

Methoden zur Berechnung der Strahlpropagation

Bernhard Steiger, Volker Neumann, S Klötzer, Andreas Fischer
Hochschule Mittweida

1 Einleitung

Der Einsatz von Laserstrahlung in technologischen Prozessen ist mit vielen unterschiedlichen Wechselwirkungsmechanismen verbunden. Die wiederum werden von den Eigenschaften des Laserstrahls beeinflusst. So bestimmt unter anderem die Laserwellenlänge zusammen mit dem Einstrahlwinkel und dem Polarisationszustand das Absorptionsverhalten und damit den Energieeintrag in ein Werkstück. In Abhängigkeit vom Material und der Strahlungsintensität kann es darüber hinaus auch zu nichtlinearen Effekten kommen.

Einige der Einflussgrößen sind gut bestimmbar, wie z. B. die Wellenlänge und Pulsdauer. Andere können nur mit großem Aufwand gemessen werden, wie die Temperaturabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten.

Bei der Bestimmung der Leistungsdichteverteilung wird meist davon ausgegangen, dass es verschiedene gutfunktionierende Modelle gibt. Das Strahlprofil kann in Abhängigkeit vom System als ideale Gaußverteilung oder auch als Top-hat-Profil und die Abbildungsoptik als nahezu fehlerfrei angenommen werden. Bei sehr anspruchsvollen Aufgabenstellungen ergibt sich aber oft eine Abweichung zwischen diesen Modellberechnungen und tatsächlich gemessenen Strahlverteilungen. Damit bessere Bearbeitungsergebnisse erzielt werden können, war es notwendig, die einfachen Modelle mit Gaußstrahlen bzw. „idealen“ Optiken durch ein genaueres zu ersetzen.

2 Prinzip und Kontrolle des Verfahrens

Huygens und später Fresnel haben gezeigt, dass sich die Effekte der Lichtbeugung als Erscheinung einer Überlagerung von Wellenfronten erklären lassen und damit der Wellentheorie des Lichtes zum Durchbruch verholfen. Auf diese fundamentale Weise können aber nicht nur Beugungseffekte an Hindernissen, sondern auch die Lichtausbreitung im freien Raum sowie die Strahlformwandlung beim Durchlaufen optischer Grenzflächen erklärt und berechnet werden.

Das grundlegende Prinzip besteht darin, dass eine Menge von Quellpunkten auf einer beliebig

geformten Fläche und mit ausreichend geringem Abstand in der Größenordnung der Wellenlänge definiert werden, die als elementare Strahler elektromagnetischer Kugelwellen fungieren. Die Abstrahlung vom Quellpunkt wird über die elektrische Feldstärke definiert. An den beliebig angeordneten Zielpunkten kann dann die resultierende Feldstärke durch die phasengerechte Addition der von den einzelnen Quellpunkten herrührenden Feldstärken berechnet werden. Polarisationseffekte werden vorerst unberücksichtigt bleiben.

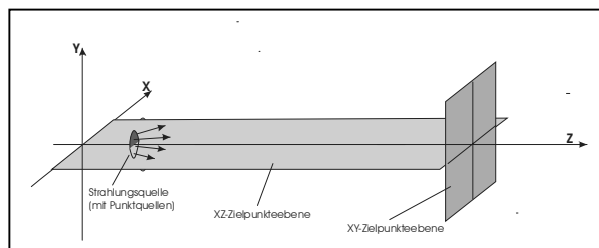


Bild 1: Anordnung der Flächen mit Quell- und Zielpunkten

Die oben beschriebene Vorgehensweise wird durch das Kirchhoffsche Beugungsintegral beschrieben:

$$E(x, y, z) = \frac{1}{i \cdot \lambda} \iint \frac{E_0(x_0, y_0, z_0)}{r} \cdot \exp(-i \cdot k \cdot r) \cdot \cos(\varepsilon) \cdot dx_0 \cdot dy_0 \quad (1)$$

(E_0 – Elektrischen Feldstärkeverteilung auf der Quellfläche, k – Kreiswellenzahl, r – Abstand zwischen Ziel- und Quellpunkt, ε - Winkel zwischen Elementarstrahlrichtung und Flächennormale der Zielfläche).

