

## Fokussierung und optische Abbildung in der Lasertechnik

### 1. Fokussierung eines Laserstrahles

#### 1.1 Allgemeiner Fall

Die Fokussierung eines Laserstrahles erfolgt in der Regel mit einer einlinsigen bzw. mehrlinsigen Laseroptik, deren wichtigste optische Parameter die Brennweite und die Apertur (Durchmesser der freien Öffnung) sind.

Abb. 1 zeigt wie eine als ideal angenommene optische Linse der Brennweite  $f$  einen vorgegebenen Primärstrahl im Raum vor der Optik in einen Sekundärstrahl im Raum nach der Optik transformiert. Mittels der folgenden Gleichungen lassen sich aus den Daten des Primärstrahles die Daten des Sekundärstrahles (Größe und Lage der sekundärseitigen Strahltaille) berechnen. Es wird bei den angeführten Berechnungen vereinfachend vorausgesetzt, dass die Apertur der optischen Linse stets so groß gewählt wurde, dass keine Beeinträchtigung der Ergebnisse durch Beugungserscheinungen am Linsenrand erfolgt.

Die durch Bündelung eines Laserstrahles entstehende Strahltaille nach der Optik wird in der Lasertechnik auch als Strahlfokus bezeichnet.

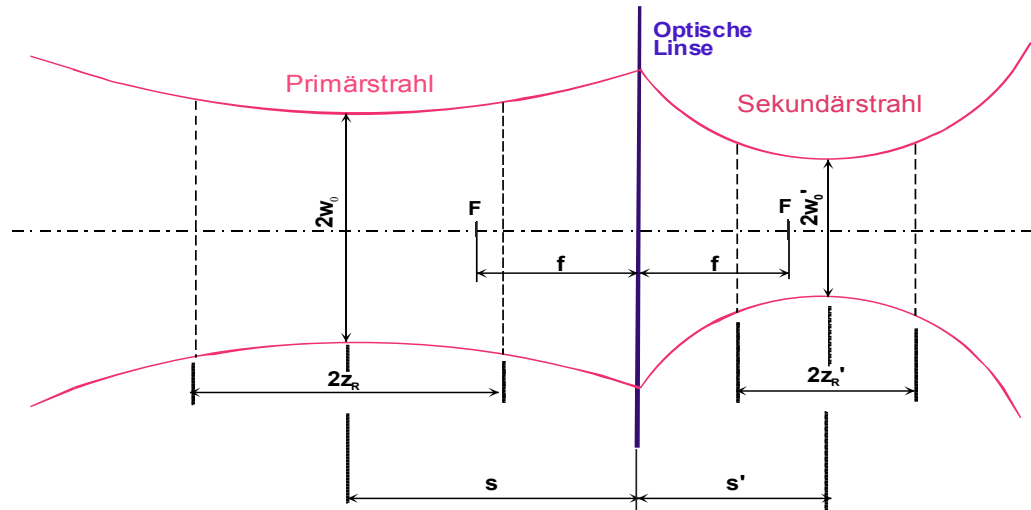


Abb. 1: Strahltransformation mittels optischer Linse der Brennweite  $f$

#### Vorgabe der Daten des Primärstrahles:

Tailenposition  $s$  und

Tailenlänge  $z_0$

oder

Tailenposition  $s$ ,

#### Berechnung der Daten des Sekundärstrahles:

$$w_0' = w_0 * f \sqrt{\frac{1}{(s-f)^2 + z_0^2}} \quad (1)$$

$$s' = f + \frac{f^2(s-f)}{(s-f)^2 + z_0^2} \quad (2)$$

Tailienradius  $w_0$

und Strahlgüte  $k$  ( $\lambda$ : Wellenlänge)

$$\text{mit } z_0 = w_0^2 \frac{k * \pi}{\lambda} \quad (3)$$

Die Ermittlung der sekundärseitigen Strahldaten setzt also voraus, das wenigstens zwei Parameter des Primärstrahles (z.B. Abstand der Taille zur Laseroptik  $s$  und die Tailienlänge  $2z_0$ ) bekannt sind.

