

Ein Strahl – Eine Matrix

Diffraktive optische Elemente im industriellen Einsatz

Diffraktive optische Elemente (DOEs) werden genutzt, um mittels Vielstrahlinterferenz an periodischen Strukturen Lichtstrahlen zu formen. Am häufigsten werden sie zur Strahlprofiländerung (Beam Shaping), zur Korrektur von Abbildungsfehlern und zur Strahlteilung (Beam Sampling) eingesetzt. Ihre Vorteile dabei: einfache Handhabung, geringste Justage und geringe Anforderungen an den Eingangsstrahl.

Der diffraktive Effekt wird bei den DOEs durch eine Mikrostruktur erreicht, die in die Substrate geätzt ist. Abhängig von der Mikrostruktur lassen sich die verschiedensten Beugungseffekte erreichen. Dementsprechend werden die DOEs in unterschiedlichsten Bereichen der Lasertechnik, angefangen bei Laboranwendungen über die industrielle Fertigung bis hin zu medizinischen Anwendungen, eingesetzt. Sie werden anstelle konventioneller refraktiver Optiken in den Strahlengang gesetzt, um die Intensitätsverteilung zu modulieren. Im Vergleich zu Masken haben sie den Vorteil, dass der Strahl auf kleinste Durchmesser fokussiert wird, ohne dass Beugungserscheinungen auftreten würden. Weiterhin wird die Strahlenergie des Eingangsstrahls fast vollständig ausgenutzt, sodass die Verluste klein sind. DOEs zeichnen sich durch sehr gute Wirkungsgrade (bis zu 80 – 99 %) und hohe Transmissionsgrade von 95 – 99 % aus.

Strahlteilung

Die Teilung von Laserstrahlen kann über verschiedene Technologien erfolgen. Prismen, Keilplatten und Strahlteilerwürfel sind alt bekannte Möglichkeiten; die Anwendung von diffraktiven Elementen ist innovativ und mit vielen Vorteilen behaftet. Gegenüber den herkömmlichen Methoden benötigen die DOEs einen deutlich geringeren Platzbedarf; vor allem punkten sie in ihrer Genauigkeit und der Möglichkeit, eine vorher definierte, nahezu beliebige Anzahl von Teilstrahlen zu erzeugen. Gegenüber Linsenarrays und holographischen Systemen bestehen die Elemente durch hohe Effizienzen, beste Laserzerstörsschwellen und Flexibilität.

Bei ersten diffraktiven optischen Elementen handelte es sich um eindimensionale Strahlteiler. Diese teilen den einfallenden Strahl an einer Gitterstruktur in Teilstrahlen auf einer Linie auf (siehe Abb. 1). Zweidimensionale Strahlteiler bzw. die Strahlteilung in Matrix-Form wurde zunächst realisiert, indem zwei eindimensionale Elemente hintereinandergeschaltet wurden. Da diese Methode sehr justageaufwändig und gleichsam mit hohen Verlusten behaftet ist, wurden zweidimensionale Designs entwickelt, die höchste Performance garantieren (siehe Abb. 2).

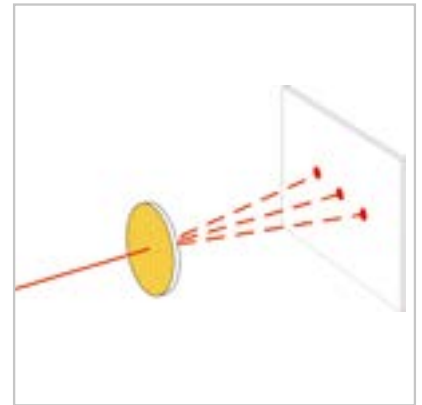


Abb. 1: 1 x 3 Matrix in schematischer Darstellung.
Eine 1 x 3 Matrix erzeugt in der Beobachtungsebene drei Punkte auf einer Linie.