Der Winkel ε kann näherungsweise Null gesetzt werden, wenn man die Näherung der Paraxialstrahlen verwendet.

Zum Test der Methode wird eine Gaußstrahlquelle simuliert. Die Wellenlänge mit $1,06 \mu\text{m}$ bezeichnet eine Nd:YAG-Laserstrahlung. Der rotationssymmetrische Strahl mit einem Tailenradius von $w_0 = 5 \mu\text{m}$ breitet sich in z-Richtung aus. Der Mittelpunkt befindet sich im Koordinatenursprung. Alle Quellpunkte strahlen in dieser Ebene in gleich

cher Phasenlage, was der ebenen Wellenfront in der Taille eines Gaußstrahles entspricht. Die Zielpunktmenge wird nun auf einem ebenen Schirm in einer definierten Entfernung e angeordnet. Als Ergebnis ergibt sich für $e = 10 \text{ mm}$ auf dem Schirm eine Leistungsdichteverteilung, wie sie in dem Bild 2 dargestellt ist.

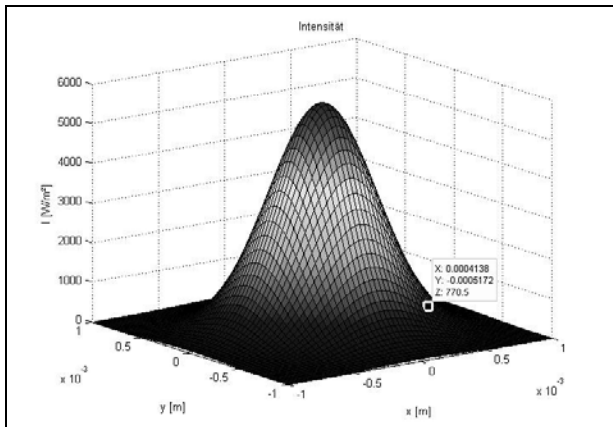


Bild 2: Berechnetes Gaußsches Strahlprofil in einer Entfernung von 10 mm nach einer ebenen Wellenfront mit einem Strahlradius von $5 \mu\text{m}$ bei einer Laserwellenlänge von $1,06 \mu\text{m}$ (Der Wert der Leistungsflussdichte von $770,5 \text{ W/m}^2$ entspricht dem $1/e^2$ -Abfall.)

Die genaue Auswertung der resultierenden Leistungsdichteverteilung auf der Zielebene zeigt, dass sich exakt wieder einer Gaußverteilung herausgebildet hat. Das ist nach der bekannten Regel der Invarianz der Strahlform eines Gaußstrahles bei der Ausbreitung im freien Raum auch zu erwarten. Die Strahlradiusbestimmung nach dem Prinzip des $1/e^2$ Abfalls der Leistungsflussdichte ergibt bei dem hier gewählten Abstand den Wert $w = 0,67 \text{ mm}$ (siehe Bild 2). Der Vergleich mit der wellenoptischen Berechnungsgleichung für die radiale Ausdehnung eines idealen Gaußstrahles liefert genau das gleiche Ergebnis:

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(z \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0^2} \right)^2} \quad (2)$$

Diese Übereinstimmung bei der Ermittlung der Strahlradien ist auch im Tailenbereich des Strahles sowie in großer Entfernung zur Strahlquelle nachweisbar.

Die Berechnungsmethode mittels der phasengerechten Addition der Feldstärken von Wellenfronten ist nicht auf Zielpunkt mengen beschränkt, die auf einem Schirm verteilt sind, der senkrecht zur z-Achse angeordnet ist. Es kann, wie in Bild 3 dargestellt, die Zielebene ebenso längs der Strahlachse z. B. in der x-z Ebene angeordnet werden. So ist es möglich, die gesamte Strahlformentwicklung in z-Richtung zu erfassen.

Die oben beschriebene Anordnung der Quellpunkte an der Position $z = 0$ wurde beibehalten und es ergibt sich in der x-z-Ebene das bekannte Bild der Ausbreitung eines Gaußstrahles im freien Raum mit der hyperbolischen Strahltaile bei der z-Position $z = 0$ und linearer Vergrößerung des Strahldurchmessers im Fernfeld.

