

Von der LED in den Lichtleiter

Robert Klug, Volker Schumacher, Jürgen P. Weißhaar, Weingarten

Superlumineszente LEDs eröffnen neue Möglichkeiten in der Beleuchtung und der optischen Informationsübertragung. Über Lichtleiter lässt sich die Strahlung an die gewünschten Stellen leiten und verteilen. Besondere Aufmerksamkeit erfordert dabei die Einkopplung des Lichts in den Leiter.

In den letzten Jahren ist die Auswahl an LEDs (Licht emittierende Dioden) deutlich gestiegen. LEDs werden typischerweise mit einer Wellenlänge von 470 bis 950 nm, einem Abstrahlwinkel von $\pm 3^\circ$ bis $\pm 60^\circ$ und mit einem typischen Gesamtlichtstrom von etwa einem Lumen in verschiedensten Gehäusebauformen angeboten. Mittlerweile sind Spezial-LEDs mit zehn Lumen Lichtstrom und mehr verfügbar. Für die Auswahl der LED benötigt der Entwickler gute Marktkenntnis, um den richtigen LED-Typ auszuwählen. Dabei sind neben dem technischen Anspruch auch die Verfügbarkeit und die Toleranzbreite der LED wichtige Entscheidungskriterien.

Die Entwicklung leistungsfähiger Optiken für die Einkopplung von LED-Strahlung in Lichtleiter setzt die genaue Kenntnis des optischen Verhaltens der LED voraus. Um mehr Information über das Verhalten der LED zu erhalten, wird diese detailliert untersucht. Diese Daten bilden die Grundlage für die präzise Simulation und Optimierung der optischen Systeme.

Die Strahlung entsteht im aktiven Bereich des Chips in der LED. Der aktive Bereich hat eine typische Fläche von zirka $0,3 \times 0,3 \text{ mm}^2$ und eine Dicke von

einigen μm . Das Substrat der LED kann dieses Licht absorbieren oder transmittieren. Darüber hinaus schattet der Löt-punkt der Anode einen Teil des Lichts ab. Das seitlich abgestrahlte Licht wird zur Erhöhung der Effizienz durch einen den Chip umgebenden Reflektorkelch nach vorne reflektiert.

Allerdings ist diese zusätzliche Effizienz für die Einkopplung der Strahlung in Lichtleiter oftmals nicht von Bedeutung, da durch den Kelch der virtuelle Lichtschwerpunkt vergrößert wird. Dieser vergrößerte virtuelle Lichtschwerpunkt lässt sich oftmals nicht komplett

in einen Lichtleiter einkoppeln. Die optischen Aberrationen der Linse an der LED vergrößern den virtuellen Lichtschwerpunkt noch weiter. Demzufolge muss ein optisches System nicht nur das Licht von der leuchtenden Fläche von $0,3 \times 0,3 \text{ mm}^2$ transformieren, sondern den virtuellen Lichtschwerpunkt mit einem typischen Durchmesser von etwa 2 mm. Der virtuelle Lichtschwerpunkt liegt axial meistens zirka 1 mm vom Chip entfernt.

Simulation erfordert digitale LED-Modelle

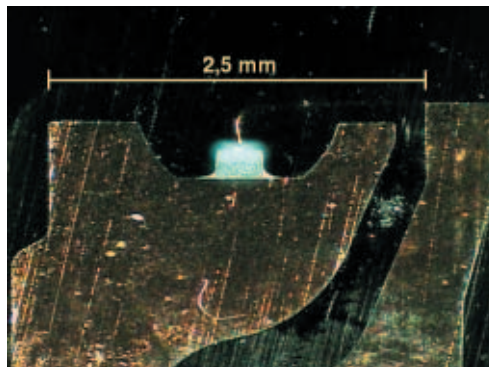


Bild 1. Schliffe der LEDs ermöglichen die Herstellung von Analysemodellen, hier eine infrarote LED mit Kelch und strahlendem Chip

Bei der Entwicklung und Optimierung von optischen Systemen arbeitet man heute oftmals mit Simulationsprogrammen. Werden in den optischen Systemen LEDs als Lichtquellen eingesetzt, befinden sich diese oft im so genannten Nahfeld zum optischen System. Die radiometrische Fernfeldbeschreibung der LED, meist im Standarddatenblatt zu finden, ist dann nicht mehr ausreichend. Dies ist zum Beispiel bei der Einkopplung in Lichtleiter der Fall, was die Verwendung eines ge-

nauen LED-Modells für die Simulation unerlässlich macht.