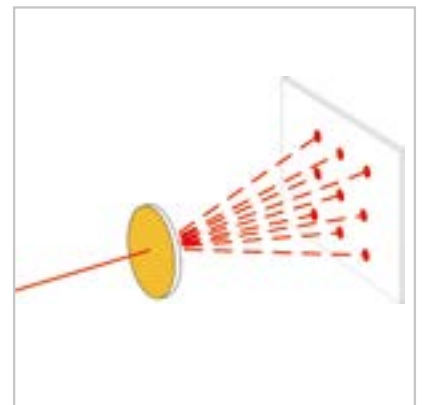


Abb. 2: Zweidimensionale DOEs führen zu einem Punktraster.
In der Abbildung sehen Sie ein 3 x 3 Element welches neun Punkte in der Beobachtungsebene erzeugt.

Aufbau diffraktiver optischer Elemente

Die Strahlteiler besitzen eine periodische Struktur, die den Eingangsstrahl in seine Teilstrahlen aufteilt (siehe Abb. 3). Im Vergleich zum Eingangsstrahl zeichnen sich die Teilstrahlen durch das gleiche Strahlprofil aus. Sie sind standardmäßig so designed, dass alle Teilstrahlen zusätzlich die gleiche Intensität aufweisen und einen gleichen Separationswinkel zueinander besitzen. Änderungen hiervon können in der Regel auf Kundenwunsch realisiert werden.

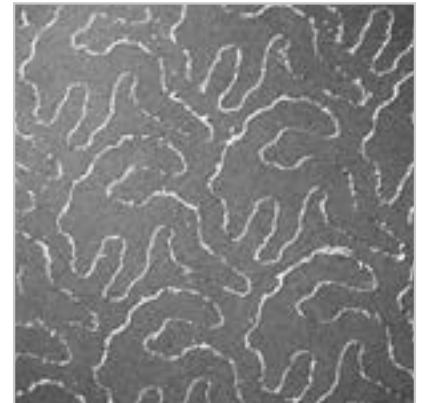


Abb. 3: In der Abbildung sehen Sie die Struktur eines Strahlteiler-Elements in der Vergrößerung 1:400

Einsatz im Strahlengang

Die Strahlteiler können in zwei verschiedenen Methoden Verwendung finden. Als einzelnes Element werden sie einfach in den Strahlengang eingefügt, sodass der Eingangsstrahl mit all seinen Eigenschaften multipliziert wird (vgl. Abb. 4a). Die Intensität aller Teilstrahlen entspricht dabei annähernd der Gesamtintensität des Eingangsstrahls. Häufiger werden die Elemente in Kombination mit einer nachgeschalteten Sammellinse verwendet (vgl. Abb. 4b). Diese wird direkt hinter das Element in den Strahlengang gesetzt. Die Abbildungsqualität der Teilstrahlen entspricht der Qualität des Eingangsstrahls kombiniert mit der Sammellinse. Die Spots können hierdurch beliebig fokussiert werden. Der Abstand zwischen den Spots verändert sich mit der eingesetzten Brennweite.

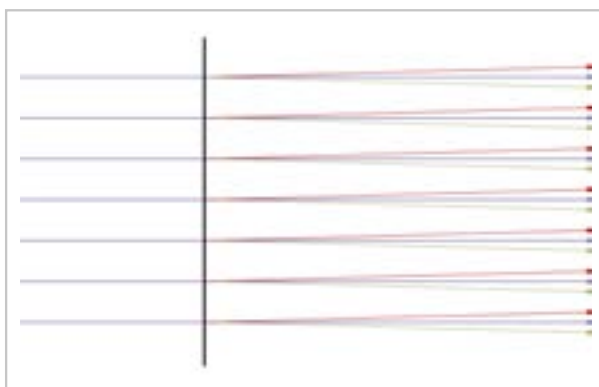


Abb. 4a: Der Strahlengang durch ein 1 x 3 DOE – die Abbildung erfolgt direkt – der Strahldurchmesser entspricht dem des Eingangsstrahls

