	Optische Konverter	26
3	2D-Laserprojektionssystem	28
3.1	Systembeschreibung	28
3.2	Modellierung der Lichtverteilung auf dem Phosphor und Simulationsergebnisse	30
3.2.1	Helligkeitsverteilung	32
3.2.1.1	Berechnung der Helligkeitswerte	33
3.2.1.2	Ungleichmäßige Helligkeitsverteilung	34
3.2.2	Nachleuchten des Phosphors	35
3.2.3	Ausblenden von bestimmten Bereichen	38
3.2.4	Dimmen des Lasers	39
3.2.5	Mehrmaliges Scannen eines Punktes	39
3.2.6	Berücksichtigung des unterschiedlichen Laserspotdurchmessers	42
3.2.7	Berücksichtigung des Zeilenabstandes der Lissajous-Figur	48
3.2.8	Simulation einer bestimmten vorgegebenen Helligkeitsverteilung	49
3.3	Validierung durch Prototypen	51
3.3.1	Prototyp	52
3.3.2	Bildaufbau	53
3.3.3	Berechnung der Intensitätswerte für die Elektronik	53
3.3.3.1	Grauwerte der vorgegebenen Helligkeitsverteilung	54
3.3.3.2	Helligkeitswerte	54
3.3.3.3	Helligkeitskompensation in x-Richtung	56
3.3.3.4	Einfluss des Zeilenabstandes	58
3.3.3.5	Gestauchte Bildprojektion	58
3.3.3.6	Vorgangsweise der Berechnung der Intensitätswerte	60
3.3.4	Ergebnisse	62
3.4	Fazit	65
4	1D-Multi-Laserprojektionssystem	66
4.1	Systembeschreibung	66

4.2	Modellierung der Lichtverteilung auf dem Phosphor und Simulationsergebnisse	68
4.2.1	Helligkeitsverteilung	69
4.2.1.1	Berechnung der Helligkeitswerte	69
4.2.1.2	Ungleichmäßige Helligkeitsverteilung	69
4.2.2	Berechnung der Kurven am Phosphor	70
4.2.3	Mehrmaliges Scannen eines Punktes	72
4.2.4	Dimmen des Lasers	73
4.2.5	Simulation einer bestimmten vorgegebenen Helligkeitsverteilung	74
4.3	Fazit	75
5	Zusammenfassung	77
6	Ausblick	79
	Abbildungsverzeichnis	81
	Tabellenverzeichnis	84
	Literaturverzeichnis	85
	Anhang	91

Kapitel 1

Einleitung

Xenon- und LED-Scheinwerfer sind zurzeit die Marktführer im Premium-Segment im Bereich der automobilen Frontbeleuchtung. Doch es wird ständig an neuen Technologien gearbeitet, um zum einen die Verkehrssicherheit zu erhöhen und zum anderen ein markenspezifisches Design gestalten zu können. Immer mehr kommen sowohl neue energieeffiziente Leuchtmittel, als auch sogenannte Fahrerassistenzsysteme zum Einsatz. Fahrerassistenzsysteme unterstützen auf unterschiedlichste Art den Lenker des Fahrzeuges, um so die Verkehrssicherheit zu steigern. Das wohl bekannteste Beispiel dafür ist das Antiblockiersystem (ABS).

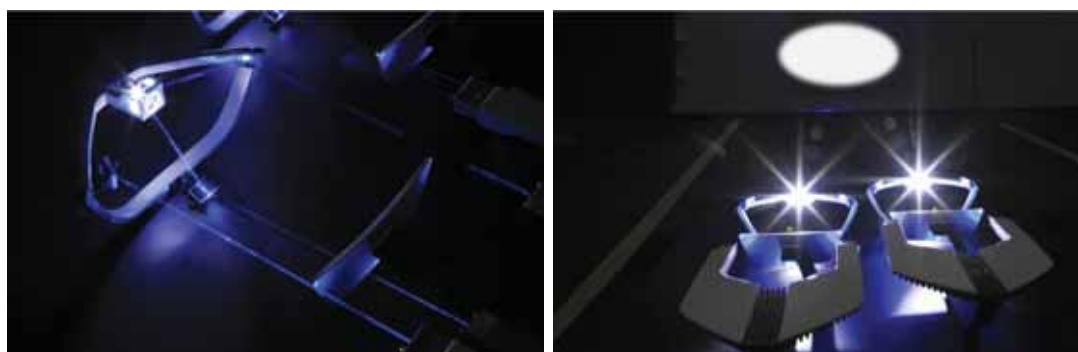
1.1 Lichtquellen

Als erste Lichtquelle für die automobilen Frontbeleuchtung wurden in den 1920er Jahren Glühlampen eingeführt. Erst Ende der 1960er Jahre konnte mit der Erfindung der Halogenlampe die Lichtleistung beträchtlich gesteigert werden.

Eine weitere Steigerung gelang 1991 mithilfe der Entwicklung der Xenon-Gasentladungslampe. Die Vorteile der Xenon-Systeme sind die Energieeffizienz und die Langlebigkeit. Weiters ist die Farbtemperatur, da sie höher ist, dem Tageslicht ähnlicher, obwohl das Xenonlicht in der Dunkelheit im Vergleich bläulich erscheint, während die herkömmlichen Halogen-Scheinwerfer einen gelben Farbton aufweisen. Der Nachteil der Xenon-Systeme sind die erhöhten Kosten. Daher findet man diese Systeme eher in der oberen Mittelklasse und im Premium-Segment. [01]

Seit einigen Jahren ist die LED-Technik in Scheinwerfern weit verbreitet. 2008 kam der erste Voll-LED-Scheinwerfer von Audi auf den Markt [02]. Die Vorteile dieser neuen Generation von Automobilscheinwerfern sind der niedrige Energieverbrauch und die nahezu unbegrenzte Lebensdauer. Außerdem ergeben sich ganz neue Gestaltungsmöglichkeiten des Frontbereichs des Fahrzeuges, da einerseits Zugänge - wie zum Beispiel zum Glühlampentausch - nicht mehr notwendig sind und andererseits die Lichtquellen im Scheinwerfer den Designerwünschen entsprechend angeordnet werden können. Daraus ergibt sich ein sehr hoher Wiedererkennungswert des Fahrzeuges. Auch diese Technik ist, aufgrund des hohen Preises, dem Premium-Segment zuzuordnen.

2011 stellte BMW in Aussicht [03], dass nach der LED-Technik das Laserlicht der nächste innovative Schritt bei der automobilen Frontbeleuchtung ist. Dadurch können nicht nur die Sicherheit und der Komfort erhöht werden, sondern auch Energie und Verbrauch reduziert werden. Weiters spielt auch die sehr kleine Baugröße des Laserscheinwerfers eine wichtige Rolle (Abbildung 1.1a). Denkbare Risiken aufgrund des Laserlichts bestehen für den Menschen jedoch nicht, da das Laserlicht nicht direkt ausgesendet wird. Bevor das Laserlicht auf die Straße leuchtet, wird der blaue Laserstrahl mithilfe eines Phosphor-Leuchtstoffes in ein rein weißes, helles und angenehmes Licht umgewandelt (siehe Abbildung 1.1b). Diese Technologie ermöglicht auch bekannte Lichtfunktionen, wie Kurvenlicht, zu realisieren. [03]



(a) BMW Lichtmodul

(b) BMW Lichtmodul mit Projektionsbild

Abbildung 1.1: BMW Lichtmodul für Laserscheinwerfer [03]

1.2 Motivation

Da die Verkehrsdichte ständig steigt, erhöht sich das Unfallrisiko für die Verkehrsteilnehmer. Um eine hohe Sicherheit zu gewährleisten, müssen einerseits verkehrspolitische Maßnahmen getroffen werden und andererseits aktive und passive Sicherheitssysteme für das Fahrzeug weiterentwickelt werden. Aktive Sicherheitssysteme versuchen Unfälle durch Eingreifen in den Fahrvorgang zu verhindern. Im Gegensatz dazu verringern passive Sicherheitssysteme Unfallfolgen. Die automobilen Frontbeleuchtung zählt dabei zu den aktiven Sicherheitssystemen. Diese ist - vor allem in der Dunkelheit - für die Informationen, die der Fahrzeuglenker erhält, maßgeblich verantwortlich. Die Wahrnehmung erfolgt beim Menschen zu 90% über visuelle Reize. Bei Nacht ist jedoch diese Informationsaufnahme eingeschränkt. Da sich auch die Sehleistung bei Dunkelheit reduziert, ist das Unfallrisiko bei Nacht viel höher.

Um die Sicherheit im Verkehr bei Dunkelheit zu erhöhen, ist die Weiterentwicklung des Automobilscheinwerfers von großer Bedeutung. Da sich das Umfeld ständig ändert, sollen Scheinwerfer mit einer statischen Lichtverteilung durch dynamische Systeme ersetzt werden. Zielführend sind hier sogenannte adaptive Systeme, in denen sich der Scheinwerfer der gegebenen Situation anpasst. Dadurch wird ermöglicht mit Fernlicht zu fahren ohne den Gegenverkehr zu blenden. Hingegen werden beim Fahren mit Abblendlicht potentielle Gefahrenobjekte gezielt angeleuchtet. [04] [05]

1.3 Stand der Technik

LED-Technik (LED - Light Emitting Diode) findet immer mehr Verbreitung im automobilen Frontbeleuchtungsbereich. Dadurch sind nicht nur eine Vielzahl an Designmöglichkeiten, sondern auch neue Funktionalitäten wie Markierungslicht realisierbar.

Grundsätzlich kann man am Markt zwei Trends beobachten. Während einige Hersteller neue Stylingunterschiede entwerfen, fokussieren sich andere auf Lichtassistentenfunktionen. Am besten ist eine Kombination aus beiden Aspekten. [06]

1.3.1 Fahrerassistenzsysteme

Wie schon erwähnt nehmen Fahrerassistenzsysteme (FAS oder ADAS = Advanced Driver Assistance Systems) eine zunehmend wichtige Rolle ein. Diese Systeme sollen den Fahrzeuglenker bei bestimmten Verkehrssituationen unterstützen, indem zum Beispiel Warnhinweise dem Fahrer zusätzlich einen zeitlichen Spielraum für sichere Fahrhandlungen einräumen oder aber durch direkte Eingriffe in die Fahrzeugdynamik die abhanden gekommene Kontrolle des Fahrzeuges zurückgegeben wird. Bei Fahrerassistenzsystemen steht vor allem die Verkehrssicherheit im Vordergrund, aber auch die Erhöhung des Fahrkomforts.

Typische Beispiele von Fahrerassistenzsystemen sind ABS (Antiblockiersystem), ASR (Antriebsschlupfregelung), MSR (Motor-Schleppmoment-Regelung), ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm), Einparkassistent, ACC (Adaptive Cruise Control = Fahrgeschwindigkeitsregelung), Frontalkollisionsschutzsystem, LDW (Lane Departure Warning = Fahrstreifenenerkennungssystem), LKS (Lane Keeping Support = Spurhalteassistent), Fahrstreifenwechselassistent und Kreuzungsassistent. [07]

Auch Systeme der automobilen Frontbeleuchtung werden mit diesen kombiniert um so die Funktionalitäten zu verbessern und zu vermehren.

1.3.2 Adaptive Scheinwerfersysteme

Derzeit etablieren sich adaptive Scheinwerfersysteme. Ziel ist auch hier die Verkehrssicherheit zu erhöhen, indem die Lichtverteilung des Scheinwerfers optimal an die Fahr- und Umweltsituation angepasst wird. Dieses Prinzip der dynamischen Anpassung des Scheinwerferlichts an die Straßengeometrie wurde bereits in den 1960er Jahren vom Autohersteller Citroën entwickelt.

Diese sogenannten AFS-Systeme (Advanced Frontlighting System, oder Adaptive Front Lighting System) berücksichtigen also „Helligkeitsverhältnisse, Witterung, Straßenzustand, Verkehrssituation, Straßenart, Fahrzeuggeschwindigkeit und Beschleunigungsverhalten“ [08]. Diese Technik wird größtenteils in Xenon- oder LED-Scheinwerfern integriert.

Schon Ende der 1960er Jahre, als die Halogen-Lichtquellen eingeführt wurden, wurde die Definition der Lichtverteilung der Scheinwerfer in verschiedenen Normen und Gesetzen festgelegt (Europa: ECE-Regelung [09]). An diesen lichttechnischen Anforderungen hat sich seitdem kaum was verändert. Die damals definierte asymmetrische Lichtverteilung im Abblendlicht bezieht sich auf eine gerade Straße, wie in Abbildung 1.2 gezeigt. Die asymmetrische Licht-

verteilung ist für den Fahrer und für den Gegenverkehr annehmbar. Jedoch bei Kurvenfahrten, vor allem bei Linkskurven, ist die dramatische Einschränkung der Sichtweite erkennbar.

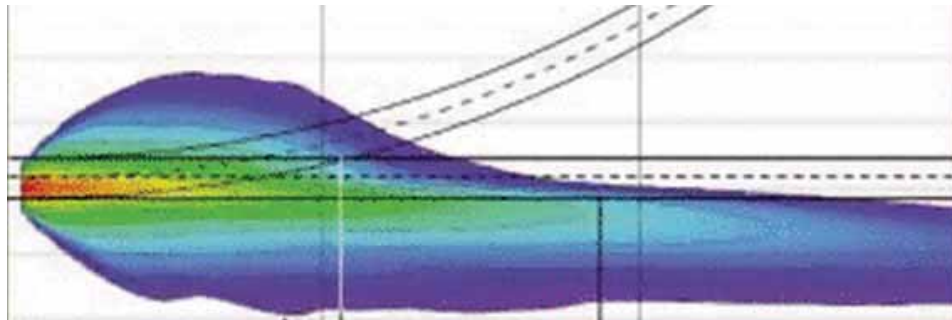


Abbildung 1.2: Lichtverteilung des Abblendlichts für geraden Straßenabschnitt [10]

AFS-Systeme enthalten neben dem normalen Abblendlicht und Fernlicht noch andere Lichtverteilungen, die sich optimal an die verschiedenen Verkehrssituationen anpassen. Vor allem das Ausleuchten des Kurvenbereiches trägt einen Großteil zur Erhöhung der Verkehrssicherheit bei. Dafür gibt es zwei Konzepte: Zum einen kann bei höherer Geschwindigkeit der gesamte Scheinwerfer in die Kurve mitgeschwenkt werden (Kurvenlicht, siehe Abbildung 1.3a) und zum anderen kann der Kurvenbereich bei niedriger Geschwindigkeit durch Zuschaltung einer zusätzlichen Lichtquelle ausgeleuchtet werden (Abbiegelicht, siehe Abbildung 1.3b). [10]

Ähnlich wie das Kurven- beziehungsweise Abbiegelicht, trägt auch das Kreuzungslicht zu einer höheren Verkehrssicherheit bei. In Abbildung 1.3 werden schematisch zum Vergleich sowohl das normale Abblendlicht (Abbildung 1.3c) als auch das Kreuzungslicht (Abbildung 1.3d) dargestellt. Die größere seitliche Ausleuchtung ermöglicht, trotz geringerer Reichweite in Fahrtrichtung, eine bessere Sicht, da die anderen Verkehrsteilnehmer im Kreuzungsbereich beleuchtet werden.

Darüberhinaus gibt es bei AFS-Systemen auch noch weitere Lichtfunktionen (Abbildung 1.4), nämlich Stadtlicht (Abbildung 1.4a), Landstraßenlicht (Abbildung 1.4b), Autobahnlicht (Abbildung 1.4c) und Schlechtwetterlicht, wobei das Landstraßenlicht dem herkömmlichen Abblendlicht entspricht. Beim Stadtlicht wird vor allem der Straßenrand (Gehsteige) besser beleuchtet und die Sichtweite muss, im Gegensatz zum Landstraßen- und Autobahnlicht, wegen der geringeren Geschwindigkeit nicht so hoch sein. Im Vergleich zum Autobahnlicht reicht die Lichtverteilung des Landstraßenlichtes auf der Gegenfahrbahn nicht so weit, damit der entgegenkommende Verkehr nicht geblendet wird.

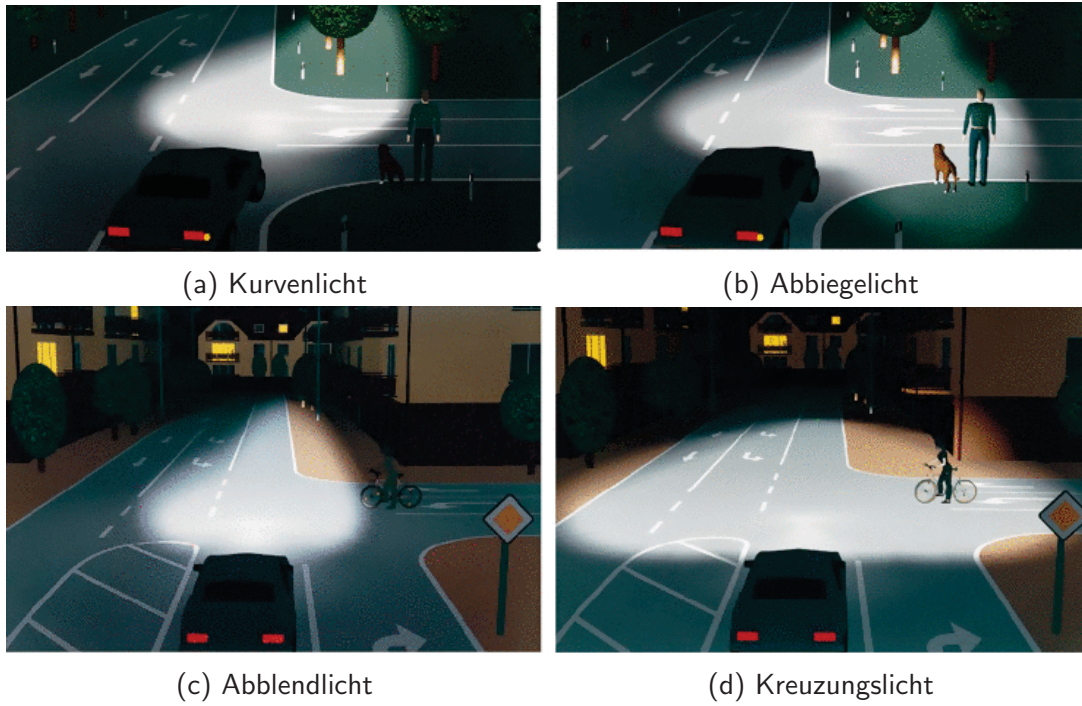


Abbildung 1.3: Bestimmte AFS-Funktionen [10]

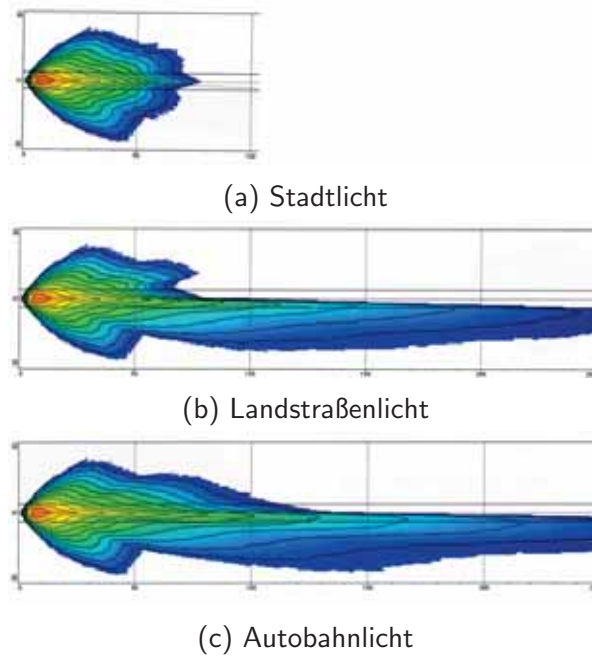


Abbildung 1.4: Bestimmte AFS-Lichtverteilungen (Quelle: ZKW)

Aus Komfortgründen werden diese adaptiven Lichtverteilungen vom Fahrzeuglenker nicht manuell eingestellt, sondern automatisch vom Fahrzeug. Dazu benötigt das AFS-System bestimmte Parameter als Eingangsgrößen, wie Geschwindigkeit oder Witterungsbedingungen, die durch die Sensorik im Auto geliefert werden.

1.3.3 Blendfreies Fernlicht

Das blendfreie Fernlicht ist eine dynamische Lichtfunktion, die die anderen Verkehrsteilnehmer auf der Straße nicht blendet. Dieses System basiert auf dem Prinzip ständig mit Fernlicht zu fahren. Wird ein anderer Verkehrsteilnehmer mithilfe einer kamera-basierten Sensorik erkannt, wird der entsprechende Bereich ausgeblendet, während der umliegende Sektor voll ausgeleuchtet bleibt. Dadurch kann das Risiko eine Gefahrenquelle durch das Abblenden bei hohen Geschwindigkeiten nicht rechtzeitig zu erkennen minimiert werden, da sowohl die Fahrbahn als auch der Straßenrand ausreichend beleuchtet werden (vergleiche Abbildung 1.5). [05] [11]



Abbildung 1.5: Blendfreies Fernlicht [11]

1.3.4 Markierungslicht

Im Gegensatz zum blendfreien Fernlicht gibt es das Markierungslicht. Dieses leuchtet explizit mögliche Gefahrenquellen am Straßenrand oder auf der Fahrbahn an, damit der Fahrzeuglenker darauf aufmerksam wird und gegebenenfalls sein Fahrverhalten ändern kann. Ein Praxistest zeigt, dass die Lenker Gefahren mithilfe des Markierungslichtes um 35 bis 40 Meter früher erkennen. Deswegen stehen zwei bis drei Sekunden mehr an Reaktionszeit zur Verfügung [12] [13] [14]. Abbildung 1.6 zeigt wie das Markierungslicht gezielt den Fußgänger am Straßenrand anleuchtet. Für die genaue Funktionsweise des Markierungslichtes wird auf weiterführende Literatur verwiesen, zum Beispiel [15].



Abbildung 1.6: Markierungslicht leuchtet gezielt Fußgänger am Straßenrand an [14]

1.4 Zukünftige Systeme

Für zukünftige Systeme werden sehr hohe Anforderungen gestellt, wie Präzision, Baugröße, Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit. Von großem Vorteil ist es dabei, wenn auf mechanische Bauteile zum Schwenken der Lichtmodule verzichtet werden kann, da damit Gewicht, Baugröße und Fehleranfälligkeit reduziert werden können.

1.4.1 Matrix- / Pixel-Licht

Dieses energieeffiziente Konzept - je nach Hersteller wird es Matrix- oder Pixel-Licht genannt - verwendet mehrere einzeln ansteuerbare Lichtquellen, die alle einen unterschiedlichen Raumwinkelbereich ausleuchten. Die Variabilität der Lichtverteilung wird durch das Ein- und Ausschalten oder Dimmen der jeweiligen Lichtquellen erreicht. Die Auflösung eines solchen Systems ist durch die Anzahl der Lichtquellen beschränkt. Es muss ein Kompromiss zwischen minimalem technischem Aufwand und optimaler Anpassung an das Umfeld gefunden werden. [05] [16]

Abbildung 1.7 zeigt zum einen eine schematische Darstellung des Matrixlichtes (1.7a) und zum anderen eine reale Fahrsituation (1.7b), wobei das entgegenkommende Auto mithilfe eines LED Matrix-Lichtsystems ausgeblendet wird.

Solche Matrix-Scheinwerfer sind mittlerweile auch schon im Mittelklasse-Preissegment vorhanden (zum Beispiel Opel Astra [17]).



(a) Schematische Darstellung des Matrixlichtes [Abb01]



(b) Reale Fahrsituation mit dem Matrixlicht [Abb02]

Abbildung 1.7: Matrixlicht: entgegenkommender Verkehr wird ausgeblendet

1.4.2 Hochauflösende Systeme mit Mikroelektronik

Aufbauend auf Erfahrungen aus dem Consumer-Bereich (Beamer) gibt es Bestrebungen hochauflösende Scheinwerfersysteme mit Hilfe von mikroelektronischen Bauteilen zu entwickeln. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten zur Umsetzung, die im Folgenden vorgestellt werden.

1.4.2.1 DMD / DLP

Ein DMD (Digital Micromirror Device) beziehungsweise DLP (Digital Light Processing) ist ein Halbleiterbauteil, das aus einer großen Anzahl an winzigen Mikrosiegeln besteht, die in einer Matrix angeordnet sind. Jeder der Spiegel ist einzeln ansteuerbar und kann zwei verschiedene diskrete Positionen einnehmen. Der DMD wird - von einer Lichtquelle kommend - vollflächig ausgeleuchtet und je nach Stellung des Spiegelsegments wird der ankommende Strahl entweder auf einen Absorber oder aber in eine Projektionsoptik umgelenkt [18]. Da die Auflösung des DMD sehr hoch sein kann, ist die Variabilität der Lichtverteilung - im Gegensatz zu den bisherigen adaptiven Systemen - sehr vielfältig [05]. Zum Beispiel besteht der in Abbildung 1.8 verwendete Pixellichtscheinwerfer aus 480 000 Mikrosiegeln.

Darüberhinaus können, wegen der sehr hohen Auflösung des DMD, zusätzliche Informationen gleich in den Lichtkegel eingeblendet werden (wie in Abbildung 1.8 zum Beispiel Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Pfeile zur Navigation) [19]. Dadurch wird vermieden, dass der Lenker seinen Blick zwischen Armaturenbrett und Straße umfokussieren muss. Entgegenkommende Verkehrsteilnehmer werden dabei nicht geblendet, da das Gesichtsfeld des Gegenverkehrs ausgeblendet wird.



Abbildung 1.8: DMD: variable Lichtverteilung [19]

Wegen den noch zu hohen Kosten und der schlechten thermischen und mechanischen Belastbarkeit der DMD, wird dieses System bis jetzt nicht in der automobilen Frontbeleuchtung eingesetzt.

1.4.2.2 Laser-Scanner-Systeme

Ein anderes Konzept zur Herstellung eines hochauflösenden Systems verwendet sogenannte MEMS-Scanner (Miko-Elektro-Mechanisches System), mit Hilfe welcher ein oder mehrere Laserstrahlen abgelenkt werden. Der Scanner schwingt in ein oder zwei Achsen und zeichnet dadurch mit dem Laserstrahl ein nahezu beliebiges Bild auf die Projektionsfläche.

Der Vorteil gegenüber dem Einsatz von DMDs ist hier die höhere Effizienz, da beim Erzeugen von dunklen Stellen im Lichtbild kein Licht abgeschattet werden muss, sondern beim Scannen von diesen Bildbereichen der Laser einfach abgeschaltet wird.

Zurzeit sind die Laserdioden im automobilen Bereich wegen der geringen Temperaturbelastbarkeit nur begrenzt einsetzbar. Außerdem sind bei solchen Systemen die Kosten noch signifikant höher als bei den bisher bekannten. Jedoch kann man davon ausgehen, dass in den kommenden Jahren noch große Fortschritte im Bereich der Lasertechnik folgen werden. Damit kann dann auch der Einsatz in der automobilen Lichttechnik ermöglicht werden. Außerdem ist zu erwarten, dass durch den vermehrten Einsatz von MEMS-Bauteilen im Consumer-Electronic-Bereich die Kosten drastisch sinken werden. [20] [21]

1.5 Aufgabenstellung

Zurzeit arbeitet die Firma ZKW - ZIZALA Lichtsysteme GmbH an einem Vorentwicklungsprojekt, in dem ein auf einem Laserprojektionssystem basierender Autoscheinwerfer (siehe Kapitel 1.4.2.2) entwickelt wird. Dieses Lichtsystem ist wegen der höher erreichbaren Auflösung eine Weiterführung von Matrix- / Pixel-Licht. Für die Verwendung im Bereich der automobilen Frontbeleuchtung muss weißes Licht mit einer hohen Lichtleistung erzeugt werden. Dafür wird eine fluoreszierende Keramikschiicht - auch „Phosphor“ oder „Konverter“ genannt (siehe Kapitel 2.4) - durch einen MEMS-Mikrospiegel mit einem fokussierten, blauen Laserstrahl abgerastert. Diese neue Technologie ist an die Funktionsweise von Pico Projektoren angelehnt.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, den Bildaufbau auf dem Phosphor für zwei unterschiedliche Konzepte von Laserprojektionssystemen zu simulieren und danach die Intensitätswerte für die Ansteuerung des Lasers zu berechnen, um eine vorgegebene Lichtverteilung zu erhalten. Die so erhaltenen Ergebnisse werden dann mithilfe eines Prototypen validiert. Beim ersten Konzept schwingt der Spiegel in zwei Raumrichtungen (2D-System) und beim zweiten in eine (1D-System).

Dabei müssen bei der Modellierung beziehungsweise Berechnung einige Effekte berücksichtigt werden. Zum einen schwingt der Spiegel resonant. Daher wird beim 2D-System durch die sinusförmige Auslenkung eine sogenannte Lissajous-Figur (siehe Abschnitt 2.1) erzeugt. Zum Anderen entsteht bei beiden Systemen durch die variierende Geschwindigkeit eine ungleichmäßige Helligkeitsverteilung. Auch weitere Einflussfaktoren, wie zum Beispiel beim 2D-System der unterschiedliche Durchmesser des Laserspots oder beim 1D-System die Schnittpunkte der Kurven am Phosphor, müssen ebenfalls bei der Modellierung beachtet werden. Mit bekannter Abstrahlcharakteristik des Phosphors kann auch das Nachleuchten der Lichtverteilung bei der Simulation berücksichtigt werden. Da diese Abstrahlcharakteristik bis dato noch nicht von dem Hersteller der Phosphorplatte bekannt gegeben wurde, soll diese über eine Exponentialfunktion approximiert werden. Jedoch wurde diese Eigenschaft des Phosphors sowie der variierende Spotdurchmesser bei der Validierung durch einen Prototypen nicht berücksichtigt.

In Kapitel 3 wird ein 2D-Laserprojektionssystem, bei dem also der Mikrospiegel in zwei Achsen schwingt, simuliert. Im Gegensatz dazu wird in Kapitel 4 ein 1D-Laserprojektionssystem modelliert, wobei aber hier insgesamt sechs Laserdioden die Phosphorplatte abrastern. Zuvor wird zum bessern Verständnis in Kapitel 2 auf die wichtigsten Grundlagen eingegangen.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Lissajous-Figuren

Unter einem Oszillator versteht man ein schwingfähiges System. Schwingt dieser in verschiedene Raumrichtungen (siehe Abbildung 2.1), so können bestimmte Bahnkurven beobachtet werden.

Stehen die Schwingungen senkrecht zueinander und ist deren Frequenzverhältnis ganzzahlig, so entstehen die sogenannten Lissajous-Figuren.

In der Praxis können Lissajous-Figuren zum Beispiel bei Oszilloskopen auftreten. Oszilloskope sind elektrische Messinstrumente, wobei durch Überlagerung von zwei sinusförmigen Signalen eine Lissajous-Figur entstehen kann.

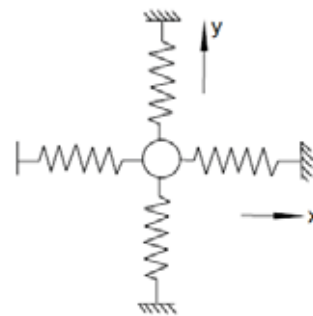


Abbildung 2.1: Schwingendes System in x- und y-Richtung [22]

Gleiche Frequenzzahlen

Zuerst werden zwei senkrecht zueinander verlaufende Schwingungen mit gleicher Frequenz ω betrachtet:

$$x(t) = A \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

und

$$y(t) = B \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.2)$$

wobei A und B die Amplituden der Schwingungen und φ die Phasenverschiebung sind.

Die Gleichung 2.1 ist äquivalent zu

$$\sin(\omega t) = \frac{x(t)}{A}.$$

Aus dem Additionstheorem $\sin(\alpha + \beta) = \sin(\alpha) \cos(\beta) + \cos(\alpha) \sin(\beta)$ und aus der Gleichung 2.2 ergibt sich die allgemeine Ellipsengleichung:

$$\frac{x(t)^2}{A^2} + \frac{y(t)^2}{B^2} - \frac{2x(t)y(t)}{AB} \cos(\varphi) = \sin^2(\varphi). \quad (2.3)$$

Die Phasenverschiebung φ im Falle gleicher Schwingungsfrequenzen kann wie oben aus Gleichung 2.2 und dem Additionstheorem durch

$$\sin(\varphi) = \frac{y(0)}{B}$$

berechnet werden.

Gilt für die Amplituden zusätzliche $A = B$, dann wird aus Gleichung 2.3 ein Kreis:

$$x(t)^2 + y(t)^2 = A^2 = \textit{konst.}$$

Verschiedene Frequenzzahlen

Nun wird der allgemeine Fall mit unterschiedlichen ganzzahligen Frequenzen $\omega_x \neq \omega_y$ betrachtet. Das Frequenzverhältnis kann durch die Anzahl der Maxima auf der vertikalen oder horizontalen Achse bestimmt werden:

$$\omega_x : \omega_y = m : n,$$

wobei m und n die Anzahlen der vertikalen und horizontalen Maxima sind.

Für die Phasenverschiebungen $\varphi = 0^\circ, 45^\circ$ und 90° wird in Abbildung 2.2 die Lissajous-Figur für die Frequenzverhältnisse $1 : 1, 1 : 2$ und $1 : 3$ gezeigt. Für weitere Informationen zu Oszillatoren und Lissajous-Figuren wird auf [22] und [23] verwiesen.

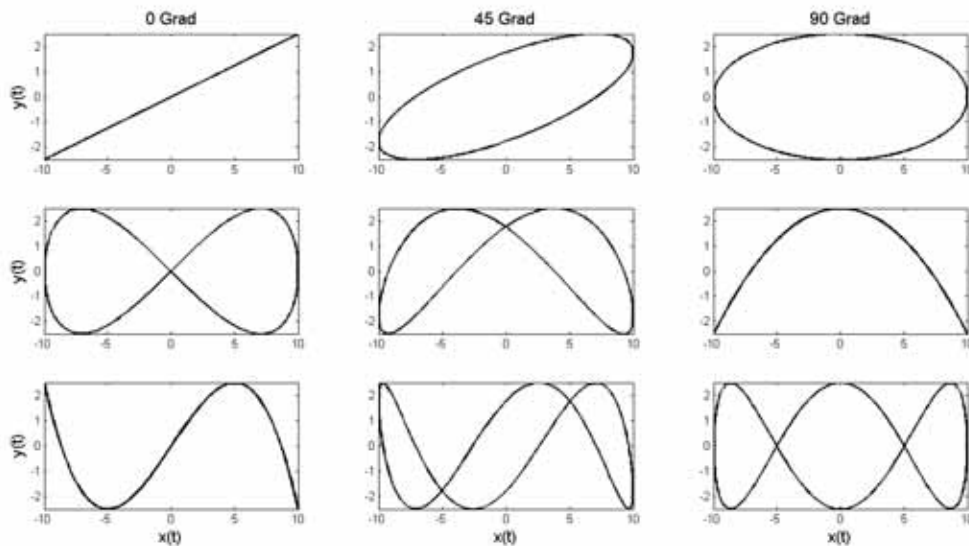


Abbildung 2.2: Lissajous-Figuren mit verschiedenen Phasenverschiebungen (links-Mitte-rechts) und Frequenzverhältnissen 1 : 1 (erste Zeile), 1 : 2 (zweite Zeile) und 1 : 3 (dritte Zeile)

2.2 Lasertechnik

Lasere werden täglich in den verschiedensten Geräten und Maschinen eingesetzt. Auch aus vielen Fertigungsprozessen sind sie kaum wegzudenken, da sie eine präzise, schnelle und preisgünstige Fertigung garantieren.