Ist die primärseitige Tailienlänge – wie in der Praxis meist der Fall – nicht bekannt, so lässt sich diese aufgrund der allgemeinen wellenoptischen Zusammenhänge entsprechend Gleichung (3) aus dem Tailienradius  $w_0$  des Primärstrahles ermitteln:

Es werden nun aber drei Parameter für die Berechnung der sekundären Strahldaten benötigt, da zusätzlich die Strahlgüte  $k$  bekannt sein muss. Für den Sonderfall, dass der primäre Laserstrahl einem idealen Gaußstrahl entspricht, hat die Strahlgüte den Wert 1. Reale Laserstrahlen weisen aber in der Regel schlechtere Strahlgüten auf, und man muss die Qualität des so genannten Rohstrahles (Primärstrahl) kennen, um die Berechnung der erzielbaren Strahltailie und deren Position am Bearbeitungsmaterial durchführen zu können (Über die gebräuchliche Beugungsmaßzahl  $M^2$  errechnet sich die Strahlgüte zu  $k = 1/M^2$ ).

### ***1.2 Sonderfall Fokussierung eines Parallelstrahles***

Obige Berechnungsart zur Bestimmung der erzielbaren Tailiengröße als auch der sekundären Tailienposition ist unverzichtbar, wenn ein divergenter Laser-Rohstrahl auf die Fokussieroptik trifft. Die Position der primären Taille muss in diesem Fall bekannt oder messtechnisch ermittelt worden sein.

Anders verhält es sich, wenn ein annähernd paralleler Strahl (was gleichbedeutend ist mit geringer Strahldivergenz bzw. großer Tailienlänge) auf die Laseroptik trifft. Den idealen Parallelstrahl gibt es bekanntlich in der Wellenoptik nicht, aber wenn der primäre Tailienradius  $w_0$  im Verhältnis zur Wellenlänge  $\lambda$  sehr groß ist, kann man den Laserstrahl in begrenzter Ausdehnung als Parallelstrahl behandeln.

In den Gleichungen (1) und (2) folgt mit  $z_0 \gg (s-f)$  die Dominanz der Tailienlänge gegenüber der Größe  $s-f$  und damit ein Übergang obiger Gleichungen in jene Form, wie sie in der Fachliteratur meist angegeben wird:

$$w_0' = \frac{\lambda * f}{\pi * k * w_p} \quad (\text{mit } w_p \text{ als Radius des Parallelstrahles vor der Optik}) \quad (4)$$

$$s' = f$$

Der Abstand der sekundären Taille  $s'$  von der optischen Linse (bzw. zur Hauptebene der Laseroptik) ist in diesem Spezialfall nun gleich der Optikbrennweite  $f$ .

Auch die Größe der sekundären Taille (erzielbare Fokusgröße) ist in diesem Sonderfall nicht mehr von der Lage der primären Taille abhängig, sondern nur noch vom Radius des primären Parallelstrahles  $w_p$ , von der Brennweite der Laseroptik  $f$  und der Strahlgüte  $k$ . Die Strahlgüte erweist sich hierbei entsprechend ihrer Definition als Maß für die Fokussierbarkeit eines Laserstrahles.

### 1.3 Ermittlung der Strahlkaustik

Die Kenntnis des erzielbaren Fokusbereichs ist oft nicht ausreichend, um die Wirkung eines Laserstrahles bei der Materialbearbeitung abzuschätzen. Auch die Veränderungen des Strahlradius mit wachsender Entfernung zur genauen Fokusposition kann von Interesse sein. Einen wichtigen Anhaltspunkt erhält man diesbezüglich durch Ermittlung der Tailenlänge des Sekundärstrahles, die man mit bekannten Tailenradius  $w_0'$  und Kenntnis der Strahlgröße  $k$  analog zu Gleichung (3) ermitteln kann:

$$z_0' = w_0'^2 \frac{k \cdot \pi}{\lambda} \quad (5)$$

An den Enden der so genannten Strahltaile hat sich der Strahldurchmesser gegenüber dem Durchmesser in Tailenmitte um den Faktor 1,4 vergrößert.

Benötigt man genauere Aussagen zum Strahldurchmesser innerhalb und außerhalb der Taille, so sind diese über die Gleichung

$$w'(z) = w_0' \sqrt{1 + (z/z_0')^2} \quad (6)$$

(mit Achsposition  $z = 0$  an Position der Tailenmitte) ermittelbar.

