

4 Airy-Muster und Durchmesser des Laserspots

Ein abzubildender Laserfleck wird in seiner Intensitätsverteilung durch Beugung, in der Regel an einer runden Blende, bestimmt. Dabei kann es sich um eine Austrittsöffnung, eine andere Verengung im optischen Strahlengang oder insbesondere um die Blende eines Raumfilters handeln. In Abb.4.1 (rechts) ist das beobachtete Intensitätsprofil in einer Videoaufnahme dargestellt. Man erkennt außerhalb eines dominierenden Maximums ringförmige lokale Intensitätsmaxima, die als Airy-Ringe bezeichnet werden. Aus der Theorie der Fraunhoferbeugung an einer runden Blende kann eine mathematische Beschreibung der beobachteten Intensitätsprofile abgeleitet werden [42]:

$$I = I_0 \left(\frac{2J_1(x)}{x} \right)^2 \quad (4.1)$$

Der berechnete Verlauf ist in Abb.4.1 (links) als durchgezogene Linie dargestellt. Er entspricht einem Schnitt durch die Mitte des rechts gezeigten Videobildes. Dabei ist J_1 die Besselfunktion erster Ordnung, einer periodischen Funktion mit exponentiell abnehmender Amplitude:

$$J_1(u) = \frac{1}{2\pi i} \int_0^{2\pi} e^{i(mv+u \cos v)} dv \quad (4.2)$$

Die Ortsvariable x in Gl.4.1 wurde vereinfachend aus der Beugungsordnung k , dem Abstandsvektor R vom Bildpunkt zur Blende, dem Blendenradius a und dem Abstand r des Bildpunktes vom Bildmittelpunkt zusammengefaßt:

$$x = \frac{k a}{R} r \quad (4.3)$$

Eine Erhöhung des Abstandes zur Blende wirkt sich demnach verbreiternd auf das Profil aus, eine Blendenvergrößerung verengend. Der prinzipielle Intensitätsverlauf wird dadurch nicht beeinflusst.

Im folgenden Abschnitt soll der Frage nachgegangen werden, wie bei dem beschriebenen Intensitätsprofil ein Laserspotdurchmesser, eine für die Raster-Laser-Mikroskopie (SMSC) wesentliche Größe, sinnvoll definiert werden kann. Den Laserspotdurchmesser einfach als die Distanz der ersten Minima zu definieren, empfiehlt

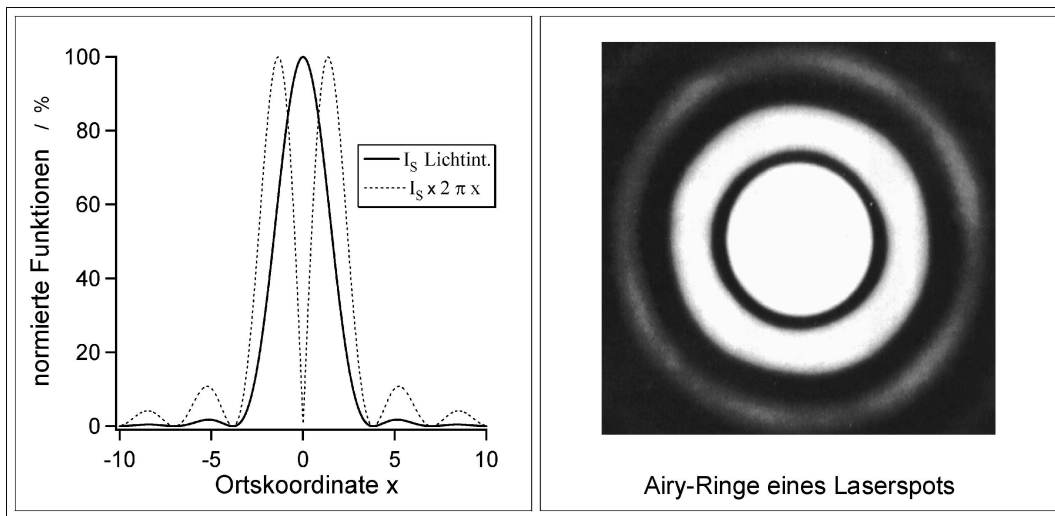


Abb. 4.1: rechts: Photographische Aufnahme eines Laserspots mit Airy-Ringen [42]; links: Intensitätsprofil nach Gl.4.1 (durchgezogen) und flächengewichtete Intensitätsverteilung (gestrichelt)

sich nicht. Die Lichtintensität außerhalb des so definierten Bereiches erscheint zwar in Abb.4.1 (links) vernachlässigbar, die Fläche, mit denen die äußeren Teile zur Gesamtintensität beitragen, wächst aber proportional zum Abstand von der Mitte. Um dies zu verdeutlichen, wurde in Abb.4.1 (links) die durch Multiplizieren mit $(2\pi x)$ aus der Intensität erhaltene flächengewichtete Intensität gestrichelt eingetragen. Die Spotmitte mit der Intensität $I_0 = 100\%$ trägt wegen der geringen Fläche praktisch nichts bei, die Intensität mit dem größten Gewicht liegt weiter außerhalb bei 61,8%.