Das Kunstwort Laser ist das Akronym "Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation" (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung) [24]. Ein Laser ist also ein künstlicher optischer Lichtverstärker (siehe Abbildung 2.3).

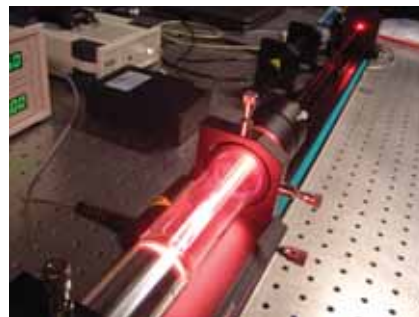


Abbildung 2.3: Helium-Neon-Laser [Abb03]

Um die Funktionsweise und Eigenschaften von Lasern verstehen zu können, werden zuerst einige physikalische Grundlagen erklärt. Neben den Laseranwendungen wird auch kurz auf die Eigenschaften von Halbleiterlasern eingegangen, da sie für die automobilen Frontbeleuchtung von Bedeutung sind.

2.2.1 Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel wird kurz auf die wichtigsten physikalischen Grundlagen eingegangen (für ausführlichere Details wird auf [24] und [25] verwiesen).

Licht

Licht ist der Teil des Spektrums elektromagnetischer Wellen, der für das menschliche Auge sichtbar ist. Das sind die Wellen mit Wellenlänge von ungefähr 380 nm bis 780 nm. Die Abbildung 2.4 zeigt das elektromagnetische Spektrum, welches die Gesamtheit aller elektromagnetischen Wellen mit verschiedenen Energien darstellt. Hervorgehoben ist auch der sichtbare Bereich.

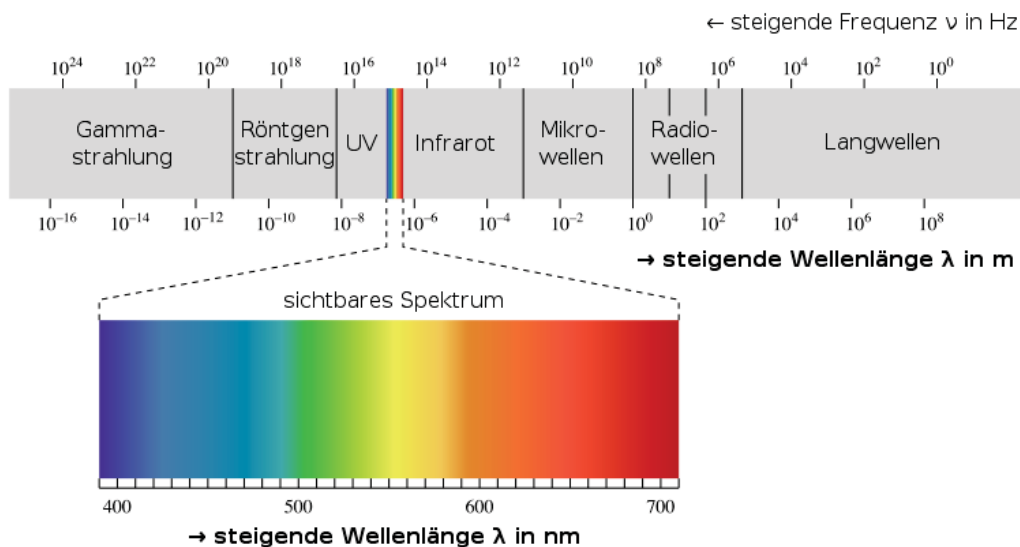


Abbildung 2.4: Elektromagnetische Spektrum und sichtbarer Bereich (380 bis 780 nm)
[Abb04]

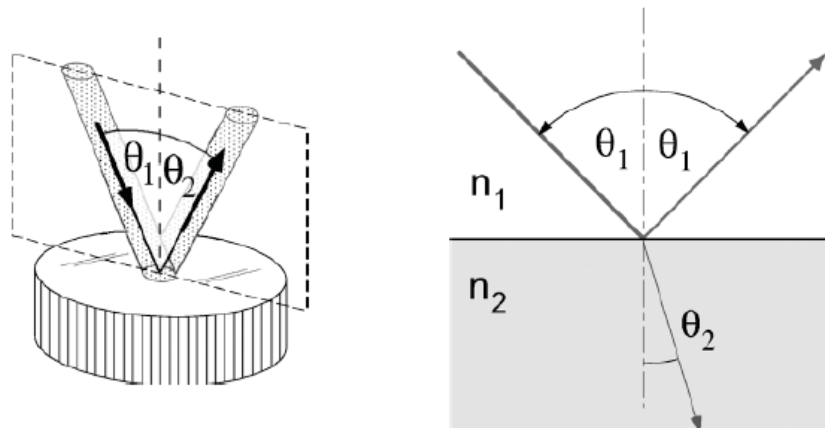
Photonen

Ein Photon ist ein Lichtteilchen, genauer gesagt ein Lichtquantum. Licht weist sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften auf (Welle-Teilchen-Dualismus). Die Energie eines Photons ist $E = hf$, wobei $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{Ws}^2$ das Plancksche Wirkungsquantum ist und f die Frequenz bezeichnet.

Reflexionsgesetz

Bei der Reflexion eines Lichtstrahls an einer Grenzfläche zwischen zwei Medien befindet sich der reflektierte Strahl in derselben Ebene wie der Einfallstrahl und der Betrag des Reflexionswinkels ist gleich dem Einfallswinkel. Die Abbildung 2.5a zeigt die Reflexion an einem ebenen Spiegel. Es gilt

$$\theta_1 = \theta_2.$$



(a) Reflexion an einem ebenen Spiegel

(b) Brechung und Reflexion an einer Grenzfläche

Abbildung 2.5: Reflexion und Brechung [25]

Brechungsgesetz

Trifft ein Lichtstrahl auf eine ebene transparente Fläche, zum Beispiel auf eine Glasscheibe, dann findet sowohl Reflexion als auch Transmission statt (Abbildung 2.5). Beim Übergang vom optischen Medium 1 mit Brechungsindex n_1 in das Medium 2 mit Brechungsindex n_2 gilt das Brechungsgesetz von Snellius:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2),$$

wobei θ_1 und θ_2 die Einfalls- und Ausfallswinkel bezeichnen (siehe Abbildung 2.5b).

2.2.2 Geschichte des Lasers

Schon 1916 wurde von Albert Einstein der theoretische Hintergrund für das Prinzip des Lasers als optischer Verstärker entwickelt. Er behauptete, dass es einen Strahlungsprozess gibt, welchen er als stimulierte Emission bezeichnete. Erst 1954 wurde ein Vorgänger des Lasers, genannt Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), von Charles H. Townes gebaut. Im Gegensatz zum Laser wurden beim Maser nicht Lichtwellen sondern Mikrowellen verstärkt. 1960 wurde der erste funktionstüchtige Laser von Theodore H. Maiman entwickelt. Dies war ein Rubinlaser, der tiefrotes Licht aussendet. Danach folgte von Ali Javan der erste Gaslaser, der Helium-Neonlaser. Dieser sendete Licht sowohl im infraroten als auch im sichtbaren Bereich aus. Darauf folgten Laser mit verschiedensten Lasermedien und Wellenlängen. Der erste Halbleiterlaser wurde 1962 von Robert N. Hall, Marshall I. Nathan und Ted M. Quist entwickelt.

Die Industrie entdeckte erst in den Siebzigerjahren die vielen Vorteile des Lasers. Neben der Industrie revolutionierte der Laser auch unter anderem die Medizintechnik, Telekommunikation und die Unterhaltungselektronik. [24]

2.2.3 Aufbau des Lasers

Laserlicht ist kohärentes und monochromatisches Licht, das aus einem hochkollimierten (nahezu parallelen) Bündel elektromagnetischer Strahlung besteht.

Die drei wesentlichen Bestandteile eines Lasers sind eine externe Energiequelle, ein Verstärkungsmedium und ein Resonator (siehe Abbildung 2.6).

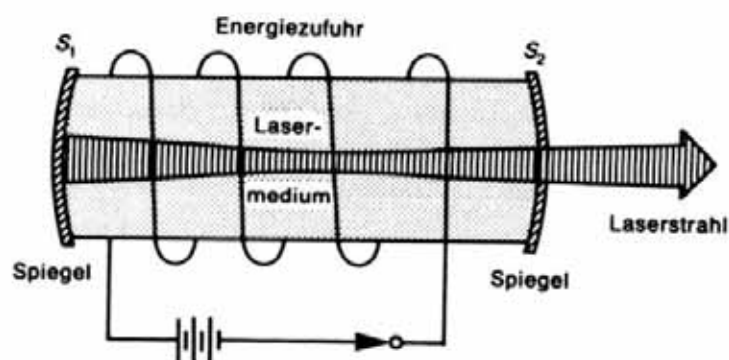


Abbildung 2.6: Bestandteile eines Lasers [24]

Das Lasermedium erzeugt durch die externe Energiezufuhr (Pumpen) Licht mit einer bestimmten Frequenz. Zum Pumpen können verschiedenste Verfahren, wie optische, elektrische oder chemische Verfahren, verwendet werden. Das Lasermedium, welches die Wellenlänge des Laserstrahls bestimmt, kann gasförmig, flüssig oder fest sein. Die Wellenlänge des Laserlichts reicht vom ultravioletten bis zum infraroten Bereich.

Der Resonator dient zur optischen „Rückkopplung“. Das bedeutet, dass die elektromagnetische Welle durch den Resonator im Lasermedium hin- und herläuft. Allgemein beschreibt der Begriff Resonator ein System von zwei gekrümmten oder ebenen Spiegeln, das das Licht hin und her reflektiert. Davon hat ein Spiegel einen Reflexionsgrad von 100% und der andere einen etwas geringeren, damit der im inneren reflektierte Strahl teilweise austreten kann. [24]

2.2.4 Funktionsweise des Lasers

Die entscheidenden Wörter im Akronym Laser sind Verstärkung (amplification), die durch den Resonator erzeugt wird, und stimulierte Emission (stimulated emission). Allgemein basiert die Funktionsweise des Lasers auf dem Prinzip der induzierten (oder stimulierten) Emission.

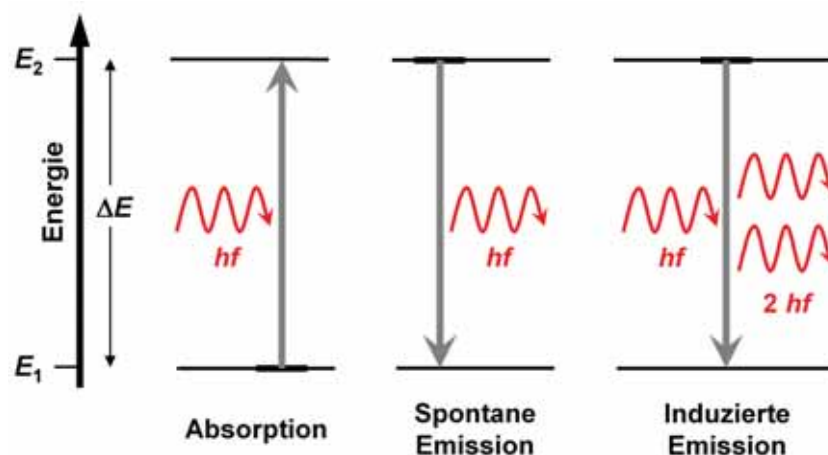


Abbildung 2.7: Absorption, spontane Emission und induzierte Emission [Abb05]

Wird ein Atom von außen angeregt, zum Beispiel durch ein Photon, kann eine der folgenden drei Möglichkeiten eintreten: Absorption, spontane Emission oder induzierte Emission (siehe Abbildung 2.7).

Bei der Absorption trifft ein Photon auf ein Atom und wird dann von diesem absorbiert. Dabei

überträgt das Photon seine Energie $E = hf$ auf das Atom. Das heißt, dass das Energieniveau des Atoms angehoben wird, sodass sich dieses dann in einem energetisch angeregten Zustand (E_2) befindet.

Die spontane Emission verursacht eine Senkung des Energieniveaus (E_1) des Atoms. Dabei emittiert ein angeregtes Atom ein Photon, wobei die Richtung der Emission beliebig ist.

Bei der induzierten Emission trifft ein Photon, dessen Energie genau der Energiedifferenz des aktuellen Zustandes und des Energieniveaus mit geringerer Energie entspricht (also $E = \Delta E = E_2 - E_1$), auf ein angeregtes Atom (E_2). Dadurch wechselt das Atom in den Zustand niedriger Energie (E_1) und ein weiteres Photon wird abgegeben. Das zweite Photon besitzt dabei die gleiche Polarisation, Frequenz und Richtung wie das induzierte Photon. Dies bedeutet gleiche Wellenlänge und Ausbreitungsrichtung.

Dieser Effekt der induzierten Emission wird beim Laser ausgenutzt. Zuerst wird von außen Energie in das Lasermedium gepumpt. Durch das Pumpen wird eine große Anzahl an Atomen in verschiedene angeregte Zustände versetzt. Nun setzt spontane Emission ein, wodurch die Atome vom angeregten Zustand in den Grundzustand übergehen. Dabei werden Photonen erzeugt, deren Emission und Richtung zufällig ist. Stimmen die Eigenschaften dieses Photons mit denen des Resonators überein, regt dieses bei der stimulierten Emission die Aussendung eines weiteren Photons an, welches dann dieselben Eigenschaften wie das induzierte Photon hat. Somit erhält man eine Verstärkung der Strahlung. Diese Strahlung wird dann am lichtdurchlässigen Spiegel ausgekoppelt. [24]

2.2.5 Eigenschaften des Laserlichts

Die von Lasern emittierte Strahlung weist besondere Eigenschaften auf. Einige werden hier aufgelistet.

Einfarbigkeit

Die Laserstrahlung ist monochromatisch, das heißt sie weist nur eine Farbe bzw. Wellenlänge auf.

Kohärenz

Die Kohärenz ist jene Eigenschaft, die die Laserstrahlung am meisten von den anderen Lichtquellen unterscheidet. Kohärenz wird unterteilt in zeitliche und räumliche Kohärenz. Erstere ist mit der Einfarbigkeit gleichzusetzen. Unter räumliche Kohärenz versteht man „die zeitliche Konstanz der Phase in einem Raumbereich“ [24], das heißt, dass in Ausbreitungsrichtung die Phasenbeziehung der Wellenfronten zeitlich unverändert bleibt.

Geringe Strahldivergenz (Strahlbündelung)

Die Strahldivergenz ist bei Lasern äußerst gering. Bei keiner anderen Lichtquelle (mit vergleichbarer Intensität), mit oder ohne Verwendung von Linsen, ist die Strahldivergenz so minimal. Diese geringe Strahldivergenz bei Lasern entsteht durch die vom Resonator vorgegebene Ausbreitungsrichtung.

Hohe Laserintensität

Aufgrund der starken Bündelung (geringe Strahldivergenz) des Laserlichts kann eine sehr hohe Laserstrahlintensität erreicht werden. Diese Eigenschaft ist vor allem für die Anwendung von Lasern in der Industrie von Bedeutung.

Fokussierbarkeit

Wegen der geringen Strahldivergenz lassen sich Laserstrahlen äußerst gut fokussieren. Die Abbildung 2.8 zeigt, dass ein Laserstrahl über ein Sammeloobjektiv ungefähr auf die Größe der Laserstrahlwellenlänge fokussiert werden kann. Dabei bezeichnet $2w_0$ den Durchmesser des Lasers und $2w'_0$ den neuen Durchmesser, der ungefähr der Wellenlänge λ des Laserstrahls entspricht.

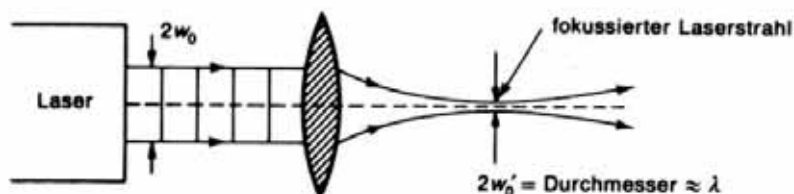


Abbildung 2.8: Fokussierung eines Laserstrahls [24]

2.2.6 Halbleiter-Laser (Laserdioden)

Da Halbleiter-Laser wegen ihrer kleinen Abmessungen eine große Anwendung finden, wird hier nur auf die grundlegenden Eigenschaften und nicht auf die konkrete Funktionsweise eingegangen. Für das genaue Prinzip von Laserdioden wird auf [25] und [26] verwiesen.

In vielen Konsumartikeln, zum Beispiel Drucker oder CD/DVD-Brenner, werden Laserdioden verwendet. Die wichtigsten Vorteile von Laserdioden sind der günstige Preis (Massenproduktion möglich), direkte Anregung durch elektrischen Strom, kleine Abmessungen (ca. $300 \times 10 \times 50 \mu\text{m}$) und damit leichte Integrierbarkeit in elektronische Komponenten.

Der Großteil an Laserdioden emittiert im nahen Infrarotbereich. Jedoch gibt es auch schon Laserdioden dessen Laserlicht für das menschliche Auge sichtbar ist. Die Abbildung 2.9 zeigt eine Laserdiode mit einer Wellenlänge von 406 nm (Blauviolett), die zum Beispiel in Blu-ray Playern verwendet wird.

Ein großer Nachteil von Laserdioden ist die starke Strahldivergenz. Es kann jedoch durch geeignete optische Bauteile, zum Beispiel durch eine Linse, ein kollimierter Strahl, das heißt ein paralleles Bündel, erzielt werden.

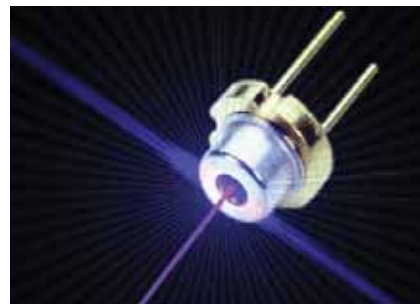


Abbildung 2.9: Laserdiode [Abb06]

2.2.7 Lasertypen und Anwendungen

Laser können auf unterschiedlichste Art und Weise klassifiziert werden. Eine Möglichkeit ist die Einteilung nach den verschiedenen Aggregatzuständen des Lasermediums. Manchmal werden Laser auch nach der Art der externen Energiezufuhr eingeteilt. Und in anderen Fällen werden die Laser nach ihrer Art der Strahlung, also gepulst oder kontinuierlich, und nach ihrem spektralen Bereich - infrarot, sichtbar oder UV - eingeteilt. In folgender Tabelle 2.1 werden einige wichtige Lasertypen angeführt. Dabei werden auch die Wellenlänge, die Art der Strahlung, der Strahldurchmesser und typische Anwendungen angegeben.

Die vielfältige Anwendung der Laser basiert auf den einzigartigen Eigenschaften des Laserlichts. Auch im Alltag verwendet fast jeder Laser (zum Beispiel Laserpointer, Laserdrucker

und Scanner). Für weitere und genauere Anwendungsbereiche der Lasertechnik wird auf [24] und [25] verwiesen.

Lasertyp	Wellenlänge	Strahlungsart	Strahldurchmesser	Anwendungen
Excimer-Laser (Gas)	193 nm, 248 nm, 308 nm, ...	gepulst	6 × 23mm ² bis 20 × 32mm ² (rechteckig)	Mikrobearbeitung, Laserchemie, Medizintechnik
Argon-Ionen-Laser (Gas)	488-514.5 nm	kontinuierlich	0.7 - 2mm	Drucktechnik, Medizintechnik
Helium-Neon-Laser (Gas)	632.8 nm	kontinuierlich	0.5 - 2 mm	Messtechnik, Holografie
CO ₂ -Laser (Gas)	10.6 μm	gepulst oder kontinuierlich	3 - 4 mm	Materialbearbeitung, Medizintechnik
Rubinlaser (Festkörper)	694.3 nm	gepulst	1.5 mm - 2.5 cm	Materialbearbeitung, Holografie, Medizintechnik
Halbleiterdiodenlaser (Festkörper)	infrarot bis sichtbar	gepulst oder kontinuierlich	divergiert zu rasch	Pumplichtquelle, Materialbearbeitung, Optoelektronik
YAG-Laser (Festkörper)	1.064μm	gepulst oder kontinuierlich	0.75 - 6 mm	Materialbearbeitung, Messtechnik, Medizintechnik
Farbstofflaser (Flüssigkeit)	400 - 950 nm	gepulst oder kontinuierlich	0.4 - 0.6 mm	Messtechnik, Spektroskopie, Medizintechnik

Tabelle 2.1: Lasertypen [24] [27]

2.2.8 Gefahren des Lasers und Lasersicherheit

Das Arbeiten mit Lasern stellt ein hohes Gefährdungspotenzial für Personen dar. Das für die Laserstrahlung empfindlichste Organ ist das Auge. Welche Schädigung ein Laserstrahl verursacht, ist abhängig von seiner Wellenlänge. Am gefährlichsten sind jene Wellenlängen, die auf die Netzhaut des Auges fokussiert werden können. Diese liegen im Bereich von 400 nm bis 1400 nm, also sowohl im sichtbaren als auch im infraroten Bereich. Diese Strahlung kann, abhängig von der Intensität und Bestrahlungsdauer, irreparable Schäden verursachen. Auch beim Kontakt mit der Haut können schwere Verbrennungen entstehen.

Klasse 1	Definition:	im Normalbetrieb harmlos
	Warnungen:	keine
	Maßnahmen:	keine
	Beispiele:	CD-Player, Scanner, Laserdrucker
Klasse 1M	Definition:	ohne optische Instrumente harmlos
	Warnungen:	nicht direkt mit optischen Instrumenten betrachten
	Maßnahmen:	Personen mit optischen Instrumenten warnen
	Beispiele:	Scanner-Registrierkassen (Supermarktkassen)
Klasse 2	Definition:	für einen Augenblick harmlos
	Warnungen:	nicht direkt in den Strahl blicken
	Maßnahmen:	nicht auf Gesichter zielen
	Beispiele:	Laserpointer, Laser-Wasserwaage, Lichtschranken
Klasse 2M	Definition:	ohne optische Instrumente wie Klasse 2
	Warnungen:	nicht direkt mit optischen Instrumenten betrachten
	Maßnahmen:	Personen mit optischen Instrumenten warnen
	Beispiele:	Disco-Laser
Klasse 3R	Definition:	reduziert gefährlich
	Warnungen:	nicht in den Strahl blicken, direkte Bestrahlung der Augen vermeiden, nicht dem Strahl aussetzen
	Maßnahmen:	nur von geschultem Personal betreiben lassen
	Beispiele:	Waffen-Ziellaser, Nivellierlaser
Klasse 3B	Definition:	Direktstrahl für Augen gefährlich, Streustrahlung nicht
	Warnungen:	nicht dem Strahl aussetzen
	Maßnahmen:	Laserschutzbeauftragten bestimmen, Bereich baulich abgrenzen und Zutritt kontrollieren, Laser am Eingang deklarieren, nur von geschultem Personal betreiben lassen, ev. Laserschutzbrille tragen
	Beispiele:	Show-Laser (Laserschutzbrille notwendig)
Klasse 4	Definition:	Strahl für Augen und Haut gefährlich, Streustrahlung für Augen gefährlich, Brandgefahr
	Warnungen:	Bestrahlung von Haut oder Auge durch direkte oder Streustrahlung vermeiden
	Maßnahmen:	Maßnahmen wie bei Klasse 3B, ev. zusätzlich Schutzausrüstung für Körperteile nötig
	Beispiele:	Medizinische Anwendungen, Technische Anwendungen (Laserschutzbrille notwendig)

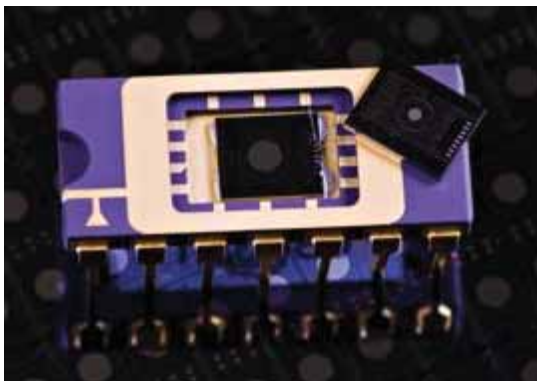
Tabelle 2.2: Laserklassen nach DIN EN 60825-1 (Mai 2008) [28] [29] [30]

Da der Begriff „Laser“ nicht genügt die Gefährdung durch das Gerät zu beschreiben, sind alle Hersteller dazu verpflichtet die Laser in Klassen einzuordnen. In Klasse 1 befinden sich die ungefährlichen Laser, in Klasse 4 die potenziell gefährlichsten. In der sogenannten Lasersicherheitsnorm IEC 60825 sind diese Klassen definiert (in Österreich: ÖNORM ÖVE EN 60825-1). In obiger Tabelle 2.2 werden die einzelnen Laserklassen angeführt.

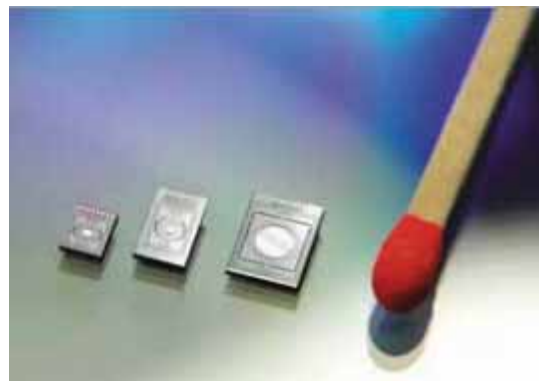
Darüberhinaus gibt es auch noch weitere (sogenannte „sekundäre“) Gefahren, die bei der Verwendung von Lasern auftreten können. Diese hängen nicht mit dem Laserstrahl selbst zusammen, sondern mit der Inbetriebnahme und Anwendung (zum Beispiel elektrische Gefahren, Brandgefahr oder Begleitstrahlung). Für genaueres wird auf [28] und [29] verwiesen.

2.3 MEMS-Mikroscanner

Das Akronym MEMS bedeutet **M**ikro-**E**lektro-**M**echanisches **S**ystem. Diese Systeme sind eine Kombination aus winzigen mechanischen und elektro-mechanischen Elementen, deren Bauarten von einfachen Strukturen ohne bewegliche Teile bis hin zu äußerst komplexen elektromechanischen Systemen mit einer Vielzahl an beweglichen Elementen reichen. Der große Vorteil dieser Technik liegt einerseits in der extrem kleinen kompakten Bauform und andererseits in den geringen Herstellungskosten durch den Einsatz von Halbleiterfertigungsprozessen. Typische Abmessungen von Mikrosystemen liegen im Nanometer- bis Millimeterbereich.



(a) MEMS-Spiegel [34]



(b) Mikroscanner im Größenvergleich [35]

Abbildung 2.10: MEMS-Mikroscanner

Die Anwendungsgebiete dieser Mikrosysteme sind sehr vielfältig. Zum Beispiel sorgen sie für

das Aufblasen der Airbags vor dem Aufprall eines Autos oder das Ausgleichen wackelnder Bewegungen bei Digitalkameras. Für weitere Anwendungsbereiche und Funktionsweise von Mikro-Elektro-Mechanischen Systemen wird auf [31], [32] und [33] verwiesen.

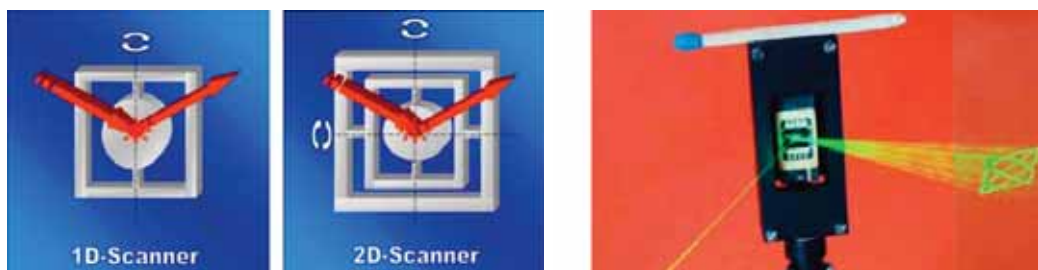
Mikroscanner sind hochminiaturisierte resonant betriebene Spiegel mit einem großen optischen Scanbereich. In Abbildung 2.10a wird ein MEMS-Mikroscanner dargestellt. Die Außenabmessungen der Mikrospiegel liegt im Millimeterbereich, wie aus der Abbildung 2.10b ersichtlich ist. [34] [35]

Die Vorteile von MEMS-Scannern gegenüber anderen Scantechniken sind die sehr kleinen Abmessungen, größere Stabilität, sehr geringer Leistungsverbrauch und die Möglichkeit hochaufgelöste Bilder ohne der Verwendung von Abbildungsobjektiven zu erzeugen.

Daher zählen zu den Anwendungsgebieten von Mikroscannern unter anderem Projektionsdisplays, Bildaufnahme (zum Beispiel für technische und medizinische Endoskope), Strichcodeleser, Spektroskopie, 3D-Kameras, Lasermarkierung und Bearbeitung von Materialien. [35]

Allgemein kann man zwischen 1D- und 2D-Scannern unterscheiden. Dabei schwingt der Spiegel entweder um eine oder zwei Achsen, wie Abbildung 2.11a zeigt. Bei 2D-Scannern sind die Frequenzen der beiden Schwingungen unabhängig voneinander, da beide Achsen individuell angeregt werden. Daher können beide Amplituden der Schwingungen individuell eingestellt und somit kontrolliert werden. [36]

Wird ein Lichtspot über einen 2D-Scanner projiziert, dann entsteht durch die sinusförmige Bewegung des Spots in beide Achsen eine Lissajous-Figur. Die Abbildung 2.11b zeigt eine Lissajous-Figur mit Frequenzverhältnis 5 : 6. Bei Standardverspiegelung beträgt der Reflexionsgrad circa 90% im sichtbaren Bereich, es werden aber auch hochreflektierende Verspiegelungen angeboten.



(a) Funktionsweise 1D-/2D-Scanner [36] (b) Demonstration eines 2D-Scanners [35]

Abbildung 2.11: 1D- und 2D-Mikroscanner

Um die Dämpfungsverluste der MEMS-Scanner durch Luftreibung zu minimieren, werden die Bauelemente vakuumverkapselt. Durch diese Vakuumsverkapselung ist das Schwingungsverhalten sehr stabil und der Spiegel wird vor Verschmutzung, Feuchtigkeit und Staub geschützt. Im Gegensatz zu Scannern, die in Atmosphärenbedingungen arbeiten, sind hier die Schwingungsamplituden in beide Richtungen weitaus größer und der Leistungsverbrauch ist sehr gering. Darüber hinaus ist die Vakuumsverkapselung der MEMS-Scanner ein preiswertes Verfahren, um die Spiegel nicht nur von äußeren Einflüssen zu schützen, sondern auch um die Oszillationseigenschaften für Projektionszwecke deutlich zu verbessern. Für genauere Informationen über die Funktionsweise beziehungsweise Eigenschaften von Mikroskannern wird auf [37] und [38] verwiesen.

2.4 Optische Konverter

Weißes Licht ist die Überlagerung von mehreren geeigneten Wellenlängen. Um aus LEDs oder Laserdioden weißes Licht zu erzeugen, gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen können Lichtquellen in den drei Primärfarben Rot, Grün und Blau überlagert werden. Auf solche RGB-Systeme soll hier aber nicht näher eingegangen werden.

Zum anderen kann das physikalische Phänomen der Fluoreszenz ausgenutzt werden. Materialien, die diese Eigenschaft besitzen, senden bei der Bestrahlung mit Licht auch selbst Licht aus, wobei dieses Licht niedrigere Energie, das heißt eine größere Wellenlänge besitzt („Stokes-Shift“). [39]

In der LED- und Lasertechnik werden als Lichtquelle üblicherweise blaue LEDs und Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 450 \text{ nm}$ verwendet. Die Konversion in weißes Licht erfolgt durch einen sogenannten „Phosphor“ oder „optischen Konverter“. Dies sind meist mit unterschiedlichen Elementen dotierte YAG-Keramiken, die bei Beleuchtung mit blauem Licht rot bis gelb fluoreszieren. [40] [41]

Um bei den Laserprojektionssystemen weißes Licht zu erhalten, muss der vom Microscanner abgelenkte blaue Laserstrahl mithilfe eines Phosphors konvertiert werden. Die Zugabe einer blauen Wellenlänge mit einem gelben Phosphor produziert ein weißes Spektrum, wie Abbildung 2.12 zeigt. Denn die blaue Strahlung, die vom Phosphor nicht konvertiert, sondern gestreut wird, ergibt mit dem gelben Licht, das vom Phosphor konvertiert wird, ein weißes Summenspektrum. [20]

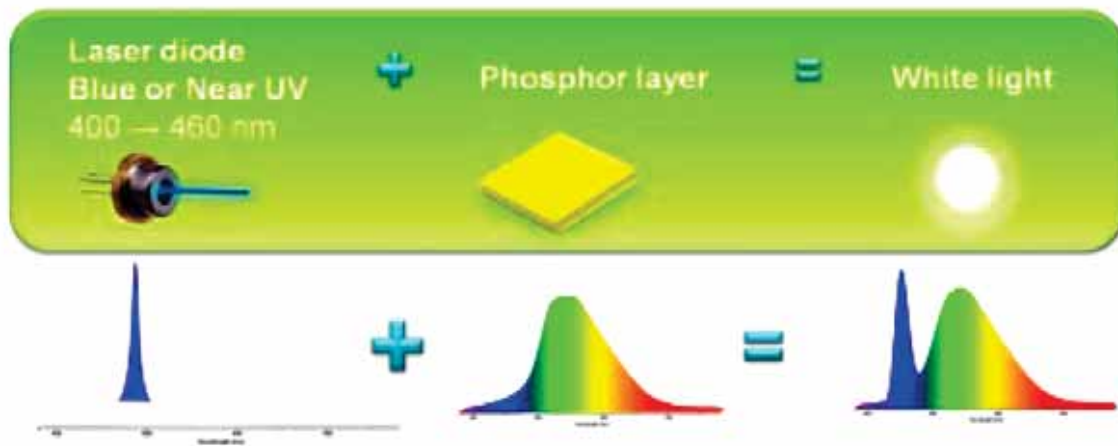


Abbildung 2.12: Konvertierung in weißes Licht [20]

Eine weitere Eigenschaft, die entsteht, wenn der Laserstrahl auf die Phosphorplatte trifft, ist die Phosphoreszenz. Phosphoreszenz bedeutet Nachleuchten, das heißt ein Teil des aufgenommenen Lichtes wird gespeichert und kann später abgegeben werden. [42]

Kapitel 3

2D-Laserprojektionssystem

In diesem Kapitel wird der Bildaufbau auf dem Phosphor eines 2D-Laserprojektionssystems, das in der automobilen Frontbeleuchtung eingesetzt werden soll, simuliert. Dieses Konzept verwendet einen zweidimensional schwingenden MEMS-Scanner, wodurch ein Bild mit mehreren Zeilen erzielt werden kann.