Die Gleichung beschreibt den für rotationssymmetrische Laserstrahlung typischen Rotationsparaboloid und gibt Auskunft über den entstehenden Strahlradius an beliebiger Strahlachsposition  $z$ .

### 1.4 Strahldurchmesserdefinitionen

In den aufgeführten Berechnungsgleichungen erscheint ein Strahlradius  $w$ , ohne dass dieser genauer spezifiziert wird. Bei einem idealen Laserstrahl (Gaußprofil) handelt es sich um den so genannten Gaußradius, der durch Abfall der Strahlintensität auf den Wert  $1/e^2$  definiert ist. Bei realen Laserstrahlen mit von 1 abweichender Strahlgröße wird der Strahldurchmesser entsprechend aktuell gültiger ISO-Normen über den Leistungseinschluss (z.B. steht  $w_{86}$  für 86% Leistungseinschluss) oder durch den so genannten Varianzdurchmesser  $w_\sigma$  (auch 2 Moment-Durchmesser genannt) definiert.

Alle hier aufgeführten Gleichungen gelten genau genommen nur dann, wenn unter dem Strahlradius  $w$  der Varianzdurchmesser  $w_\sigma$  verstanden wird. Dieser kann nur durch Erfassung der Intensitätsverteilung in einer Ebene senkrecht zur Strahlachse bestimmt werden, wozu man Messgeräte mit entsprechender Softwareausstattung benötigt

Oftmals stehen als Ausgangswerte nur Strahlradien auf der Basis 86 % Leistungseinschluss zur Verfügung. Bei geringerem Anspruch bezüglich Genauigkeit der Berechnungen können auch diese Werte in die Gleichungen eingesetzt werden. Abseits der Strahltaile ergeben sich kaum Unterschiede zwischen den ermittelten Werten. Abweichungen von den Ergebnissen einer korrekten Berechnung auf der Basis des Varianzdurchmessers sind vor allem im Tailenbereich zu erwarten. Aber auch diese sind in der Regel so gering, dass man Ihnen für die praktischen Belange der Lasertechnik keine größere Bedeutung zumessen muss.

## ***1.5 Bestimmung des Strahlprofils***

Alle bisher aufgeführten Gleichungen zur Bestimmung der Strahlparameter nach einer fokussierenden Laseroptik geben lediglich Auskunft über die entstehenden Strahldurchmesser. Angaben zum entstehenden Strahlprofil erhält man dagegen nicht. Bei Vorliegen eines idealen Gaußstrahles ist eine Berechnung der Strahlprofile auch nicht erforderlich, da das Gaußprofil längs der Strahlachse erhalten bleibt und dies auch gilt, wenn der fokussierte Sekundärstrahl durch eine hochwertige Laseroptik erzeugt wird, welche die Güte des Laserstrahles nicht (oder nur unbedeutend) beeinträchtigt.

Jedes von der idealen Gaußform abweichende Strahlprofil erfährt aber einen fortgesetzten Profilwandel mit Änderung der Position auf der Strahlachse. Zur genauen Bestimmung des jeweils entstehenden Strahlprofils sind dann aufwendige Berechnungsmethoden erforderlich, die nur mit Rechnerunterstützung und entsprechenden Programmen zur Strahlkaustikberechnung realisierbar sind.

## ***1.6 Optische Fehler der Fokussieroptiken und Beugungseffekte***

Oben wurde bereits auf die Annahme verwiesen, dass die beschriebene Transformation von Laserstrahlen mittels fehlerfreier (idealer) Fokussieroptiken erfolgt. Praktisch ist diese Voraussetzung aber nie ganz erfüllt. Für die Fokussierung eingesetzte plankonvexe Einzellinsen weisen einen sphärischen Abbildungsfehler auf, der umso größer wird, je mehr die optische Linse vom Laserstrahl ausgeleuchtet wird. Mit mehrlinsigen Systemen oder durch Einsatz asphärischer Linsen versucht man diesen Abbildungsfehlern zu begegnen.