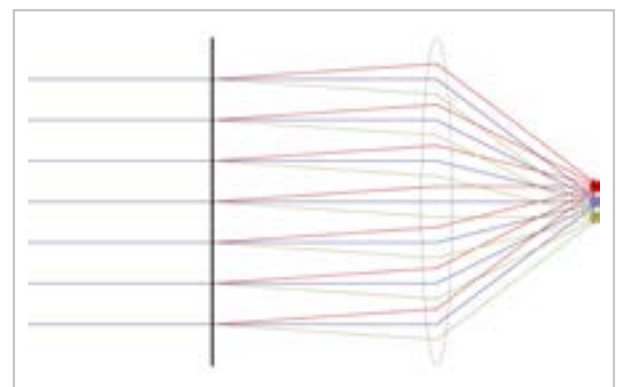


Abb. 4b: Die Sammellinse fokussiert die durch das Element gehenden Strahlenbündel in drei Punkten

Herstellung von High-Power DOEs

Diffraktive optische Elemente bestehen aus einem Glassubstrat, in das mittels eines lithographischen Verfahrens eine Mikrostruktur geätzt wurde. Diese Technologie hinterlässt keinerlei Rückstände auf dem Substrat, sodass das aktive Element „sauber“ bleibt. Nur das ursprüngliche Material (also ZnSe, Quarzglas oder ähnliches) ist neben einer möglichen Beschichtung auf der Linse vorhanden. Im Vergleich zu anderen Verfahren ist damit gewährleistet, dass der Laserstrahl an keinen Polymer-Schichten absorbieren oder aufgrund der hohen Strahltemperatur diese Schicht zerstören könnte. Normalerweise werden die Elemente mit einer High-Power Antireflex-Beschichtung versehen, die auch bei refraktiven Laseroptiken verwendet wird. Das Endprodukt besitzt eine hohe Zerstörschwelle die vergleichbar mit einer beschichteten Linse bzw. mit einem Fenster hoher Qualität ist. In den meisten Laseranwendungen können die diffraktiven Optischen Elemente, die nach diesem Verfahren erstellt wurden, eingesetzt werden.

Herstellungs-Prozess

Mittels einer Maske (Abb. 5/A) wird ein Substrat, auf dem ein Photoresist aufgebracht ist (Abb. 5/B), belichtet. Nach der Entwicklung (Abb. 5/C) kommt es zu einem Materialabtrag mittels eines Trockenätz-Prozesses (Abb. 5/D). Der Fotolack wird danach abgetragen (Abb. 5/E). Übrig bleibt das Substrat, auf dem nun eine Mikrostruktur sichtbar ist. Der Prozess der Belackung mit einem Photoresist, der Belichtung und des Ätzens kann beliebig oft wiederholt werden. Es entstehen immer feinere Strukturen bzw. Stufen (Abb. 6).

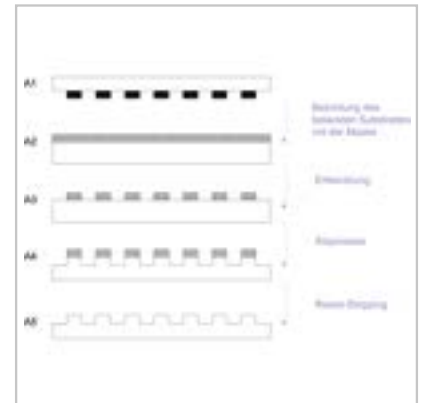


Abb. 5: Die Erstellung eines DOEs erfolgt in den dargestellten Schritten unter Zuhilfenahme einer Maske