Zur Erzeugung eines genauen LED-Modells werden die LEDs auf verschiedene Analyseebenen abgeschliffen und, zum Teil in leuchtendem Zustand, mit einem Video-Mikroskop vermessen (Bild 1). Anhand der gemessenen geometrischen und radiometrischen Größen lässt sich ein Lichtquellenmodell im Optik-Simulationsprogramm erstellen. Die Verifikation des Lichtquellenmodells erfolgt durch den Vergleich der simulierten Abstrahlcharakteristik und der Nahfeldverteilung mit den gemessenen Werten. Das genaue Modell ermöglicht dann, den virtuellen Licht- oder Strahlungsschwerpunkt der LED zu ermitteln und ein optisches System optimal für die weitere Transformation der LED-Strahlung zu entwickeln.

Neben dem großen virtuellen Lichtschwerpunkt kann die Positionsgenauigkeit des Chips in der LED ein weiteres Problem darstellen. Die Chips werden in der LED mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 0,1$ mm eingebaut. Diese Toleranz kann die gebündelte Abstrahlung der LED um einige Grad ablenken. Das optische System ist darum so auszulegen, dass das System auch mit dieser Genauigkeit zuverlässig funktioniert. Die Draufsicht auf eine SMD-LED verdeutlicht die Positionierung des Chips im LED-Gehäuse (Bild 2).

Einkopplung von LED-Licht in Lichtleiter

Die Einkopplung von LEDs in Lichtleiter ist im Regelfall mit Verlusten verbunden. Der Strahlungsverlust bei der Einkopplung ist abhängig vom Durchmesser und dem Akzeptanzwinkel (numerische Apertur, NA) des Lichtleiters. Ist der Durchmesser des Spots der Strahlung an der Einkopplfläche größer als der Durchmesser des Lichtleiters, oder wird der Lichtleiter unter einem größeren Winkel als der Akzeptanzwinkel des Lichtleiters bestrahlt, geht der entsprechende Anteil der Strahlung verloren.

In einem verlustfreien optischen System bleibt die Leuchtdichte erhalten und kann nicht erhöht werden. Das Produkt von Raumwinkel der Strahlung mit der strahlenden Fläche bleibt konstant. Das bedeutet im Falle der Einkopplung von LED-Strahlung in einen Lichtleiter: Wird der virtuelle Brennpunkt der LED mit einer Zusatzoptik verkleinert auf die

Einkopplfläche abgebildet, vergrößert sich der Einstrahlwinkel, und umgekehrt.

Aus diesem Grund bewirkt eine Verkleinerung des Spots nur dann eine Effizienzsteigerung, wenn der Akzeptanzwinkel des Lichtleiters eingehalten wird. Darum müssen sowohl der Einstrahl-

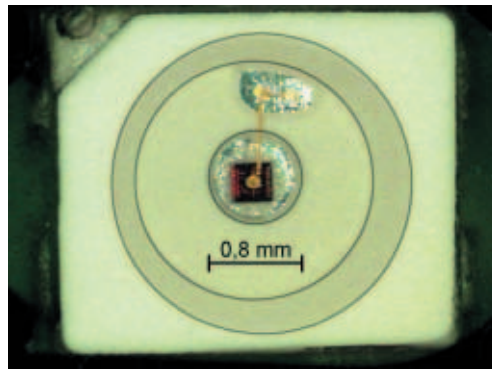


Bild 2. Bei der Entwicklung ist die Positionierungstoleranz des LED-Chips von typisch 0,1 mm zu beachten

winkel als auch die Größe des Lichtflecks optimal an den Lichtleiter angepasst werden. Als Ersatz für den Koppelverlust bekommt man am Faserausgang eine angepasste Lichtverteilung mit höherer Positionsgenauigkeit. Drei reale Beispiele sollen die Einkopplung von LED-Strahlung in Lichtleiter weiter verdeutlichen.