Nach Gleichung (4) wäre der kleinste Fokusdurchmesser bei maximaler Ausleuchtung der Fokussieroptik zu erwarten. Deshalb werden vor der Fokussieroptik oftmals Strahlaufweiter eingesetzt. Da bei zu großer Strahlaufweitung bestehende Optikfehler wieder stärker ins Gewicht fallen, kann sich das Ergebnis dadurch aber auch wieder verschlechtern. Die optimale Ausleuchtung zur Erzielung des kleinsten Fokusdurchmessers ist deshalb besser durch Versuche oder bei Verfügbarkeit der entsprechenden Mittel durch exakte wellenoptische Berechnung zu bestimmen.

Aber auch ideal fokussierende Linsen verändern das Strahlprofil, sobald infolge ihrer endlichen Ausdehnung Beugungseffekte entstehen. Im obigen Berechnungsmodell werden zur Vereinfachung der Rechnung die Linsendurchmesser stets so groß angenommen, dass Beugungseffekte zu vernachlässigen sind.

In der praktischen Lasertechnik gelingt es, die Beugungseffekte gering zu halten, indem man sich an die Regel hält, dass der Optikdurchmesser doppelt so groß sein sollte wie der Strahldurchmesser. Diese Forderung ist aber nicht immer erfüllbar. Zur genauen Bestimmung der Folgen der Strahlbeugung sind dann entweder Messungen oder auch hier aufwendige rechnergestützte Verfahren erforderlich. Mit der Verfügbarkeit rigoroser wellenoptischer Berechnungsverfahren sind sowohl die Beugungseffekte als auch die Folgen von Optikfehlern bestimmbar, so dass mit diesen auch die Lösung laseroptischer Optimierungsaufgaben erfolgen kann.

## **2. Abbildung eines Laserstrahles**

### **2.1 Anwendungsbereich**

Nicht immer geht es bei der Lasermaterialbearbeitung nur darum, durch Fokussierung größtmögliche Leistungsdichte auf dem Material zu erzielen. Immer häufiger steht die Forderung, ganz spezifische Leistungsdichteverteilungen an der Bearbeitungsstelle zu realisieren und diese Verteilung durch vorgegebene Muster und Geometrien zu bestimmen. Im einfachsten Falle ist dies die Forderung, statt Verwendung einer gaußähnlichen Leistungsdichteverteilung eine vorgegebene Kreisfläche mit konstanter Leistungsdichte zu bestrahlen (Top-hat- Leistungsdichteverteilung). In der Lasermikrobearbeitung werden außer kreisförmigen Begrenzungen aber auch beliebig andere Geometrien und Muster für die Umrahmung und lokale Eingrenzung der wirksamen Laserbestrahlung vorgegeben. Die Realisierung solcher scharf begrenzter Intensitätsmuster erfolgt üblicherweise durch Abbildung von Masken auf dem Bearbeitungsmaterial. Diese Bearbeitungsmasken werden im Raum vor der Laseroptik platziert. Man spricht dann von einer Laserbearbeitung in Abbildung. Im Vergleich zur Methode der Strahlfokussierung ergeben sich dabei einige Unterschiede, die im Folgenden besprochen werden sollen.

### **2.2 Abbildungsposition**

Gleichung (2) in Abschnitt 1.1 beschreibt die Abhängigkeit der Tailenposition des Sekundärstrahles (Tailenabstand  $s'$  zur optischen Linse) von der Tailenposition des Primärstrahles (Tailenabstand  $s$  zur optischen Linse) bei Vorgabe eines bestimmten primären Strahltaillenradius  $w_0$ . In Abb. 2 ist diese Abhängigkeit als Diagramm dargestellt.

Nun kann man diesen wellenoptisch bestimmten Verlauf jenen gegenüberstellen, der sich aus dem bekannten strahlenoptischen Abbildungsgesetz ergibt. Die Größe  $s$  steht dann für den Abstand des Gegenstandes zur optischen Linse (Gegenstandsweite) und die Größe  $s'$  für den Abstand der entstehenden Abbildung (Bildweite) zur optischen Linse. Der Zusammenhang beider Größen wird durch die Gleichung

$$s' = \frac{s * f}{s - f} \tag{7}$$

beschrieben.

