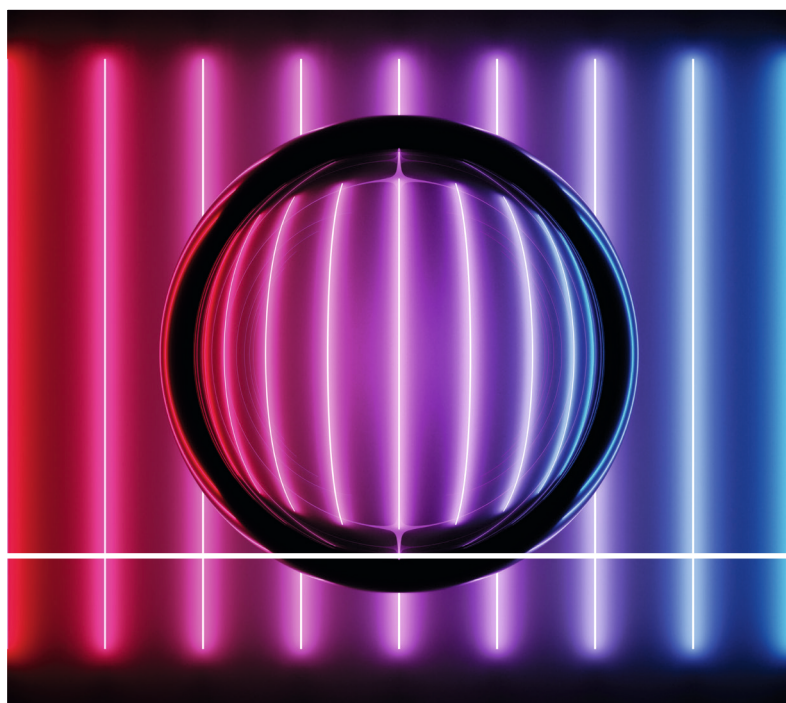


Julia Unterhinninghofen



Moderne Beleuchtungs- optik in der Praxis

Konzepte, Auslegung, Simulation,
Fertigung mit Freiformoptiken



HANSER

Unterhinninghofen
Moderne Beleuchtungsoptik in der Praxis



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-fark3-2nib8

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Julia Unterhinninghofen

Moderne Beleuchtungsoptik in der Praxis

Konzepte, Auslegung, Simulation, Fertigung mit Freiformoptiken

HANSER

Die Autorin:

Prof. Dr. Julia Unterhinninghofen, Fachbereich Ingenieurwesen, Hochschule Koblenz



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelbild: © gettyimages.de/Jorg Greuel

Satz: Julia Unterhinninghofen

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47130-6

E-Book-ISBN 978-3-446-47435-2

Vorwort

Jahrtausendlang hat die Menschheit mit einer künstlichen Lichtquelle gelebt und gearbeitet: mit dem Feuer. Ob als Feuerstelle, Fackel oder Kienspan, dies war in vorgeschichtlicher Zeit die einzige Lichtquelle abgesehen vom Tageslicht. Mit den Hochkulturen in Mittelamerika, in Asien, Ägypten und im Mittelmeerraum entstanden *Öllampen* mit Docht, die Verbrennung eines Fettes oder Öls nutzen und die zwar lichtschwache, aber für viele Tätigkeiten ausreichende Beleuchtung erlauben. *Kerzen*, die Bienenwachs verbrennen, waren selten und teuer – noch heute nimmt in der christlichen Osterliturgie die Osterkerze eine besondere Rolle ein. Erst die Erfindung der Petroleumlampe mit Lampenzylinder im 19. Jahrhundert machte rußärmere und lichtstärkere Lichtquellen verfügbar, die zudem gegen Umwelteinflüsse wie Wind und Regen besser geschützt werden konnten. Noch heute werden sie an Orten ohne verfügbare Elektrizität eingesetzt; in Westdeutschland wurden sie bis in die 1970er-Jahre als Signalleuchte an Baustellen zur Verkehrssicherung verwendet, in Ostdeutschland bis in die 1980er-Jahre auch als Signalleuchten im Bahnverkehr.