Ein Anwendungsbeispiel ist die Einkopplung und Verteilung von LED-IR-Strahlung mit einem Y-Kunststofflichtleiter. Dieser Lichtleiter dient als Sendeelement für eine Positions-Decodereinheit. Der Lichtleiter wird als Kunststoffspritzgussteil gefertigt. Sowohl die Elemente zur mechanischen Befestigung des Lichtleiters als auch die optischen Elemente zur Einkopplung, Strahlungslenkung und Auskopplung sind direkt in dem Kunststoffteil enthalten.

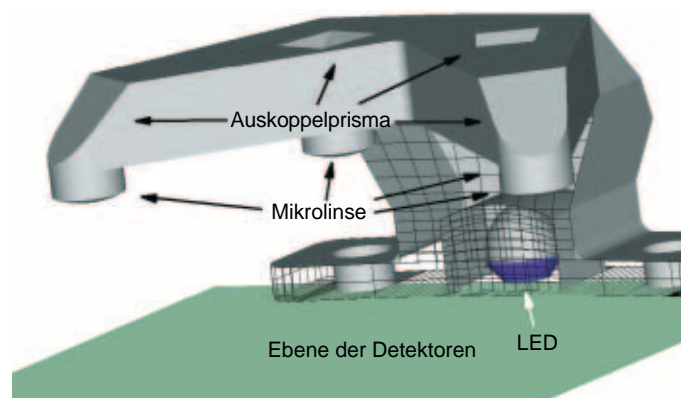


Bild 3. Der Lichtleiter verteilt die Strahlung der LED an vier Stellen

Strahlungsverteilung in LEDs mit Kunststofflichtleiter

Die Einkopplung der LED-Strahlung wird durch eine Einkoppllinse unterstützt, so dass möglichst viel Strahlungsleistung in den Lichtleiter eingekoppelt. Durch die Strahlrichtung der eingekoppelten Strahlen sowie durch die Geometrie des Lichtleiters gelangt die Strahlung in die beiden Arme (Y) des Lichtleiters. Die ersten beiden Auskoppelstellen befinden sich direkt am Beginn der Arme. Die weiteren Auskoppelstellen sind am Ende der Arme angebracht. Die Auskopplung erfolgt durch Totalreflexion an den Auskoppelprismen, welche in die obere Fläche des Lichtleiters eingebracht sind. Die Prismen sind so gestaltet, dass sowohl im vorderen als auch im hinteren Bereich eine identische Strahlungsmenge ausgekoppelt wird. Die Mikrolinsen konzentrieren die ausgekoppelte Strahlung auf eine bestimmte Fläche in der Detektorebene.

Durch diese Art der Strahlungslenkung stehen vier homogene Strahlungspunkte in der Detektorebene zur Verfügung, welche zum Beispiel für die weitere Verarbeitung durch eine Decoderscheibe genutzt werden können. Alle vier Messstrahlbündel werden durch nur eine LED erzeugt. Ein weiterer Vorteil dieses Lichtleiterprinzips liegt darin, dass für die LED und die Detektoren nur eine Platine notwendig ist (Bild 3).

Weitere Lichtleitformen zur Strahlungslenkung sind möglich, zum Beispiel mehrere Lichtarme mit mehreren Auskoppelbereichen pro Arm. Die Länge dieser Lichtleitarme ist nahezu unerheblich, soweit keine Querschnittsverkleinerungen auftreten, da die Absorption

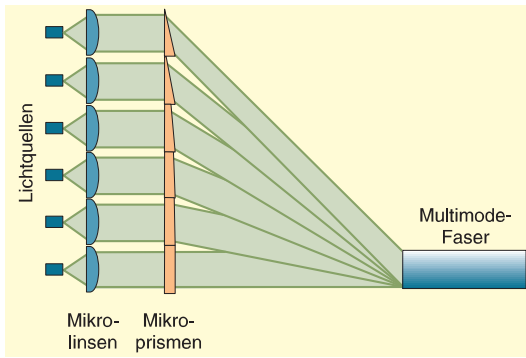


Bild 4. Durch Winkel-Multiplexer sind vier Kanäle in einer Faser übertragbar

im Material relativ gering ist. Mit mehreren Auskopplern ergibt sich eine Matrix aus Quasipunktquellen, welche in der optischen Positionssensorik zum Einsatz kommt. Die Auskopplung aus dem Lichtleiter lässt sich, neben den schon beschriebenen Auskoppelprismen, auch über aufgeprägte Gitter realisieren.