Bei der Gegenüberstellung beider Verläufe in Abb. 2 ist zu erkennen, dass sich bei großem Abstand zur Laseroptik Deckungsgleichheit ergibt, aber mit zunehmender Näherung der Größe  $s$  an die Linsenbrennweite  $f$  deutliche Abweichungen auftreten. Während strahlenoptisch betrachtet bei Annäherung der Gegenstandsweite an die Brennweite  $f$  der optischen Linse sich die Abbildungsposition ins Unendliche verschiebt, erreicht die wellenoptisch berechnete sekundäre Taille nur einen endlichen Abstand zur fokussierenden Optik, von da an kehrt sie um und erreicht bei  $s = f$  einen Abstand  $s' = f$  (wellenoptischer Symmetriepunkt). Die praktische Konsequenz ist, dass bei Anordnung von Stahlmasken im Raum vor der Laseroptik die Position von Strahlfokus und Abbildung hinter der Optik nicht übereinstimmen (Das strahlenoptische Abbildungsgesetz (7) gilt mit nur geringen Einschränkungen auch für die Gegenstands-Abbildungsbeziehung innerhalb kohärenter Laserstrahlung).

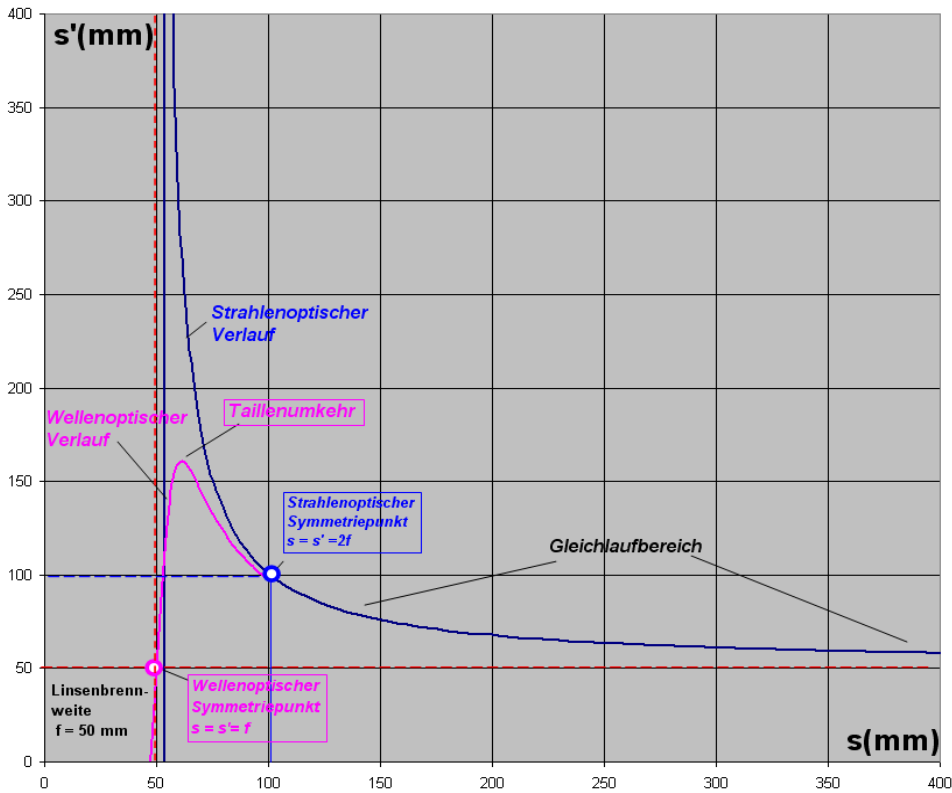


Abb.2: Gegenüberstellung strahlenoptischer Verlauf- wellenoptischer Verlauf der Größe  $s'$

Im Beispiel Abb. 3a ist in einer Entfernung  $s = 2f$  vor der Laseroptik eine Maske im Parallelstrahlbereich des Lasers positioniert. Die scharfe Abbildung dieser Maske erfolgt dann entsprechend dem strahlenoptischen Abbildungsgesetz hinter der Laseroptik an der Stelle  $s' = 2f$ . Der Strahlfokus befindet sich aber an der Stelle  $s' = f$ .