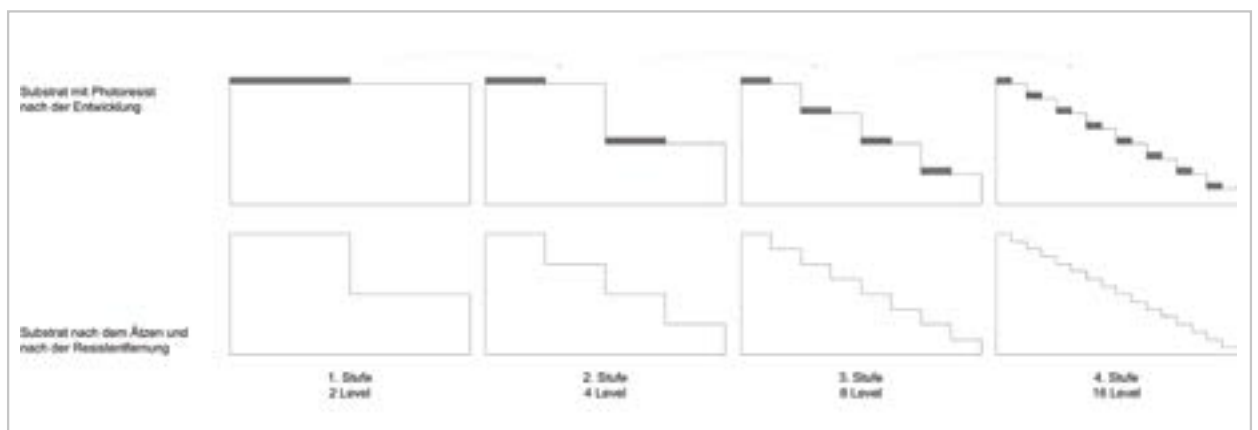


Abb. 6: Werden die Prozessschritte zur Erstellung eines DOEs mehrfach wiederholt, so werden die Stufen, die in das DOE geätzt werden immer kleiner, das Ergebnis damit immer genauer. Das Ergebnis der Stufenverfeinerung sehen Sie deutlich in der Abb. 7.

Design

In der Abbildung 7/A ist ein gewünschtes Design (Querschnitt) einer Maske angegeben. Dieses Design kann mit seinem kontinuierlichen Profil nicht genau nachgestellt werden. Durch eine möglichst hohe Prozess-Wiederholung (Abb. 6) kann jedoch eine gute Näherung erzielt werden (Abb. 7/A, C). Es ist eine stufenförmige Anpassung sichtbar.

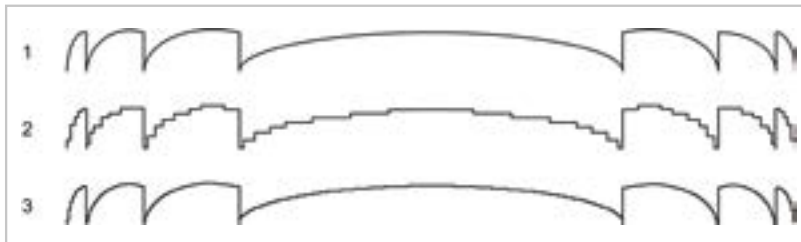


Abb. 7: Gewünschtes Profil ist in der Abb. 7A dargestellt. Je höher die Stufenanzahl, desto besser die Angleichung an das gewünschte Profil

Auswirkungen auf die Effizienz der Elemente

Die Effizienz des Elements ist abhängig von der Anzahl der Prozessstufen (siehe Tab. 1), die zu einem fertigen Design führen. Bei einem kontinuierlichen Profil (7/A) läge die Effizienz bei 100 %.

Struktur	Effizienz ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$)
Kontinuierliches Profil	100%
16 Level	98,7%
8 Level	95%
4 Level	81,1%

Tab.1: Auswirkungen auf die Effizienz der Elemente

Anwendungen: Verpackungsindustrie, Medizintechnik, Industrie

Die Einsatzgebiete diffraktiver optischer Elemente sind vielfältig. Immer mehr Anwender greifen auf die noch weitestgehend unbekannteste Technologie zurück und sind vor allem erstaunt, ob der einfachen Handhabung bei höchster Performance. LASER COMPONENTS bestätigt diesen Trend. Die Nachfrage der DOEs erhöhte sich in den letzten Jahren kontinuierlich. Workshops, die in Kooperation mit HoloOR in Deutschland durchgeführt werden, erfreuen sich hoher Beliebtheit. Fragen zu Anwendungen stehen dabei im Vordergrund. Die Möglichkeiten von DOEs werden häufig noch unterschätzt. Anbei daher einen Überblick über bereits durchgeführte Anwendungen.

Perforationen mit dem Laser

Zweidimensionale Strahlteiler können die Durchlaufleistung in der Produktion erheblich steigern. Mit nur einem Laserstrahl können mit einem 15 x 15 Element zeitgleich bis zu 225 Löcher in ein Material gebracht werden. Dieser Vorgang kann uneingeschränkt wiederholt werden. Diesen Vorteil nutzt bereits die Verpackungsindustrie bei der Herstellung von Plastik- und Metallfolien und bei der Erstellung von Öffnungsperforationen bei Kartons, Papier, Plastik- oder Metallfolien. Aber auch in der Zigarettenindustrie werden die Filterlöcher zunehmend mit Hilfe von DOEs, die in den Laserstrahl eingesetzt werden, erstellt. Die Sicherheit steht in der Automobilindustrie an vorderster Stelle. Damit Airbags problemlos auslösen können, werden Sollbruchstellen (sog. Split Lines) in der Verkleidung unter Einsatz dieser Komponenten erzeugt.