Störstrahlung, welche bei einem solchen Lichtleiter normalerweise auch auftritt, ist schon während der Entwicklung durch gezielte Pfadanalyse erkennbar. Diese Strahlungspfade lassen sich durch geeignete Geometrieänderung abschwächen oder der Nutzstrahlung wieder zuführen. Ein solches optisches Lichtleitersensorsystem bietet klare Vorteile hinsichtlich Zuverlässigkeit, Einbauraum und Kosten.

LED-Einkopplung in Multimode-Faser

In vielen Anwendungsfällen ist es notwendig, die Strahlung einer LED in eine Standard-Multimode-Faser einzukoppeln. Bei dieser Einkopplung ist der Lichtleiter fest vorgegeben und kann nicht an die LED angepasst werden. In diesem Fall muss die Abstrahlung der LED mit einer Sekundäroptik entsprechend transformiert werden, so dass möglichst viel Strahlungsleistung in die Faser eingekoppelt wird. Da der Chip heller und kleiner ist als der virtuelle Brennpunkt der LED, soll vorzugsweise der Chip auf den Faserkern abgebildet werden. Dabei ist ein Kompromiss zwischen dem Vergrößerungsfaktor und der Winkelöffnung der Einstrahlung zu finden, da eine Verkleinerung der Abbildung des Chips die Winkelöffnung vergrößert und damit die NA der Faser überschritten wird.

Der Vorteil einer Multimode-Faser mit einem größeren Kerndurchmesser in Bezug auf die Einkoppeleffizienz wird zum Teil wieder zunichte gemacht, da die Strahlung am Lichtleiterausgang nicht mehr entsprechend punktförmig vorhanden ist. Eine Faser mit einem Kerndurchmesser von 100 µm eignet sich besser als Punktquelle als eine Faser mit einem Kerndurchmesser von 1 mm. Des Weiteren verschlechtert sich durch den vergrößerten Durchmesser

auch die mechanische Flexibilität der Faser.

Die Einkopplulinse zum Einkoppeln der zusammengeführten LED-Strahlung in die Faser hat die gleiche NA wie die Faser. Diese Linse bildet die Chips der LEDs auf die Eintrittsebene der Faser ab. Da die drei verwendeten LEDs unterschiedliche Abstrahlcharakteristiken aufweisen, haben die Kollimatorlinsen vor den LEDs jeweils angepasste Material- und Geometrieigenschaften. Zur Optimierung von Linsen lassen sich in den Optiksimsulationsprogrammen automatische Optimierungsschritte durchführen, welche die Linseneigenschaften an die verwendeten LEDs anpassen.

Im Vergleich zur Faserlänge ist der Kerndurchmesser meistens vernachlässigbar klein. Die Strahlung erhält darum in der Faser so viele Reflexionen, dass die Bestrahlungsstärkeverteilung an der Austrittsfläche der Faser immer homogen ist.

Die theoretische Betrachtung der Ausbreitung von Strahlung in einer Stufenindexfaser ergibt, dass bei Annahme einer perfekten Zylindergeometrie des Faserkerns und einem homogenen Brechungsindex in der Faser der Einkopplwinkel in eine Stufenindex-Multimode-Faser (SMF) erhalten bleibt. Das heißt, wird eine ebene Welle in eine SMF schräg eingekoppelt, erscheint am Faserende ein Lichtkegel mit einem halben Öffnungswinkel, der gleich dem Einkopplungswinkel ist. Dieser Lichtkegel zeichnet sich jedoch nicht als scharfer Kreis auf einem Schirm ab, da Beugung am Faserkern auftritt.