Setzt man - wie in Abb.4b dargestellt - bei einem (z.B. durch Zwischenfokussierung entstandenen) stark divergenten Primärstrahl mit Tailleabstand  $s$  zur Laseroptik die Strahlmaske genau auf die Position der primären Strahltille, so befinden sich auch in diesem Fall der Strahlfokus des Sekundärstrahles und die Masken-Abbildung nicht an der gleichen Position der Strahlachse. Die Abbildung der Strahlmaske kann dann unter Umständen auch vor dem Fokus erscheinen (Der Abstand zwischen Abbildungs- und Fokusposition verringert sich mit Verkleinerung des primärseitigen Taille radius: Weitergehende Näherung von wellenoptischen und strahlenoptischer Verlauf in Diagramm 2).

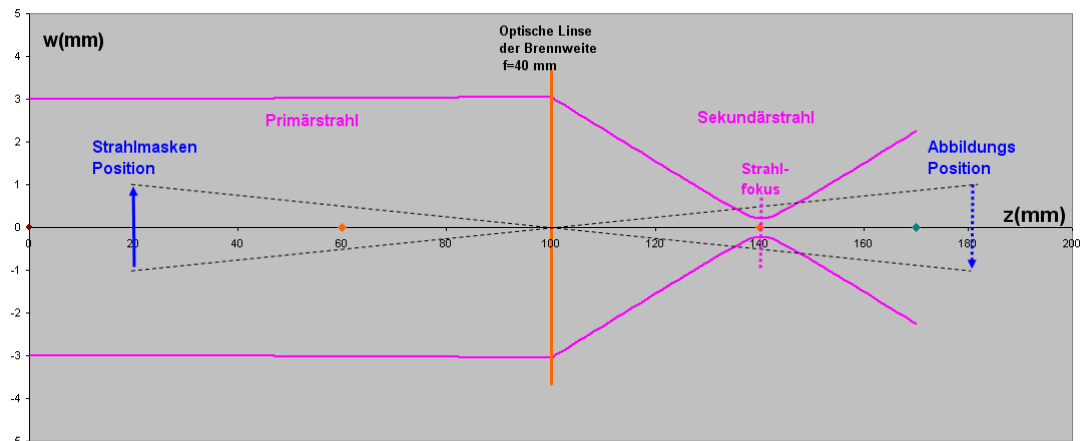


Abb.3a: Verschiedene Positionen von Strahlfokus und Abbildung bei eingehendem Parallelstrahl

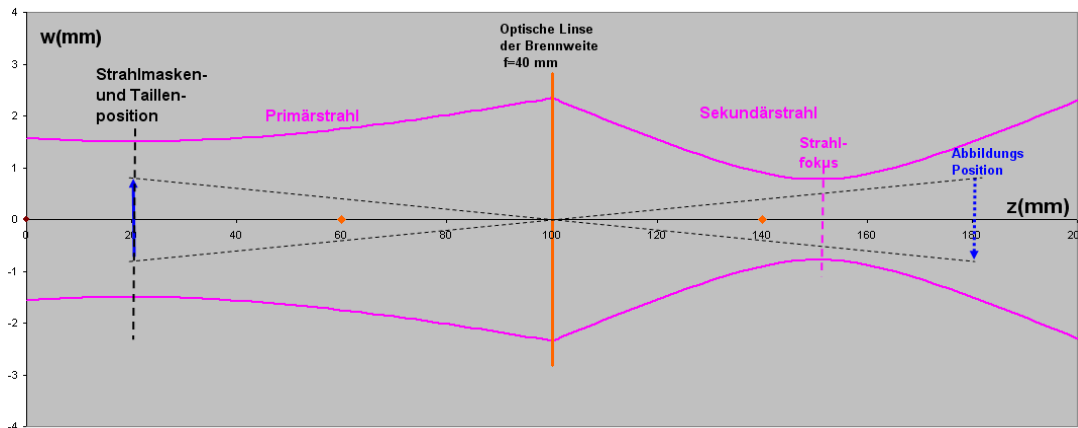


Abb.3b: Verschiedene Positionen von Abbildung und Strahlfokus bei divergentem Eingangsstrahl