Perforationen sind nicht nur mit Lochmatrizen möglich. Es gibt ebenfalls Anwendungen, bei denen Strahlteiler eingesetzt werden, die Muster verwenden. Die Lochmuster können beispielsweise Ziffern aber auch komplexere Abbildungen darstellen.

Der Vorteile – verglichen mit Scannertechnologien – sind die kleine Standfläche, hohe Durchlaufleistungen, simultane Perforationen und genaue Strahlteilungen mit definierten Intensitäten und Durchmessern. Hierdurch ergeben sich weniger bewegliche Bauteile und dadurch geringste Abnutzungserscheinungen bzw. Systemwartungen.

	IR Elemente	NIR – UV Elemente
Wellenlänge	10,6 μm Andere λ (z. B. 9,25 μm) möglich	1064, 532, 355 und 266 nm Kundenspezifische Designs möglich
Material	ZnSe ZnS, Si, GaAs erhältlich	Fused Silica Saphir erhältlich
Durchmesser	1,1", 20 mm, 15 mm Kundenspezifische Designs – auch quadratisch – möglich	1,0", 18 mm Kundenspezifische Designs – auch quadratisch – möglich
Dicke	3 mm	3 mm
Winkelseparation	0,3° – 10°	0,3° – 10°
Element Typen	1 x 2, 1 x 3, 2 x 2, 3 x 3 Kundenspezifische Designs möglich	1 x 2, 1 x 3, 1 x 7, 1 x 81, 2 x 2, 3 x 3, 4 x 4, 5 x 5, 7 x 7, 9 x 9 Kundenspezifische Designs möglich
Intensität in gewünschten Ordnungen	typ. 75 – 90 % Optimierung durch Erhöhung der Level möglich (vgl. Abb. 6)	
Homogenität zwischen den Strahlen	typ. 1 bis 5 % Information in welcher Ordnung ist möglich	
Winkelgenauigkeit	0,02 mrad	

Tab. 2: Parameter diffraktiver optischer Elemente

Dermatologische Anwendungen

Diffraktive optische Elemente werden bspw. bei der Haarentfernung mittels Laserstrahl eingesetzt. Hierbei darf die Haut nicht überhitzt werden, wenn auch eine bestimmte Temperatur notwendig ist, um das erwünschte Ergebnis zu erhalten. Wird das Objekt mit einem Punktmuster bestrahlt, so ist die Haut zwischen diesem Raster unbeleuchtet. Dies hilft bei der Abkühlung der bestrahlten Fläche.

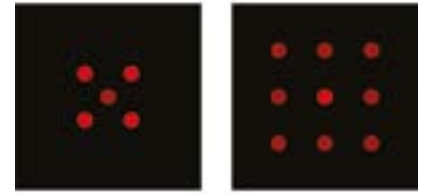


Abb. 8: Bei Strahlteilern, die eine gerade Anzahl von Strahlen erzeugen, ist die Nullte Beugungsordnung in der Mitte sichtbar. Bei Strahlteilern mit ungerader Beugungsordnung wird der mittlere Strahl in die Nullte Beugungsordnung gelegt. – Beide Effekte lassen sich korrigieren, bleiben jedoch messbar.

Aus Eins mach Zwei

In Laboren aber auch bei Industrieanwendungen soll ein einzelner Laser häufig für mehrere Aufbauten eingesetzt werden. Besitzt der Laser eine ausreichend hohe Leistung und benötigt jedes Set-Up nur einen Teil dieser Energie, so können DOE-Strahlteiler eingesetzt werden, um nicht nur den Strahl zu teilen, sondern jedem Set-Up die benötigte Energie zukommen zu lassen. Für das Design des Strahlteilers ist zu beachten, dass die Energien einmalig festgelegt werden und das Element dementsprechend entwickelt wird.