Zuerst werden das System und die Eigenschaften, die bei der Simulation berücksichtigt werden müssen, erklärt. Danach wird die Lichtverteilung auf dem Phosphor modelliert und deren Ergebnisse dargestellt. Damit dieses Konzept in Zukunft als Scheinwerfer eingesetzt werden kann, müssen die erhaltenen Ergebnisse schlussendlich mithilfe eines ersten Prototyps validiert werden.

3.1 Systembeschreibung

Um eine Lichtverteilung mit einem 2D-Laserprojektionssystem zu erzeugen, wird ein blauer Halbleiterdiodenlaser verwendet. Die vertikale Strahldivergenz dieses Lasertyps ist sehr groß (siehe Kapitel 2.2, konkret Tabelle 2.1), daher muss der Laserstrahl kollimiert und fokussiert werden. Bei der Kollimierung von Laserstrahlen werden ebene Wellen erzeugt. Danach können diese fokussiert werden, sodass der Laserspotdurchmesser auf dem Phosphor so klein ist, dass die gewünschte Ortsauflösung erreicht wird.

Die folgende Abbildung 3.1 zeigt das Grundgerüst des Systems.

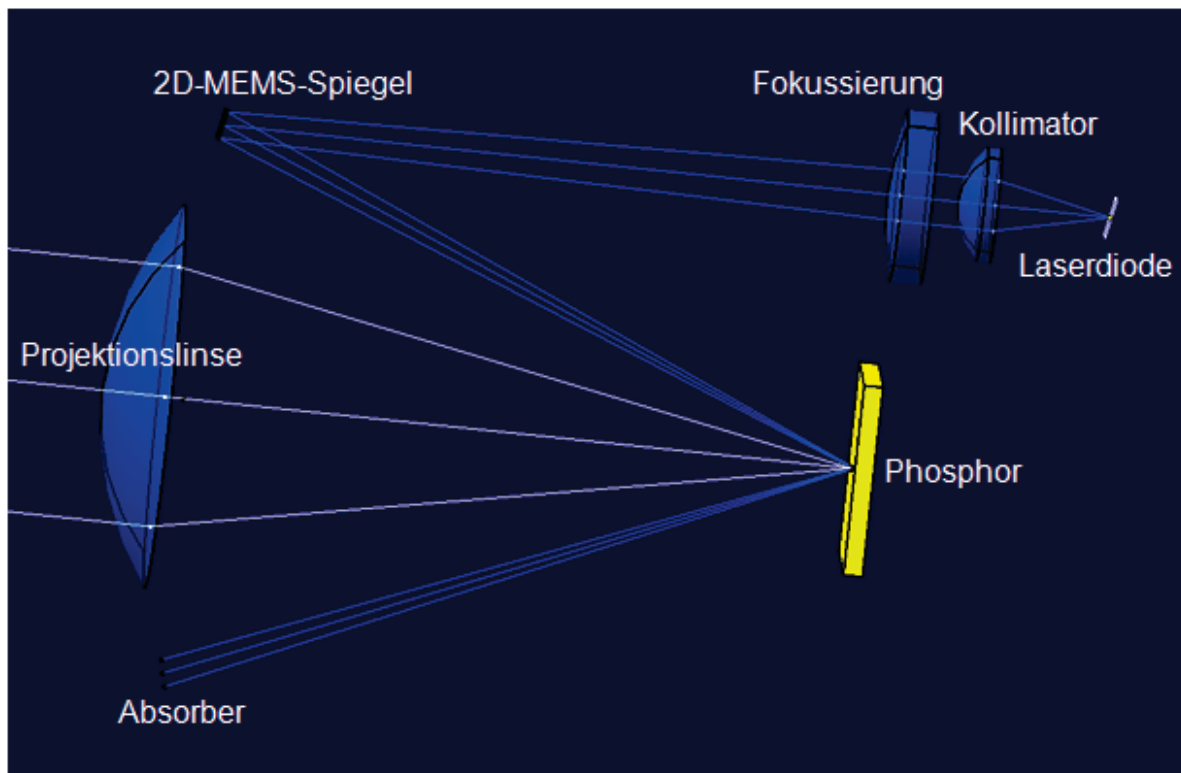


Abbildung 3.1: 2D-Laserprojektionssystem (Quelle: ZKW)

Die erste Linse im System dient zur Kollimierung des von der Laserdiode kommenden Laserstrahls. Mithilfe der zweiten Linse wird dann der Laserstrahl fokussiert.

Nun kann die Phosphorplatte durch den 2D-MEMS-Scanner mit dem fokussierten Laserstrahl abgerastert werden. Der 2D-Mikroscanner schwingt resonant mit einer sinusförmigen Schwingung in zwei Achsen, sodass auf dem Phosphor eine Lissajous-Figur geschrieben wird (siehe Kapitel 2.3). Die Phosphorplatte wird durch den Laserstrahl in den beleuchteten Bereichen zur Emission von weißem Licht angeregt (wie in Kapitel 2.4 erklärt). Diese Lichtverteilung wird anschließend über eine Projektionslinse auf die Straße abgebildet. Der direkte Laserstrahl, der am Phosphor reflektiert wird, wird abgeschirmt, sodass dieser Strahl keine Gefahr darstellt.

Das 2D-Laserprojektionssystem ermöglicht es, mehrere Bildzeilen zu generieren. Außerdem können die Helligkeitswerte einzelner Bildpunkte unabhängig voneinander in beide Dimensionen gesteuert werden. Dadurch können bestimmte Teilbereiche ausgeschaltet werden, um zum Beispiel ein blendfreies Fernlicht zu erzeugen.

Weiters sei noch einmal erwähnt, dass nicht das komplette System inklusive Projektionsop-

tik simuliert wird, da dies zu umfangreich wäre. Diese Arbeit beschränkt sich dabei auf die Simulation der Lichtverteilung, die auf der Phosphorplatte entsteht.

Die für die Simulation und Berechnung verwendete Software ist Maxima. Maxima ist ein Open-Source Computeralgebraprogramm, welches ein Nachfolger von Macsyma, eines der ersten Computeralgebrasysteme, ist. Entwickelt wurde es in den späten 1960er Jahren am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Macsyma war damals so revolutionär, sodass spätere Programme, wie Maple und Mathematica, dadurch inspiriert wurden. Als grafische Benutzeroberfläche wird unter Windows wxMaxima verwendet. Die Plotfunktionen basieren auf Gnuplot. [43]

Da später auch bestimmte Lichtverteilungen simuliert werden sollen, die als Bild (JPEG) vorgegeben sind, muss eine weitere Software verwendet werden, da in Maxima nicht die Möglichkeit besteht, Bilder einzulesen und danach die Graustufenwerte für die weitere Berechnung auszulesen. Um das zu ermöglichen wird zusätzlich GNU Octave verwendet. GNU Octave ist eine freie Software für numerische Berechnungen. Ursprünglich entstand Octave 1988 als Begleitsoftware für ein Lehrbuch für chemische Reaktoren an der University of Wisconsin-Madison und University of Texas. Die erste Alpha GNU Octave Version erschien 1993. Heute dient GNU Octave als freier MATLAB Ersatz. Mit MATLAB ist GNU Octave auch überwiegend kompatibel. [44]

3.2 Modellierung der Lichtverteilung auf dem Phosphor und Simulationsergebnisse

Um später eine bestimmte Lichtverteilung für die automobilen Frontbeleuchtung erzielen zu können, muss zuerst das Verhalten des Laserstrahls auf der Phosphorplatte untersucht werden. Dabei wird vorerst angenommen, dass der Laserstrahl ein fokussierter, immer gleichgroßer, Punkt ist.

Wie schon in Kapitel 2.1 erwähnt, entstehen auf der Phosphorplatte Lissajous-Figuren. In x- und y-Richtung werden folgende Schwingungen ohne Phasenverschiebung, jedoch mit unterschiedlichen Frequenzen geschrieben:

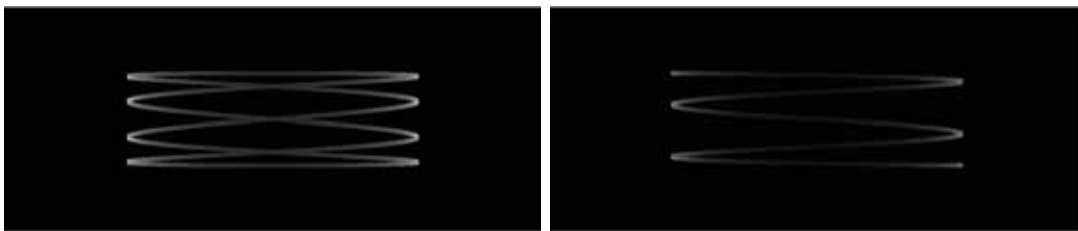
$$x(t) = A \sin(\omega_x t) \quad (3.1)$$

und

$$y(t) = B \sin(\omega_y t), \quad (3.2)$$

wobei A , B die Amplituden und $\omega_x \neq \omega_y$ die Frequenzen bezeichnen. Für die Amplituden wurden immer folgende Werte gewählt: $A = 10$ und $B = 2.5$. Um eine Lissajous-Figur zu erhalten, muss das Frequenzverhältnis ganzzahlig sein. Dabei wird einfachheitshalber immer $\omega_y = 1$ angenommen. Dadurch ist das Frequenzverhältnis $\omega_x : \omega_y$ gleich ω_x . Mithilfe dieser Annahme entspricht dann die Frequenz ω_x genau der Anzahl der Zeilen in y-Richtung der Lissajous-Figur.

Um die entsprechenden Helligkeitswerte des Laserstrahls auf dem Phosphor berücksichtigen zu können, müssen die Lissajous-Figuren dreidimensional geplottet werden. Dabei wird in z-Richtung die Helligkeit als Grauwert aufgetragen. Weiters durchläuft t immer eine volle Schwingung, das heißt $t \in [0, 2\pi]$. Dabei durchläuft der Laserspot das Bild von oben nach unten und dann von unten nach oben. Je nachdem, ob die Frequenz, also die Anzahl der Zeilen, gerade oder ungerade ist, erfolgt der Bildaufbau auf unterschiedliche Arten.



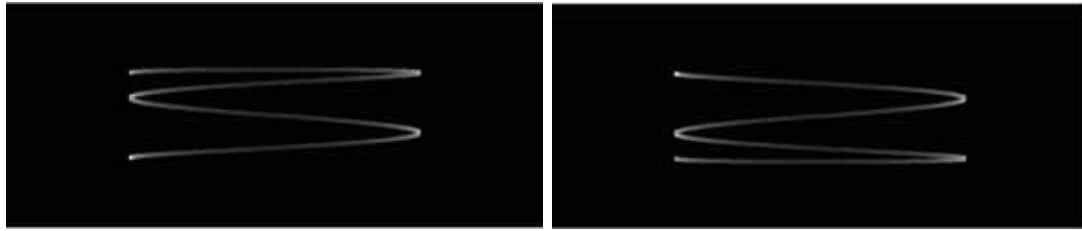
(a) Lissajous-Figur mit 4 Zeilen

(b) Lissajous-Figur mit 5 Zeilen

Abbildung 3.2: Lissajous-Figuren mit 4 und 5 Zeilen

Als Beispiel werden in Abbildung 3.2 Lissajous-Figuren mit 4 und 5 Zeilen dargestellt. Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Plots ist, dass einmal die Anzahl an Zeilen gerade und einmal ungerade ist. Im Falle von einer geraden Anzahl an Zeilen durchläuft der Laserspot sowohl bei der Abwärtsbewegung als auch bei der Aufwärtsbewegung am gleichen Weg das Bild, während im Fall eines ungeraden Frequenzverhältnisses unterschiedliche Wege durchlaufen werden.

Für ein besseres Verständnis wird in Abbildung 3.3 die Lissajous-Figur mit 4 Zeilen (siehe Abbildung 3.2a) auf die Vorwärts- (Abbildung 3.3a) und Rückwärtsbewegung (Abbildung 3.3b) aufgeteilt. Dabei wird das Bild bei der Vorwärtsbewegung von oben nach unten durchlaufen und bei der Rückwärtsbewegung von unten nach oben.

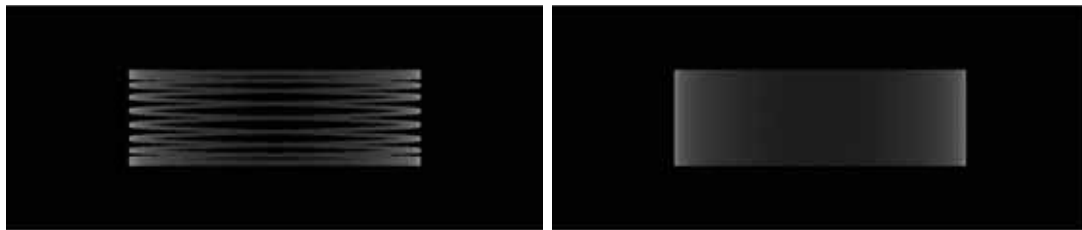


(a) Vorwärtsbewegung

(b) Rückwärtsbewegung

Abbildung 3.3: Vorwärts- und Rückwärtsbewegung einer Lissajous-Figur mit 4 Zeilen

Je höher die Frequenz ist, desto vollständiger ist die Fläche, die am Phosphor abgerastert wird. In Abbildung 3.4 sind Lissajous-Figuren mit 10 und 80 Zeilen dargestellt. Abbildung 3.4b zeigt, dass hier das gesamte Bild gescannt wird. Um später eine bestimmte Helligkeitsverteilung zu erzielen, muss eine geeignet große Frequenz angenommen werden.



(a) Lissajous-Figur mit 10 Zeilen

(b) Lissajous-Figur mit 80 Zeilen

Abbildung 3.4: Lissajous-Figuren mit 10 und 80 Zeilen

3.2.1 Helligkeitsverteilung

Um den Bildaufbau auf der Phosphorplatte zu simulieren, muss zuerst die Helligkeit des Laserspots berechnet werden. Diese ist nicht konstant, da die Geschwindigkeit des Laserstrahls durch die Sinus-Schwingung des Spiegels zum Rand hin abnimmt. Dies muss bei der späteren Modellierung berücksichtigt werden.

3.2.1.1 Berechnung der Helligkeitswerte

Der Ortsvektor des Laserstrahls ist durch

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$$

und seine Geschwindigkeit durch

$$v(t) = \left| \frac{\partial \vec{r}(t)}{\partial t} \right| = \sqrt{\left(\frac{\partial x(t)}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial y(t)}{\partial t} \right)^2}$$

gegeben.

Wegen den Gleichungen 3.1 und 3.2 gilt $t = \frac{1}{\omega_x} \arcsin\left(\frac{x(t)}{A}\right)$ beziehungsweise $t = \frac{1}{\omega_y} \arcsin\left(\frac{y(t)}{B}\right)$. Diese werden dann in die partiellen Ableitungen eingesetzt, um die explizite Abhängigkeit von der Zeit zu verhindern.

Weiters kann man aus $\cos^2(\alpha) + \sin^2(\alpha) = 1$ auf folgende Beziehung schließen:

$$\cos(\arcsin(\alpha)) = \sqrt{1 - \alpha^2}.$$

Durch Einsetzen der partiellen Ableitungen von $x(t)$ und $y(t)$ und der obigen Beziehung in $v(t)$ erhält man für die Geschwindigkeit

$$v(t) = \sqrt{\omega_x^2(A^2 - x(t)^2) + \omega_y^2(B^2 - y(t)^2)}. \quad (3.3)$$

Die Helligkeit ist proportional zum Kehrwert der Geschwindigkeit. Dies ist anschaulich einsichtig, denn je schneller sich der Laserstrahl über den optischen Konverter bewegt, desto weniger lange wird jede einzelne Stelle angeregt. Der entsprechende Proportionalitätsfaktor kann dabei auf 1 gesetzt werden, da später die Helligkeitswerte noch umskaliert werden. Für die Helligkeit des Laserspots zur Zeit t ergibt sich nun

$$h(t) = \frac{1}{v(t)} = \frac{1}{\sqrt{\omega_x^2(A^2 - x(t)^2) + \omega_y^2(B^2 - y(t)^2)}}. \quad (3.4)$$

3.2.1.2 Ungleichmäßige Helligkeitsverteilung

Die Helligkeit des Laserspots ist durch Gleichung 3.4 gegeben. Daraus ist ersichtlich, dass am Rand, also für $x(t) \rightarrow \pm A$ und $y(t) \rightarrow \pm B$, die Helligkeit - da die Geschwindigkeit geringer wird - sehr groß wird. Die Helligkeit kann dabei aber nicht unbeschränkt werden, da es zu keinem Zeitpunkt t möglich ist, dass sowohl $x(t) = A \sin(\omega_x t) = \pm A$ ist als auch $y(t) = B \sin(\omega_y t) = \pm B$ annimmt. Im Gegensatz zum Rand ist die Helligkeit in der Mitte der Phosphorplatte, also um den Ursprung, am geringsten. Somit erhält man durch die variierende Geschwindigkeit des Laserstrahls eine ungleichmäßige Helligkeitsverteilung. Dies war auch schon in den Abbildungen 3.2 und 3.4 erkennbar. Dieser Effekt muss bei der weiteren Modellierung berücksichtigt werden.

Für die graphische Darstellung der Helligkeitsverteilungen wird der Logarithmus der Helligkeitswerte geplottet, da die optische Wahrnehmung - wie andere Sinnesempfindungen - dem Weber-Fencher-Gesetz gehorchen. Dieses besagt, dass die subjektiv empfundenen Intensitäten verschiedener Sinneseindrücke proportional zum Logarithmus der Stärke der wahrgenommenen Reize sind. [45]

Für die weiteren Berechnungen wird selbstverständlich mit den Helligkeitswerten und nicht mit dem Logarithmus dieser gerechnet und simuliert.

Im Anhang (01) befindet sich der Programmkopf, der sowohl die verwendeten Variablen und Funktionen, als auch das Paket und die Einstellungen für das Plotten enthält. Dieser ist für alle weiteren Programme bis auf kleine Veränderungen ident und wird daher in den darauf folgenden Programmcodes nicht angegeben. Kommentare sind in Maxima von den Zeichen `/*` und `*/` eingeschlossen.

Weiters ist noch anzumerken, dass immer Punkte geplottet werden. Dafür ist ein festes Zeitgitter notwendig. Die Zeitvariable t durchläuft immer eine volle Periode mit wählbarer Zeitschrittweite Δt , also von 0 bis 2π in zum Beispiel $\Delta t = 0.05$ Schritten. Dabei werden zu jedem Zeitpunkt t nicht nur die x-Koordinate $x(t)$ und die y-Koordinate $y(t)$, sondern auch die Helligkeit $h(t)$ berechnet.

Abbildung 3.5 zeigt für die Zeitschrittweite $\Delta t = 0.05$ eine Lissajous-Figur mit zwei Zeilen. Es ist ersichtlich, dass aufgrund des fest gewählten Zeitgitters und der variierenden Geschwindigkeit des Laserspots am Rand mehr Punkte als in der Mitte dargestellt werden. In den kommenden Abbildungen wird die Zeitschrittweite so klein gewählt, dass durchgehende Linien und nicht mehr die einzelnen Punkte wahrgenommen werden. Je kleiner die Zeitschrittweite ist, desto genauer ist die Simulation, aber umso länger ist dadurch die Re-

chenzeit. Daher sollte die Länge der Zeitschritte als Mittelweg zwischen ausreichend genauer Simulationsergebnisse und akzeptabler Rechenzeit gewählt werden.

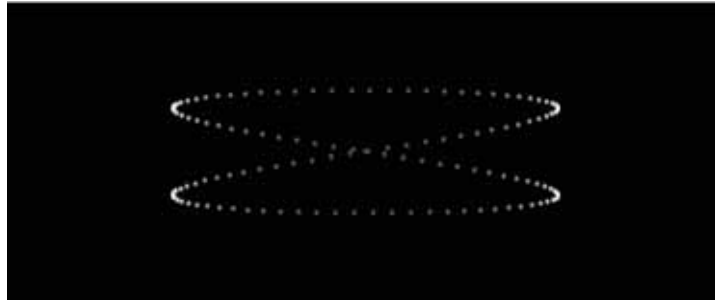


Abbildung 3.5: Lissajous-Figur mit 2 Zeilen: festes Zeitgitter mit $\Delta t = 0.05$

3.2.2 Nachleuchten des Phosphors

In Kapitel 2.4 wurde auf die Phosphoreszenz schon eingegangen. Dieses Nachleuchten muss ebenfalls bei der Simulation berücksichtigt werden. Dabei wird mithilfe von zwei Parametern a und b dieses Nachleuchten modelliert. Konkret wird also angenommen, dass die Helligkeit exponentiell abnimmt, das heißt in jedem Zeitschritt t wird die Helligkeit mit ae^{bt} multipliziert. Dabei muss natürlich $ae^{bt} \leq 1$ sein.

Ziel ist nun nach jedem Zeitschritt einen Plot zu erzeugen, der dieses Nachleuchten darstellt. Bei der Modellierung wurde nun eine sogenannte „Schrittweite“ des Nachleuchtens eingeführt, um die Simulationszeit zu verkürzen. Normalerweise kommt pro Zeitschritt ein neuer Punkt der Lissajous-Figur hinzu und die Helligkeiten aller vorherigen verringern sich um den Faktor ae^{bt} . Mit dieser „Schrittweite“ kann man nun einstellen, wie viele Punkte pro Zeitschritt hinzu kommen. Infolgedessen klingen dann deren Helligkeiten gleich ab. Normalerweise ist diese „Schrittweite“ 1, um aber die Rechenzeit zu verkürzen, wurde dieser Wert um den Faktor 10 erhöht.

Da Maxima in jedem Plot den kleinsten Grauwert mit 0 (schwarz) und den größten mit 1 (weiß) identifiziert - und die Werte dazwischen linearisiert - müssen für die graphische Ausgabe die gesamten Plots noch skaliert werden. Dazu werden am Schluss alle Helligkeitswerte auf das Intervall $[0, 1]$ skaliert. Um dann noch in jedem Zeitschritt die richtigen optischen Helligkeitswerte zu bekommen, muss noch zusätzlich in jedem Plot jeweils ein Punkt das Minimum und ein Punkt das Maximum der Helligkeitswerte annehmen. Im Anhang (02) be-

findet sich der relevante Quellcode. Hier wurde immer die Helligkeit des ersten Punktes auf 0 und die des letzten Punktes auf 1 gesetzt.

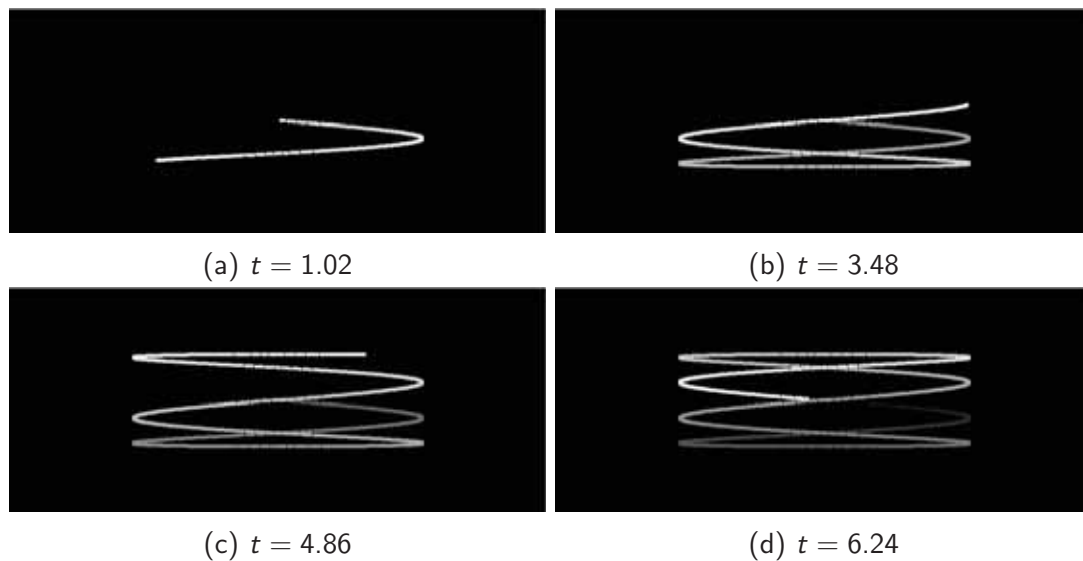


Abbildung 3.6: Nachleuchten der Phosphorplatte (Lissajous-Figur mit 4 Zeilen, $a = 1$, $b = -1$, $\Delta t = 0.006$)

In Abbildung 3.6 wurde dieses Nachleuchten dargestellt. Dabei wurden hier ausgewählte Plots stellvertretend aus der gesamten Simulation entnommen.

Um zu beobachten wie die Parameter a und b das Ergebnis beeinflussen, wurden beide variiert.

Wählt man $a = 1$ und $b = 0$, dann gibt es unendlich langes Nachleuchten, da $ae^{bt} = 1$ ist (vergleiche Abbildung 3.7).

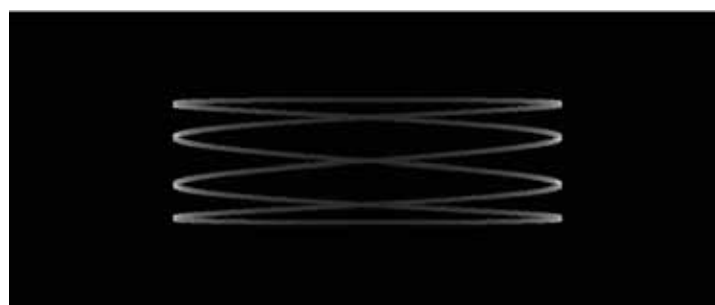
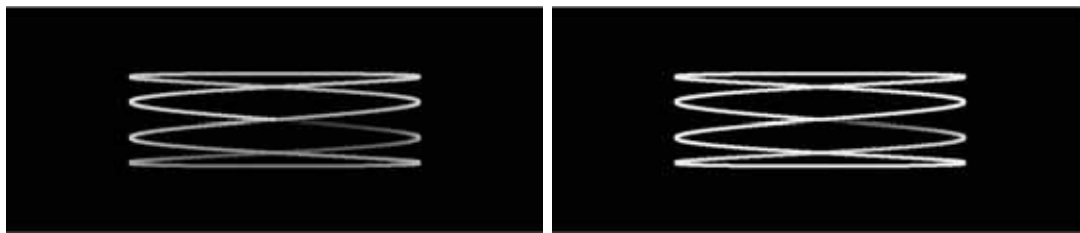


Abbildung 3.7: Unendlich langes Nachleuchten der Phosphorplatte ($a = 1$, $b = 0$)

Um physikalisch sinnvolle Ergebnisse zu erzielen muss $a \leq 1$ und $b < 0$ sein.

Nun wird der Parameter b variiert. Man erkennt in Abbildung 3.8, dass mit dem Fallen des Parameters b , die Dauer des Nachleuchtens des Phosphors länger wird.

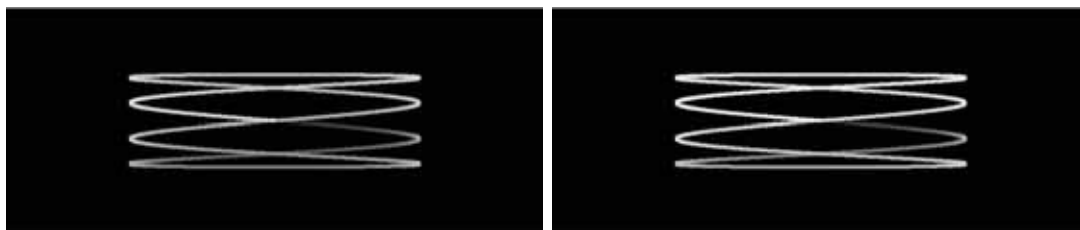
Dabei ist zu beachten, dass die folgenden Abbildungen nicht mit Abbildung 3.6 verglichen werden dürfen, da dort die „Schrittweite“ für die gesamte Simulation mit 10 angenommen wurde, um in akzeptabler Rechenzeit genügend Zwischenbilder zu erhalten. Abbildung 3.8 bis Abbildung 3.10 sind die Ergebnisse von Simulationen, in denen mit „Schrittweite“ 1 gerechnet wird, dafür aber keine Zwischenbilder ausgegeben werden.



(a) $b = -0.001$

(b) $b = -0.01$

Abbildung 3.8: Nachleuchten der Phosphorplatte: $a = 1$



(a) $b = -0.001$

(b) $b = -0.002$

Abbildung 3.9: Nachleuchten der Phosphorplatte: $a = 0.5$

Genauso wird nun in Abbildung 3.9 der Parameter b variiert, jedoch hat hier a den Wert 0.5. Auch hier erhöht sich die Dauer des Nachleuchtens des Phosphors, jedoch weitaus nicht so viel, wie in Abbildung 3.8. Der Parameter a entspricht lediglich einer Multiplikation der Helligkeit mit einer Konstanten. Kleine Änderungen des Parameters a haben somit keinen großen Einfluss, da dieser durch die Umskalierung am Ende wieder kompensiert wird (siehe Abbildung 3.10).

Da zum aktuellen Zeitpunkt weder die Abstrahlcharakteristik der Phosphorplatte bekannt ist noch die Messung der Helligkeitswerte des Nachleuchtens möglich ist, wird in den weiteren

Simulationen diese Eigenschaft vernachlässigt. Damit wird also angenommen, dass die Phosphorplatte so kurz nachleuchtet, dass dies keinen Einfluss auf das Ergebnis hat.

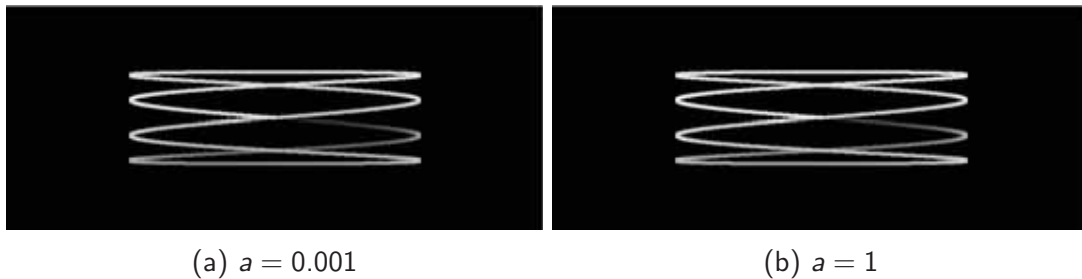


Abbildung 3.10: Nachleuchten der Phosphorplatte: $b = -0.002$

3.2.3 Ausblenden von bestimmten Bereichen

Eine wichtige Eigenschaft für adaptive Scheinwerfer in der automobilen Frontbeleuchtung ist, gewisse Bereiche auszublenden, um zum Beispiel den Gegenverkehr oder Fußgänger nicht zu blenden.

Im Anhang (03) befindet sich wieder der Quellcode. Die Modellierung erfolgt durch das Null setzen des durch die vier definierten Werte x_1 , x_2 , y_1 und y_2 entstandenen Rechtecks $x_1 \leq x \leq x_2$, $y_1 \leq y \leq y_2$. Dieses Nullsetzen entspricht dem Ausschalten des Lasers. Dadurch können im Prinzip beliebige Bilder dargestellt werden.

Abbildung 3.11 zeigt anhand einer gleich hellen Helligkeitsverteilung das Ausblenden eines Bereiches im unteren rechten Teil.

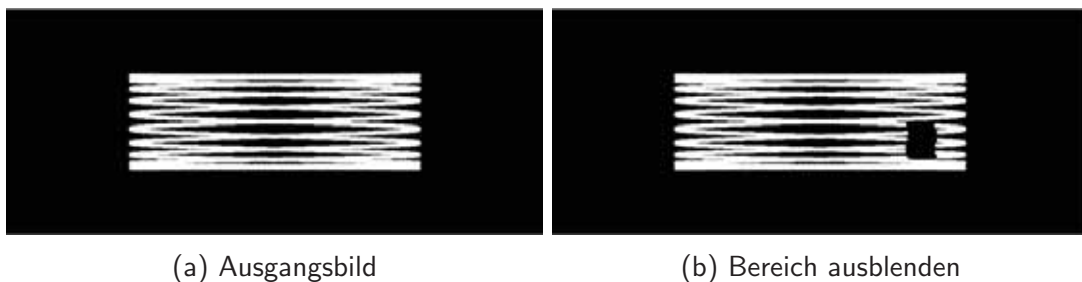


Abbildung 3.11: Bereich ausblenden: $x_1 = 6$, $x_2 = 8$, $y_1 = -2$ und $y_2 = 0$

Angemerkt sei noch, dass der Betrag der vier vorgegebenen Werte x_1, x_2, y_1 und y_2 die Amplituden der Schwingungen des Spiegels natürlich nicht überschreiten darf.

3.2.4 Dimmen des Lasers

Wie schon erläutert wurde, ist die Helligkeitsverteilung auf dem Phosphor nicht gleichmäßig. Am Rand der Phosphorplatte ist es heller als in der Mitte. Da aber eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung gefordert wird, muss der Laser am Rand gedimmt werden. Um welchen Anteil die Helligkeit verringert werden muss, muss erst berechnet werden. Dieser Anteil wird als Dimmwert $d(t)$ bezeichnet.

Die Helligkeit ist laut Gleichung 3.4 der Kehrwert der Geschwindigkeit. Wird nun die Helligkeitsverteilung mit den jeweiligen Geschwindigkeiten multipliziert, erhält man überall Helligkeit $h(t) = 1$. Das heißt, man hat eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung. Somit entsprechen die Dimmwerte genau den Kehrwerten der Helligkeit:

$$d(t) = \frac{1}{h(t)}. \quad (3.5)$$

Im einfachsten Fall, wenn äquidistante Zeitschritte gewählt sind, stimmen die Dimmwerte genau mit den Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt t überein, also $d(t) = v(t)$. Wenn aber später ein festes Ortsgitter gefordert wird, muss man die Helligkeitswerte neu berechnen. Die Kehrwerte davon sind dann die Dimmwerte.