## 2.2 Abbildungsmaßstab und optische Auflösung

Der strahlenoptische Abbildungsmaßstab  $m$  (Abbildungsgröße / Gegenstandsgröße) ergibt sich aus der Beziehung

$$m = \frac{f}{s - f} = \frac{s'}{s} \quad (8)$$

Die Abbildungsgröße ist somit im Gültigkeitsbereich dieser Gleichung linear von der Gegenstandsgröße und sonst nur von der Optikbrennweite  $f$  und der Gegenstandsweite  $s$  abhängig. Dagegen ist der wellenoptisch bestimmte Fokusbrennweite entsprechend Gleichung (4) durch die Wellenlänge der Laserstrahlung, der Strahlgüte und die verfügbare Apertur der Laseroptik bestimmt, so dass einer gewünschten Fokusverkleinerung bestimmte Grenzen gesetzt sind. Dies könnte zu der Vorstellung führen, dass man durch Abbildung von Strahlmasken in Form von Blenden mit kleinem Lochdurchmesser kleinere Brennflecke auf dem Material erzeugen kann, als dies bei der wellenoptisch bedingten Fokusbildung möglich ist. Tatsächlich aber funktioniert das strahlenoptische Prinzip der Abbildung nicht für beliebige Abbildungsmaßstäbe und Blendenverkleinerungen. Unterschreitet der Lochdurchmesser in einer vor der Laseroptik positionierten Blende einen bestimmten Wert, treten Beugungseffekte an der Laseroptik auf und die Intensitätsverteilung entspricht an der Abbildungsposition nicht mehr der Maskenvorlage.

Abb. 5 zeigt die Veränderung der Intensitätsverteilung an der Abbildungsposition, wenn man den Lochdurchmesser einer vor der Optik eingesetzten Blende schrittweise verkleinert.

Für relativ große Lochdurchmesser erfolgt eine weitgehend korrekte Abbildung und der Durchmesser des Top-Hat-Profiles an der Abbildungsposition verkleinert sich linear mit dem Lochdurchmesser der Blende. Die bereits vorliegende und im Vergleich zur Idealform verringerte Flankensteilheit ist noch unauffällig. Bei fortgesetzter Verkleinerung des Lochdurchmessers der Blende bestimmt aber die begrenzte Flankensteilheit in Verbindung mit den abgerundeten Übergängen an den Eckpunkten des Top-Hat-Profiles mehr und mehr das Ergebnis. Schließlich erscheint überhaupt keine Top-Hat-artige Intensitätsverteilung mehr in der Abbildungsebene und stattdessen das so genannte Beugungsscheibchen, das man durch Angabe des Abstandes der innersten Minima quantitativ beschreibt. Dieser Durchmesser des Beugungsscheibchens stellt die Grenze dar, welche durch weitere Verkleinerung des Blendenloches nicht mehr unterschritten werden kann. Eine fortgesetzte

Reduzierung des Lochdurchmessers verringert nur noch die Intensitätswerte in der Abbildung ohne dass Form und radiale Größe des Beugungsscheibchens verändert werden. Die Größe des Beugungsscheibchens wird bestimmt durch die Beziehung

$$d_A' = \frac{2,44 * \lambda * s'}{D} \quad \text{mit } d_A' \text{ als Größe des Beugungsscheibchens (Airy-Scheibchen)}$$

D als Optikedurchmesser (freie Apertur) und  
s' als Abstand zwischen Optik und Abbildung

(9)