In der Realität wird jedoch durch die nicht idealen Eigenschaften der Faser ein Teil des eingekoppelten Winkelspektrums homogenisiert. Ist eine homogenere Strahlstärkeverteilung am Ausgang notwendig, lässt sich dies durch örtlichen Druck auf die Faser erreichen. Der Druck verursacht Spannungen in der Faser, und dies bewirkt eine Brechungsindexinhomogenität des Fasermaterials, was zur Homogenisierung des Winkelspektrums führt.

Datenübertragung in Multimode-Fasern

Der zuvor beschriebene Effekt der Erhaltung des Einkoppelwinkels lässt sich zur optischen Datenübertragung verwenden. Hierbei können mehrere Datenkanäle in einer Stufenindex-Multimode-faser parallel übertragen werden. Die einzelnen Datenkanäle werden dabei

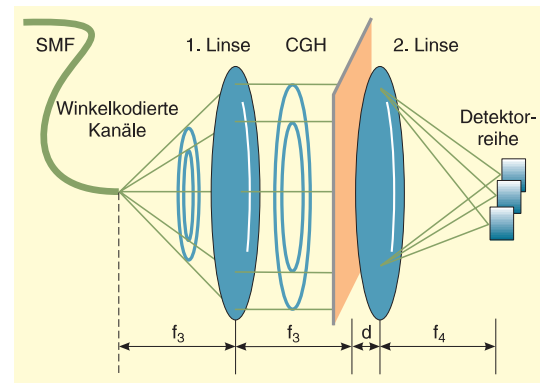


Bild 5. Schematischer Aufbau des Demultiplexers

mit unterschiedlichen Winkeln in die Faser eingekoppelt.

Der schematische Aufbau dieses Winkel-Multiplexers ist in Bild 4 dargestellt. Die Strahlung der Quelle wird mit Mikrolinsen kollimiert, und die kollimierte Strahlung wird mit Mikroprismen in unterschiedlichen Winkeln abgelenkt. Auf diese Weise werden die Datenkanäle mit unterschiedlichen Winkeln in die SMF eingekoppelt. Die Datenkanäle erscheinen am Faserende als Lichtkegel. Die Winkelbreite eines Datenkanals nimmt mit der Länge der Faser zu. Deshalb lassen sich maximal vier Kanäle mit bis zu 100m Faserlänge mit der heutigen Faserqualität übertragen.

Der Demultiplexer bildet die winkelnkodierte Kanäle auf unterschiedliche Orte in der Detektorebene ab. Die erste Linse Fourier-transformiert die Lichtverteilung

des Faserausgangs, so dass man die zu den einzelnen Kanälen gehörenden Lichtringe in der hinteren Brennebene der Linse beobachten kann (Bild 5). Das Licht wird in dieser Ebene abgelenkt und zwar jeder Ring in eine andere Richtung. Somit wird jeder Kanal nach der zweiten Fourier-Transformation mit der zweiten Linse von einem anderen Detektor in der Detektorebene empfangen. Die Ablenkfunktion ist mit einem computergenerierten Hologramm oder mit einer Mikroprismenstruktur realisierbar. Abhängig von der Positionsgenauigkeit und der Größe der Austrittsfenster der Lichtquelle ist die Multiplexer- und Demultiplexereinheit mit einer Toleranzforderung von 5 µm bis auf die Größe einer Mignonzelle miniaturisierbar.

Unter Verwendung von VCSELs (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers) lässt sich die ganze Bandbreite des Übertragungssystems mit Winkelkodierung - 20Gbit/s pro Kanal - nutzen. Als preisgünstigere Alternative für diese Lichtquelle bietet sich die RCLED (Resonant Cavity Light Emitting Diode) an. Die RCLED ist für die Datenübertragung in Kunststofffasern mit dem Kerndurchmesser von 0,5 bis 1 mm optimiert und lässt auch größere Toleranzen zu. Wird

eine RCLED im Winkel-Multiplex verwendet, kann die Übertragung mit einer Bandbreite von bis zu 500Mbit/s pro Kanal erfolgen.

Mit dieser Winkelcodiertechnik sind zum Beispiel vier hoch aufgelöste Videosignale oder vier Kanäle des IEEE-1394b-Standards über bis zu 100m parallel übertragbar. Möglich wäre auch ein optischer Datenbus für Intrachip- oder Platinenverbindungen mit bis zu 16 Datenkanälen zu je 20Gbit/s. Diese Winkelkodierung ist zudem mit anderen Multiplexer-Techniken wie TDM (Time Division Multiplexing) oder WDM (Wave Division Multiplexing) kombinierbar.