Um die aus den Dimmwerten erhaltenen Intensitäten später am Prototyp zu testen, müssen diese noch entsprechend skaliert werden. Die Intensität des Lasers muss eine ganze Zahl zwischen 0 und 255 sein, wobei 0 Ausschalten und 255 volle Intensität des Lasers bedeutet. Für die Skalierung werden das Minimum und das Maximum der Helligkeitswerte benötigt. Danach können diese zwischen 0 und 255 linear skaliert werden.

3.2.5 Mehrmaliges Scannen eines Punktes

Auch das Nachleuchten der Phosphorplatte muss berücksichtigt werden. Wenn ein Punkt auf dem Phosphor in der zweiten Hälfte der Schwingungsperiode - das heißt auf dem Rückweg - ein zweites Mal getroffen wird, während dieser noch durch die ursprüngliche Anregung leucht-

tet, muss die Intensität der zweiten Anregung - um eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung zu erhalten - reduziert werden.

Da man für äquidistante Zeitschritte keine äquidistanten Ortsschritte bekommt - die Geschwindigkeit ist am Rand niedriger als in der Mitte - muss zuerst ein festes Ortsgitter definiert werden. Dabei können die Schrittweiten Δx und Δy in x- und y-Richtung frei gewählt und variiert werden.

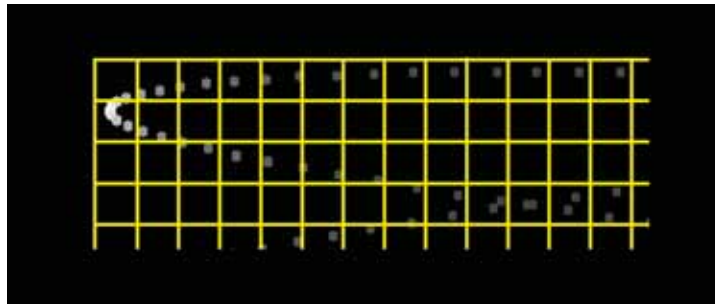


Abbildung 3.12: Lissajous-Figur mit 2 Zeilen: festes Zeitgitter mit $\Delta t = 0.05$ und schematisch dargestelltes festes Ortsgitter

Abbildung 3.12 zeigt einen Ausschnitt einer Lissajous-Figur mit zwei Zeilen und einem festen Zeitgitter ($\Delta t = 0.05$), wobei zusätzlich schematisch ein festes Ortsgitter eingezeichnet wurde. Da am Rand mehr Punkte vorhanden sind, fallen dort mehr Punkte in ein Gitterrechteck. Je kleiner die Schrittweiten sind, umso genauer ist das Modell. Danach wird dieses Gitter zeilenweise durchlaufen und wenn mehrere Punkte in ein Rechteckselement, das von dem Ortsraster erzeugt wird, fallen, werden deren Helligkeiten addiert, da die Helligkeit mit der eingebrachten Energie linear steigt. Somit erhält man für jedes Rechteckselement maximal einen Helligkeitswert. Natürlich ist hier die Helligkeitsverteilung nicht nur von den Schrittweiten in x- und y-Richtung abhängig, sondern auch von der zeitlichen Schrittweite Δt . Je kleiner die Zeitschritte beziehungsweise je größer die Ortsschritte sind, umso mehr Punkte können in ein Rechteck fallen. Dies wird allerdings durch die Umskalierung der Werte am Schluss kompensiert, das heißt die Addition der Helligkeitswerte in jedem Gitterelement entspricht im Prinzip dem Mittelwert der Helligkeitswerte in diesem Gitterelement.

Um möglichst nahe an die Realität zu kommen, werden sowohl die Zeitschrittweite als auch die Ortsschrittweiten sehr klein gewählt.

Anhang (04) enthält den Quellcode für die Erstellung eines festen Ortsgitters. Mit Hilfe von drei for-Schleifen wird überprüft, ob beziehungsweise wie viele Werte in welchen Rechteckselementen liegen. Liegen mehrere Werte in einem Rechteck, so werden deren Helligkeiten addiert. Danach müssen noch die Einträge mit Helligkeit 0 gelöscht werden, da ja das gesamte

Bild zeilenweise durchgelaufen wird, obwohl der Laser nicht zwingend überall den Phosphor abrastern muss. Zum Schluss werden die Dimmwerte ausgegeben, indem der Kehrwert der Helligkeiten berechnet wird.

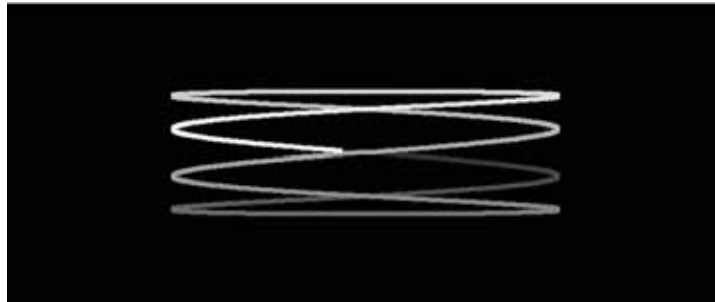
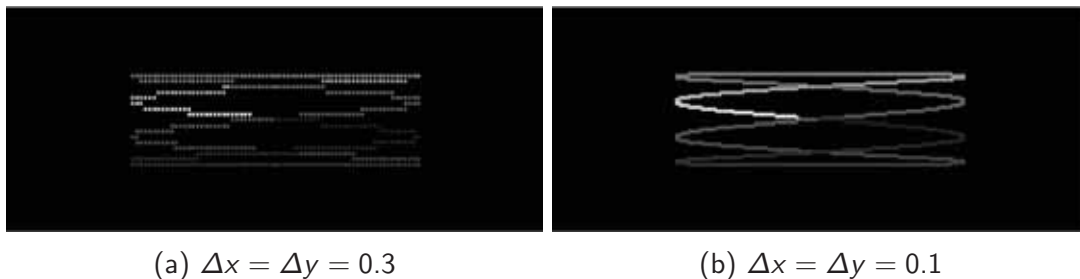


Abbildung 3.13: Ausgangsplot für festes Ortsgitter mit Nachleuchten der Phosphorplatte
($a = 1$, $b = -1$)

Abbildung 3.13 zeigt den Ausgangsplot. Das Nachleuchten der Phosphorplatte wurde dabei berücksichtigt (vergleiche Abbildung 3.6). Die Plots in Abbildung 3.14 zeigen die Helligkeitsverteilung mit einem festen Ortsgitter. Aufgrund der angenommenen Amplituden $A = 10$ und $B = 2.5$, wurde in Abbildung 3.14a $\Delta x = \Delta y = 0.3$ und in Abbildung 3.14b $\Delta x = \Delta y = 0.1$ gewählt. Hier erkennt man, dass die Simulation genauer wird, je feiner man das Ortsgitter wählt.



(a) $\Delta x = \Delta y = 0.3$

(b) $\Delta x = \Delta y = 0.1$

Abbildung 3.14: Festes Ortsgitter

Danach wurde ein Programm erzeugt, das alle bisherigen Überlegungen und Vorgaben ausführen kann. Plot 3.15 zeigt wieder das Ausgangsbild einer Lissajous-Figur mit 20 Zeilen. Danach wurde wieder das Nachleuchten des Phosphors mit den Parametern $a = 1$, $b = -1$ und auch das Ausblenden eines bestimmten Bereiches ($x_1 = 6$, $x_2 = 8$, $y_1 = -2$ und $y_2 = 0$) simuliert, wie die Abbildung 3.16a zeigt. In Abbildung 3.16b wurde dann wieder ein festes Ortsgitter mit $\Delta x = \Delta y = 0.2$ erzeugt.

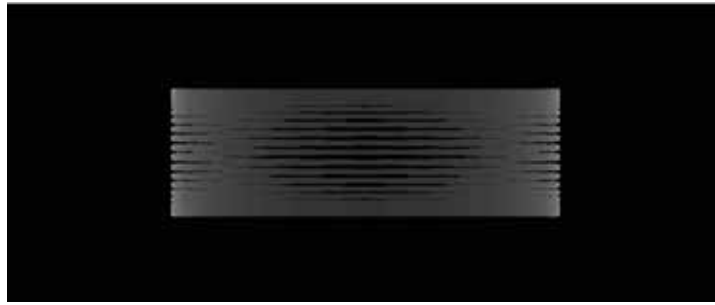
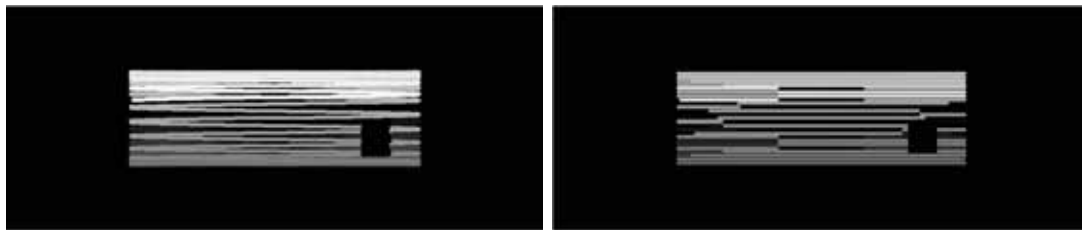


Abbildung 3.15: Ausgangsplot für die Funktionen „Bereich ausblenden“ und „festes Ortsgitter“ mit Nachleuchten der Phosphorplatte



(a) Bereich ausblenden ($x_1 = 6$, $x_2 = 8$,
 $y_1 = -2$ und $y_2 = 0$)

(b) Bereich ausblenden und festes
Ortsgitter mit $\Delta x = \Delta y = 0.2$

Abbildung 3.16: Bereich ausblenden und festes Ortsgitter

3.2.6 Berücksichtigung des unterschiedlichen Laserspotdurchmessers

Ein weiterer Effekt muss bei der Modellierung berücksichtigt werden. Durch den Wegunterschied zwischen Spiegel und Phosphor bei unterschiedlich starker Ablenkung, ändert sich der Spotdurchmesser des Laserstrahls. Der Strahl ist im Zentrum des Phosphors auf einen Punkt fokussiert, zu den Rändern hin kommt es durch den längeren Weg, den der Strahl zurücklegt, zu einer Aufweitung des Strahldurchmessers. Die minimale Spotgröße erhält man auf einer Kugeloberfläche mit dem Zentrum im Mittelpunkt des Spiegels und einem Radius, der dem Abstand zwischen dem Spiegel und der Mitte des Phosphors entspricht.

Um zu berechnen entlang welcher Kurven die Fläche gleich bleibt, wird zuerst der Ursprung des Koordinatensystems in die Mitte des Spiegels gelegt. Schneidet man nun die Phosphorplatte mit einer Kugeloberfläche, die als Radius die Länge vom Ursprung bis zum Punkt auf der Phosphorplatte hat, erhält man eine Schnittkurve entlang welcher der Spotdurchmesser konstant bleibt, wie Abbildung 3.17 zeigt.

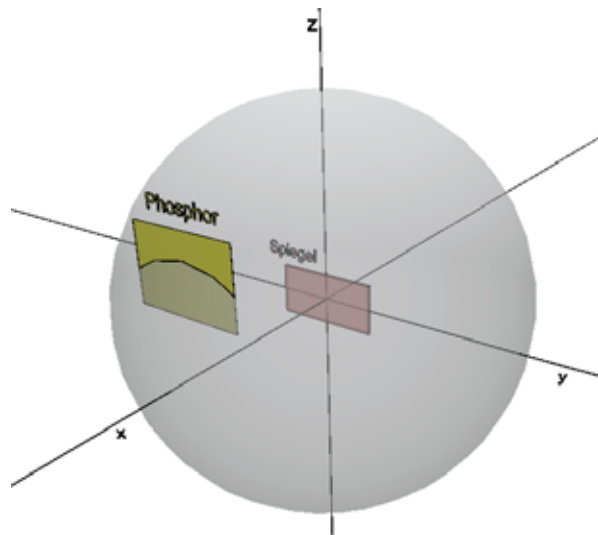
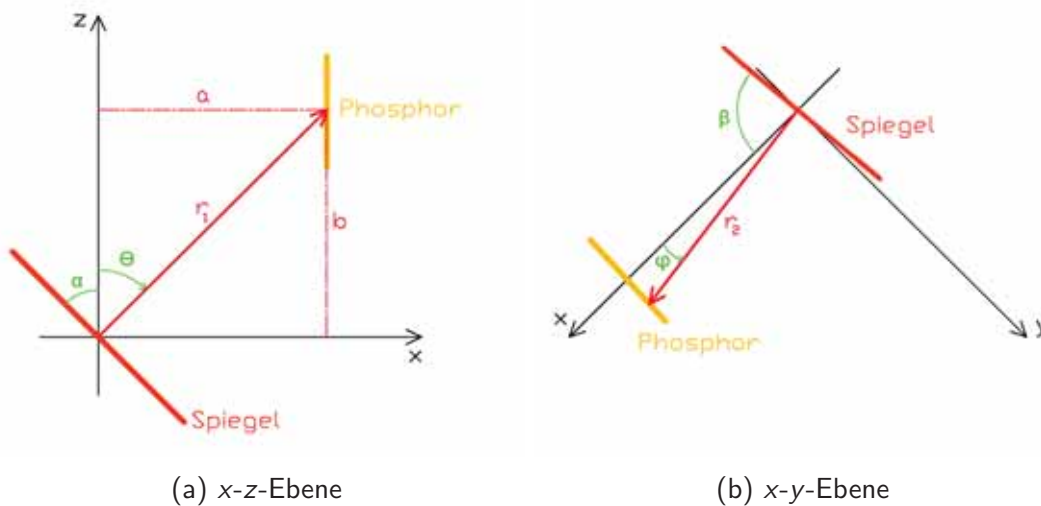


Abbildung 3.17: Schnittkurve mit gleichem Spotdurchmesser

Für die Berechnung der Schnittkurven werden nun die x - z -Ebene und die x - y -Ebene einzeln betrachtet (siehe Abbildung 3.18a und Abbildung 3.18b).

In der x - z -Ebene ist der Spiegel nicht ausgelenkt, das bedeutet, dass der Radiusvektor r_1 genau bis zum Mittelpunkt der Phosphorplatte geht. Im Gegensatz dazu ist in der x - y -Ebene der Spiegel schon ausgelenkt. Dort zeigt also der Radiusvektor r_2 , abhängig von der Auslenkung des Spiegels, auf eine andere Stelle auf der Phosphorplatte.



(a) x - z -Ebene

(b) x - y -Ebene

Abbildung 3.18: 2D-System

Um die Schnittkurven zu berechnen wird zuerst der Schnittpunkt P des Laserstrahls mit der Phosphorplatte bestimmt. Dabei wird die Ebene ϵ der Phosphorplatte mit Hilfe der Parameter $s \in \mathbb{R}$ und $t \in \mathbb{R}$ durch folgende Gleichung beschrieben, wobei a und b die Abstände zwischen Spiegel- und Phosphorplattenmittelpunkt in x- beziehungsweise z-Richtung sind:

$$\epsilon : X = \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ b \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Und der Laserstrahl ist durch die Gerade λ (durch den Ursprung und in Kugelkoordinaten) mit dem Parameter $u \in \mathbb{R}$ gegeben:

$$\lambda : X = u \begin{pmatrix} r \sin(\theta) \cos(\varphi) \\ r \sin(\theta) \sin(\varphi) \\ r \cos(\theta) \end{pmatrix}.$$

Wird die Gerade mit der Ebene geschnitten, erhält man folgenden Schnittpunkt P auf der Phosphorplatte:

$$P = \begin{pmatrix} a \\ \frac{a \sin(\varphi)}{\cos(\varphi)} \\ \frac{a \cos(\theta)}{\sin(\theta) \cos(\varphi)} \end{pmatrix}.$$

Vom Ursprung zu diesem Schnittpunkt P geht der Radius der Kugel, die mit der Phosphorplatte nun geschnitten werden muss, um die Kurven mit konstanten Spottedurchmessern zu erhalten. Somit ist der neue Radius r_2 gegeben durch

$$r_2^2 = |P| = a^2 \left(1 + \frac{\sin^2(\varphi)}{\cos^2(\varphi)} + \frac{\cos^2(\theta)}{\sin^2(\theta) \cos^2(\varphi)} \right) = \frac{a^2}{\sin^2(\theta) \cos^2(\varphi)}.$$

Nun kann die Kugel $x^2 + y^2 + z^2 = r_2^2$ mit der Phosphorebene ϵ geschnitten werden. Als Schnittkurve erhält man

$$z = \pm \sqrt{a^2 \left(\frac{1}{\sin^2(\theta) \cos^2(\varphi)} - 1 \right) - y^2}. \quad (3.6)$$

Entlang dieser Kurven bleibt die Fläche des Spots gleich. Diese Kurven sind parabelförmig. Für den Spezialfall, dass $\varphi = 0$ ist - also dass der Laserstrahl genau auf die Mitte der

Phosphorplatte trifft - erhält man

$$z = \pm \sqrt{b^2 - y^2}.$$

Für eine vorgegebene Größe der Phosphorplatte dürfen die Winkel φ und θ nicht beliebig sein, damit der Laserstrahl am Phosphor bleibt. Sei die Breite der Platte h_1 und die Höhe h_2 . Für die Modellierung wird angenommen, dass $h_1 = 2A$ und $h_2 = 2B$ ist, also genau die zweifache Amplitude der Schwingung des Spiegels in die entsprechende Richtung. Der Mittelpunkt der Phosphorplatte befindet sich bei $(a, 0, b)$. Somit haben die vier Eckpunkte der Platte folgende Koordinaten: $(a, 0, b + \frac{h_2}{2})$, $(a, \frac{h_1}{2}, b)$, $(a, 0, b - \frac{h_2}{2})$ und $(a, -\frac{h_1}{2}, b)$. Also ergibt sich aus

$$\tan(\theta_1) = \frac{a}{b + \frac{h_2}{2}}, \quad \tan(\theta_2) = \frac{a}{b - \frac{h_2}{2}}, \quad \tan(\varphi_1) = -\frac{h_1}{2a}$$

und

$$\tan(\varphi_2) = \frac{h_1}{2a}$$

folgende Bedingungen für die Winkel φ und θ :

$$\arctan\left(\frac{a}{b + \frac{h_2}{2}}\right) = \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 = \arctan\left(\frac{a}{b - \frac{h_2}{2}}\right)$$

und

$$\arctan\left(-\frac{h_1}{2a}\right) = \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2 = \arctan\left(\frac{h_1}{2a}\right).$$

Je größer die Fläche des Laserspots, desto geringer ist seine Helligkeit, da die gleiche Energie auf eine größere Fläche verteilt wird. Um den Einfluss der Größe des Laserspots auf die Helligkeit zu modellieren, wird zuerst eine bestimmte Anzahl an verschiedenen Schnittkurven berechnet. Es wird angenommen, dass jeweils entlang einer Kurve die Spotgröße konstant bleibt, wobei die Kurve durch den Mittelpunkt des Phosphors die geringste Spotgröße beschreibt. Mit zunehmenden Abstand der Kurven vom Mittelpunkt des Phosphors steigt der Durchmesser des Laserstrahls. In Abbildung 3.19 ist dies schematisch für drei verschiedene Spotgrößen dargestellt.

Die Punktgröße wird in Maxima in Pixel eingestellt. Der Radius eines Laserspots wird als ein Zehntel der Pixelgröße angenommen und daraus die Flächen der verschiedenen Spots berechnet. Danach werden die Werte der Flächen auf die kleinste Fläche normiert, damit alle Flächenwerte größer gleich eins sind, und die Helligkeit durch diese Werte dividiert. Für die

genaue Vorgangweise für die Abnahme der Helligkeit wird auf Anhang (05) verwiesen.



Abbildung 3.19: Unterschiedliche Spotgröße

Die Abbildung 3.20a zeigt das Ausgangsbild für die anderen Plots. Dieses ist eine Lissajous-Figur mit 4 Zeilen, wobei hier das Nachleuchten der Phosphorplatte nicht berücksichtigt wurde.

Um den unterschiedlichen Laserspotdurchmesser berücksichtigen zu können, muss zuerst ein festes Ortsgitter gelegt werden (Abbildung 3.20b). Die Schrittweite dieses Gitters ist $\Delta x = \Delta y = 0.3$. Die Abbildung 3.20c zeigt nun den variablen Laserspotdurchmesser. Dieser hat auch Einfluss auf die Helligkeit, wie zuvor erklärt wurde.

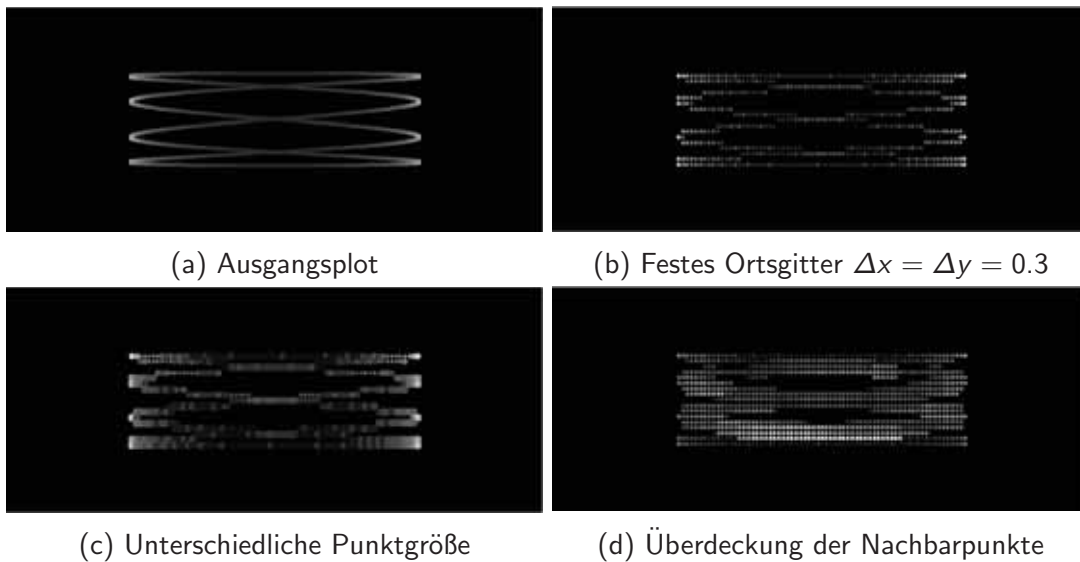


Abbildung 3.20: Unterschiedlicher Laserspotdurchmesser mit Überdeckung der Nachbarpunkte und festem Ortsgitter $\Delta x = \Delta y = 0.3$

Durch die variierende Punktgröße kann es vorkommen, dass mehr als ein Gitterpunkt des festen Ortsgitters getroffen wird, das heißt dass nicht nur der Helligkeitswert im eigenen Gitterpunkt erhöht wird, sondern auch in den benachbarten Zellen. Um diesen Einfluss zu modellieren, wird für verschiedene Pixelgrößen definiert, welche und wie viele Nachbarzellen von diesem mit beleuchtet werden, wobei für die kleinste Punktgröße angenommen wird, dass keine Nachbarzellen getroffen werden (Abbildung 3.21a). Für die nächstgrößere beziehungsweise übernächstgrößere Pixelgröße wird angenommen, dass die direkten vier (Abbildung 3.21b) beziehungsweise alle acht Nachbarzellen (Abbildung 3.21c) überdeckt werden. Für die restlichen Punktgrößen wird festgelegt, dass sowohl alle acht Nachbarzellen als auch von diesen die direkten zwölf Nachbarzellen überdeckt werden (Abbildung 3.21d).

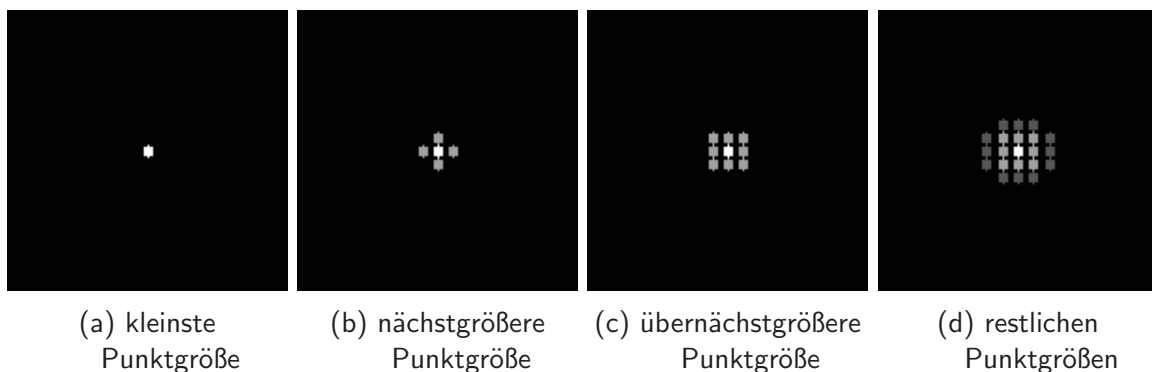


Abbildung 3.21: Mitbeleuchtung der Nachbarzellen

Da das Strahlprofil eines Lasers näherungsweise gaußförmig ist, nimmt die Helligkeit des Laserspots zum Rand hin ab [24] [25]. Daher werden die Helligkeitswerte der Nachbarzellen nicht gleich den Helligkeitswerten des Punktes selbst gesetzt, sondern je nach Abstand mit einem Abschwächungsfaktor multipliziert um einen geringeren Helligkeitswert zu erhalten. Dies wurde ebenfalls in Abbildung 3.21 schematisch dargestellt. Darüberhinaus muss auch noch berücksichtigt werden, dass durch die Überdeckung der Punkte deren Helligkeiten dann addiert werden müssen (siehe Anhang (05)).

Die Abbildung 3.20d zeigt wie der Laserspot - abhängig von seinem Durchmesser - die Nachbarzellen überdeckt. Dabei wurden die verschiedenen Punktgrößen aus Abbildung 3.20c übernommen. Man sieht deutlich, dass in den Bereichen mit großem Spotdurchmesser - hier vor allem unten im Bild - die Helligkeit größer wird.

Nun wurde auch für ein feineres Ortsgitter diese Simulation durchgeführt. Hier wurde die Schrittweite $\Delta x = \Delta y$ auf 0.1 gesetzt, um eine realitätsgetreuere Simulation darzustellen. Abbildung 3.22a zeigt zuerst wiederum den Ausgangsplot und die Abbildungen 3.22b und 3.22c stellen das feste Ortsgitter mit konstantem und unterschiedlichem Laserspotdurchmesser dar. Schlussendlich wurde in Abbildung 3.22d wieder die Überdeckung der Nachbarzellen berücksichtigt.

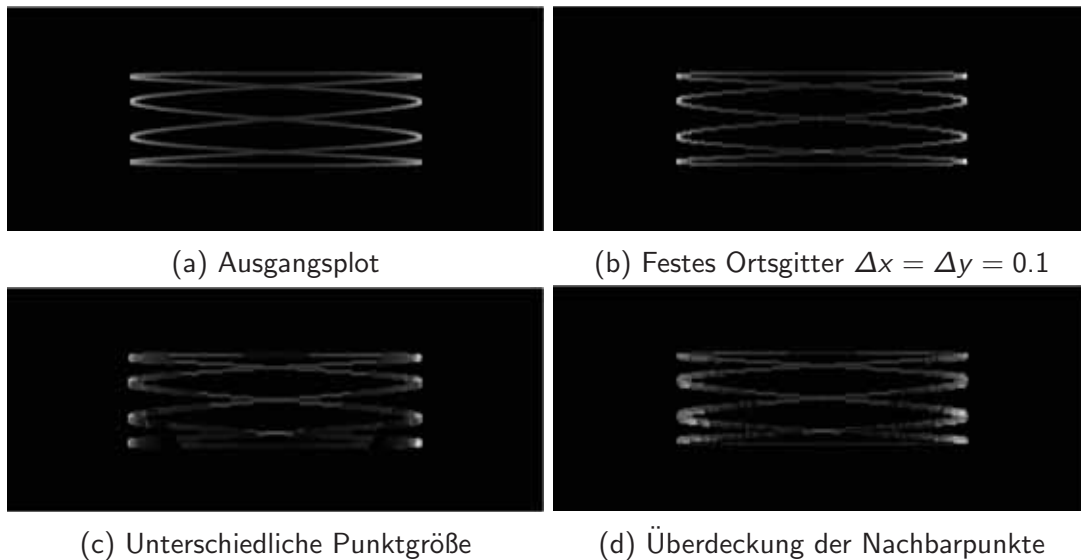


Abbildung 3.22: Unterschiedlicher Laserspotdurchmesser mit Überdeckung der Nachbarpunkte und festem Ortsgitter $\Delta x = \Delta y = 0.1$

3.2.7 Berücksichtigung des Zeilenabstandes der Lissajous-Figur

Die Zeilen der Lissajous-Figur liegen oben und unten näher zusammen als in der Mitte (vergleiche Abbildung 3.3). Dies muss bei der Simulation berücksichtigt werden, da dort, wo die Zeilen näher beisammen liegen, die Helligkeitsverteilung heller wirkt.

Wie Anhang (06) zeigt, werden zuerst die Indizes der Zeilensprünge gesucht. Diese sind genau dort, wo die x-Koordinaten des vorherigen und des nächsten Punktes entweder beide größer oder beide kleiner sind als die x-Koordinate des momentanen Punktes. Dies kann einfach mithilfe von zwei for-Schleifen abgefragt werden. Danach wird der Zeilenabstand vom mittleren Punkt der Zeile zum mittleren Punkt der nächsten Zeile berechnet. Der Einfluss des Zeilenabstandes wird berücksichtigt, indem die Helligkeitswerte pro Zeile durch den Mittelwert des

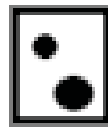
Zeilenabstandes davor und danach dividiert werden. Somit werden die Helligkeitswerte der Lissajous-Figur oben und unten größer, da dort der Zeilenabstand kleiner ist. Die Zeilenabstände werden immer berücksichtigt bevor ein festes Ortsgitter erzeugt wird.

3.2.8 Simulation einer bestimmten vorgegebenen Helligkeitsverteilung

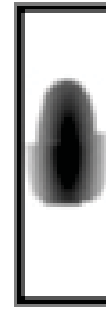
Um für eine vorgegebene Helligkeitsverteilung die Intensitätswerte ausgegeben zu können, soll die gewünschte Lichtverteilung als JPEG-Bild (mit vordefinierter Größe) eingelesen werden. Da dies mit dem Programm Maxima nicht möglich ist, wird hier ein Umweg über Octave gemacht. In Octave ist es möglich ein Bild einzulesen und daraus die Grauwerte zu bekommen. Die Anzahl der Bildpunkte in x-Richtung ist dabei durch die Ansteuerungselektronik vorgegeben, in y-Richtung ist sie durch die Frequenz des Spiegels festgelegt. Gegebenenfalls muss davor das Bild manuell (zum Beispiel in Paint) entsprechend gestaucht werden. Als Ergebnis erhält man eine Matrix mit den Grauwerten, die im Intervall $[0, 255]$ liegen. Mithilfe des Befehls „imread“ kann ein Bild in Octave eingelesen werden und mit „save“ dessen Grauwerte gespeichert werden. Diese werden dann in Maxima als Matrix eingelesen und für die weitere Berechnung der Intensitätswerte verwendet.

In Kapitel 3.2.4 wurde erklärt, wie man eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung erhält. Konkret erhält man eine Matrix der Dimmwerte für die Vorwärtsbewegung der Lissajous-Figur und eine für die Rückwärtsbewegung, da immer eine volle Schwingung des Spiegels betrachtet wird. Diese Dimmwert-Matrizen müssen nun mit den Grauwerten der gewünschten Helligkeitsverteilung punktweise multipliziert werden. Daraus erhält man die gesuchten Intensitätswerte - vergleiche Anhang (07) (nur Vorwärtsbewegung). Weiters wird bei der Simulation - wie in Kapitel 3.2.7 erklärt - berücksichtigt, dass die Zeilen der Lissajous-Figur oben und unten näher beisammen liegen. Für die genaue Vorgangsweise der Berechnung der Intensitätswerte für den Prototypen wird auf Kapitel 3.3.3.6 verwiesen.

Abbildung 3.23 zeigt zwei Beispielbilder, für die die Intensitätswerte ausgegeben werden sollen. In Abbildung 3.23a werden mit 30 Zeilen zwei Punkte und in Abbildung 3.23b mit 80 Zeilen eine Fernlichtverteilung dargestellt. In x-Richtung wird jeweils mit 24 Werten gerechnet. Die Bilder erscheinen hier im Hochformat, weil die durch die Spiegelschwingung erzeugten Pixel nicht quadratisch, sondern Querformat-rechteckig sind.



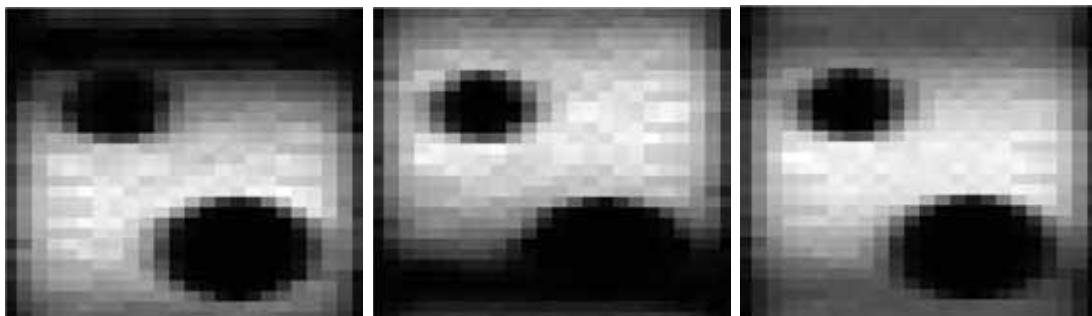
(a) Punkte



(b) Fernlichtverteilung

Abbildung 3.23: Bestimmte vorgegebene Helligkeitsverteilungen

Die Abbildung 3.24 zeigt nun die Intensitätswerte für die Vorwärts- (Abbildung 3.24a) und Rückwärtsbewegung (Abbildung 3.24b). In Abbildung 3.24c werden die beiden Bilder überlagert, um so zu sehen, wie das vom Laser gescannte Bild später aussehen wird. Hier werden die Intensitätswerte basierend auf deren Wert in Graustufe dargestellt, der kleinste Wert wird schwarz und der größte Wert weiß markiert. Somit erhält man als „Bild“ sozusagen die Helligkeit des Lasers. Durch die langrechteckige Form der Einzelpixel wird das Bild nun auch im korrekten Seitenverhältnis dargestellt.



(a) Intensitätswerte für Vorwärtsbewegung

(b) Intensitätswerte für Rückwärtsbewegung

(c) Überlagerung von Vor- und Rückwärtsbewegung

Abbildung 3.24: Intensitätswerte für eine bestimmte Helligkeitsverteilung

Man sieht, dass bei der Vorwärtsbewegung oben die Intensitätswerte geringer sind und bei der Rückwärtsbewegung unten. Dies war auch zu erwarten, da die Zeilen oben beziehungsweise unten näher beisammen liegen und daher die Helligkeit dort größer ist (vergleiche Abbildung 3.3). Dadurch muss also genau dort mehr gedimmt werden, also die Intensität verringert werden.