Verwendung als Homogenisierer

Überlagern sich die einzelnen Spots oder Strahlen in der Arbeitsebene mit ihren direkten oder gar weiteren Nachbarn, so erhält man hierdurch einen sehr homogenen Strahl. Verglichen zu bspw. TopHat Strahlformern sind die Anforderungen an den Eingangsstrahl sehr gering. So kann mit einem $M^2 > 1.3$ noch ein gutes Ergebnis in der Arbeitsebene erzielt werden. Um die gewünschte Homogenität des Strahls zu erhalten, ist es notwendig, den optischen Aufbau genau zu spezifizieren, da nach diesen Angaben das DOE entwickelt wird.

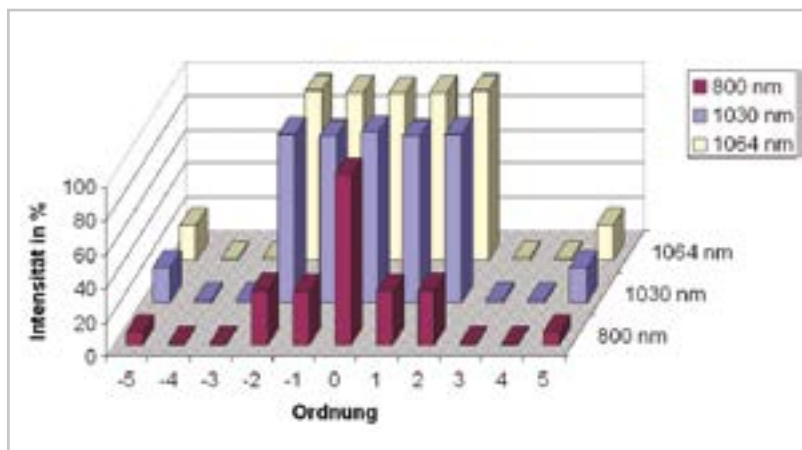


Abb. 9: Einsatz eines DOEs bei unterschiedlichen Wellenlängen. Das abgebildete 1 x 5 Element wurde für die Wellenlänge 1064 nm designed. Sichtbar ist die Simulation, würde das Profil bei 1030 nm bzw. 800 nm eingesetzt.

Praktische Hinweise zum Einsatz von DOEs

Diffraktive optische Elemente sind in ihrer Verwendung nicht grundsätzlich anders als herkömmliche optische Elemente. Dennoch sind die folgende Punkte bei ihrem Einsatz zur Strahlteilung zu beachten:

Aufbau

Beim Aufbau wird das DOE direkt in den Laserstrahl eingebracht. Der Durchmesser des DOEs sollte auf den Durchmesser des Laserstrahls abgestimmt sein.

Spotanzahl

Zu beachten sind die Unterschiede bei einer geraden bzw. ungeraden Anzahl von Spots. Diffraktive Elemente zeigen immer zusätzlich zu der gewünschten Spotanzahl eine Nullte Ordnung im Zentrum. Bei DOEs hoher Qualität liegt hierin ein nur geringer Energieanteil, der jedoch messbar bleibt. Bei einer ungeraden Spot-Matrix (z.B. bei einem 3 x 3 Element) wird die Nullte Ordnung einfach zu dem mittleren Spot addiert. Bei einer geraden Spot-Anzahl (z.B. bei einem 2 x 2 Element) liegt die Nullte Ordnung als zusätzlicher Spot in der Mitte – eingerahmt von vier gewünschten Ordnungen (Abb. 8). HoloOR ist bspw. in der Lage, diesen zusätzlichen Spot mit geringster Intensität zu fertigen, sodass er für die meisten Anwendungen nicht ins Gewicht fällt.

Wellenlänge

Die Wellenlängen, mit denen das DOE verwendet wird, müssen bei der Auswahl des Bauteils berücksichtigt werden. Die Elemente werden generell für eine Wellenlänge gefertigt. Werden sie mit anderen Wellenlängen verwendet, so ist mit Homogenitätsschwankungen, insbesondere in der Nullten Beugungsordnung, zu rechnen. In der Abb. 9 ist dies exemplarisch dargestellt.