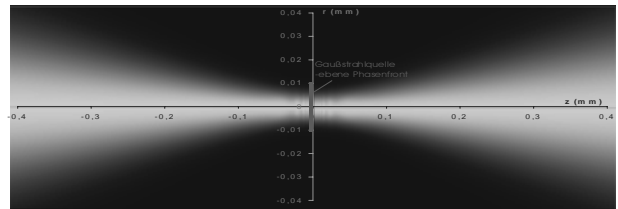


Bild 3: Berechnung der Ausbreitung eines Gaußstrahles in der x-z-Ebene (Strahltaile bei $z = 0$)

Die Quellpunkte müssen nicht auf einer Ebene angeordnet sein bzw. die Phasenlage der Quellpunkte muss nicht konstant sein. So ist im Allgemeinen die Wellenfront des Gaußstrahles außerhalb der Strahltaile gekrümmt und der Krümmungsradius dieser Wellenfront errechnet sich zu

$$R(z) = z \cdot \left[1 + \left(\frac{k \cdot \pi \cdot w_0^2}{z \cdot \lambda} \right)^2 \right] \quad (3)$$

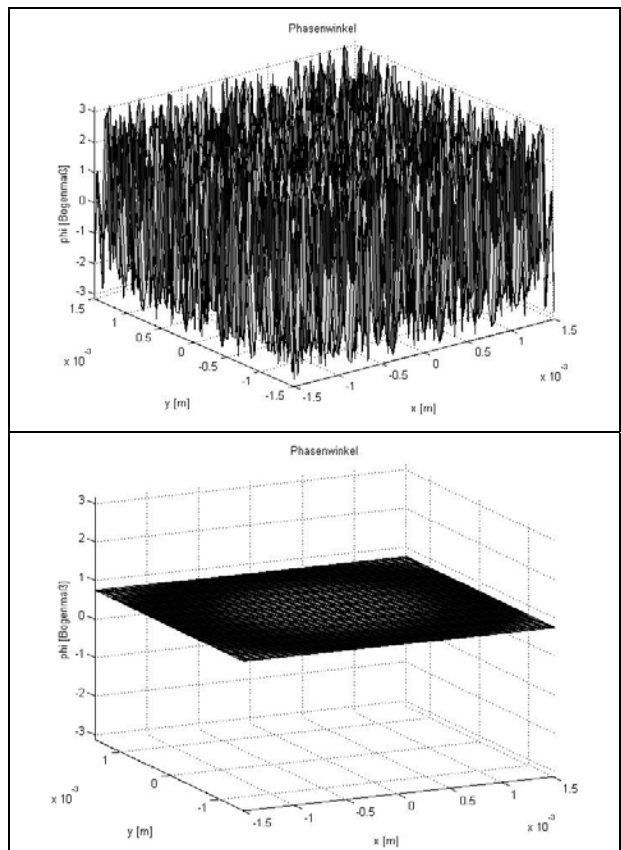


Bild 4: Berechnete Phasenwinkel (oben: Verlauf des Phasenwinkels auf einer ebenen Fläche; unten: Verlauf des Phasenwinkels

auf einer sphärischen Fläche mit dem Krümmungsradius einer Wellenfront)

Weitere Berechnungen beziehen sich auf ein fokussierendes optisches System, bestehend aus Luft (Brechzahl $n = 1$) und Glas ($n = 1,5$). Die Grenzfläche zwischen beiden Medien ist sphärisch mit einem Krümmungsradius von $r = 10$ mm gekrümmt und der Scheitelpunkt befindet sich auf der optischen Achse bei $z = 10$ mm. Ein Gaußscher Nd: YAG-Laserstrahl mit seiner Strahltaile bei $z = 0$ und einem Tailenradius von $w_0 = 0,1$ mm wird in das System eingestrahlt. Die Berechnungsergebnisse sind in Bild 5 dargestellt. Die Gaußsche Leistungsflussdichteverteilung bleibt erhalten. Die Leistungsflussdicht auf der Strahlachse steigt von 10^8 W/m² auf $2,2 \cdot 10^8$ W/m² an und der Strahlradius sinkt im Gegenzug von $100 \mu\text{m}$ auf $68 \mu\text{m}$. Die Strahlleistung wurde ebenfalls mit berechnet, da sie konstant bleiben sollte. Sie beträgt in beiden Fällen $1,57$ W. Das ist eine gute Kontrollmöglichkeit, um numerische Berechnungsfehler beurteilen zu können.