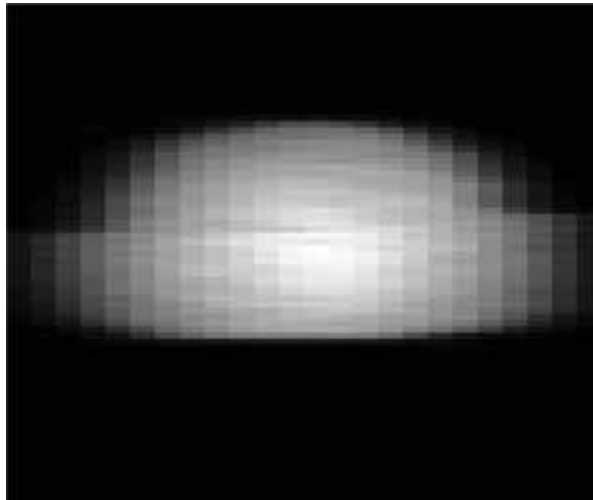


Abbildung 3.25: Intensitätswerte für eine Fernlichtverteilung

Die Abbildung 3.25 zeigt die Überlagerung von Vorwärts- und Rückwärtsbewegung der Fernlichtverteilung aus Abbildung 3.23. Auf die Darstellung der Einzelbilder für die Vorwärts- und Rückwärtsbewegung wird in diesem Fall verzichtet, da hier die unterschiedlichen Zeilenabstände keine große Rolle spielen, da oben und unten die Helligkeit Null beträgt.

3.3 Validierung durch Prototypen

Um die erzeugten Daten für die Simulation einer bestimmten vorgegebenen Helligkeitsverteilung (vergleiche Kapitel 3.2.8) zu validieren, werden diese anhand eines Prototypen (Tischmusters) getestet. Das heißt also, dass die berechneten Daten auf den Prototypen aufgespielt werden und danach das so erhaltende Projektionsbild mit dem vorgegebenen Bild verglichen und bewertet wird. Zuvor wird noch der Prototyp präsentiert.

In den kommenden Abbildungen sind die Projektionsbilder durch die Wahl einer geeigneten Belichtungszeit beim Fotografieren realitätsgetreu dargestellt und können dadurch sehr gut beurteilt und verglichen werden.

3.3.1 Prototyp

Die Hauptkomponenten des Tischmusters sind eine blaue Laserdiode und ein 2D-Mikro-Scanner (Abbildung 3.26). Anstelle der Phosphorplatte wurde für die folgenden Untersuchungen ein weißes Blatt Papier verwendet. Dadurch können die Projektionsbilder größer dargestellt werden, denn die Phosphorplatte hat eine Größe von maximal 1×2 cm. Außerdem kann ein schwächerer, für das Auge und den Kamerachip ungefährlicherer Laser verwendet werden, und auch Bildartefakte durch unerwünschte Eigenschaften des Phosphors können vermieden werden. Durch den sehr frühen Zeitpunkt in der Entwicklungsphase sind an dem Konvertermaterial noch nicht alle Probleme zufriedenstellend gelöst beziehungsweise keine Daten für die Abstrahlcharakteristik bekannt. Deshalb wird auf den Einsatz der Phosphorplatte verzichtet, somit wird auch das Nachleuchten dieser in der Simulation nicht berücksichtigt.

Obwohl zum Testen schwächere Laserdioden verwendet werden, muss dennoch vorsichtig damit umgegangen werden. Der Prototyp darf nur in geeigneten Laserschutzräumen benutzt werden und das Tragen eine Laserschutzbrille ist unbedingt notwendig.

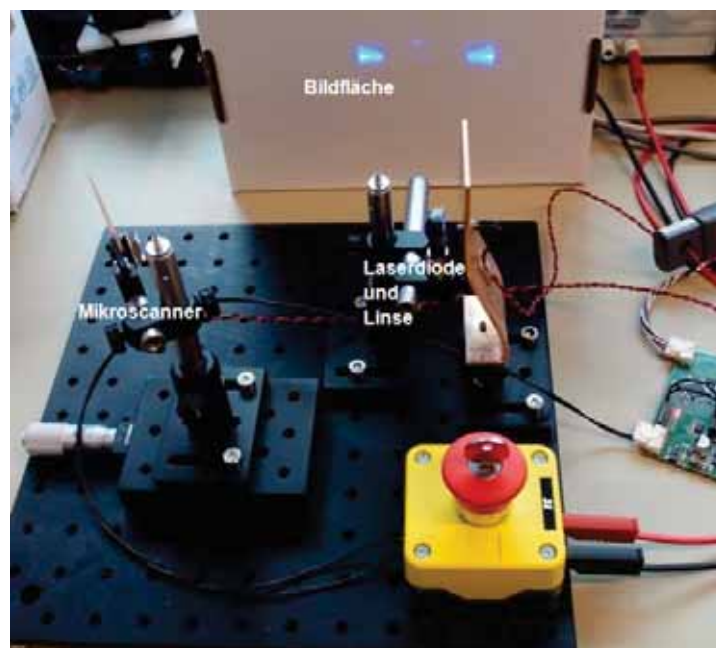


Abbildung 3.26: Prototyp des 2D-Laserprojektionssystems (Quelle: ZKW)

Verwendet wird hier ein 2D-Mikroscanner, welcher eine Zeilenfrequenz von 80 besitzt. Dadurch wird also eine Lissajou-Figur mit 80 Zeilen generiert. Aufgrund der hohen Zeilenanzahl

kann somit die gesamte Bildfläche zeilenweise abgerastert werden.

Für die genauere Beschreibung und Funktionsweise des Prototypen wird auf [46] verwiesen.

3.3.2 Bildaufbau

Durch die Schwingung des Spiegels in beide Raumrichtungen entstehen Lissajous-Figuren. Die Entstehung des Bildes erfolgt also zeilenweise, wobei unterschieden wird zwischen der Vorwärts- und Rückwärtsbewegung (siehe auch Kapitel 3.2). Weiters muss die Bildwiederholfrequenz so hoch sein, dass das menschliche Auge kein Flimmern wahrnimmt.

Für den hier gezeigten Prototypen wird ein Spiegel verwendet, der in der schnellen Achse eine Resonanzfrequenz (Zeilenfrequenz) von 10 kHz besitzt, in der langsamen Achse eine von 200 Hz (Bildwiederholfrequenz). [46]

Abbildung 3.27 zeigt den zeilenweisen Bildaufbau. Durch eine sehr kurze Belichtungszeit von $\frac{1}{4000}$ s konnte das festgehalten werden. Ganz rechts ist das vollständige Bild zu sehen. Hier betrug die Belichtungszeit $\frac{1}{20}$ s.



Abbildung 3.27: Bildaufbau

3.3.3 Berechnung der Intensitätswerte für die Elektronik

Bei der Berechnung der Intensitätswerte für die Elektronik werden sämtliche Eigenschaften, die in Kapitel 3.2 erklärt wurden, berücksichtigt. Darüber hinaus müssen die Daten eine bestimmte Form und Struktur aufweisen, um in den Prototypen eingelesen werden zu können. Der Strom, mit dem die Laserdiode gepumpt wird, kann in Schritten von 0 – 255 angepasst werden. Da sich die Ausgangsleistung des Lasers annähernd linear zum Pumpstrom verhält, geben diese Werte die Intensität vor. Dabei stehen 0 für das Ausschalten des Lasers und 255 für die volle Laserleistung. Daher werden die Intensitätswerte immer vor der Ausgabe auf ganze Zahlen im Intervall $[0, 255]$ skaliert.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Ausgabe der Intensitätswerte ist, dass der Bildaufbau

nicht nur aus einer Vorwärts- und Rückwärtsbewegung besteht, sondern auch die Vorwärtsbewegungen immer links oben beginnen. Daher erfolgt die Ausgabe immer zeilenweise und zwar für die Vorwärtsbewegung von oben nach unten und für die Rückwärtsbewegung von unten nach oben. Dabei werden die Zeilen, je nachdem wie der Laser sie durchläuft, in der Reihenfolge von links nach rechts oder von rechts nach links ausgegeben (vergleiche Abbildung 3.3). Die erste Zeile der Vorwärtsbewegung wird also immer von links nach rechts ausgegeben, die nächste dann von rechts nach links, und so weiter. Vorsicht ist jedoch beim Wechsel von der Vorwärts- auf die Rückwärtsbewegung geboten. Denn abhängig von der Frequenz in x-Richtung, also der Anzahl an Zeilen, wird bei der Rückwärtsbewegung die erste Zeile von rechts nach links oder von links nach rechts durchlaufen. Allgemein gilt also, dass die erste Zeile der Rückwärtsbewegung von links nach rechts durchlaufen wird, wenn die Frequenz in x-Richtung gerade ist. Ist diese jedoch ungerade, dann wird die erste Zeile der Rückwärtsbewegung von rechts nach links ausgegeben. Da hier jedoch die Anzahl der Zeilen durch die Spiegelschwingung bestimmt ist, ist die Frequenz in x-Richtung 80. Somit wird die erste Zeile der Rückwärtsbewegung von links nach rechts ausgegeben. Insgesamt werden am Schluss der Simulation Wertetabellen für die Intensitäten für die Vorwärtsbewegung und für die Rückwärtsbewegung ausgegeben.

3.3.3.1 Grauwerte der vorgegebenen Helligkeitsverteilung

In Kapitel 3.2.8 wurde bereits erklärt, wie man aus einem JPEG-Bild die Grauwerte erhält. Dabei muss das Bild bereits die richtige Anzahl an Pixeln haben. Aktuell sind dies in x-Richtung 24 Pixel und in y-Richtung 80. Diese Grauwert-Matrix kann in Maxima eingelesen werden, um dann mit dieser weiter rechnen zu können.

3.3.3.2 Helligkeitswerte

Zuerst werden für die Berechnung der Intensitäten nur die Helligkeitswerte herangezogen. Wie aus Kapitel 3.2.4 bekannt, entsprechen die Dimmwerte genau den Kehrwerten der Helligkeitswerte. Werden sonst keine weiteren Eigenschaften der Simulation berücksichtigt, können diese Dimmwerte mit den Grauwerten der vorgegebenen Helligkeitsverteilung punktweise multipliziert werden. Daraus erhält man folgendes Bild 3.28 als Projektionsbild:

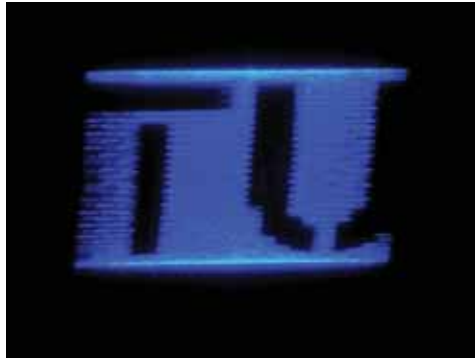


Abbildung 3.28: TU Logo: Helligkeitswerte

Wie aus dieser Abbildung 3.28 des TU-Logos ersichtlich ist, ist hier die Helligkeitsverteilung nicht gleichmäßig, obwohl dies zu erwarten wäre. In der Mitte ist die Helligkeit offensichtlich höher als am Rand. Vor allem sind die ersten und letzten Zeilen deutlich heller.

Die ungleichmäßige Helligkeit in x-Richtung entsteht durch eine Überkorrektur. Aus technischen Gründen in der Elektronik, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, wird die durch die Sinusschwingung des Spiegels erzeugte, ungleichmäßige Helligkeit in x-Richtung bereits hardwareseitig korrigiert [46]. Es kommt somit zu einer doppelten Korrektur, was in der Berechnung der Dimmwerte berücksichtigt werden muss.

Die ungleichmäßige Helligkeit in y-Richtung kommt daher, dass die Zeilen im oberen und unteren Bildbereich viel enger zusammen liegen als in der Mitte. Dies zeigen auch die Abbildungen 3.3 und 3.29.

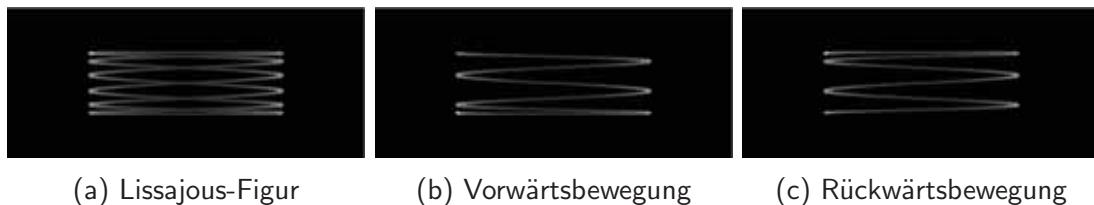


Abbildung 3.29: Unterschiedliche Zeilenabstände: Lissajous-Figur mit 6 Zeilen

Dadurch erscheint die Helligkeit in diesem Bereich höher als in der Mitte. Dies muss bei der Simulation auch berücksichtigt werden (siehe Kapitel 3.3.3.4).

3.3.3.3 Helligkeitskompensation in x-Richtung

Die Helligkeit in x-Richtung entspricht dem Kehrwert der Ableitung $x(t)$ nach t . Daher ergibt sich für die Helligkeitskompensation folgende Funktion $\kappa(t)$:

$$\kappa(t) = A\omega_x \cos(\omega_x t),$$

beziehungsweise (wie in Kapitel 3.2.1.1)

$$\kappa(t) = \sqrt{A^2 - x(t)^2}.$$

Da diese in der Elektronik schon berücksichtigt wird, muss bei der Berechnung der Intensitätswerte durch diese Funktion κ dividiert werden (siehe Anhang (08)).

In der Abbildung 3.30 wurde die Helligkeitskompensation der Elektronik berücksichtigt.

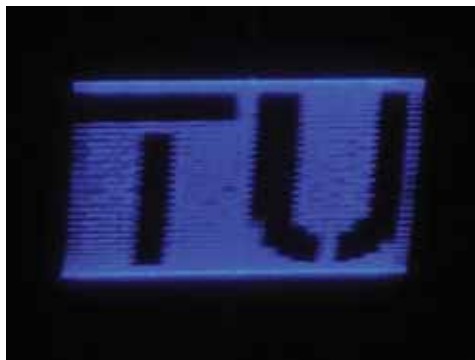


Abbildung 3.30: TU Logo: Helligkeitskompensation in x-Richtung

Es ist ersichtlich, dass die Helligkeit in x-Richtung nun im Gegensatz zur Abbildung 3.28 gleichmäßig ist. Der Unterschied in y-Richtung wird im nächsten Unterkapitel behandelt und korrigiert.

Die Dimmwerte für eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung sollten eigentlich in x-Richtung aufgrund der Helligkeitskompensation gleich bleiben. Betrachtet man aber die Dimmwerte - die für die weitere Berechnung benötigt werden - näher, so ist auffällig, dass in x-Richtung die Werte auch variieren. Vor allem an den Rändern sind die Werte deutlich geringer als in der Mitte.

Die Abbildung 3.31a zeigt die Dimmwerte, also den Kehrwert der Helligkeiten, ohne (blau)

und mit (rot) Berücksichtigung der Helligkeitskompensation in x-Richtung, wobei hier äquidistante Zeitschritte gewählt wurden. Hier ist ersichtlich, dass durch die Berücksichtigung der Helligkeitskompensation wirklich eine konstante Laserleistung über die gesamte Zeile erforderlich ist. Im Gegensatz dazu zeigt die Abbildung 3.31b ebenfalls die zwei Kurven, jedoch mit äquidistanten Ortsschritten.

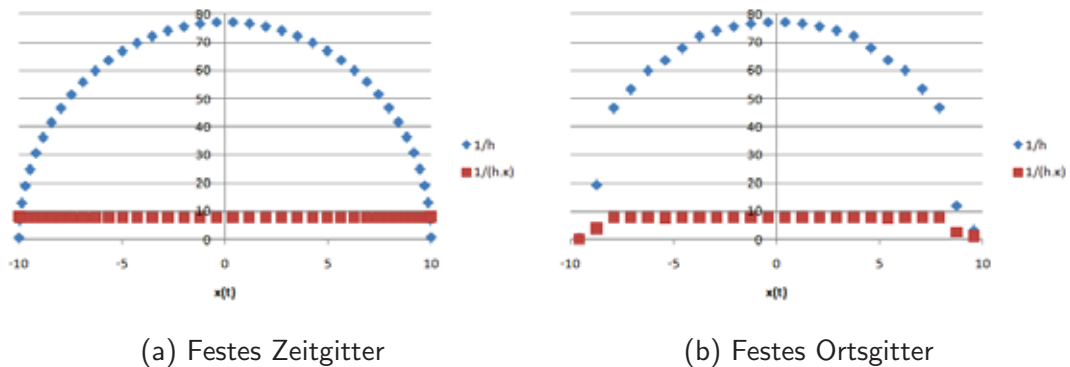


Abbildung 3.31: Dimmwerte ohne (blau) und mit (rot) Helligkeitskompensation

Die Helligkeit ist bei beiden Plots sinusförmig. Man erkennt jedoch, dass bei konstanten Zeitschritten die Helligkeitskompensation eine konstante Laserleistung erzeugt. Im Gegensatz dazu wird dies in Abbildung 3.31b nicht erzielt. Weil bei der Erstellung des festen Ortsgitters die Helligkeiten addiert werden, sind diese - vor allem an den Rändern - sehr hoch, da die Geschwindigkeit dort am geringsten ist. Wegen diesen Schwankungen am Rand, erzeugt die Helligkeitskompensation dort geringere Dimmwerte. Der Fehler ist dabei umso geringer, je feiner das Ortsgitter gewählt wird.

Da für diesen Effekt weitere Einflussfaktoren (Wahl des Ortsgitters, hardwareseitige Helligkeitskompensation, geringere Spotgröße beziehungsweise Helligkeit des Lasers zum Rand hin, ...) verantwortlich sind, und der notwendige Aufwand zur vollständigen Behebung dieses vergleichsweise kleinen Fehlers in keiner Relation zum Nutzen stehen, wurde dieser nicht erschöpfend behandelt. Es wurde ein feines Ortsgitter gewählt um die Schwankungen am Rand zu minimieren, weitere Schritte wurden nicht gesetzt.

3.3.3.4 Einfluss des Zeilenabstandes

Wie schon in Kapitel 3.3.3.2 dargestellt wurde, spielt der Einfluss der Abstände der Zeilen in y-Richtung auch eine entscheidende Rolle. In der Simulation wurden dazu alle y-Abstände - gemessen immer vom mittleren Punkt pro Zeile - berechnet und die dazugehörigen Helligkeitswerte durch diese dividiert. Dadurch ist die Helligkeit am oberen und unteren Rand höher, da die y-Abstände dort kleiner sind. Genauer wird dies im Kapitel 3.2.7 und 3.3.3.6 beziehungsweise im Anhang (08) beschrieben.



Abbildung 3.32: TU Logo: Berücksichtigung des Zeilenabstandes in y-Richtung

Vergleicht man nun Abbildung 3.32 mit Abbildung 3.30 so erkennt man, dass hier die höheren Helligkeitswerte im oberen und unteren Bildbereich ausgebessert wurden. An den vier Ecken des Logos sieht man jedoch leichte Abrundungen. Da jedoch der notwendige Aufwand zur vollständigen Behebung dieses vergleichsweise kleinen Fehlers in keiner Relation zum Nutzen stehen, wurde dieser nicht weiter behandelt. Insgesamt wurde ein schönes gleichmäßiges TU-Logo erzeugt.

3.3.3.5 Gestauchte Bildprojektion

Die Abbildung 3.33 zeigt nicht nur das originale Bild, das eingelesen wird, sondern auch das dazugehörige Projektionsbild. Es ist zu erkennen, dass bei der Bildprojektion die Geometrie nicht ganz korrekt wiedergegeben wird. Das projizierte Bild ist oben und unten etwas gestaucht. Das ist darauf zurückzuführen, dass - wie schon erwähnt wurde - die Zeilenabstände oben und unten kleiner sind als in der Mitte.

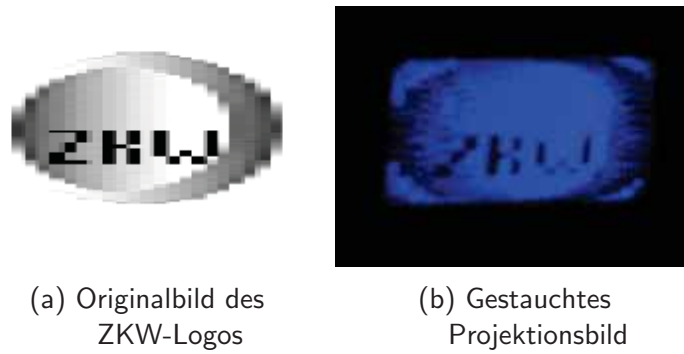


Abbildung 3.33: Gestauchtes ZKW Logo

Um diesen Effekt zu korrigieren kann entweder bei der Erstellung des JPEG darauf Rücksicht genommen werden oder es werden vor der Bildprojektion, ausgehend von einem größeren Bild, bestimmte Zeilen und Spalten gezielt gelöscht, um dann im Projektionsbild eine korrekte Darstellung zu erhalten.

Hier wird nun eine Möglichkeit vorgestellt, die das Bild vor der Projektion geeignet streckt um dann im Projektionsbild keine Stauchung mehr zu erkennen. Dies wird zusammen mit dem Auslesen der Grauwerte im Programm Octave durchgeführt. Ausgegangen wird von einem Bild mit 120×100 Pixel. Um dann ein Bild mit 24×80 Pixel zu erhalten, wird zuerst nur jede fünfte Spalte eingelesen. Danach werden noch gezielt 20 Zeilen gelöscht, um das Bild in richtiger Größe zu erhalten. Die Verteilung der gelöschten Spalten ist dabei sinusförmig, das heißt im oberen und unteren Bildbereich werden mehr Zeilen als in der Mitte gelöscht.

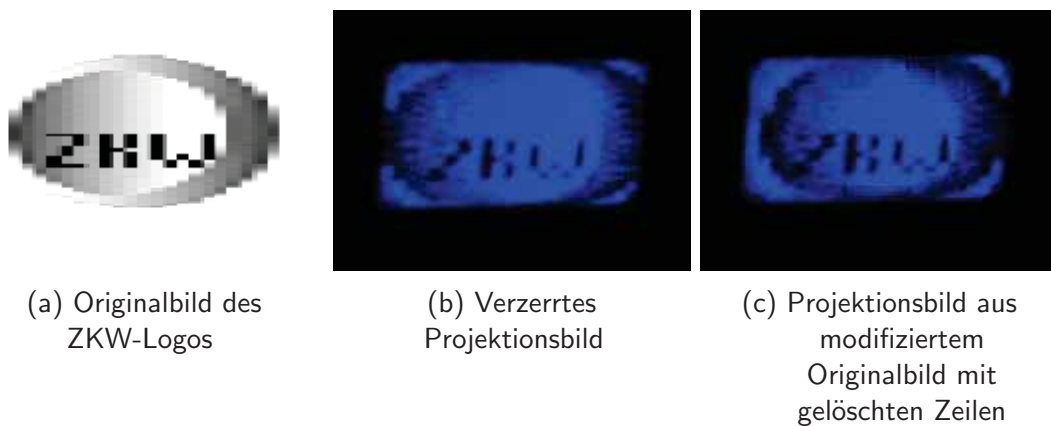


Abbildung 3.34: ZKW Logo - Erhaltung der Geometrie

Die Abbildung 3.34 zeigt nun neben dem Originalbild und dem vorherigen gestauchten Projek-

tionsbild den Unterschied zu dem neuen Projektionsbild. Es ist ersichtlich, dass die Geometrie vor allem im oberen und unteren Bereich weitaus mehr der Vorgabe durch das Originalbild entspricht als zuvor.

3.3.3.6 Vorgangsweise der Berechnung der Intensitätswerte

Bis jetzt wurden nur die wichtigsten Punkte, die bei der Simulation berücksichtigt werden müssen, behandelt. Wie nun konkret die Intensitätswerte für den Prototypen berechnet werden, wird im Folgenden erklärt. Weiters wird auch auf die Anhänge (08) und (09) verwiesen, da sich dort die Quellcodes für die Ausgabedaten für die Vorwärtsbewegung befinden. Für die Rückwärtsbewegung sind die Berechnungen fast ident.

Die Berechnung der Intensitätswerte für die Elektronik erfolgt in drei Schritten. Im ersten Schritt werden die Dimmwerte für eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung berechnet. Anschließend wird die gewünschte Helligkeitsverteilung als Bild eingelesen, sodass zum Abschluss für diese die Intensitätswerte - aufbauend auf die Dimmwerte aus Schritt 1 - berechnet werden können.

1. Schritt: Gleichmäßige Helligkeitsverteilung

Ausgangspunkt für die Berechnung der Intensitätswerte einer bestimmten Helligkeitsverteilung sind die Dimmwerte $d(x, y)$ für eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung. Im Anhang (08) befindet sich dazu der Quellcode. Zu allererst muss das Zeitintervall t so gewählt werden, dass links oben im Bild mit dem Abrastern begonnen wird. Dazu werden zuerst die Helligkeitswerte für zwei vollständige Perioden berechnet und danach der Zeitwert t_0 mit dem entsprechenden x - und y -Wert gesucht. Ab diesem wird dann eine volle Periode zu den Berechnungen verwendet. Daraus erhält man die Helligkeitswerte $h(t)$ für $t \in [t_0, t_0 + 2\pi]$. Danach werden die Zeilensprünge in y -Richtung gesucht, um die Intensitätswerte am Schluss zeilenweise ausgeben zu können. Dabei findet ein Zeilenumbruch genau dann statt, wenn die x -Werte der zwei Nachbarpunkte beide kleiner beziehungsweise größer sind als die x -Koordinate des Punktes selbst.

Danach wird der Einfluss des y -Abstandes der einzelnen Zeilen berücksichtigt. Dafür werden die y -Abstände zwischen den Zeilen immer vom Mittelpunkt der Zeilen berechnet. Da die Helligkeiten bei geringeren Zeilenabständen größer sind, werden die Helligkeitswerte durch den Mittelwert der angrenzenden y -Abstände dividiert beziehungsweise wird die erste und die

letzte Zeile nur durch den ersten oder den letzten y-Abstand dividiert. Daraus erhält man die modifizierten Helligkeitswerte $\tilde{h}(t)$.

Nachdem dann ein festes Ortsgitter gelegt wurde (vergleiche Kapitel 3.2.5), wird die Helligkeitskompensation in x-Richtung der Elektronik berücksichtigt. Zuerst benötigt man für eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung die Kehrwerte der Helligkeiten $\tilde{h}(t)$. Danach werden diese durch die Helligkeitskompensation $\kappa(x)$ dividiert, wie im Kapitel 3.3.3.3 beschrieben.

Nun erhält man die Dimmwerte $d(x, y)$ sowohl für die Vorwärtsbewegung als auch für die Rückwärtsbewegung für eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung:

$$d(x, y) = \frac{1}{\tilde{h}(x, y)\kappa(x)}.$$

Diese werden als Matrix abgespeichert um sie danach in einem neuen Programm einlesen zu können. Diese Werte müssen noch nicht entsprechend skaliert sein, da sie noch für die weitere Berechnung verwendet werden. Falls jedoch wirklich eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung erwünscht ist, dann müssen diese noch auf das Intervall $[0, 255]$ skaliert werden. Daraus ergeben sich die Intensitätswerte für eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung. Die Abbildung 3.35 zeigt eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung.



Abbildung 3.35: Gleichmäßige Helligkeitsverteilung

2. Schritt: Bestimmte Helligkeitsverteilung als Bild einlesen

Als nächstes muss - wie in Kapitel 3.3.3.1 beziehungsweise 3.3.3.5 erklärt - die gewünschte Helligkeitsverteilung als JPEG-Bild über Octave in Maxima eingelesen werden.

3. Schritt: Resultierende Intensitätswerte

Im letzten Schritt werden, aufbauend auf die Dimmwerte $d(x, y)$ für eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung, die Intensitätswerte für eine bestimmte vorgegebene Helligkeitsverteilung berechnet. Dazu werden zuerst die Grauwerte $g(x, y)$ aus Schritt 2 in Maxima eingelesen und danach punktweise mit den Dimmwerten für die gleichmäßige Helligkeitsverteilung multipliziert. Daraus ergeben sich die relativen Werte $I(t)$ für die Laserintensitäten:

$$I(t) = d(x, y)g(x, y) = \frac{g(x, y)}{\tilde{h}(x, y)\kappa(x)}.$$

Diese müssen danach noch auf das Intervall $[0, 255]$ skaliert werden und in einer passenden Ausgabeform gespeichert werden. Der genaue Quellcode für die Vorwärtsbewegung befindet sich im Anhang (09).

3.3.4 Ergebnisse

Nun werden für einige vorgegebene Helligkeitsverteilungen die dazugehörigen Projektionsbilder präsentiert. Dabei wurden die Grauwerte der Ausgangsbilder, wie in Kapitel 3.3.3.5 erklärt, generiert.

Die erste Abbildung 3.36 zeigt das originale und projizierte Logo der dwh GmbH. Hier werden im Prinzip nur zwei Helligkeitsstufen verwendet. Dies sind einerseits 0 für komplettes Ausschalten des Lasers und andererseits 255 für volle Laserleistung.

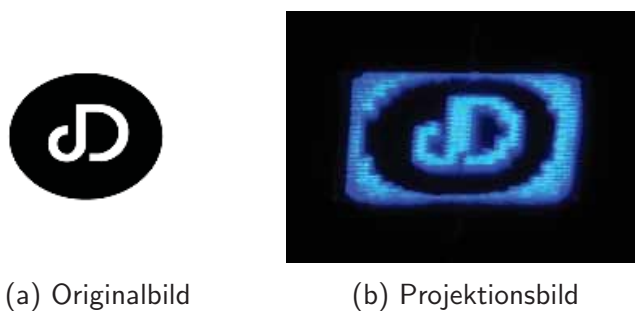


Abbildung 3.36: dwh GmbH-Logo

Da auch Helligkeitsverläufe erzielt werden sollen, wird dies in der nächsten Abbildung 3.37

dargestellt.

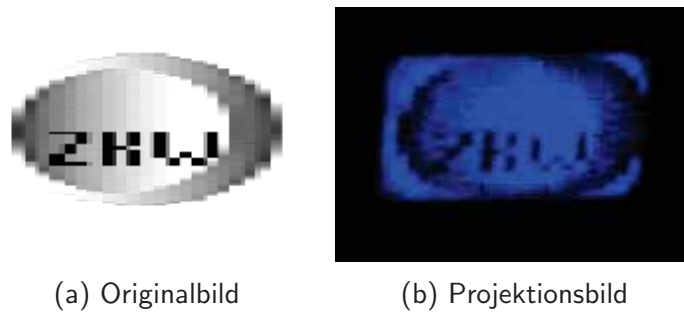


Abbildung 3.37: ZKW-Logo

Da das 2D-Laserprojektionssystem später im automobilen Frontbeleuchtungsbereich eingesetzt werden soll, werden nun eine Abblendlichtverteilung und verschiedene Fernlichtverteilungen dargestellt.

Die folgende Abbildung 3.38 zeigt eine typische Lichtverteilung eines Abblendlichtes. Das Abblendlicht ist asymmetrisch, um einerseits den eigenen Fahrstreifen genügend auszuleuchten und andererseits den Gegenverkehr nicht zu blenden.

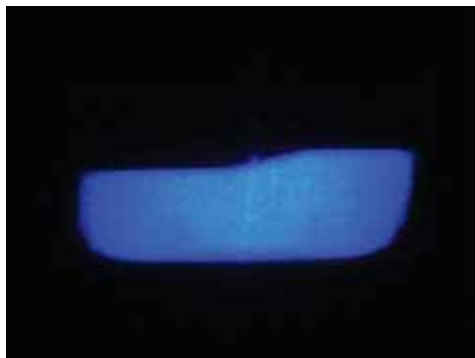
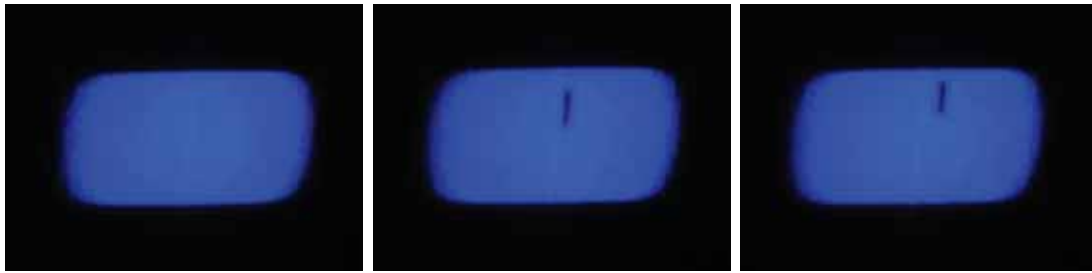


Abbildung 3.38: Lichtverteilung eines Abblendlichtes

Abbildung 3.39 zeigt verschiedene Lichtverteilungen für ein Fernlicht. Die Abbildung 3.39a stellt dabei ein einfaches Fernlicht dar, wohingegen die anderen beiden Bilder (Abbildungen 3.39b und 3.39c) einen bestimmten Bereich ausblenden, um zum Beispiel den Lenker eines vorausfahrenden Fahrzeuges nicht zu blenden.



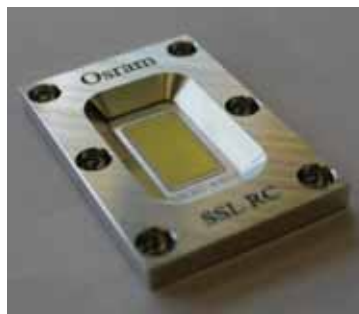
(a) Fernlicht ohne Bereich ausblenden

(b) Fernlicht mit Bereich ausblenden

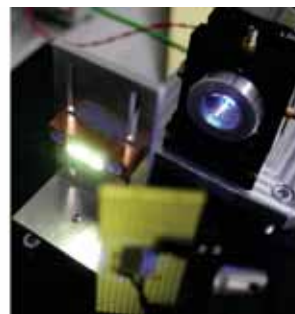
(c) Fernlicht mit Bereich ausblenden

Abbildung 3.39: Lichtverteilungen verschiedener Fernlichter

Zum Schluss wurde untersucht, wie der Phosphor auf die Laserstrahleinwirkung reagiert. Dazu stellt die folgende Abbildung 3.40 eine Phosphorplatte der Firma Osram (Abbildung 3.40a) und das durch den Laserstrahl angeregte Leuchten des Phosphors dar (Abbildung 3.40b).



(a) Phosphorplatte



(b) Leuchten des Phosphors

Abbildung 3.40: Phosphorplatte und Leuchten des Phosphors (Quelle: ZKW)

Die letzte Abbildung 3.41 zeigt nun einen ersten Versuch des Projektionsbildes auf dem Phosphor. Hier ist sehr gut ersichtlich, dass der blaue Laserstrahl auf der Phosphorplatte weißes Licht erzeugt.