Effizienz

Die Effizienz der Elemente ist beschrieben als Energiesumme der gewünschten Spotanzahl dividiert durch die Ausgangsenergie des Eingangsstrahls. Für diese Elemente liegt die typische Effizienz bei 75 %. Sie ist abhängig von der Anzahl der Level bei der Fertigung und damit auch vom Preis.

Ungewünschte Ordnungen

Die Stärke der ungewünschten Ordnungen ist abhängig vom Design des Elements. Sie liegen typischerweise zwischen 0,01 % und 5 % der Energie des Eingangsstrahls.

Konstanz der Teilstrahlen

Die Konstanz als Quotient aus der Energie des schwächsten Teilstrahls und des stärksten Teilstrahls ist ebenfalls abhängig vom Design. Er liegt typischerweise bei 0,8.

Homogenität

Die Homogenität ist sowohl abhängig vom Design als auch von der Fertigung und liegt zwischen +/- 0,5 % bis +/- 25 %

Parameter

Es muss nicht nur die Anzahl der Punkte angegeben werden, sondern auch der Separationswinkel. Als solcher wird der Winkel zwischen zwei Teilstrahlen, unabhängig von der Anzahl der Teilstrahlen, definiert. Weiterhin können abweichende Intensitäten bei den Einzelspots realisiert werden.

Typische Parameter diffraktiver optischer Strahlteiler sind in der Tabelle 2 aufgelistet.

Bei Rückfragen stehen Ihnen die genannten Ansprechpartner gern zur Verfügung.

Die Autoren

Barbara Herdt



Barbara Herdt ist seit Anfang 2005 zuständig für den Vertrieb von Laseroptiken bei LASER COMPONENTS. Davor lag ihr Tätigkeitsschwerpunkt in der Optik-Entwicklung. Hier kann sie auf eine 15-jährige Entwicklungserfahrung für abbildende Optiken sowie Optiken für die Messtechnik zurückblicken. Die Projektbetreuung für Medizinische Messgeräte und Teleskope für die Raumfahrt schlossen sich an. Das Studium der physikalischen Technik an der FH München war die Voraussetzung für all ihre Tätigkeiten.

Barbara Herdt
Produktionsingenieurin
Laseroptik und Zubehör
LASER COMPONENTS GmbH
Werner-von-Siemens-Str. 15
82140 Olching/Germany
Tel.: +49 8142/286441
Fax: +49 8142/286411
E-mail: b.herdt@lasercomponents.com
Website: www.lasercomponents.com

Moshe Bril



Moshe Bril erlangte seinen Master in experimenteller Physik am Laser Centre der Freien Universität (VU) von Amsterdam. Weitere Stationen waren das Weitzmann-Institut in Rehovoth und die Hebrew Universität in Jerusalem. Der Physiker ist Salesmanager bei Holo-Or Ltd in Rehovot, Israel. Zu seinem Aufgabenbereich gehört neben den vertrieblichen Tätigkeiten die Entwicklung von Produkten für neue Applikationen. Die Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der diffraktiven Optiken, Laser und angewandten Physik.

Moshe Bril
Sales and Marketing
Holo Or Ltd.
Science Park Rehovot Building 13b
POB 1051
Rehovoth 76114, Israel
Tel.: +972-8-9409687 EXT-104
Fax: +972-8-9409606
E-Mail: mbril@holoor.co.il
Website: www.holoor.co.il

Die Firma

LASER COMPONENTS GmbH Olching

Gegründet 1982, hat sich das Olchinger Familienunternehmen LASER COMPONENTS auf die Entwicklung, Herstellung und den Vertrieb hochwertiger Komponenten und Dienstleistungen für die Lasertechnik und Optoelektronik spezialisiert. Die abgedeckten Produktbereiche umfassen Laserdioden und Emittoren, Detektoren, Messtechnik, Faseroptik und optische Komponenten. Die weltweit agierende LASER COMPONENTS Group besitzt Verkaufsniederlassungen und Produktionsstandorte in fünf Ländern.

Artikel ähnlich veröffentlicht in der Zeitschrift *Optik & Photonik* im März 2008