Neue Konzepte durch neue LEDs

Die Fortschritte bei den LEDs und Laserdioden sowie neue Arten von Strahlungsquellen wie VCSELs oder RCLEDs lassen eine Vielzahl neuer Optikkonzepte für die Sensortechnik und Datenübertragung erahnen. Immer schnellere Computer ermöglichen die effiziente Optimierung derartiger Systeme. Unverzichtbare Grundlage dafür sind genaue Rechnermodelle der Lichtquellen. Die konkurrenzfähige Entwicklung dieser

Systeme innerhalb immer kürzer werdender Time-to-Market-Perioden ist ohne die Reduzierung der Anzahl von Prototypen durch die Rechnersimulation kaum mehr möglich. Opsira entwickelt innovative optische Lösungen für einen sehr weiten Anwendungsbereich. Nicht selten können Konzepte eines total andersartigen Produkts bei einer Neuentwicklung wieder herangezogen werden. Dies, in Kombination mit der Projektbetreuung optischer Entwicklungen von der Idee bis hin zum Prototypen oder zum Serienteil, bietet die Voraussetzungen zur effizienten Entwicklung neuartiger, konkurrenzfähiger Produkte.

Autoren

Dr. Robert Klug, Jahrgang 1969, studierte technische Physik an der Technischen Universität Budapest und Mikrooptik an der Universität Mannheim. Seit 2000 ist er Projektleiter bei Opsira in Weingarten, Württemberg.

Dipl.-Ing. Volker Schumacher war von 1996 bis 1999 im Steinbeis-Transferzentrum Leuchtenteknik in Weingarten als Projektleiter tätig. Seit 1999 ist er geschäftsführender Gesellschafter bei Opsira.

Dipl.-Ing. Jürgen P. Weißhaar war von 1993 bis 1999 im Steinbeis-Transferzentrum Leuchtenteknik in Weingarten tätig, dessen Leitung er 1998 übernahm. Seit 1999 ist er geschäftsführender Gesellschafter bei Opsira.

It's no trick...

it's a vision system



Intelligente Kameras vom Marktführer

Framegrabber und DSP schon eingebaut - kein PC nötig!

CCD-Sensoren:	von 500 x 580 bis 1280 x 1024 Pixel, S/W, Farbe, Progressive Scan
DSP:	ADSP2181/83/85 TIC62XX
Bild/Datenspeicher:	von 2MB bis 8MB DRAM (TI: 16MB)
Programmspeicher:	von 0,5 bis 2 MB Flash EPROM (TI: 8MB)
Seriell Interface:	RS232 bis 115,2 kBaud
SPS Interface:	4 Eingänge, 4 Ausgänge, 12-24V, optisch getrennt
Größe:	125 x 50 x 35 mm
Preis:	ab 384 EUR (1+)

Über **100 Standard-Softwareprodukte** auf Basis der VC-Serie sind schon erhältlich. Es werden allgemeine Aufgaben aus dem Bereich Industrielle Bildverarbeitung abgedeckt, wie etwa Optische Meßtechnik / Drehlageerkennung / Objekterkennung / Etikettenkontrolle / Montagekontrolle / Sortierung / Lesen von 1D Barcode und 2D Matrix Codes (ECC200), OCR (Schriftlesen) und Mustererkennung.

Es gibt aber auch viele **Sensordösungen** auf Basis der VC-Kameras, wie etwa einen Kugellager-Sensor oder einen Sensor, der die Winkellage eines Nietautomaten in 3D so steuert, daß die Nieten auch bei gekrümmten Oberflächen im richtigen Winkel (nämlich senkrecht) durch die Bleche gehen. Die Kameras sind ideal geeignet für **OEMs** und **VARs**.

Vision Components GmbH
 Ottostrasse 2
 D-76275 Ettlingen
 Tel. +49/(0)7243/2167-0
 Fax +49/(0)7243/2167-11
 www.vision-components.de
 sales@vision-components.de