Abbildung 3.41: Bildprojektion auf der Phosphorplatte

Die Ergebnisse des 2D-Laserprojektionssystems sind sehr zufriedenstellend, sodass das Programm für die Berechnung der Intensitätswerte des Lasers für die Elektronik geeignet ist, und bei einem eventuellen Serieneinsatz als Grundlage für die Entwicklung der Software im Scheinwerfer dienen kann.

3.4 Fazit

Um die Intensitätswerte für den Laser zu berechnen, müssen einige Einflussfaktoren beachtet werden. Hauptsächlich muss für eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung die variierende Geschwindigkeit des Spiegels berücksichtigt werden. Weiters müssen neben der von der Elektronik durchgeführten Helligkeitskompensation in x-Richtung auch die unterschiedlichen Zeilenabstände in y-Richtung beachtet werden. Darüber hinaus müssen die endgültigen Werte eine bestimmte Form und Struktur aufweisen, um von der Elektronik verarbeitet werden zu können. Generell sind die erhaltenen Ergebnisse des 2D-Laserprojektionssystems sehr zufriedenstellend. Das Einlesen beliebiger Helligkeitsverteilungen und die darauffolgende Ausgabe der Intensitätswerte funktioniert einwandfrei.

Es gibt aber auch noch Aspekte, die genauer untersucht und erarbeitet werden könnten. Zum einen verursacht das feste Ortsgitter Schwankungen am Rande der Dimmwerte. Auch mit einer sehr feinen Auflösung treten noch immer leichte Effekte auf. Andererseits könnte die durch die Bildprojektion veränderte Geometrie tiefer analysiert und verbessert werden. Dazu müsste der Einfluss der Zeilenabstände in y-Richtung genauer überprüft und die Auswirkungen berücksichtigt werden.

Eine weitere wichtige Eigenschaft, die zukünftig vermutlich einen Einfluss auf die Simulation des gesamten Projektionssystems hat, ist die Abstrahlcharakteristik der Phosphorplatte. Da diese noch nicht bekannt ist, muss diese später studiert werden.

Da jedoch die bisherigen Resultate befriedigend sind, werden die obigen angesprochenen Punkte vorerst nicht weiter untersucht.

Kapitel 4

1D-Multi-Laserprojektionssystem

Nun wird in diesem Kapitel ein 1D-Multi-Laserprojektionssystem für den Einsatz in der automobilen Scheinwerfertechnik betrachtet. Dieses Konzept verwendet nur einen eindimensionalen Mikroscanner, der lediglich eine Bildzeile erzeugen kann. Jedoch werden hier im Gegensatz zum 2D-Laserprojektionssystem insgesamt sechs Laserdioden und zwei Mikroscanner verwendet. Dadurch können sechs Bildzeilen am optischen Konverter generiert werden.

Dieses System ist in der Lage die Helligkeitswerte in horizontaler Richtung zu ändern beziehungsweise bestimmte Teilbereiche abzuschalten um auch hier zum Beispiel ein blendfreies Fernlicht erzeugen zu können.

Zuerst wird auch hier kurz das System beschrieben. Um dann die Lichtverteilung am Phosphor zu simulieren, wird davor noch auf einige Eigenschaften eingegangen, die bei der Modellierung zu berücksichtigen sind. Die erhaltenen Ergebnisse dieses Konzepts können nicht mithilfe eines Prototyps validiert werden, da dieser noch nicht fertig gestellt wurde.

4.1 Systembeschreibung

Das 1D-Multi-Laserprojektionssystem verwendet für die Erzeugung einer Lichtverteilung für die automobilen Frontbeleuchtung insgesamt sechs blaue Halbleiterdiodenlaser.

Die Abbildung 4.1 zeigt die wichtigsten Komponenten dieses Konzeptes. Je drei blaue Laserstrahlen - in dieser Darstellung sind sie unterschiedlich gefärbt, um sie auseinander halten zu können - werden auf je einen 1D-MEMS-Scanner gelenkt. Wie beim 2D-Laserprojektionssystem sind auch hier die vertikalen Strahldivergenzen der Laserdioden sehr groß (siehe Kapitel 2.2.6).

Daher müssen auch hier die Laserstrahlen zuvor über Linsen kollimiert und fokussiert werden. Die Laserstrahlen werden hier nicht auf die gemeinsame Phosphorplatte fokussiert, sondern schon davor um am Phosphor einen größeren Strahldurchmesser zu erhalten. Dadurch kann der gesamte Konverter abgerastert werden. Abhängig von den momentanen Spiegelstellungen werden die Laserstrahlen auf die gemeinsame Phosphorplatte geleitet. Da die sechs Laserdioden einen unterschiedlichen Einfallswinkel auf den Spiegel haben, können somit insgesamt sechs Zeilen am Phosphor generiert werden.

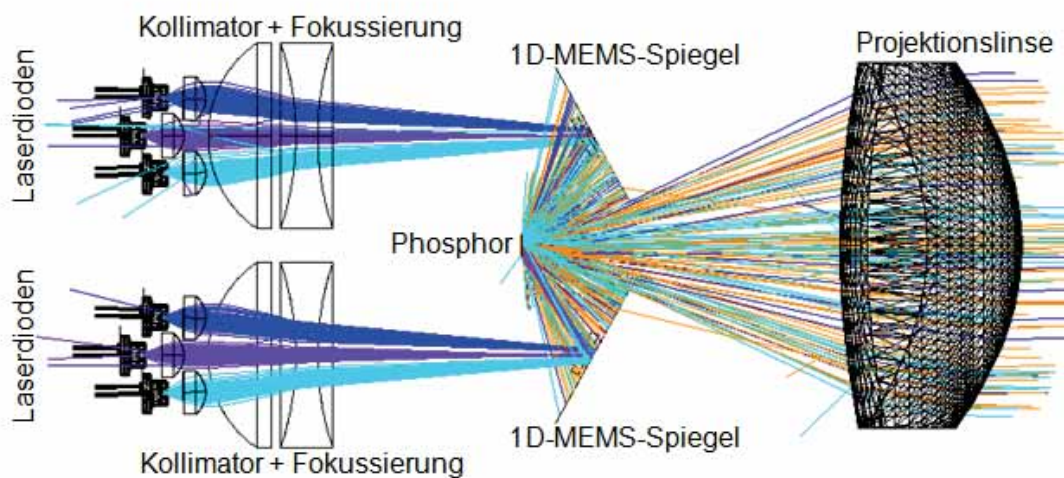


Abbildung 4.1: 1D-Multi-Laserprojektionssystem (Quelle: ZKW)

Auch hier erhält man wegen des Phosphors und der blauen Laserstrahlen ein weißes Licht. Über eine anschließende Optik wird das Licht auf die Fahrbahn projiziert. Da die Durchmesser der Laserstrahlen größer sind, überlappen sich diese (Abbildung 4.2). Abbildung 4.2a zeigt die ersten drei Laserstrahlen, die vom ersten Spiegel kommen. Diese überlappen sich noch nicht. Genauso stellt Abbildung 4.2b die anderen drei nicht überlappenden Laserstrahlen des zweiten Spiegels dar. Zusammen überlappen sich dann diese sechs Laserstrahlen am Phosphor. Dies wurde aber in den kommenden Simulationen nicht berücksichtigt.

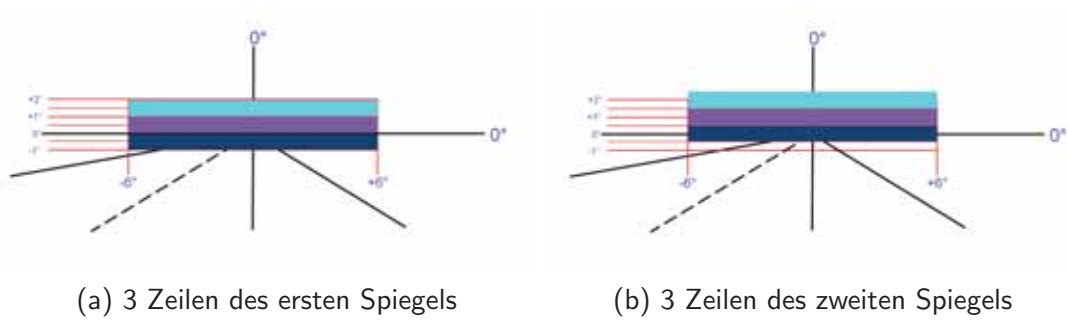


Abbildung 4.2: Überlappung der sechs Zeilen (Quelle: ZKW)

4.2 Modellierung der Lichtverteilung auf dem Phosphor und Simulationsergebnisse

Um später eine Lichtverteilung für die automobile Frontbeleuchtung simulieren zu können, muss zuerst untersucht werden, wie sich die Laserstrahlen am Phosphor bewegen. Hier werden die einzelnen Laserdioden nicht auf den Phosphor fokussiert, sondern werden mit größeren Strahldurchmessern über die Platte geführt, um keine Abstände zwischen den einzelnen Zeilen zu erzeugen.

Da der 1D-Mikro-Scanner resonant mit einer sinusförmigen Schwingung in einer Achse schwingt, erzeugt jeder Laserstrahl eine Kurve auf dem Phosphor, die fortlaufend vorwärts und rückwärts abgerastert wird. Die Schwingung in x-Richtung des Spiegels wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$x(t) = A \sin(t), \quad (4.1)$$

wobei A die Amplitude ist. Für die genaue Berechnung der entstehenden Kurven auf dem Phosphor wird auf Kapitel 4.2.2 verwiesen. Davor müssen jedoch noch die Helligkeitswerte berechnet werden.

Im Prinzip hat dieses Projektionssystem dieselben Eigenschaften wie das 2D-Konzept, deshalb wird hier nur mehr auf die wichtigsten genauer eingegangen. Sowohl das Nachleuchten der Phosphorplatte als auch der variierende Laserspotdurchmesser werden komplett vernachlässigt. Das Ausblenden von bestimmten Bereichen im Lichtbild kann analog zum 2D-Modell durch punktweise Multiplikation der Helligkeitsmatrix mit einer vorgegebenen Lichtverteilung simuliert werden.

4.2.1 Helligkeitsverteilung

Wie schon erwähnt muss für den Bildaufbau auf der Phosphorplatte zuerst die Helligkeit des Laserspots bestimmt werden. Auch hier erhält man zunächst wieder eine ungleichmäßige Helligkeitsverteilung, bedingt durch die sinusförmig variierende Geschwindigkeit des Laserspots.

4.2.1.1 Berechnung der Helligkeitswerte

Die relative Helligkeit des Laserspots am Phosphor hängt von der Geschwindigkeit des Spiegels ab. Da sich der Spiegel nur in eine Raumrichtung bewegt, erhält man für die Geschwindigkeit

$$v(t) = \frac{\partial x(t)}{\partial t}. \quad (4.2)$$

Aus Gleichung 4.1 kann t berechnet werden und in die obige Ableitung (Gleichung 4.2) eingesetzt werden. Aus der Beziehung $\cos(\arcsin(x)) = \sqrt{1 - x^2}$ (vergleiche Kapitel 3.2.1.1) erhält man für die Geschwindigkeit

$$v(t) = \sqrt{A^2 - x(t)^2}. \quad (4.3)$$

Die relative Helligkeit des Spots entspricht wie beim 2D-Laserprojektionssystem dem Kehrwert der Geschwindigkeit (der Proportionalitätsfaktor wurde wieder auf 1 gesetzt):

$$h(t) = \frac{1}{v(t)} = \frac{1}{\sqrt{A^2 - x(t)^2}}. \quad (4.4)$$

4.2.1.2 Ungleichmäßige Helligkeitsverteilung

Die Helligkeit des Laserspots ist durch Gleichung 4.4 definiert. Befindet sich der Laserstrahl am Rand, das heißt geht also $x(t)$ gegen $\pm A$, so nimmt die Helligkeit zu, da die Geschwindigkeit sehr klein wird. Somit sind also die Helligkeitswerte in der Mitte geringer als am Rand. Diese Eigenschaft muss bei der Simulation einer gleichmäßigen Helligkeitsverteilung berücksichtigt werden.

Zu erwähnen sei noch, dass die Helligkeit am Rand nicht unbeschränkt werden kann, da bei der Wahl des festen Ortsgitters immer der Mittelpunkt des Gitters verwendet wird, das heißt

es wird für $x(t)$ nie genau $\pm A$ eingesetzt. Somit kann die Helligkeit nie unbeschränkt werden. Auch hier wird nur für die graphischen Darstellungen der Helligkeitsverteilungen der Logarithmus der Helligkeitswerte verwendet (vergleiche dazu Kapitel 3.2.1.2), die Berechnungen erfolgen mit den ursprünglichen Werten.

4.2.2 Berechnung der Kurven am Phosphor

Durch die geometrische Anordnung der drei Laserdioden und die daraus resultierenden unterschiedlichen Einfallswinkel auf den Spiegel erhält man nicht nur eine ungleichmäßige Helligkeitsverteilung, sondern auch bestimmte Kurven auf der Phosphorplatte. Um diese Kurven geschickt zu berechnen, wird vorerst der Koordinatenursprung in einen Spiegelmittelpunkt gelegt, wie Abbildung 4.3 zeigt.

Diese Abbildung zeigt die x - z -Ebene des Modells. Weiters wurde diese Skizze, um einen guten Überblick zu bieten, vereinfacht, indem oben und unten nur je ein Laserstrahl (s_1 und s_2) in das System zu den Spiegeln gelenkt wird. Die Abmessungen zwischen Spiegel und Phosphor werden durch $a = 9.51$ und $b = 15.2$ cm festgelegt. Die Ausgangsstellungen der Spiegel betragen $\alpha_1 = -61^\circ$ und $\alpha_2 = 61^\circ$.

Da das System um die Oberflächennormale des Phosphors symmetrisch ist, betragen die drei Einfallswinkel der Laserstrahlen - in der Skizze mit β_1 und β_2 bezeichnet - für beide Spiegel -3.77° , 0° und 3.77° .

Die beiden 1D-MEMS-Scanner schwingen um die z -Achse. Angenommen wird dabei, dass die maximale Auslenkung der Spiegel $\pm 10^\circ$ beträgt. In Abbildung 4.4 wird dieser Auslenkwinkel

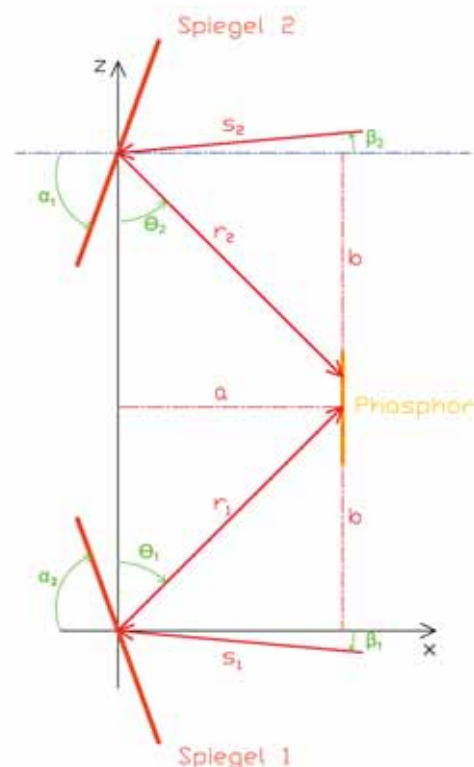


Abbildung 4.3: x - z -Ebene des 1D-Multi-Laserprojektionssystems

mit δ bezeichnet und es ist ersichtlich, dass aufgrund des Brechungsgesetzes (siehe Kapitel 2.2.1) $\varphi = 2\delta$ ist. Außerdem sind die Auslenkwinkel von der Zeit abhängig, also $\delta = \delta(t)$ mit δ aus $[-10^\circ, 10^\circ]$. Auf die genaue Berechnung der Auslenkwinkel, die von den Schwingungen der Spiegel abhängig sind, wird hier nicht eingegangen, da es reicht für δ nur diskrete Werte aus obigem Intervall anzunehmen.

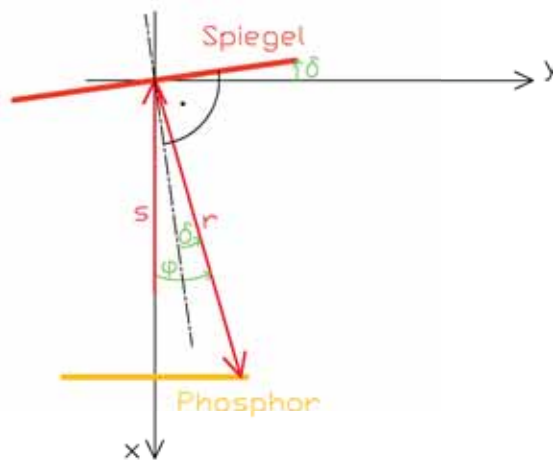


Abbildung 4.4: Ausschnitt der x-y-Ebene des 1D-Multi-Laserprojektionssystems

Die Kurven auf der Phosphorplatte müssen für beide Spiegel separat berechnet werden, dies erfolgt in Kugelkoordinaten. Notwendig dabei sind die Winkel θ_1 und θ_2 der reflektierten Laserstrahlen. Aus dem Brechungsgesetz erhält man, dass $\theta_1 = \beta_1 - 2\alpha_1 - 90^\circ$ beziehungsweise $\theta_2 = \beta_2 - 2\alpha_2 + 90^\circ$. Die Orientierungen der Winkel werden dabei berücksichtigt. Nun muss auch die Schwingung des Spiegels beachtet werden. Diese ist eine einfache Drehung um die z-Achse um den Winkel $\varphi = 2\delta$. Daraus ergeben sich für die reflektierten Laserstrahlen folgende Richtungsvektoren:

$$r_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ \tan(2\delta) \\ \frac{2\alpha_1 - \beta_1}{\cos(2\delta)} \end{pmatrix}$$

und

$$r_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ \tan(2\delta) \\ \frac{2\alpha_2 - \beta_2}{\cos(2\delta)} \end{pmatrix}.$$

Zum Schluss muss nur noch der reflektierte Strahl mit der durch die Phosphorplatte definier-

ten Ebene ϵ geschnitten werden, wobei

$$\epsilon : X = \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ b \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

mit Parametern $s \in \mathbb{R}$ und $t \in \mathbb{R}$ ist.

Dabei ist zu beachten, dass der am zweiten Spiegel reflektierte Strahl nicht durch den Ursprung geht, sondern durch den Punkt $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2b \end{pmatrix}$. Für den reflektierten Laserstrahl an Spiegel 1 erhält man

$$\begin{pmatrix} a \\ a \tan(2\delta) \\ \frac{a \tan(2\alpha_1 - \beta_1)}{\cos(2\delta)} \end{pmatrix}$$

und für den an Spiegel 2

$$X_2(t) = \begin{pmatrix} a \\ a \tan(2\delta) \\ \frac{a \tan(2\alpha_2 - \beta_2)}{\cos(2\delta) + 2b} \end{pmatrix},$$

wobei $X_i(t)$, $i = 1, 2$, für die Koordinaten $x_i(t)$, $y_i(t)$ und $z_i(t)$ ($i = 1, 2$) steht.



Abbildung 4.5: Kurven der sechs Laserstrahlen am Phosphor

Abbildung 4.5 zeigt die sechs Kurven der Laserstrahlen auf dem Phosphor. Die ungleichmäßige Helligkeitsverteilung ist dabei auch ersichtlich.

4.2.3 Mehrmaliges Scannen eines Punktes

Da sich die sechs Kurven, abhängig von den Einfallswinkeln der Laserstrahlen, schneiden können, müssen bei den Helligkeitswerten diese Schnittpunkte extra betrachtet werden. Wer-

den Punkte mehrfach gescannt, so erhöhen sich deren Helligkeitswerte.

Im Anhang (10) befindet sich der Quellcode für diese Simulation. Hier wird die Berechnung nur für einen Strahl gezeigt, für alle anderen sind diese analog durchzuführen.

Da die Kurven parabelförmig sind, vereinfacht dies die Berücksichtigung der Schnittpunkte. Zuerst werden die Kurven durch Funktionen $y = c_1x^2 + c_2x + c_3$ beschrieben. Danach wird ein festes Ortsgitter mit Schrittweiten Δx und Δy gelegt. Dabei wird bei jedem Rechteckselement des Gitters überprüft, wie viele Punkte der einzelnen Kurven in diesem liegen und dann gegebenenfalls deren Helligkeitswerte addiert, da die Helligkeit mit der eingebrachten Energie linear steigt.



Abbildung 4.6: Kurven der sechs Laserstrahlen am Phosphor mit Berücksichtigung des mehrmaligen Scannens eines Punktes

In Abbildung 4.6 wurde das mehrmalige Scannen eines Punktes berücksichtigt. Es zeigt, dass die Helligkeitswerte der Schnittpunkte deutlich höher sind als im Plot 4.5.

Da Anhang (10) eigentlich für die Berechnung der Dimmwerte gedacht ist, wird hier mit den Kehrwerten der Helligkeiten gerechnet. Um den Plot aus Abbildung 4.6 darstellen zu können, muss man natürlich mit den Helligkeitswerten rechnen.

4.2.4 Dimmen des Lasers

Aus Kapitel 4.2.1 ist bekannt, dass die Helligkeitsverteilung auf der Phosphorplatte nicht gleichmäßig ist. Am Rand des Phosphors ist der Laserstrahl heller, daher muss der Laser dort gedimmt werden. Genauso wie beim 2D-Laserprojektionssystem wird dies auch hier über die Intensität des Lasers kontrolliert. Die Dimmwerte entsprechen hier auch dem Kehrwert der Helligkeit (vergleiche Kapitel 3.2.4). Im nachfolgenden Kapitel wird näher erläutert, wie die aus den Dimmwerten resultierenden Intensitäten konkret berechnet werden.

4.2.5 Simulation einer bestimmten vorgegebenen Helligkeitsverteilung

Auch mit diesem Konzept sollen entweder die Intensitätswerte für eine gleichmäßige oder für eine bestimmte vorgegebene Helligkeitsverteilung erzeugt werden. Im Anhang (11) befindet sich der entsprechende Quellcode. Zuerst kann eingestellt werden, ob eine gleichmäßige oder eine bestimmte Helligkeitsverteilung, die als JPEG-Bild eingelesen wird, erzielt werden soll. Falls ein Bild eingelesen wird, wird wieder wie in Kapitel 3.2.8 der Umweg über Octave gegangen.

Soll eine als Bild vorgegebene Helligkeitsverteilung erzielt werden, so müssen die Kehrwerte der Helligkeiten (entsprechen den Dimmwerten) der Laserstrahlen mit den Grauwerten des Bildes punktweise multipliziert werden. Wird eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung gewünscht, verwendet man nur die Dimmwerte. In Abbildung 4.7 wird dies dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass am Rand die Laserdioden immer gedimmt werden müssen, da ja dort die Helligkeitswerte am größten sind. Die Dimmwerte verhalten sich also invers zur Helligkeit.



Abbildung 4.7: Dimmwerte der sechs Laserstrahlen am Phosphor für gleichmäßige Helligkeitsverteilung

Die Intensitätswerte ergeben sich dann aus den Dimmwerten oder aus der Multiplikation dieser mit den Grauwerten einer gewünschten Helligkeitsverteilung. Diese werden anschließend für jede Laserdiode in einer Zeile ausgegeben. Da es auch hier eine Vorwärts- und Rückwärtsbewegung gibt, muss es für beide Richtungen Intensitätswerte geben. Da die Laserstrahlen denselben Weg auch zurück abtasten, muss nur die Reihenfolge der obigen Intensitätswerte umgekehrt werden.

Nun soll dieses Bild 4.8 eingelesen werden um die Intensitätswerte für das 1D-Multi-Laserprojektionssystem zu bekommen. Die Abbildung 4.9 zeigt dafür die Intensitätswerte der Laser. Um links eine gleichmäßig weiße Fläche zu bekommen, muss dort trotzdem gedimmt

werden, da am Rand die Helligkeit am größten ist. Weiters erkennt man gut, dass rechts die Laserdioden abgeschaltet werden, um kein Licht zu erzeugen. Kurz gesagt, spiegeln diese Intensitätswerte der Laser das obige gewünschte Bild wider.



Abbildung 4.8: Bestimmte Helligkeitsverteilung



Abbildung 4.9: Intensitätswerte der sechs Laserstrahlen am Phosphor für die bestimmte Helligkeitsverteilung 4.8

Diese berechneten Werte können noch nicht am Prototyp getestet werden, da dieser noch nicht fertig gestellt ist. Jedoch ist zu erwarten, dass die Ergebnisse wie beim 2D-Laserprojektionssystem zufriedenstellend sind.

4.3 Fazit

Die Simulation des 1D-Multi-Laserprojektionssystems ist ähnlich wie die des 2D-Konzeptes. Aufwendiger ist nur die Berechnung der entstehenden Kurven auf der Phosphorplatte. Die erhaltenen Resultate sind, obwohl sie noch nicht durch den Prototyp validiert werden konnten, plausibel. Wie gut dann jedoch in der Realität eine bestimmte Helligkeitsverteilung durch diese sechs Laserdioden ausgeleuchtet werden kann, wird erst ein Versuch zeigen.

Der große Vorteil gegenüber dem 2D-Laserprojektionssystem ist - aufgrund der insgesamt sechs Laserdioden - die höhere Beleuchtungsstärke. Die Auflösung dieses Systems ist jedoch

deutlich kleiner. In vertikaler Richtung entspricht die Auflösung der Anzahl der verwendeten Laserdioden.

Auch hier gibt es noch Aspekte, die tiefer analysiert und simuliert werden könnten. Die mögliche Überlagerung der sechs Laserstrahlen auf dem Phosphor kann variiert werden. Dadurch kann eventuell noch eine bessere Ausleuchtung des Phosphors erzielt werden. Ebenso ist bei diesem Ansatz die Abstrahlcharakteristik der Phosphorplatte ein Einflussfaktor. Dieser und das Nachleuchten kann - wenn notwendig - untersucht und in die Simulation integriert werden.

Ob das 1D- oder 2D-Laserprojektionssystem besser für den Einsatz im Scheinwerfer geeignet ist, kann nicht so leicht beurteilt werden. Es kommt darauf an, wie es im Bereich der automobilen Frontbeleuchtung eingesetzt werden soll.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Um die Verkehrssicherheit bei Nacht deutlich zu erhöhen, ist es notwendig neue effiziente Scheinwerfersysteme zu entwickeln. Sogenannte adaptive Scheinwerfersysteme, die sich an die aktuelle Verkehrssituation anpassen, finden immer mehr Verwendung im automobilen Frontbeleuchtungsbereich. Auch mit diesen zwei laserbasierten Projektionssystemen, die in dieser Arbeit analysiert wurden, ist dies möglich.

Zuerst wurde das 2D-Laserprojektionssystem betrachtet. Um den Bildaufbau auf der Phosphorplatte simulieren zu können, müssen die resonanten Schwingungen in beide Raumrichtungen des Mikrosanners berücksichtigt werden. Durch diese entsteht auf dem Phosphor eine ungleichmäßige Helligkeitsverteilung. Neben dieser wurden auch die Einflüsse weiterer Aspekte - wie das Nachleuchten des Phosphors, der unterschiedliche Laserspotdurchmesser aufgrund des Wegunterschiedes zwischen Spiegel und Phosphor bei unterschiedlich starker Ablenkung - auf die Helligkeitsverteilung untersucht. Die ungleichmäßige Helligkeitsverteilung beeinflusst die Ansteuerung des Lasers. Um die Intensitätswerte des Lasers für die Steuerung berechnen zu können, müssen einige Faktoren beachtet werden. Zum Beispiel wird schon in der Elektronik eine Helligkeitskompensation in x-Richtung durchgeführt, auf die bei den Intensitätswerten Rücksicht genommen werden muss. Weiters müssen diese Werte auch eine bestimmte Form und Struktur haben, um von der Elektronik eingelesen werden zu können. Im nächsten Schritt ist es auch wünschenswert eine bestimmte Helligkeitsverteilung als Bild einlesen zu können, um danach die Intensitätswerte zu erhalten. Nachdem die Grauwerte des Bildes eingelesen wurden, können die Werte für die Steuerung berechnet werden. Diese Ergebnisse wurden dann anhand eines Prototypen validiert. Generell sind die hier erhaltenen Ergebnisse sehr zufriedenstellend. Jedoch gibt es auch noch Punkte die weiter analysiert

werden können. Beispielweise ist die Geometrie des eingelesenen Bildes nicht ganz ident mit der des Projektionsbildes. Das Projektionsbild ist immer etwas gestaucht. Ebenso könnten die Schwankungen, die bei der Berücksichtigung der Helligkeitskompensation in x-Richtung aufgrund der Erstellung des festen Ortsgitters entstehen, korrigiert werden (Abbildung 3.31). Weiters ist auch die Abstrahlcharakteristik des Phosphors noch nicht bekannt. Dies könnte später auch bei der Modellierung berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zu diesem System schwingt beim 1D-Multi-Laserprojektionssystem der Mikrospiegel resonant nur in eine Richtung, jedoch werden hier insgesamt sechs Laserdioden verwendet. Je drei davon treffen mit unterschiedlichen Winkeln auf einen Spiegel, sodass am Phosphor verschiedene parabelförmige Kurven geschrieben werden. Deren Lage ist so ausgerichtet, dass so gut als möglich die gesamte Phosphorplatte abgerastert wird. Auch hier muss die Spiegelschwingung für die Berechnung der Helligkeitswerte berücksichtigt werden. Analog zum ersten System sollen auch hier die Intensitätswerte für die Ansteuerung des Lasers, um bestimmte Helligkeitsverteilungen generieren zu können, berechnet werden. Für dieses Projektionssystem gibt es leider noch keinen Prototypen, dennoch sind die erhaltenen Ergebnisse plausibel.

Grundsätzlich sind beide Systeme im Bereich der automobilen Frontbeleuchtung einsetzbar. Jedoch gibt es noch einige Herausforderungen, die erst gelöst werden müssen. Beim 2D-Laserprojektionsmodell sind die verfügbaren Laser noch zu schwach und beim 1D-System ist die Auflösung in vertikaler Richtung - diese entspricht der Anzahl der verwendeten Laser - zu klein. Darüber hinaus gibt es zum aktuellen Zeitpunkt zu wenig Erfahrung über die längere Inbetriebnahme beider Konzepte. Dabei wird vermutet, dass es zum Beispiel beim Temperaturmanagement der Laser oder bei der mechanischen Stabilität der Scanner zu Problemen kommen kann.

Trotz vielversprechender Zukunftstechnologie sind beide Konzepte von der Serienreife noch weit entfernt.

Kapitel 6

Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurden Programme für die Berechnung der Laserintensitätswerte für zwei verschiedene Laserprojektionssystemen entwickelt. Durch deren Einsatz können zukünftig neue effiziente Scheinwerfersysteme mit einer Vielzahl an neuen Funktionen und Designmöglichkeiten entwickelt werden. Ein weiterer wichtiger Vorteil dieser neuen Systeme im Bereich der automobilen Frontbeleuchtung ist die lange Lebensdauer.

Besonders wurde auf eine kurze Rechenzeit und vielseitigen Einsatz Wert gelegt. In Zukunft soll sich die Lichtverteilung des Scheinwerfers adaptiv an die gegebene Verkehrssituation anpassen. Dazu ist es notwendig, dass die Berechnung der Dimmwerte sehr rasch erfolgt. Dies ist mit beiden Projektionssystemen möglich, da ein denkbarer Ansatz wäre, die Dimmwerte vorab zu berechnen und fest in der Steuerung zu hinterlegen, um diese dann mit sich dynamisch ändernden Bildern maskieren zu können. Dazu ist zusätzlich eine kamerabasierte Sensorik notwendig, um die aktuelle Verkehrssituation erkennen zu können.

Da es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war den Prototypen für das 1D-Laserprojektionssystem fertigzustellen, müssen die Resultate dieses Systems erst validiert werden. Natürlich gibt es noch bei beiden Konzepten weitere Aspekte die analysiert werden müssen. Vor allem sollte, sobald die Abstrahlcharakteristik der Phosphorplatte bekannt ist, das Nachleuchten des Phosphors modelliert und dadurch die vom Phosphor abgestrahlte Lichtverteilung berechnet werden. Auch könnte die genaue Geometrie des Laserspots berücksichtigt werden. Beim 2D-Laserprojektionssystem wurde angenommen, dass dieser kreisförmig mit einem gaußförmigen Helligkeitsverlauf ist. In der Realität ist dies jedoch nicht der Fall. Außerdem muss die sich laufend verändernde Geometrie aufgrund der Weiterentwicklung der Prototypen in der Simulation korrigiert werden.

Eine Erweiterung der Modelle wäre die anschließende Simulation des Lichtbildes durch die Projektionslinse. Konkret würde dabei die Lichtverteilung auf eine 25m weit entfernte weiße Wand projiziert und anschließend simuliert werden. Ein Effekt, der hier berücksichtigt werden muss, sind die Linsenfehler. Manche dieser Fehler, wie der Randlichtabfall oder Koma und Astigmatismus können möglicherweise durch eine Anpassung der Bilddaten korrigiert werden. Vor der Umsetzung weiterer Schritte sollte immer der Aufwand und der resultierende Nutzen abgewogen werden.

Laserprojektionssysteme werden in Zukunft eine wichtige Rolle im Bereich der automobilen Frontbeleuchtung spielen. Einige Automobilhersteller sind sehr interessiert an diesem neuen Konzept. Zum Beispiel veröffentlichte im April 2013 Mercedes-Benz das Konzept des Mercedes GLA. Dieser kompakte SUV verfügt über laserbasierte Frontscheinwerfer. Mit dieser Technologie kann nicht nur die Lichtverteilung adaptiv an die Verkehrssituation angepasst werden, sondern auch Navigationshinweise, wie beispielsweise Abbiegepeile, auf die Fahrbahn projiziert werden. Dadurch können auch die anderen Verkehrsteilnehmer erkennen, wohin der Lenker fahren will. [47]

Auch die Firma ZKW wird weiterhin an diesem Vorentwicklungsprojekt arbeiten. Diese Systeme bieten viel Potential, um zukünftige Scheinwerfersysteme, die die Verkehrssicherheit bei Nacht deutlich erhöhen, zu entwickeln.