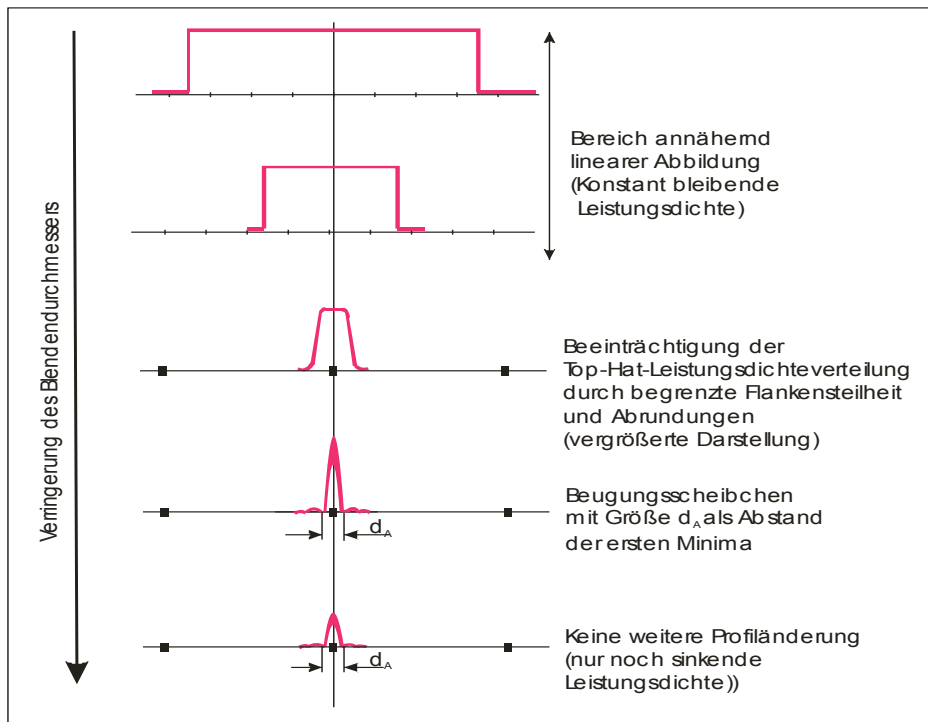


Abb.5: Intensitätsverteilung innerhalb der Abbildung bei Verkleinerung des Durchmessers einer primärseitig angeordneten Blende

Damit ist das erzielbare Ergebnis auch hier durch die Wellenlänge der Strahlung und die Apertur der Optik begrenzt. Vergleicht man die Größe des Beugungsscheibchens mit der in Gleichung (4) ermittelten Fokusgröße, die bei gleichen optischen Bedingungen erzielbar ist, so unterscheiden sich beiden Berechnungswerte durch den Faktor 1,92. Dieser ist lediglich als die Folge unterschiedlicher Definitionen für die Erfassung der Strahldurchmesser an der Bearbeitungsstelle zu interpretieren. Es ist aber zu beachten, dass mit wachsender Fokussierung eines Laserstrahles die an der Bearbeitungsstelle verfügbare Strahlleistung wächst, während sie bei Einsatz von Blenden vor der Optik sinkt und nur die Leistungsdichte auf dem Material konstant bleibt, solange ein bestimmter Lochdurchmesser der Blende nicht unterschritten wird. So verlangt die Arbeit in Abbildung gegebenenfalls höhere Laserleistungsausgaben.

Die Kenntnis der Größe des Beugungsscheibchens hat aber nicht nur Bedeutung für die Abschätzung der kleinstmöglichen Brennfleckgröße auf dem Bearbeitungsmaterial. Bei Arbeit in Abbildung wird auch die mögliche Güte einer Maskendarstellung auf dem Material von dieser Wellenlängen und Apertur abhängigen Kenngröße bestimmt. Vor allem bei der Lasermikrobearbeitung ist es wichtig zu wissen, mit welcher Schärfe tatsächlich eine vorgegebene Maske auf dem Material abgebildet werden kann, mit welchen Abweichungen



von der idealen Abbildung gerechnet werden muss (begrenzte Flankensteilheiten und Abrundungen an Eckpunkten). Der Grad dieser Abweichung wird durch die Größe des Beugungsscheibchens bestimmt, denn man muss sich vorstellen, dass die Abbildung durch Überlagerung einer Vielzahl solcher Beugungsscheibchen entsteht.

Die Größe der Beugungsscheibchen in der Abbildungsebene projiziert auf die Gegenstandsebene (Maskenebene vor der Optik) ergibt das optische Auflösungsvermögen einer solchen Anordnung. Es errechnet sich zu

$$d_A = d_A' s/s' \quad (10)$$

Strukturelemente in den Masken mit Dimensionen kleiner  $d_A$  sind durch die gegebene Laseroptik nicht mehr darstellbar (Begrenzung des Auflösungsvermögens) und damit auf dem Material unwirksam.

-----