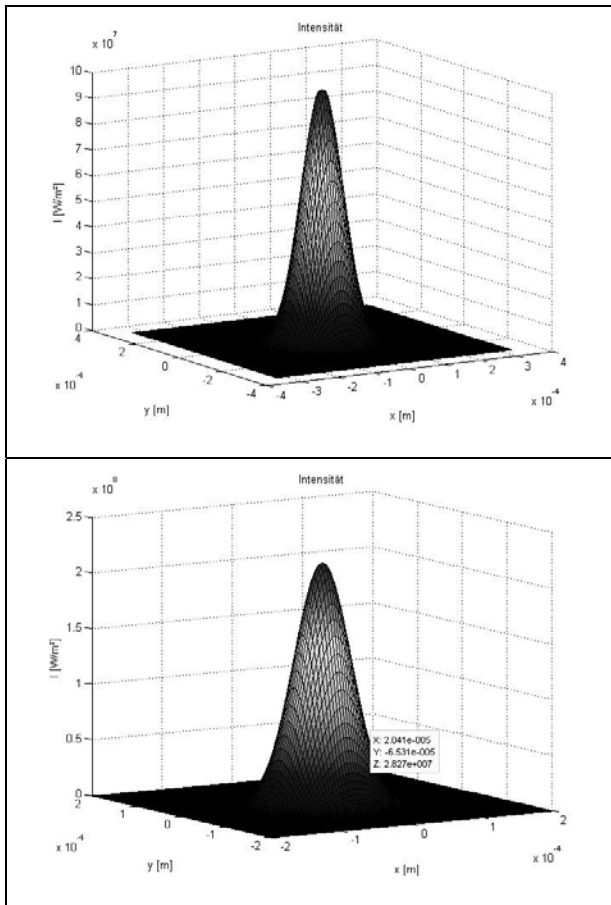


Bild 5: Fokussierung eines Gaußschen Laserstrahles (oben: Ausgangsstrahl in der Strahltaile mit $w_0 = 100 \mu\text{m}$ und $S_0 = 10^8$ W/m²; unten: fokussierter Laserstrahl mit $w_1 = 68 \mu\text{m}$ und $S_{01} = 2,2 \cdot 10^8$ W/m²)

Befinden sich im Strahlengang Blenden, die den Strahl begrenzen, dann werden Beugungseffekte

die Leistungsflussdichteverteilung des Laserstrahles beeinflussen. Bild 6 zeigt das berechnete Ergebnis, wenn in den Strahlengang vor der Grenzfläche ein Spalt in x -Richtung mit einer Breite von $100 \mu\text{m}$ eingefügt wird. In der y -Richtung bleibt der Gaußstrahl analog den Ergebnissen im Bild 5 erhalten und in der x -Richtung kommen die typischen Beugungseffekte hinzu, die sich durch Nebenmaxima in x -Richtung bemerkbar machen. Die Strahlleistung und damit auch die Leistungsflussdichte reduziert sich durch die Spaltblende.

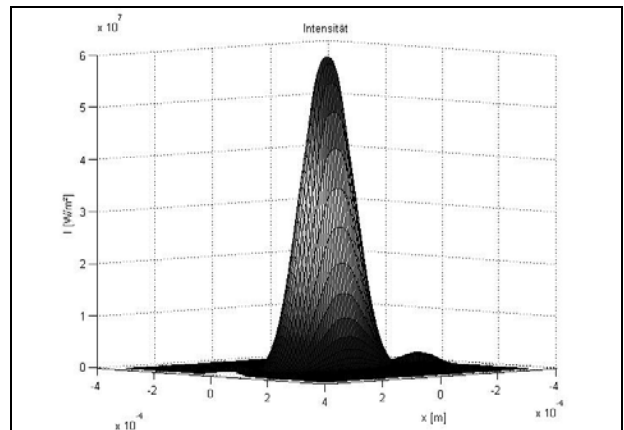


Bild 6: Berechnete Leistungsflussdichteverteilung im Fokus des optischen Systems, wenn in den Strahlengang ein Spalt mit der Breite von $100 \mu\text{m}$ eingefügt wird (Nebenmaxima sind deutlich zu erkennen.)