Abbildungsverzeichnis

1.1	BMW Lichtmodul für Laserscheinwerfer [03]	2
1.2	Lichtverteilung des Abblendlichts für geraden Straßenabschnitt [10]	5
1.3	Kurven-, Abbiege-, Abblend- und Kreuzungslicht [10]	6
1.4	Stadt-, Landstraßen- und Autobahnlicht (Quelle: ZKW)	6
1.5	Blendfreies Fernlicht [11]	7
1.6	Markierungslicht leuchtet gezielt Fußgänger am Straßenrand an [14]	8
1.7	Matrix- / Pixel-Licht: entgegenkommender Verkehr wird ausgeblendet [Abb01], [Abb02]	9
1.8	DMD: variable Lichtverteilung [19]	10
2.1	Schwingendes System [22]	12
2.2	Lissajous-Figuren mit verschiedenen Phasenverschiebungen und Frequenzverhältnissen	14
2.3	Helium-Neon-Laser [Abb03]	14
2.4	Elektromagnetische Spektrum und sichtbarer Bereich (ungefähr 380 nm bis 780 nm) [Abb04]	15
2.5	Reflexion und Brechung [25]	16
2.6	Bestandteile eines Lasers [24]	17
2.7	Absorption, spontane Emission und induzierte Emission [Abb05]	18
2.8	Fokussierung eines Laserstrahls [24]	20
2.9	Laserdiode [Abb06]	21
2.10	MEMS-Spiegel [34], [35]	24
2.11	Funktionsweise 1D- und 2D-Mikroscanner [35], [36]	25
2.12	Konvertierung in weißes Licht [20]	27
3.1	2D-Laserprojektionssystem (Quelle: ZKW)	29
3.2	Lissajous-Figuren mit 4 und 5 Zeilen	31
3.3	Vorwärts- und Rückwärtsbewegung einer Lissajous-Figur mit 4 Zeilen	32

3.4	Lissajous-Figuren mit 10 und 80 Zeilen	32
3.5	Lissajous-Figur mit 2 Zeilen: festes Zeitgitter mit $\Delta t = 0.05$	35
3.6	Nachleuchten der Phosphorplatte ($a = 1, b = -1, \Delta t = 0.006$)	36
3.7	Unendlich langes Nachleuchten der Phosphorplatte ($a = 1, b = 0$)	36
3.8	Nachleuchten der Phosphorplatte ($a = 1, b = -0.001, -0.01$)	37
3.9	Nachleuchten der Phosphorplatte ($a = 0.5, b = -0.001, -0.002$)	37
3.10	Nachleuchten der Phosphorplatte ($a = 0.001, 1, b = -0.002$)	38
3.11	Bereich ausblenden	38
3.12	Lissajous-Figur mit 2 Zeilen: festes Zeitgitter mit $\Delta t = 0.05$ und schematisch dargestelltes festes Ortsgitter	40
3.13	Ausgangsplot für festes Ortsgitter mit Nachleuchten der Phosphorplatte ($a =$ $1, b = -1$)	41
3.14	Festes Ortsgitter ($\Delta x = \Delta y = 0.3, \Delta x = \Delta y = 0.1$)	41
3.15	Ausgangsplot für die Funktionen „Bereich ausblenden“ und „festes Ortsgitter mit Nachleuchten der Phosphorplatte“	42
3.16	Bereich ausblenden ($x_1 = 6, x_2 = 8, y_1 = -2$ und $y_2 = 0$) und festes Ortsgitter ($\Delta x = \Delta y = 0.2$)	42
3.17	Schnittkurve mit gleichem Spotdurchmesser	43
3.18	2D-System: x-z-Ebene und x-y-Ebene	43
3.19	Unterschiedliche Spotgröße	46
3.20	Unterschiedlicher Laserspotdurchmesser mit Überdeckung der Nachbarpunkte und festem Ortsgitter $\Delta x = \Delta y = 0.3$	46
3.21	Mitbeleuchtung der Nachbarzellen	47
3.22	Unterschiedlicher Laserspotdurchmesser mit Überdeckung der Nachbarpunkte und festem Ortsgitter $\Delta x = \Delta y = 0.1$	48
3.23	Bestimmte vorgegebene Helligkeitsverteilungen	50
3.24	Intensitätswerte für eine bestimmte Helligkeitsverteilung	50
3.25	Intensitätswerte für eine Fernlichtverteilung	51
3.26	Prototyp des 2D-Laserprojektionssystems (Quelle: ZKW)	52
3.27	Bildaufbau	53
3.28	TU Logo: Helligkeitswerte	55
3.29	Unterschiedliche Zeilenabstände: Vorwärts- und Rückwärtsbewegung einer Lissajous-Figur mit 6 Zeilen	55
3.30	TU Logo: Helligkeitskompensation in x-Richtung	56
3.31	Dimmwerte ohne und mit Helligkeitskompensation (festes Orts- und Zeitgitter)	57

3.32	TU Logo: Berücksichtigung des Zeilenabstandes in y-Richtung	58
3.33	Gestauchtes ZKW Logo	59
3.34	ZKW Logo - Erhaltung der Geometrie	59
3.35	Gleichmäßige Helligkeitsverteilung	61
3.36	dwh GmbH-Logo	62
3.37	ZKW-Logo	63
3.38	Lichtverteilung eines Abblendlichtes	63
3.39	Lichtverteilungen verschiedener Fernlichter	64
3.40	Phosphorplatte und Leuchten des Phosphors (Quelle: ZKW)	64
3.41	Bildprojektion auf der Phosphorplatte	64
4.1	1D-Multi-Laserprojektionssystem (Quelle: ZKW)	67
4.2	Überlappung der sechs Zeilen (Quelle: ZKW)	68
4.3	x-z-Ebene des 1D-Multi-Laserprojektionssystems	70
4.4	Ausschnitt der x-y-Ebene des 1D-Multi-Laserprojektionssystems	71
4.5	Kurven der sechs Laserstrahlen am Phosphor	72
4.6	Kurven der sechs Laserstrahlen am Phosphor mit Berücksichtigung des mehrmaligen Scannens eines Punktes	73
4.7	Dimmwerte der sechs Laserstrahlen am Phosphor für gleichmäßige Helligkeitsverteilung	74
4.8	Bestimmte Helligkeitsverteilung	75
4.9	Intensitätswerte der sechs Laserstrahlen am Phosphor für die bestimmte Helligkeitsverteilung 4.8	75

Tabellenverzeichnis

2.1 Lasertypen [24] [27] 22

2.2 Laserklassen nach DIN EN 60825-1 (Mai 2008) [28] [29] [30] 23

Literaturverzeichnis

- [01] Reif, Konrad. *Automobilelektronik: Eine Einführung Für Ingenieure*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [02] Hamm, Michael und Wolfgang Huhn. „Weltweit erster Voll-LED-Scheinwerfer im Audi R8.“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*. Band Nummer 110. Ausgabe Nummer 10. Seite 894 - 900. München: Springer Automotive Media, 2008.
- [03] BMW AG. „Scheinwerfer der Zukunft - Laserlicht.“ *Medieninformation - Innovationstage Connected Drive 2011*. 2011.
- [04] HeiBing, Peter, Metin Ersoy und Stefan Gies. *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- [05] Jebas, Christian. *Physiologische Bewertung aktiver und passiver Lichtsysteme im Automobil*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012.
- [06] Berlitz, Stephan. „Next LED Head Lights.“ *9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011*. Band Nummer 14. Seite 623 - 633. München: Herbert Utz Verlag, 2011.
- [07] Winner, Hermann, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012.
- [08] Eichhorn, Karsten, und Roland Lachmayer. „Scheinwerfer von morgen - multifunktional und hoch integriert..“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*. Band Nummer 101. Ausgabe Nummer 12. Seite 1026 - 1031. München: Springer Automotive Media, 1999.

- [09] Huhn, Wolfgang. *Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen*. München: Herbert Utz Verlag, 1999.
- [10] Hendrischk, Wolfgang, Martin Grimm und Franz-Josef Kalze. „Adaptive Scheinwerfer.“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*. Band Nummer 104. Ausgabe Nummer 11. Seite 968 - 973. München: Springer Automotive Media, 2002.
- [11] „Lichttechnik - Technische Information.“ *Hella KGaA Hueck & Co.* 10.07.2013 <http://www.hella.com/hella-at/assets/media_global/ti_lichttechnik_DE.pdf>.
- [12] „Markierendes Licht ist Preisträger im Land der Ideen.“ *KIT - Karlsruher Institut für Technologie*. 22.03.2012. 10.07.2013 <https://www.kit.edu/besuchen/pi_2012_9163.php>.
- [13] Stroop, Philip, Alexandra Koslowski, Boris Kubitzka und Jacek Roslak. „Safety Benefit of Marking light - an empirical study.“ *9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011*. Band Nummer 14. Seite 315 - 319. München: Herbert Utz Verlag, 2011.
- [14] Schneider, Dominik. „Markinglight: Safety enhancement by Markinglight Systems and their technical implementation.“ *9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011*. Band Nummer 14. Seite 320 - 326. München: Herbert Utz Verlag, 2011.
- [15] Schneider, Dominik. *Markierungslicht - Eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern*. München: Herbert Utz Verlag, 2011.
- [16] Moser, Andreas und Günther Krenn. „Matrix Light - Combining Styling, Functionality and Scalability.“ *9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011*. Band Nummer 14. Seite 261 - 270. München: Herbert Utz Verlag, 2011.
- [17] „Opel Astra.“ *Opel. Wir leben Autos.* 26.08.2013 <<http://media.gm.com/content/media/at/de/opel/vehicles/astranew/2009.html>>.

- [18] Lee, Taewon, Gunwoo Park, Hongseok Kim, Inheum Park, Kyunghoon Lee und Byoungsuk Ahn. „The Development of the Automotive Headlamp using the DMD.“ *9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011*. Band Nummer 14. Seite 524 - 534. München: Herbert Utz Verlag, 2011.
- [19] „Kurvenscheinwerfer - Pixellicht.“ *KIT - Karlsruher Institut für Technologie*. 30.05.2012. 10.07.2013 <<http://www.lti.uni-karlsruhe.de/1408.php>>.
- [20] Ravier, Jean-Paul, Loic Boinet und Julien Muller. „Laser source for automotive lighting applications: A new way to think style and lighting functions.“ *Proceedings - International Conference and Exhibition VISION 2012 - SIA*. Versailles: 09.10.2012.
- [21] Takahashi, Koji, Yoshiyuki Takahira, Yosuke Maemura, Katsuhiko Kishimoto, Rina Sato, Shigetoshi Ito, Yoshitaka Tomomura und Hidenori Kawanishi. „'Laser headlight' for Next Generation Automotive Lighting.“ *9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011*. Band Nummer 14. Seite 271 - 280. München: Herbert Utz Verlag, 2011.
- [22] Eichler, Jürgen. *Physik für das Ingenieurstudium - prägnant mit knapp 300 Beispielaufgaben*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- [23] Hering, Ekbert, Rolf Martin und Martin Stohrer. *Physik für Ingenieure*. Berlin: Springer, 2007.
- [24] Pedrotti, Frank, Leno Pedrotti, Werner Bausch und Hartmut Schmidt. *Optik für Ingenieure: Grundlagen*. Berlin: Springer, 2007.
- [25] Meschede, Dieter. *Optik, Licht und Laser*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.
- [26] Windholz, Laurentius. „Aufbau und Funktionsweise des Lasers.“ *Technische Universität Graz*. 2006. 05.07.2013 <http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/i5110/files/Lehre/Praktika/FP/Aufbau_Laser_Nd_Yag_Laser.pdf>.
- [27] „Lasertypen.“ *Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT*. 05.07.2013 <<http://www.ilt.fraunhofer.de/de/studium/laser-tutorial/lasertypen.html>>.

- [28] Veas, Georg. „Grundlagen der Lasersicherheit.“ *Universität für Bodenkultur Wien*. 01.02.2009. 05.07.2013 <http://www.boku.ac.at/fileadmin/_/an-gesund/AUVA_lasersicherheit.pdf>.
- [29] Müller, Bruno. „Achtung, Laserstrahl.“ *Swissphotonics*. 01.06.2007. 05.07.2013 <<http://www.swissphotonics.net/libraries.files/AchtungLaserstrahl.pdf>>.
- [30] Udovicic, Ljiljana. „Damit nichts ins Auge geht... Schutz vor Laserstrahlung.“ *Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)*. Bönen/Westfalen: DruckVerlag Kettler GmbH, 2010.
- [31] „What is MEMS Technology?.“ *MEMSnet*. 11.07.2013 <<https://www.memsnet.org/about/what-is.html>>.
- [32] Hsu, Tai-Ran. *Mems and microsystems: design, manufacture and nanoscale engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [33] Ballas, Rüdiger, Günther Pfeifer und Roland Werthschützky. *Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [34] „MEMS-Scanner.“ *Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme IPMS*. 11.07.2013 <<http://www.ipms.fraunhofer.de/de/applications/mems-scanners.html>>.
- [35] „Resonante Mikros scanner.“ *Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme IPMS*. 11.07.2013 <<http://www.ipms.fraunhofer.de/content/dam/ipms/common/products/AMS/microscanners-d.pdf>>.
- [36] „User Manual - VarioS-Microscanner-Demonstrators.“ *Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme IPMS*. 01.07.2013. 11.07.2013 <http://www.micro-mirrors.com/en/doc/USER_MANUAL_VarioS.pdf>.
- [37] Hofmann, Ulrich, Joachim Janes und Hans-Joachim Quenzer. „High-Q MEMS Resonators for Laser Beam Scanning Displays.“ *Micromachines*. Band Nummer 3. Ausgabe Nummer 2. Seite 509 - 528. Basel: MDPI AG, 06.06.2012.

- [38] Janes, Joachim und Ulrich Hofmann. „Schnell lenkbare Mikrosco-
nner-Spiegel., *Laser+Photonik*. Ausgabe 02/2012. Seite 26 - 29. München: Carl Hanser
Verlag, 01.02.2012.
- [39] Fox, Mark. *Optische Eigenschaften von Festkörpern*. München: Oldenbourg Wis-
senschaftsverlag GmbH, 2012.
- [40] Fujita, Shunsuke, Satoru Yoshihara, Akihiko Sakamoto, Shigeru Yamamoto und
Setsuhisa Tanabe. „YAG glass-ceramic phosphor for white LED (I): background
and development.“ *Proceedings of the SPIE: Fifth International Conference on
Solid State Lighting*. Band Nummer 5941. Seite 186 - 192. Bellingham: SPIE,
2005.
- [41] Tanabe, Setsuhisa, Shunsuke Fujita, Satoru Yoshihara, Akihiko Sakamoto und Shi-
geru Yamamoto. „YAG glass-ceramic phosphor for white LED (II): Luminescence
characteristics.“ *Proceedings of the SPIE: Fifth International Conference on Solid
State Lighting*. Band Nummer 5941. Seite 193 - 198. Bellingham: SPIE, 2005.
- [42] Meister, Erich. *Grundpraktikum Physikalische Chemie*. Zürich: vdf Hochschulverlag
AG, 2012.
- [43] *Maxima, a Computer Algebra System*. 12.07.2013 <[http://maxima.
sourceforge.net/](http://maxima.sourceforge.net/)>.
- [44] *GNU Octave*. 12.07.2013 <<http://www.gnu.org/software/octave/index.html>>.
- [45] Niederhäusern, Edward von. *Lichtgestaltung in der Fotografie: Licht und Beleuch-
tung optimal einsetzen*. München: mitp, eine Marke der Verlagsgruppe Hüthig
Jehle Rehm GmbH, 2010.
- [46] Mitterlehner, Thomas. „Ansteuerung eines Laserprojektionssystems für automobile
Frontbeleuchtung.“ MS thesis Fachhochschule Technikum Wien, 2013. Print.
- [47] Koller, Peter. „Concept GLA - Mercedes setzt auf La-
ser als Scheinwerfer.“ *Elektronikpraxis*. 19.04.2013. 01.08.2013
<<http://www.elektronikpraxis.vogel.de/automotive/articles/402321/>>.

- [Abb01] „ZKW entwickelt intelligenten LED-Scheinwerfer - Vollautomatisches LED-Matrix-Lichtsystem ermöglicht blendfreies Fahren.“ *ZKW - ZIZALA Lichtsysteme GmbH*. 14.09.2012. 10.07.2013 <<http://www.zkw.at/news/news-archiv/article//zkw-entwickelt-intelligte.html>>.
- [Abb02] „Opel revolutioniert die Lichttechnik.“ *Opel. Wir leben Autos*. 10.07.2013 <http://opel.auto-wiener.at/nachrichten/opel_revolutioniert_die_lichttechnik/bff5f0bf-6275-4c37-adba-4f540478da19/>.
- [Abb03] Franke, Thomas. „Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene.“ *Technische Universität Chemnitz*. 23.01.2012. 05.07.2013 <<http://www.tu-chemnitz.de/physik/FPRAK/>>.
- [Abb04] „File:EM-Spektrum.svg.“ *Wikimedia Commons*. 28.10.2011. 05.07.2013 <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM-Spektrum.svg?uselang=de>>.
- [Abb05] „Fernerkundung mit Lasern.“ *SEOS*. 04.07.2013 <<http://www.seos-project.eu/modules/laser-rs/laser-rs-c02-p05.de.html>>.
- [Abb06] „Blaue Laserdiode 406 nm.“ *Sander electronic*. 16.01.2009. 05.07.2013 <<http://www.sander-electronic.de/be00070.html>>.

Anhang

(01) 2D: Programmkopf

```
A:10$           /* Amplitude horizontal */
B:2.5$         /* Amplitude vertikal */
w_x:80$        /* Frequenz horizontal */
w_y:1$         /* Frequenz vertikal */

x(t):=A*sin(w_x*t)$
y(t):=B*sin(w_y*t)$
v(t):=sqrt((A^2-x(t)^2)*w_x^2+(B^2-y(t)^2)*w_y^2)$
h(t):=1/(sqrt((A^2-x(t)^2)*w_x^2+(B^2-y(t)^2)*w_y^2))$

load("draw")$
set_draw_defaults()$
set_draw_defaults(
  xrange=[-A,A],
  yrange=[-B,B],
  axis_3d=false,
  xtics=none,
  ytics=none,
  ztics=none,
  color=white,
  background_color=black,
  nticks=10000,
  line_type=solid,
  line_width=5,
  user_preamble="set xyplane at 0",
  enhanced3d=true,
  colorbox = false,
  contour_levels=10,
  palette = gray,
  contour=surface,
  view=[0, 360]
)$

/* Berechnungen mit h(t), graphische Darstellung mit log(h(t)) */
list:makelist([x(t), y(t), h(t)], t, 0, 2*pi, 0.05)$
n:length(list)$
array(lissa, n)$ /* erstellt Array lissa */
fillarray(lissa, list)$ /* füllt Array mit list auf */
```

(02) 2D: Nachleuchten des Phosphors

```
/* Nachleuchten: a*e^(b*t) */
a:1$
b:-1$
anzahl:10$           /* "Schrittweite" des Nachleuchtens */
t:0$                 /* Laufzeit */
m:floor(n/anzahl)$   /* floor...abrunden */
zwerte:zeromatrix(n+1,m)$
maxz:0$              /* für Skalierung -> Maximum und Minimum der Helligkeitswerte */
minz:0$
```

```

for i:anzahl+1 thru n+1 step anzahl do(
list:makelist([x(t), y(t), v(t)], t, -%pi, %pi, 0.006),
n:length(list),
array(lissaneu, n),
fillarray(lissaneu, list),
rearray(lissaneu,i),          /* kürzt Array bis i */
for j: 1 while j<=t do(
for k: (i-(j+1)*anzahl) thru i-j*anzahl step 1 do(
lissaneu[k][3]:log(lissa[k][3]*a*exp(j*b))
)
),
for l:1 thru i step 1 do(
zwerte[l][t+1]:lissaneu[l-1][3]
),
for o:1 thru i step 1 do(          /* suche Maximum */
if zwerte[o][t+1] >= maxz then maxz:zwerte[o][t+1] else maxz:maxz
),
for p:1 thru i step 1 do(          /* suche Minimum */
if zwerte[p][t+1] <= minz then minz:zwerte[p][t+1] else minz:minz
),
t:t+1
);

/* zwerteneu für Skalierung */
werteneu:zeromatrix(n+1,m)$
t:1$
/* Skalierung: maxz=1, minz=0 */
/* y=kx+d mit k=1/(maxz-minz), d=minz/(minz-maxz) --> y aus [0,1] */
k:1/(maxz-minz)$
d:minz/(minz-maxz)$

for i:anzahl+1 thru n+1 step anzahl do(
for j:1 thru i step 1 do(
werteneu[j][t]:k*zwerte[j][t]+d
),
list:makelist([x(t), y(t), v(t)], t, -%pi, %pi, 0.006),
n:length(list),
array(lissaplot, n),
fillarray(lissaplot, list),
rearray(lissaplot,i+1),
lissaplot[0][3]:0,          /* für gleiche Grauskala: 1. Punkt=0, letzter=1 */
lissaplot[i+1][3]:1,
for l:1 thru i step 1 do(
lissaplot[l][3]:werteneu[l][t]
),
draw3d(
terminal=png,
file_name=concat("lissajous_wx9_",add zeroes(i-1)),
points(listarray(lissaplot))),
t:t+1
);

```

(03) 2D: Bereich ausblenden

```

/* einen bestimmten Bereich ausblenden */
/* x1 < x < x2, y1 < y < y2 */
x1:6$
x2:8$
y1:-2$
y2:0$

list3:makelist([x(t), y(t), log(h(t))], t, -%pi, %pi, 0.005)$
array(lissaplotneu, n)$
fillarray(lissaplotneu, list2)$

for i:0 thru n step 1 do(
lissaplotneu[i][3]:1          /* setze alle Helligkeitswerte 1 */
);

```

```

for i:1 thru n step 1 do(
if lissaplot[i][1]>x1 and lissaplot[i][1]<x2 and lissaplot[i][2]>y1 and lissaplot[i][2]<y2 then
lissaplotneu[i][3]:0      /* Ausblenden entspricht Helligkeit 0 */
);
wxdraw3d(points(listarray(lissaplotneu)));

```

(04) 2D: Festes Ortsgitter und Ausgabe der Dimmwerte

```

/* -----festes Ortsgitter----- */
aufx:0.1$      /* Auflösung in x-Richtung */
aufy:0.1$      /* Auflösung in y-Richtung */

/* lissa .... Matrix, mit folgenden Spalten: t, x(t), y(t), h(t) */

nx:round(2*A/aufx);      /* Anzahl der Schritte in x-Richtung */
ny:round(2*B/aufy);      /* Anzahl der Schritte in y-Richtung */

/* festes Ortsgitter */
lissaneu:zeromatrix(nx*ny,4)$      /* enthält wieder t, x(t), y(t), sum(h(t_i)) */

for i:1 thru ny step 1 do(
for j:1 thru nx step 1 do(
lissaneu[(i-1)*nx+j][2]:-A+(j-0.5)*aufx, /* x-Koordinate */
lissaneu[(i-1)*nx+j][3]:B-(i-0.5)*aufy /* y-Koordinate */
)
);

for i:1 thru ny step 1 do(
for j:1 thru nx step 1 do(
for k:1 thru n-1 step 1 do(
if lissa[k][2]>=-A+(j-1)*aufx and lissa[k][2]<=-A+j*aufx and lissa[k][3]<=B-(i-1)*aufy and lissa[k][3]>=B-i*aufy then(
lissaneu[(i-1)*nx+j][4]:lissaneu[(i-1)*nx+j][4]+lissa[k][4], /* Summe der Helligkeitswerte */
lissaneu[(i-1)*nx+j][1]:lissa[k][1]      /* t, des letztes Punktes */
)
)
);

/* -----Einträge mit h=0 gehören gelöscht----- */
/* diese Punkte werden ja nicht vom Laser getroffen */

lissaneumatrix:zeromatrix(nx*ny,4)$
t:1$
for i:1 step 1 thru nx*ny do(
if lissaneu[i][4]#0 then(
lissaneumatrix[t][1]:lissaneu[i][1],
lissaneumatrix[t][2]:lissaneu[i][2],
lissaneumatrix[t][3]:lissaneu[i][3],
lissaneumatrix[t][4]:lissaneu[i][4],
t:t+1)
else t:t
);

/* -----Ausgabe der Dimmwerte----- */
ausgabematrix:zeromatrix(t-1,4)$
for i:1 step 1 thru t-1 do(
ausgabematrix[i][1]:lissaneumatrix[i][1], /* t */
ausgabematrix[i][2]:lissaneumatrix[i][2], /* x */
ausgabematrix[i][3]:lissaneumatrix[i][3], /* y */
ausgabematrix[i][4]:1/lissaneumatrix[i][4] /* d=1/h */
);

stringout("Dimmwerte",float(ausgabematrix));

```

(05) 2D: Berücksichtigung des unterschiedlichen Laserspotdurchmessers

```

/* -----Unterschiedlicher Laserspotdurchmesser----- */

/* -----Punktgröße----- */
anzsize:3$ /* Anzahl der verschiedenen Punktgrößen */
klein:1$ /* kleinste Punktgröße eingeben */
gross:2$ /* größte Punktgröße */

groesse:zeromatrix(anzsize,1)$
for i:1 thru anzsize step 1 do(
groesse[i][1]:gross-(gross-klein)/(anzsize-1)*(i-1)
); /* Punktgrößen absteigend sortieren!!!! */

/* Annahme: Radius des Kreises entspricht 1/10 der Punktgröße */
r:zeromatrix(anzsize,1)$ /* Radien */
for i:1 thru anzsize step 1 do(
r[i][1]:groesse[i][1]/10
);

/* -----Größe der Punkte bleibt entlang der Kurve  $f_i: y = a_i x^2 + b_i x + c_i$  gleich----- */
/* -----exakten Kurven  $y = \sqrt{a^2 * (1 / (\sin(\theta)^2 * \cos(\phi)^2 - 1) - y^2)}$ ----- */
/* -----werden durch obige approximiert!----- */

anzci:(anzsize-1)*2$ /* Anzahl der Kurven (ist durch anzsize bestimmt) */
auslenkungz:0.03$ /* Spiegel schwingt in z-Richtung um +/- 0.03 rad */
auslenkungx:0$ /* Spiegel schwingt in x-Richtung um +/- 0 rad */
absspvh:70$ /* Abstand Spiegel Phosphor in x-Richtung */
absspvhz:20$ /* Abstand Spiegel Phosphor in z-Richtung */
alpha:90*pi/180-atan(absspvh/absspvhz)$ /* Ausgangsstellung des Spiegels, Winkel zur z-Achse - in rad!!! */
beta:90*pi/180$ /* Ausgangsstellung des Spiegels, Winkel zur x-Achse - in rad!!! */

/* definiere die zwei Winkel phi und theta, in rad!!!! */
phi:zeromatrix(anzci,1)$
theta:zeromatrix(anzci,1)$
for i:1 thru anzci step 1 do(
phi[i][1]:90*pi/180-beta-(floor(anzci/2)-i)*auslenkungx/(anzci-1),
theta[i][1]:90*pi/180-alpha-(floor(anzci/2)-i)*auslenkungz/(anzci-1)
);

/* Überprüfe, ob Winkel für Phosphorplatte zulässig sind: */
theta1:atan(absspvh/(absspvhz+B))$
theta2:atan(absspvh/(absspvhz-B))$
phi1:atan(A/absspvh)$
phi2:atan(-A/absspvh)$
for i:1 thru anzci step 1 do(
if (theta[i][1]<theta1 and theta[i][1]>theta2) or (theta[i][1]>theta1 and theta[i][1]<theta2) then
print("Winkel ist zulässig") else print("Winkel muss geändert werden")
);
for i:1 thru anzci step 1 do(
if (phi[i][1]<phi1 and phi[i][1]>phi2) or (phi[i][1]>phi1 and phi[i][1]<phi2) then
print("Winkel ist zulässig") else print("Winkel muss geändert werden")
);

c:zeromatrix(anzci,3)$
/* Berechne Koeffizienten der approximierten Schnittkurven */
for i:1 thru anzci step 1 do(
M:zeromatrix(A*2+1,2),
for j:1 thru A*2+1 step 1 do(
M[j][1]:-A+j-1,
M[j][2]:sqrt((absspvh^2)*(1/((sin(theta[i][1]))^2*(cos(phi[i][1]))^2)-1)-(M[j][1])^2)
),
cwerte:lsquares_estimates(M,[x,y],y=co1*x^2+co2*x+co3,[co1,co2,co3]),
c[i][1]:(-1)*rhs(cwerte[1][1]), /* Entsprechend der Anzahl der Kurven, die Koeffizienten ai, bi und ci */
c[i][2]:(-1)*rhs(cwerte[1][2]),
c[i][3]:(-1)*(rhs(cwerte[1][3])-absspvhz) /* Verschiebe die Kurven in die Mitte des Koordinatensystems! */
);

/* die 3. Spalte der ci sollte absteigend sortiert sein!!! */
tmp1:0$
tmp2:0$
tmp3:0$

```

```

for i:1 thru anzci-1 step 1 do(
for j:1 thru anzci-1 step 1 do(
if c[j][3] < c[j+1][3] then(
tmp1:c[j][3],
c[j][3]:c[j+1][3],
c[j+1][3]:tmp1,
tmp2:c[j][1],
c[j][1]:c[j+1][1],
c[j+1][1]:tmp2,
tmp3:c[j][2],
c[j][2]:c[j+1][2],
c[j+1][2]:tmp3
)
)
);

/* Punkte mit größerer Fläche sind weniger hell --> Helligkeit wird durch Fläche dividiert */
/* A=r^2*Pi */
/* Punktgröße=1 --> r=0.1 --> A=0.03, damit die Fläche immer größer gleich 1 ist --> Multiplikation von r mit fcons */
fcons:floor(1/(%pi*r[anzsize][1]^2))+1$ /* r=0.1 --> A=r^2*Pi*fcons=1.005 */
Apunkte:zeromatrix(anzsize,1)$
for i:1 thru anzsize step 1 do(
Apunkte[i][1]:r[i][1]^2*fcons*%pi
);

/* abhängig von der Größe der Punkte und von der Ortsauflösung, werden Nachbarzellen überdeckt: abrunden(punktgröße/aufx) */
nachbar1:zeromatrix(anzsize,1)$
for i:1 thru anzsize step 1 do(
nachbar1[i][1]:floor(groesse[i][1]/aufx)
);
/* nachbar1 wird dann mit Zahlen von 0,1,2,... identifiziert, d.h. wenn z.B. nachbar1=[6,6,6,5,5,4,4,4,3,3] */
/* dann ist nachbar=[3,3,3,2,2,2,1,1,1,0,0] */
nachbaranz:1$
for i:1 thru anzsize-1 step 1 do(
if nachbar1[i][1]#nachbar1[i+1][1] then nachbaranz:nachbaranz+1 else nachbaranz:nachbaranz
);

nachbar:zeromatrix(anzsize,1)$
nachbar[1][1]:nachbaranz-1$
for i:2 thru anzsize step 1 do(
if nachbar1[i][1]=nachbar1[i-1][1] then nachbar[i][1]:nachbar[i-1][1] else nachbar[i][1]:nachbar[i-1][1]-1
);

/* nachbar=0 --> keine Nachbarzellen werden überschrieben */
/* nachbar=1 --> die vier anliegenden Nachbarzellen werden überschrieben, wobei die Helligkeit außen weniger ist --> *gauss1 */
/* nachbar=2 --> alle 8 Nachbarzellen werden überschrieben, wobei die Helligkeit außen weniger ist --> *gauss1 */
/* nachbar>2 --> alle 8 Nachbarzellen + 12 direkten der nächsten Nachbarumgebung werden überschrieben, wobei die Helligkeit außen weniger ist --> *gauss1 bzw. *gauss2 */

gauss1:0.7$ /* multiplikative Konstante für den Abfall der Helligkeit der ersten Nachbarzellen */
gauss2:0.3$ /* multiplikative Konstante für den Abfall der Helligkeit der zweiten Nachbarzellen */

/* Berechne festes Ortsgitter, wie im Anhang (04) */
/* erhalte Matrix lissa mit Spalten x, y, h, t */

/* -----Bereiche der verschiedenen Punktgrößen----- */
/* z.B. für 3 verschiedene Punktgrößen --> 4 Kurven */
/* zwischen den Kurven y <= a1*x^2 + b1*x + c1 und y > a2*x^2 + b2*x + c2 --> Punktgröße: groesse[2][1] */
/* ----- y <= a2*x^2 + b2*x + c2 und y > a3*x^2 + b3*x + c3 --> Punktgröße: groesse[3][1] */
/* ----- y <= a3*x^2 + b3*x + c3 und y > a4*x^2 + b4*x + c4 --> Punktgröße: groesse[2][1] */
/* ----- sonst --> Punktgröße: groesse[1][1] */

anzbereiche:anzci$ /* Anzahl der Bereiche */

ti:zeromatrix(anzbereiche,4)$ /* 1. Spalte für die Anzahl der Punkte in einem Bereich */
/* 2. Spalte für die Punktgröße in den verschiedenen Bereichen */
/* 3. Spalte für die Art der Nachbarumgebung */
/* 4. Spalte für die Fläche des Punktes */

lauf:1$
for i:1 thru anzbereiche step 1 do(
if i<anzsize then(

```

```

ti[i][1]:1, /* wird erst ermittelt */
ti[i][2]:groesse[i+1][1],
ti[i][3]:nachbar[i+1][1],
ti[i][4]:Apunkte[i+1][1]
)
else (
ti[i][1]:1, /* wird erst ermittelt */
ti[i][2]:groesse[i-lauf][1],
ti[i][3]:nachbar[i-lauf][1],
ti[i][4]:Apunkte[i-lauf][1],
lauf:lauf+2
)
);

punkt:zeromatrix(dimneu,4*anzbereiche)$ /* x,y,h,t mal Bereiche */

for i:1 step 1 thru dimneu+1 do(
for j:1 step 1 thru anzbereiche-1 do(

if lissa[i-1][2] <= c[j][1]*(lissa[i-1][1])^2+c[j][2]*(lissa[i-1][1])+c[j][3] and lissa[i-1][2] > c[j+1][1]*(lissa[i-1][1])^2+c[j+1][2]*(
lissa[i-1][1])+c[j+1][3] then(
punkt[ti[j][1]][1+(j-1)*4]:lissa[i][1],
punkt[ti[j][1]][2+(j-1)*4]:lissa[i][2],
punkt[ti[j][1]][3+(j-1)*4]:lissa[i][3],
punkt[ti[j][1]][4+(j-1)*4]:lissa[i][4],
ti[j][1]:ti[j][1]+1
)
),
if lissa[i-1][2] > c[1][1]*(lissa[i-1][1])^2+c[1][2]*(lissa[i-1][1])+c[1][3] or lissa[i-1][2] <= c[anzci][1]*(lissa[i-1][1])^2+c[anzci][2]*(
lissa[i-1][1])+c[anzci][3] then(
punkt[ti[anzbereiche][1]][1+(anzbereiche-1)*4]:lissa[i][1],
punkt[ti[anzbereiche][1]][2+(anzbereiche-1)*4]:lissa[i][2],
punkt[ti[anzbereiche][1]][3+(anzbereiche-1)*4]:lissa[i][3],
punkt[ti[anzbereiche][1]][4+(anzbereiche-1)*4]:lissa[i][4],
ti[anzbereiche][1]:ti[anzbereiche][1]+1
)
);

/* -----Bei den Punkten mit größerer Fläche nimmt die Helligkeit ab----- */
/* -----Abnahme *1/Fläche----- */

plotmatrix:zeromatrix(anzbereiche,1)$

for j:1 step 1 thru anzbereiche do(
listplotmatrix:makelist([x(t), y(t), h(t)], t, t1, t2, zeit),
array(fuerplot,n),
fillarray(fuerplot, listplotmatrix),
rearray(fuerplot, ti[j][1]-2),

for i:0 thru ti[j][1]-2 step 1 do(
fuerplot[i][1]:punkt[i+1][1+(j-1)*4],
fuerplot[i][2]:punkt[i+1][2+(j-1)*4],
fuerplot[i][3]:log(punkt[i+1][3+(j-1)*4]*(1/ti[j][4]))
),

plotmatrix[j][1]:listarray(fuerplot)
);

/* -----point_size=ti[j][2],points(plotmatrix[j][1]),... für jeden Bereich j=1,2,...----- */
/* Plot mit verschiedenen Punktgrößen */

wxdraw3d(point_size=ti[1][2],points(plotmatrix[1][1]), point_size=ti[2][2],points(plotmatrix[2][1]), point_size=ti[3][2],points(plotmatrix
[3][1]), point_size=ti[4][2],points(plotmatrix[4][1]));

/* -----Übertragung der Helligkeit auf die Nachbarzellen----- */
werteneu:zeromatrix(laenge,5)$ /* 4. Spalte für Parameter der Nachbarzellen, 5. Spalte für t */

ts:zeromatrix(anzbereiche,1)$
for i:1 thru anzbereiche step 1 do(
for j:1 thru i step 1 do(
ts[i][1]:ts[i][1]+ti[j][1]-1
)
)