Die Erzeugung und Nutzung des *elektrischen Stroms* im 19. Jahrhundert führte zu neuen Möglichkeiten in der Beleuchtungstechnik. Zum einen wurden ab 1801 (Humphrey DAVY und andere) Experimente mit Lichtbogenentladungen durchgeführt, die zur *Kohlebogenlampe* und damit den Vorläufern der modernen Gasentladungslampen wie Leuchtstoffröhren und „Energiesparlampen“ führten. Zum anderen entstanden ab 1854 (Heinrich GOEBEL, Thomas Alva EDISON) *Glühlampen*, in denen ein Draht oder Faden durch elektrischen Strom zum Glühen gebracht wird. Die Möglichkeit der Übertragung von elektrischer Energie über große Entfernungen (Werner VON SIEMENS in den 1860er-Jahren) führte zu ersten *Stromnetzen* und der Möglichkeit der Beleuchtung von Straßen und Gebäuden, wie beispielsweise von EDISON für die Pariser Weltausstellung 1889 durchgeführt. Die Entwick-

lung effizienterer Leuchten im 20. Jahrhundert und der wachsende Zugang zu Elektrizität führte zur breiten Verfügbarkeit von *tagheller*, künstlicher Beleuchtung – zu ersten Mal war die Menschheit nicht mehr nur auf das Tageslicht beschränkt, sondern kann unabhängig vom vorgegebenen Tag-Nacht-Rhythmus leben und arbeiten.

Das hat, wie seit Ende des 20. und Anfang des 21. Jahrhunderts klar wird, nicht nur Vorteile. Die zunehmende Energienutzung (auch für Beleuchtung) hat als Mitursache des Klimawandels tiefgreifende Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Weniger drastisch, aber auch merklich sind die Auswirkungen des künstliche Lichts im Außenraum auf die Tierwelt („Lichtverschmutzung“): das zusätzliche Licht stört Mechanismen, die sich über Jahrtausende entwickelt haben, wie den Insektenflug und die nächtliche Orientierung. Und auch auf den Menschen wirkt es sich aus, durch künstliche Beleuchtung „die Nacht zum Tage“ zu machen: der natürliche Tag-Nacht-Rhythmus wird gestört, Schlafprobleme und daraus folgend gesundheitliche Probleme sind die Folge.

Die Licht- und Beleuchtungstechnik muss sich diesen Herausforderungen stellen und hat Antworten auf sie. Die Entwicklung hocheffizienter Lichtquellen (weiße LEDs ab 2003) und intelligenter Möglichkeiten der Steuerung (ab ca. 2010) hilft, den Energiebedarf für Beleuchtung zu senken und trotzdem allen Menschen künstliches Licht zugänglich zu machen. Die Möglichkeit einer effizienten *Lichtlenkung* mit passend ausgelegten Optiken (Freiformoptiken ab ca. 2000) reduziert die Lichtverschmutzung; das Licht ist nur dort verfügbar, wo es benötigt wird. Und die Verwendung von Lichtquellen mit Möglichkeiten zur tageszeitabhängigen Änderung von Lichtfarbe und Helligkeitsniveau („Human Centric Lighting“) ermöglicht die Arbeit mit künstlicher Beleuchtung ohne starke Störungen des menschlichen Organismus.

Dabei ist klar, dass die Anwendungen breit gefächert sind: mit der Ausleuchtung von Innenräumen muss man sich ebenso auseinander setzen wie mit der von Straßen und Plätzen; Signalleuchten an Fahrzeugen und zur Sicherung des Straßen-, Schiffs- und Luftverkehrs gehören dazu wie die künstlerische Gestaltung von Gebäudefassaden. Immer befindet man sich dabei in einem Spannungsfeld zwischen physikalischen Größen, die berechnet, simuliert und gemessen werden können, und der biologischen und psychologischen Wirkung des Lichts. Dieser Gegensatz macht eine großen Reiz des Beleuchtungstechnik aus: es ergibt sich eine große Vielfalt nicht nur der Anwendungen, sondern auch der Problemstellungen und Spezifikationen zwischen exakter Erfüllung einer Norm und dem Finden der passenden, harmonischen wirkenden Lichtgestaltung. An der Planung und Auslegung einer Beleuchtungsanlage, ob zur Ausleuchtung eines Kameramessfelds oder

bei der Sanierung der Straßenbeleuchtung eines Stadtviertels, sind eine Vielzahl von Disziplinen beteiligt – allein aus dem technischen Bereich seien hier die Elektrotechnik, thermische Simulation, die mechanische Konstruktion und Fertigung neben der eigentlichen Optikentwicklung (Berechnung, Simulation und Fertigung von Elementen wie Reflektoren und Linsen) genannt. Sie alle müssen sich miteinander und oft auch mit nichttechnischen Beteiligten wie Endkunden oder einer Ortsverwaltung verständigen und benötigen dazu lichttechnisches Grundwissen: über sinnvolle Größen und Einheiten zur Beschreibung einer Anlage ebenso wie über die Eigenschaften von Lichtquellen und die Möglichkeiten und Grenzen der Lichtlenkung.

Eine solche Einführung in die Licht- und Beleuchtungstechnik, mit dem Schwerpunkt auf modernen Lichtquellen wie LEDs und Lasern sowie aktuellen Methoden der Auslegung von lichtlenkenden Systemen, möchte dieses Buch geben. Dabei kann aufgrund der großen Vielfalt der Einsatzgebiete nur schlaglichtartig auf einige Anwendungen, Auslegungsverfahren und Fertigungsmethoden eingegangen werden. Der *Prozess* der Optikentwicklung für Beleuchtungssysteme kann aber mit seinen wichtigsten Schritten durchaus allgemein beschrieben werden und soll ebenfalls ein Thema sein.

Mit Dr. Angelika Hofmann, Simon Junginger und Dr. Andreas Timinger über den Optikdesignprozess in der Beleuchtungstechnik, über Fertigungsprobleme und über die Toleranzierung zu diskutieren ist ein andauernder Prozess. Ihnen verdanke ich ebenso viele Erkenntnisse wie den Diskussionen auf den Jahrestagungen der deutschen Gesellschaft für angewandte Optik. Prof. Dr. Martina Hentschel und Prof Dr. Jan Wiersig haben in einer Vielzahl von Gesprächen mein Verständnis für chaotische Dynamik geprägt – ein Gebiet, das hier ganz praxisnah für Lichtmischung zum Einsatz kommt. Meine Studierenden in den Lichttechnik-Vorlesungen der Hochschule Koblenz haben durch eine Vielzahl von Fragen, Rückmeldungen aus der Berufspraxis und Verbesserungsvorschlägen dieses Buch mitgestaltet. Ich danke ihnen allen herzlich. Und meine Familie hat den Zeitaufwand, den die Erstellung mit sich brachte, immer mitgetragen: Stefan, Elisabeth, Martin, vielen Dank auch euch!

Juni 2022
Julia Unterhinninghofen



Inhalt

1	Lichttechnische Grundlagen	1
1.1	Lichttechnische Größen und Einheiten	2
1.1.1	Lichtstrom	3
1.1.2	Beleuchtungsstärke	4
1.1.3	Lichtstärke	5
1.1.4	Leuchtdichte	7
1.1.5	Übersicht	8
1.2	Licht und Farbe	9
1.2.1	Lichtwahrnehmung	9
1.2.2	Farbwahrnehmung	11
2	Lichterzeugung	17
2.1	Temperaturstrahler	17
2.2	Gasentladungslampen	19
2.3	LEDs und Laser	23
2.3.1	Leuchtdioden (LEDs)	23
2.3.2	Organische Leuchtdioden (OLEDs)	28
2.3.3	Laser als Lichtquellen	29
3	Lichtlenkung	33
3.1	Lichttechnische Erhaltungsgrößen	33
3.1.1	Lichtstrom	34

3.1.2	Leuchtdichte.....	34
3.1.3	Étendue.....	35
3.1.4	Lichttechnische Analyse einer Problemstellung.....	37
3.2	Reflektoren.....	38
3.2.1	Reflektorgrundformen	39
3.2.2	Freiformspiegel.....	42
3.3	Linsen	44
3.3.1	Sphärische Linsen	46
3.3.2	Asphärische Linsen	47
3.3.3	Freiformlinsen.....	48
3.4	Streuung.....	49
3.4.1	Oberflächenstreuung.....	49
3.4.2	Volumenstreuung.....	51
3.5	Lichtleiter	52
3.5.1	Totalreflexion	52
3.5.2	Lichtleiter und Lichtstäbe	53
4	Beleuchtungsoptische Anwendungen	59
4.1	Auslegung von Freiformoptiken für komplexe Lichtverteilungen ..	59
4.1.1	Optikdesignprozess.....	59
4.1.2	Erzeugung festgelegter Beleuchtungsstärkeverteilungen ...	62
4.1.2.1	Sensorik und „machine vision“.....	62
4.1.2.2	Straßenbeleuchtung	64
4.1.2.3	Akzentleuchten	67
4.1.3	Erzeugung festgelegter Lichtstärkeverteilungen	68
4.2	Lichtmischung mit Lichtstäben und Freiformoptiken	72
4.2.1	Mischung mit Mikrolinsenarrays	72
4.2.2	Mischung mit Lichtstäben.....	73
4.2.2.1	Aufbau und Gütekriterien	73
4.2.2.2	Strahlendynamik und Mischung im Phasenraum ..	75
4.2.3	Hinterleuchtete Displays	80