```



```

);

/* maxminvek ist ein Spaltenvektor, der alle berechneten Helligkeiten enthält */
/* maxminvek2 enthält die Einträge von fuerplot, wobei in der 4. Spalte noch t enthalten ist */

for i:1 thru laenge step 1 do(
if i <= ts[1][1] then(
werteneu[i][1]:maxminvek2[i][1],
werteneu[i][2]:maxminvek2[i][2],
werteneu[i][3]:maxminvek[i][1],
werteneu[i][4]:ti[i][3],
werteneu[i][5]:maxminvek2[i][4]
)
else(
for j:2 thru anzbereiche step 1 do(
if i>ts[j-1][1] and i<=ts[j][1] then(
werteneu[i][1]:maxminvek2[i][1],
werteneu[i][2]:maxminvek2[i][2],
werteneu[i][3]:maxminvek[i][1],
werteneu[i][4]:ti[j][3],
werteneu[i][5]:maxminvek2[i][4]
)
)
)
);

/* -----Einlesen in Gitter der Reihe nach----- */
werteneu2:zeromatrix(nx*ny,5)$
for i:1 thru ny step 1 do(
for j:1 thru nx step 1 do(
werteneu2[(i-1)*nx+j][1]:-10+(j-0.5)*aufx, /* x */
werteneu2[(i-1)*nx+j][2]:2.5-(i-0.5)*aufy /* y */
)
);

for i:1 thru ny step 1 do(
for j:1 thru nx step 1 do(
for k:1 thru laenge step 1 do(
if werteneu[k][1]=werteneu2[(i-1)*nx+j][1] and werteneu[k][2]=werteneu2[(i-1)*nx+j][2] then(
werteneu2[(i-1)*nx+j][3]:werteneu[k][3],
werteneu2[(i-1)*nx+j][4]:werteneu[k][4],
werteneu2[(i-1)*nx+j][5]:werteneu[k][5] /* t */
)
)
);

/* nachbar=0 --> keine Nachbarzellen werden überschrieben */
/* nachbar=1 --> die vier anliegenden Nachbarzellen werden überschrieben, wobei die Helligkeit außen weniger ist --> *gauss1 */
/* nachbar=2 --> alle 8 Nachbarzellen werden überschrieben, wobei die Helligkeit außen weniger ist --> *gauss1 */
/* nachbar>2 --> alle 8 Nachbarzellen + 12 direkten der nächsten Nachbarumgebung werden überschrieben, wobei die Helligkeit außen weniger ist --> *gauss1 bzw. *gauss2 */

/* nachbar=0 muss nicht berücksichtigt werden! */

for i:3 thru ny-2 step 1 do(
for j:3 thru nx-2 step 1 do(
if werteneu2[(i-1)*nx+j][4]=1 then(
werteneu2[(i-1)*nx+j-1][3]:werteneu2[(i-1)*nx+j-1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i-1)*nx+j+1][3]:werteneu2[(i-1)*nx+j+1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i-2)*nx+j][3]:werteneu2[(i-2)*nx+j][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i)*nx+j][3]:werteneu2[(i)*nx+j][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1
)
elseif werteneu2[(i-1)*nx+j][4]=2 then(
werteneu2[(i-1)*nx+j-1][3]:werteneu2[(i-1)*nx+j-1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i-1)*nx+j+1][3]:werteneu2[(i-1)*nx+j+1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i-2)*nx+j][3]:werteneu2[(i-2)*nx+j][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i)*nx+j][3]:werteneu2[(i)*nx+j][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i-2)*nx+j-1][3]:werteneu2[(i-2)*nx+j-1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i-2)*nx+j+1][3]:werteneu2[(i-2)*nx+j+1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i)*nx+j-1][3]:werteneu2[(i)*nx+j-1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i)*nx+j+1][3]:werteneu2[(i)*nx+j+1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1
)
)
);

```

```

)
elseif werteneu2[(i-1)*nx+j][4]>2 then(
werteneu2[(i-1)*nx+j-1][3]:werteneu2[(i-1)*nx+j-1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i-1)*nx+j+1][3]:werteneu2[(i-1)*nx+j+1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i-2)*nx+j][3]:werteneu2[(i-2)*nx+j][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i)*nx+j][3]:werteneu2[(i)*nx+j][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i-2)*nx+j-1][3]:werteneu2[(i-2)*nx+j-1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i-2)*nx+j+1][3]:werteneu2[(i-2)*nx+j+1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i)*nx+j-1][3]:werteneu2[(i)*nx+j-1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,
werteneu2[(i)*nx+j+1][3]:werteneu2[(i)*nx+j+1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss1,

werteneu2[(i-1)*nx+j-2][3]:werteneu2[(i-1)*nx+j-2][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss2,
werteneu2[(i-1)*nx+j+2][3]:werteneu2[(i-1)*nx+j+2][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss2,
werteneu2[(i-3)*nx+j][3]:werteneu2[(i-3)*nx+j][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss2,
werteneu2[(i+1)*nx+j][3]:werteneu2[(i+1)*nx+j][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss2,
werteneu2[(i-2)*nx+j-2][3]:werteneu2[(i-2)*nx+j-2][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss2,
werteneu2[(i-2)*nx+j+2][3]:werteneu2[(i-2)*nx+j+2][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss2,
werteneu2[(i)*nx+j-2][3]:werteneu2[(i)*nx+j-2][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss2,
werteneu2[(i)*nx+j+2][3]:werteneu2[(i)*nx+j+2][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss2,

werteneu2[(i+1)*nx+j+1][3]:werteneu2[(i+1)*nx+j+1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss2,
werteneu2[(i-3)*nx+j+1][3]:werteneu2[(i-3)*nx+j+1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss2,
werteneu2[(i-3)*nx+j-1][3]:werteneu2[(i-3)*nx+j-1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss2,
werteneu2[(i+1)*nx+j-1][3]:werteneu2[(i+1)*nx+j-1][3]+werteneu2[(i-1)*nx+j][3]*gauss2
)
)
);

/* -----Einträge mit h=0 gehören gelöscht!----- */
/* wie im Anhang (04) --> Array plotwerteneu */
/* Plot */
wxdraw3d(points(listarray(plotwerteneu)));

```

(06) 2D: Berücksichtigung des Zeilenabstandes der Lissajous-Figur

```

/* -----Berücksichtigung des Zeilenabstandes----- */
/* Zeilensprünge genau dort, wo die x-Koordinate gerade größer oder kleiner wird */

hell:zeromatrix(n,4)$

/* hell enthält in den Spalten: t, x(t), y(t) und h(t) */

/* zeilen enthält Indizes der Zeilensprünge */
zeilen:zeromatrix(2*w_x+2,1)$
zeilen[1][1]:1$ /* am Anfang auch Zeilensprung */
zeilen[2*w_x+2][1]:n$ /* am Schluss auch Zeilensprung */
lauf:1$ /* Zählvariable */
for i:1 thru 2*w_x-1 step 1 do(
for j:zeilen[i][1]+1 step 1 while not ((hell[j-1][2]<hell[j][2] and hell[j+1][2]<hell[j][2]) or (hell[j-1][2]>hell[j][2] and hell[j+1][2]>hell[j][2])) do(
lauf:lauf+1
),
lauf:lauf+1,
zeilen[i+1][1]:lauf
);

lissaneu:zeromatrix(n,4)$
for i:1 thru n step 1 do(
lissaneu[i][1]:hell[i][1],
lissaneu[i][2]:hell[i][2],
lissaneu[i][3]:hell[i][3],
lissaneu[i][4]:hell[i][4]
);

/* Berücksichtigung des Zeilenabstandes */
abstand:zeromatrix(2*w_x-2,1)$
for i:1 thru 2*w_x-2 step 1 do(
abstand[i][1]:abs((lissaneu[floor((zeilen[i][1]+zeilen[i+1][1])/2)][3])-(lissaneu[floor((zeilen[i+1][1]+zeilen[i+2][1])/2)][3]))
);

```

```

/* jede Zeile dann gleiche y-Werte */
ywerte:zeromatrix(2*w_x,1)$
for i:1 thru w_x step 1 do(
  ywerte[i][1]:B-(i-0.5)*2*B/w_x
);
for i:w_x+1 thru 2*w_x step 1 do(
  ywerte[i][1]:-(B-(i-0.5)*2*B/w_x)
);

lissaneu2:zeromatrix(n,4)$
for i:1 thru n step 1 do(
  lissaneu2[i][1]:hell[i][1], /* t */
  lissaneu2[i][2]:hell[i][2] /* x */
);
for i:1 thru 2*w_x step 1 do(
  for j:zeilen[i][1] thru zeilen[i+1][1] step 1 do(
    lissaneu2[j][3]:ywerte[i][1] /* y -> pro Zeile gleich! */
  )
);
for j:zeilen[1][1] thru zeilen[2][1] step 1 do(
  lissaneu2[j][4]:hell[j][4]/abstand[1][1]
);
for j:zeilen[w_x][1] thru zeilen[w_x+1][1] step 1 do(
  lissaneu2[j][4]:hell[j][4]/abstand[w_x-1][1]
);
for i:2 thru 2*w_x-2 step 1 do(
  for j:zeilen[i][1] thru zeilen[i+1][1] step 1 do(
    lissaneu2[j][4]:hell[j][4]/((abstand[i-1][1]+abstand[i][1])/2)
  )
);

```

(07) 2D: Intensitätswerte für eine bestimmte Helligkeitsverteilung

```

/* -----Helligkeitsverteilung einlesen + Intensitätswerte----- */

daten:read_nested_list(file_search("Fernlicht.txt"))$
listtomat(daten):=block([i,M],M:matrix(),for i:1 thru length(daten) do M:adrow(M,daten[i]),return(M))$
bild:listtomat(daten)$

/* Matrix der Helligkeitsverteilung */
/* x_w ... Anzahl der Zeilen, xrichtung ... Anzahl der Punkte in x-Richtung */
hellverteilung:zeromatrix(w_x,xrichtung)$
for i:1 thru w_x step 1 do(
  for j:1 thru xrichtung step 1 do(
    hellverteilung[i][j]:bild[i][j]
  )
)$

/* dimmwertematrix_vor ... enthält die Dimmwerte für die Vorwärtsbewegung für eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung */
intensitaet_vor:zeromatrix(w_x,xrichtung)$
for i:1 thru w_x step 1 do(
  for j:1 thru xrichtung step 1 do(
    intensitaet_vor[i][j]:dimmwertematrix_vor[i][j]*hellverteilung[i][j]
  )
)$

stringout("Intensitaetswerte_vorwaerts",float(intensitaet_vor));

```

(08) 2D: Ausgabe für Elektronik: gleichmäßige Helligkeitsverteilung

```

/* -----Ausgabe für Elektronik: gleichmäßige Helligkeitsverteilung----- */

/* -----Eingabe----- */
A:10$ /* Amplitude horizontal */
B:2.5$ /* Amplitude vertikal */
w_x:80$ /* Frequenz horizontal */
w_y:1$ /* Frequenz vertikal */
zeit:0.001$ /* zeitliche Auflösung */

```

```

durchlaeufe:1$          /* Anzahl der Durchläufe */
xrichtung:24$           /* Anzahl der Punkte in x-Richtung */
aufx:2*A/xrichtung$     /* Auflösung in x-Richtung für Dimmwerte --> Elektronik */
aufy:2*B/w_x$          /* Auflösung in y-Richtung für Dimmwerte --> Elektronik */
/* -----Ende der Eingabe----- */

load("draw")$

/* wenn w_x = 5 + n*4, für n ein N_0, dann muss um die y-Achse gespiegelt werden, damit man links oben starten kann */
/* d.h. x -> -x */

if mod(w_x-5,4)=0 then x(t):=-A*sin(w_x*t) else(
x(t):=A*sin(w_x*t))$

y(t):=B*sin(w_y*t)$
v(t):=(sqrt((A^2-x(t)^2)*w_x^2+(B^2-y(t)^2)*w_y^2))$ /* Geschwindigkeit = Dimmwerte */
h(t):=1/(sqrt((A^2-x(t)^2)*w_x^2+(B^2-y(t)^2)*w_y^2))$ /* Helligkeit = 1/v(t) */

set_draw_defaults()$
set_draw_defaults(
  xrange=[-A,A],
  yrange=[-B,B],
  dimensions=[835,350],
  axis_3d=false,
  xtics=none,
  ytics=none,
  ztics=none,
  color=white,
  background_color=black,
  nticks=10000,
  line_type=solid,
  line_width=5,
  point_type=7,
  point_size=1,
  /* points_joined=true, */ /* verbindet Punkte durch Linie */
  user_preamble="set xyplane at 0",
  enhanced3d=true,
  colorbox = false,
  contour_levels=10,
  palette = gray,
  contour=surface,
  view=[0, 360]
)$

t1: -%pi*durchlaeufe$
t2: %pi*durchlaeufe$
list:makelist([x(t), y(t), h(t)], t, t1, t2, zeit)$
print("Anzahl der Auswertungen");
n:length(list);
array(lissa, n)$
fillarray(lissa, list)$

listhilfe:makelist([x(t), y(t), h(t)], t, 0, 4*%pi, zeit)$
nhilfe:length(listhilfe)$
array(lissahilfe,nhilfe)$
fillarray(lissahilfe,listhilfe)$

hilfe:0$
for i:0 thru nhilfe step 1
while not(lissahilfe[i][1]>-A and lissahilfe[i][1]<-A+aufx and lissahilfe[i][2]<B and lissahilfe[i][2]>B-aufy) do(
hilfe:i+1
);

hilfe2:hilfe$
for i:hilfe+1 thru nhilfe step 1
while lissahilfe[i][1]>lissahilfe[i+1][1] do(
hilfe2:i+1
);

for i:0 thru n step 1 do(

```

```

lissa[i][1]:lissahilfe[hilfe2+i][1],
lissa[i][2]:lissahilfe[hilfe2+i][2],
lissa[i][3]:lissahilfe[hilfe2+i][3]
);

/* t-Vektor */
tvek:zeromatrix(n+1,1)$
for i:1 thru n+1 step 1 do(
tvek[i][1]:(hilfe2+i)*zeit
);

/* -----suche Zeilensprünge----- */
nlast:n$
hellneu:zeromatrix(nlast-1,4)$
for i:1 thru nlast-1 step 1 do(
hellneu[i][1]:tvek[i][1], /* t */
hellneu[i][2]:lissa[i-1][1], /* x */
hellneu[i][3]:lissa[i-1][2], /* y */
hellneu[i][4]:lissa[i-1][3] /* h */
);

/* Suche Zeilensprünge --> genau dort wo (h[i]<h[i-1] und h[i]<h[i+1]) oder (h[i]>h[i-1] und h[i]>h[i+1]) */
/* bei der Hälfte Zeilensprung --> vorwärts und dann rückwärts! */
/* bei 1. und letzten Eintrag auch! */

nvor:floor((nlast-1)/2)$
nrueck:nlast-1-nvor$
hellvor:zeromatrix(nvor,4)$
for i:1 thru nvor step 1 do(
hellvor[i][1]:hellneu[i][1],
hellvor[i][2]:hellneu[i][2],
hellvor[i][3]:hellneu[i][3],
hellvor[i][4]:hellneu[i][4]
);

hellrueck:zeromatrix(nrueck,4)$
for i:1 thru nrueck step 1 do(
hellrueck[i][1]:hellneu[nvor+i][1],
hellrueck[i][2]:hellneu[nvor+i][2],
hellrueck[i][3]:hellneu[nvor+i][3],
hellrueck[i][4]:hellneu[nvor+i][4]
);

zeilenvor:zeromatrix(w_x+1,1)$
zeilenrueck:zeromatrix(w_x+1,1)$
zeilenvor[1][1]:1$
zeilenvor[w_x+1][1]:floor((nlast-1)/2)$
zeilenrueck[1][1]:1$
zeilenrueck[w_x+1][1]:floor((nlast-1)/2)$
lauf1:1$
lauf2:1$
for i:1 thru w_x-1 step 1 do(
for j:zeilenvor[i][1]+10 step 1 while not((hellvor[j-1][2]<hellvor[j][2] and hellvor[j+1][2]<hellvor[j][2]) or (hellvor[j-1][2]>hellvor[j][2] and hellvor[j+1][2]>hellvor[j][2])) do(
lauf1:lauf1+1
),
lauf1:lauf1+10,
zeilenvor[i+1][1]:lauf1
);
for i:1 thru w_x-1 step 1 do(
for j:zeilenrueck[i][1]+10 step 1 while not((hellrueck[j-1][2]<hellrueck[j][2] and hellrueck[j+1][2]<hellrueck[j][2]) or (hellrueck[j-1][2]>hellrueck[j][2] and hellrueck[j+1][2]>hellrueck[j][2])) do(
lauf2:lauf2+1
),
lauf2:lauf2+10,
zeilenrueck[i+1][1]:lauf2
);

/* -----Intensitätswerte vorwärts----- */
lissavorw:zeromatrix(nvor,4)$
for i:1 thru nvor step 1 do(
lissavorw[i][1]:hellvor[i][1],

```

```

lissavorw[i][2]:hellvor[i][2],
lissavorw[i][3]:hellvor[i][3],
lissavorw[i][4]:hellvor[i][4]
);

/* jede Zeile gleiche y-Werte */
/* verschiedenen y-Werte */
ywertedisk:zeromatrix(w_x,1)$
for i:1 thru w_x step 1 do(
ywertedisk[i][1]:B-(i-0.5)*2*B/w_x
);

/* Berücksichtigung des Zeilenabstandes */
abstand:zeromatrix(w_x-1,1)$
for i:1 thru w_x-1 step 1 do(
abstand[i][1]:abs((lissavorw[floor((zeilenvor[i][1]+zeilenvor[i+1][1])/2)][3])-(lissavorw[floor((zeilenvor[i+1][1]+zeilenvor[i+2][1])/2)
][3]))
);

lissavorw2:zeromatrix(nvor,4)$
for i:1 thru nvor step 1 do(
lissavorw2[i][1]:hellvor[i][1], /* t */
lissavorw2[i][2]:hellvor[i][2] /* x */
);
for i:1 thru w_x step 1 do(
for j:zeilenvor[i][1] thru zeilenvor[i+1][1] step 1 do(
lissavorw2[j][3]:ywertedisk[i][1] /* y -> pro Zeile gleich! */
);
);
for j:zeilenvor[1][1] thru zeilenvor[2][1] step 1 do(
lissavorw2[j][4]:hellvor[j][4]/abstand[1][1]
);
for j:zeilenvor[w_x][1] thru zeilenvor[w_x+1][1] step 1 do(
lissavorw2[j][4]:hellvor[j][4]/abstand[w_x-1][1]
);
for i:2 thru w_x-1 step 1 do(
for j:zeilenvor[i][1] thru zeilenvor[i+1][1] step 1 do(
lissavorw2[j][4]:hellvor[j][4]/((abstand[i-1][1]+abstand[i][1])/2)
);
);

/* feste x-Koordinaten */
/* x-Richtung: xrichtung Anzahl an Punkten, y-Richtung: w_x Anzahl an Zeilen*/
lissaerstedisk:zeromatrix(xrichtung*w_x,4)$
for i:1 thru w_x step 1 do(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
lissaerstedisk[(i-1)*xrichtung+j][2]:-10+(j-0.5)*aufx,
lissaerstedisk[(i-1)*xrichtung+j][3]:ywertedisk[i][1]
)
);

for i:1 thru w_x step 1 do(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
for k:1 thru nvor step 1 do(
if lissavorw2[k][2]>=-10+(j-1)*aufx and lissavorw2[k][2]<=-10+j*aufx and lissavorw2[k][3]=ywertedisk[i][1] then(
lissaerstedisk[(i-1)*xrichtung+j][4]:lissaerstedisk[(i-1)*xrichtung+j][4]+lissavorw2[k][4],
lissaerstedisk[(i-1)*xrichtung+j][1]:lissavorw2[k][1]
)
)
);

/* Helligkeitskompensation in x-Richtung: */
/* Dimmwerte = (1/h)*(1/wurzel(A^2-x^2)) */

dimmwertematrix1:zeromatrix(xrichtung*w_x,4)$
for i:1 thru xrichtung*w_x step 1 do(
dimmwertematrix1[i][1]:lissaerstedisk[i][1],
dimmwertematrix1[i][2]:lissaerstedisk[i][2],
dimmwertematrix1[i][3]:lissaerstedisk[i][3],
if lissaerstedisk[i][4]=0 then dimmwertematrix1[i][4]:0 else
dimmwertematrix1[i][4]:(1/lissaerstedisk[i][4])*(1/(A^2-(lissaerstedisk[i][2])^2)^(1/2))
);

```

```

/* Intensitätswerte */
intwertematrixout1:zeromatrix(w_x,xrichtung)$
for i:1 thru w_x step 1 do(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
intwertematrixout1[i][j]:dimmwertematrix1[(i-1)*xrichtung+j][4]
)
);

intensitaetmatrixneu:zeromatrix(w_x,xrichtung)$
intensitaetmatrixneu:intwertematrixout1$

/* Matrix gleichhell vorwärts */
stringout("Matrix_gleichhell_vorwaerts",float(intensitaetmatrixneu));

```

(09) 2D: Ausgabe für Elektronik: bestimmte Helligkeitsverteilung

```

/* -----Ausgabe für Elektronik: bestimmte Helligkeitsverteilung----- */
/* -----aufbauend auf Anhang (08)----- */

/* Helligkeitsverteilung einlesen */
/* Bild muss 80x24 Pixel haben!!! */
daten:read_nested_list(file_search("Audi_Schriftzug_120x100.txt"))$
listtomat(daten):=block([i,M],M:matrix(),for i:1 thru length(daten) do M:adrow(M,daten[i]),return(M))$
bild:listtomat(daten)$

/* -----Dimmwerte vorwärts----- */
load(matrixgleichhell_vor)$ /* man erhält intwertematrixout1 --> Matrix gleich hell vorwärts */

/* Dimmwerte mit der gewünschten Helligkeitsverteilung multiplizieren */
/* Matrix der Helligkeitsverteilung */
hellverteilung:zeromatrix(w_x,xrichtung)$
for i:1 thru w_x step 1 do(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
hellverteilung[i][j]:bild[i][j]
)
)$

intmatrixneu:zeromatrix(w_x,xrichtung)$
for i:1 thru w_x step 1 do(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
intmatrixneu[i][j]:intwertematrixout1[i][j]*hellverteilung[i][j]
)
)$

/* Dimmwerte auf Intervall [0,255] skalieren */
minmax:zeromatrix(w_x*xrichtung,1)$
for i:1 thru w_x step 1 do(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
minmax[(i-1)*xrichtung+j][1]:intmatrixneu[i][j]
)
);

/* suche Maximum */
maxdimm:minmax[1][1]$
for i:1 thru xrichtung*w_x step 1 do(
if minmax[i][1]>maxdimm then maxdimm:minmax[i][1] else maxdimm:maxdimm
);
/* suche Minimum */
mindimm:minmax[1][1]$
for i:1 thru xrichtung*w_x step 1 do(
if minmax[i][1]<=mindimm then mindimm:minmax[i][1] else mindimm:mindimm
);

/* Skalierung: maxdimm=255, mindimm=0 */
/* y=kx+d mit k=255/(maxdimm-mindimm), d=-k*mindimm --> y aus [0,255] */
k:255/(maxdimm-mindimm)$
d:-k*mindimm$

intskaliert1:zeromatrix(w_x,xrichtung)$

```

```

for i:1 thru w_x step 1 do(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
intskaliert1[i][j]:k*intmatrixneu[i][j]+d
)
);

/* Ausgabedatei der Intensitätswerte */
ausgabeint1:zeromatrix(w_x,xrichtung)$
for i:1 thru w_x step 1 do(
if mod(i,2)=1 then(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
ausgabeint1[i][j]:intskaliert1[i][j]
)
) else(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
ausgabeint1[i][j]:intskaliert1[i][xrichtung+1-j]
)
)
);

stringout("Intensitaetswerte_vorwaerts",float(ausgabeint1));

```

(10) 1D: Mehrmaliges Scannen eines Punktes und Dimmwerte

```

/* -----1D-Multi-Laserprojektionssystem----- */

A:6$ /* Amplitude horizontal */
xrichtung:24$ /* Anzahl der Punkte in x-Richtung */
anz:30*xrichtung$ /* Anzahl der Punkte, mit denen gerechnet wird */
a:9.51$ /* Abstand Spiegel Phosphor in x-Richtung */
b:15.2$ /* Abstand Spiegel Phosphor in z-Richtung */
alpha1:-(90-29)*%pi/180$ /* Ausgangsstellung des unteren Spiegels, Winkel zur x-Achse - in rad!!! netagiv */
alpha2:(90-29)*%pi/180$ /* Ausgangsstellung des oberen Spiegels, Winkel zur x-Achse - in rad!!! positiv */
beta1:3.77*%pi/180$ /* Ausgangswinkel des 1. Strahls für unteren Spiegel zur x-Achse - in rad!!! */
beta2:0*%pi/180$ /* Ausgangswinkel des 2. Strahls für unteren Spiegel zur x-Achse - in rad!!! */
beta3:-3.77*%pi/180$ /* Ausgangswinkel des 3. Strahls für unteren Spiegel zur x-Achse - in rad!!! */
beta4:3.77*%pi/180$ /* Ausgangswinkel des 4. Strahls für oberen Spiegel zur x-Achse - in rad!!! */
beta5:0*%pi/180$ /* Ausgangswinkel des 5. Strahls für oberen Spiegel zur x-Achse - in rad!!! */
beta6:-3.77*%pi/180$ /* Ausgangswinkel des 6. Strahls für oberen Spiegel zur x-Achse - in rad!!! */
laengephosphor:2*A$ /* Länge des Phosphors in x-Richtung */
breitephosphor:6$ /* Breite des Phosphors in y-Richtung */

x(t):=A*sin(w_x*t)$
v(t):=sqrt(A^2-x(t)^2)$ /* Geschwindigkeit = Dimmwerte */
h(t):=1/sqrt(A^2-x(t)^2)$ /* Helligkeit = 1/v(t) */

/* -----Schwingung des Spiegels----- */
/* delta=delta(t) aus [-10°,10°] */

ndelta:21$

deltagrad:zeromatrix(ndelta,1)$
for i:1 thru ndelta step 1 do(
deltagrad[i][1]:-11+i
);

deltarad:zeromatrix(ndelta,1)$
for i:1 thru ndelta step 1 do(
deltarad[i][1]:deltagrad[i][1]*%pi/180
);

/* -----Berechnung der Schnittkurven----- */

/* Spiegel 1 */
xyban1:zeromatrix(ndelta,2)$

for i:1 thru ndelta step 1 do(
xyban1[i][1]:a*tan(2*deltarad[i][1]),
xyban1[i][2]:a/cos(2*deltarad[i][1])*tan(2*alpha1-beta1)-b
);

```



```

/* Approximiere Kurven durch  $y = c1*x^2 + c2*x + c3$  */
load(lsquares)$

c:zeromatrix(3,6)$ /* Zeilen: c1, c2, c3 und Spalten: Strahl 1 - 6 */

cwerte1:lsquares_estimates(xyban1,[x,y],y=c11*x^2+c12*x+c13,[c11,c12,c13])$

for i:1 thru 3 step 1 do(
c[i][1]:rhs(cwerte1[1][i])
);

/* Kurven der Laserstrahlen */
laser1(x):=c[1][1]*x^2 + c[2][1]*x + c[3][1]$

/* -----Helligkeitswerte----- */

/*  $v(x) = \sqrt{A^2-x^2}$ ,  $h = 1/v$  */
/* mit anz an Punkten wird gerechnet, plus Schnittpunkte */

/* x-Werte */
/* t von  $-\pi/2$  bis  $3\pi/2$  */
t:zeromatrix(anz-1,1)$
t[1][1]:-%pi/2+%pi/anz$
for i:2 thru anz-1 step 1 do(
t[i][1]:t[i-1][1]+%pi/anz
);

xwerte:zeromatrix(anz-1,1)$
for i:1 thru anz-1 step 1 do(
xwerte[i][1]:x(t[i][1])
)$

/* 1. Spalte x-Wert, 2. y-Wert, 3. Helligkeit */
hellstrahl1:zeromatrix(anz-1,3)$

for i:1 thru anz-1 step 1 do(
hellstrahl1[i][1]:xwerte[i][1],
hellstrahl1[i][2]:laser1(xwerte[i][1]),
hellstrahl1[i][3]:1/sqrt(A^2-xwerte[i][1]^2)
);

/* in x-Richtung 24 Werte --> addieren, wenn mehrere in einem "Rechteck" */
/* Zeilen: 6 Strahlen, Spalten: Helligkeitswerte */

gitterx:zeromatrix(xrichtung+1,1)$
for i:1 thru xrichtung+1 step 1 do(
gitterx[i][1]:-laengephosphor/2+(i-1)*laengephosphor/xrichtung
);

helligkeit1:zeromatrix(2,xrichtung)$ /* 1. Spalte für h, zweite für y-Wert */

for i:1 thru xrichtung step 1 do(
for j:1 thru anz-1 step 1 do(
if hellstrahl1[j][1]>=gitterx[i][1] and hellstrahl1[j][1]<=gitterx[i+1][1] and hellstrahl1[j][1]#0 and hellstrahl1[j][2]#0 and
hellstrahl1[j][3]#0 then(
helligkeit1[1][i]:helligkeit1[1][i]+hellstrahl1[j][3],
helligkeit1[2][i]:hellstrahl1[j][2]
)
)
);

dimmwerte1:zeromatrix(2,xrichtung)$

for i:1 thru xrichtung step 1 do(
dimmwerte1[1][i]:(1/helligkeit1[1][i]),
dimmwerte1[2][i]:helligkeit1[2][i]
);

/* helligkeit1-6 in Matrizen schreiben --> also x-y-Koordinaten! */
hellmatrix1:zeromatrix(bildy,xrichtung)$

```

```

gittery:zeromatrix(bildy+1,1)$
for i:1 thru bildy+1 step 1 do(
gittery[i][1]:-breitephosphor/2+(i-1)*breitephosphor/bildy
);

for i:1 thru xrichtung step 1 do(
for j:1 thru bildy step 1 do(
  if dimmwerte1[2][i]>gittery[j][1] and dimmwerte1[2][i]<gittery[j+1][1] then(
hellmatrix1[j][i]:dimmwerte1[i][i]
)
)
);

/* Berechnung der Schnittpunkte der Bananen */
/* 1., 2. und 3. Strahl je mit 4., 5. und 6. */
/* wenn Schnittpunkt --> halben Mittelwert der Dimmwerte durch 2 */

hellmatrix1schnitt:hellmatrix1$
hellmatrix4schnitt:hellmatrix4$

/* Strahl 1 mit 4 */
for i:1 thru xrichtung step 1 do(
for j:1 thru bildy step 1 do(
  if hellmatrix1[j][i]#0 and hellmatrix4[j][i]#0 then(
hellmatrix1schnitt[j][i]:(hellmatrix1[j][i]+hellmatrix4[j][i])/2,
hellmatrix4schnitt[j][i]:(hellmatrix1[j][i]+hellmatrix4[j][i])/2
)
)
);

/* hellmatrix1schnitt enthält die Dimmwerte! */

```

(11) 1D: Bestimmte Helligkeitsverteilung einlesen und Ausgabe der Intensitätswerte

```

/* -----aufbauend auf Anhang (10)----- */
/* ----- Einlesen einer bestimmten Helligkeitsverteilung und Dimmwerte----- */

/* Soll gleiche Helligkeit oder eine bestimmte Helligkeitsverteilung erzielt werden? */
gleichhell:i$ /* 1 ja, 0 nein */
einlesen:0$

/* falls einlesen=1, dann soll die Helligkeitsverteilung eingelesen werden */
/* Bild muss 24x24 Pixel haben!!! */
if einlesen=1 then(
daten:read_nested_list(file_search("testbildmatrix.txt")),
listtomat(daten):=block([i,M],M:matrix(),for i:1 thru length(daten) do M:adrow(M,daten[i]),return(M)),
bild:listtomat(daten)
)$

/* falls einlesen=1, dann werden die Dimmwerte mit der gewünschten Helligkeitsverteilung multipliziert */
/* Matrix der Helligkeitsverteilung */
if einlesen=1 then(
hellverteilung:zeromatrix(xrichtung,xrichtung),
for i:1 thru bildy step 1 do(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
hellverteilung[i][j]:bild[i][j]
)
)
);

dimmmatrixneu1:zeromatrix(bildy,xrichtung)$
if einlesen=1 then(
for i:1 thru bildy step 1 do(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
dimmmatrixneu1[i][j]:hellmatrix1schnitt[i][j]*hellverteilung[i][j]
)
)
)

```

```

) else(
for i:1 thru bildy step 1 do(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
dimmmatrixneu1[i][j]:hellmatrix1schnitt[i][j]
)
)
);

/* Matrix mit Intensitätswerten */
neueint:zeromatrix(6,xrichtung)$
/* Zeilen: Dimmwerte der 6 Strahlen */

for i:1 thru xrichtung step 1 do(
for j:1 thru bildy step 1 do(
if dimmmatrixneu1[j][i]#0 then neueint[1][i]:dimmmatrixneu1[j][i]
)
);

/* Ausgabe der Dimmwerte */
/* vorwärts */
stringout("01Intensitaetswerte_vorwaerts",float(neueint));
/* rückwärts -> wie vorwärts nur umgedreht */
intrueck:zeromatrix(6,xrichtung)$
for i:1 thru 6 step 1 do(
for j:1 thru xrichtung step 1 do(
intrueck[i][j]:neueint[i][xrichtung+1-j]
)
);
stringout("02Intensitaetswerte_ruckwaerts",float(intrueck));

```