Ideal wäre ein Laserspot mit einer konstanten Lichtintensität innerhalb der kreisrunden Fläche und einer Lichtintensität gleich Null außerhalb. Dessen Durchmesser könnte ohne weiteres auch als Bezugswert für Photostromdichten herangezogen werden, wenn die Ladungsträgerdiffusion vernachlässigbar bleibt.

Würde als Laserspotdurchmesser ein sehr großer Wert definiert werden, um möglichst die gesamte weit ausgedehnte Lichtleistung in ihm zu vereinen, wäre die durchschnittliche Lichtintensität sehr gering, und der Spotdurchmesser würde nicht mehr mit der Auflösung eines Scanbildes korrelieren, die durch den kleineren Bereich hoher Lichtintensität bestimmt wird.

Daher scheint es sinnvoll, einen effektiven Laserspotdurchmesser mit einer mittleren Lichtintensität innerhalb der so festgelegten Fläche zu definieren, um einerseits einen Bezug für Stromdichtenflächen und andererseits eine Vergleichsmöglichkeit für die Lichtintensitäten gegenüber herkömmlichen integralen Photostrommessungen mit konstanter großflächiger Beleuchtung zu haben.

Da Gl.4.1 eine rotationssymmetrische Intensitätsverteilung beschreibt, kann aus ihr durch Integrieren über die Kreissegmente die Gesamtlichtleistung $P(r)$ innerhalb

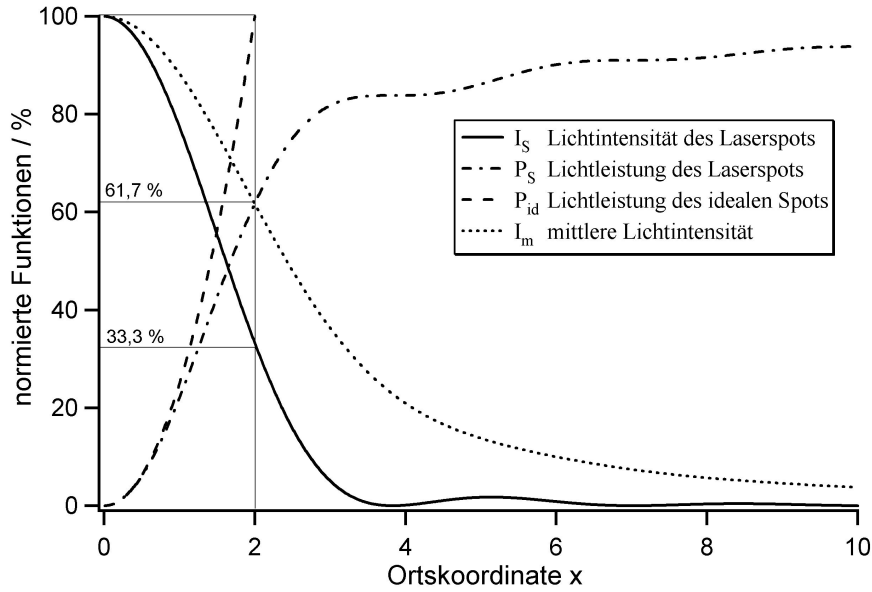


Abb. 4.2: Zur Definition eines effektiven Laserspotdurchmessers: Der normierte Verlauf der Lichtintensität I_S , der Lichtleistung P_S und der mittleren Lichtintensität I_m eines an einer Lochblende gebeugten Laserspots vom Spotzentrum nach außen. Zum Vergleich ist die Lichtleistung P_{id} eines hypothetischen idealen, runden Spots mit konstanter innerer Lichtintensität und scharfen Grenzen eingezeichnet.

des entsprechenden angenommenen Laserspotradius erhalten werden:

$$P_S(r) = \int_0^R 2 \pi r I(r) dr \quad (4.4)$$

Dabei ist der Integrand die schon in Abb.4.1 gestrichelt eingezeichnete flächengewichtete Lichtintensität. Die Gesamtleistung $P(r)$ ist in Abb.4.2 zusammen mit der Lichtintensität eingezeichnet. Am ersten Intensitätsminimum beträgt die Gesamtleistung innerhalb 84 % und am zweiten 91 %. Bei einem hypothetischen, idealen Laserspot mit konstanter Lichtintensität und scharfen Kanten würde seine Gesamtleistung P_{id} quadratisch mit dem Radius anwachsen.

$$P_{id}(r) = \int_0^R 2 \pi r I_0 dr = I_0 \pi r^2 \quad (4.5)$$

Wie in Abb.4.2 zu erkennen ist, erreicht dieser Laserspot die Gesamtleistung (100 %) verglichen mit dem realen gebeugten Spot verhältnismäßig schnell. Der Radius dieses idealen Spots mit der gleichen Lichtleistung wie der reale gebeugte, entspricht dem Radius des Kreissegments des Spots bei einer Intensität von 33,3 % (siehe Abb.4.2). Die Lichtleistung innerhalb dieses Spots beträgt dann 61,7 % der Gesamtleistung. Um abzuschätzen, wie groß die mittlere Lichtintensität innerhalb der

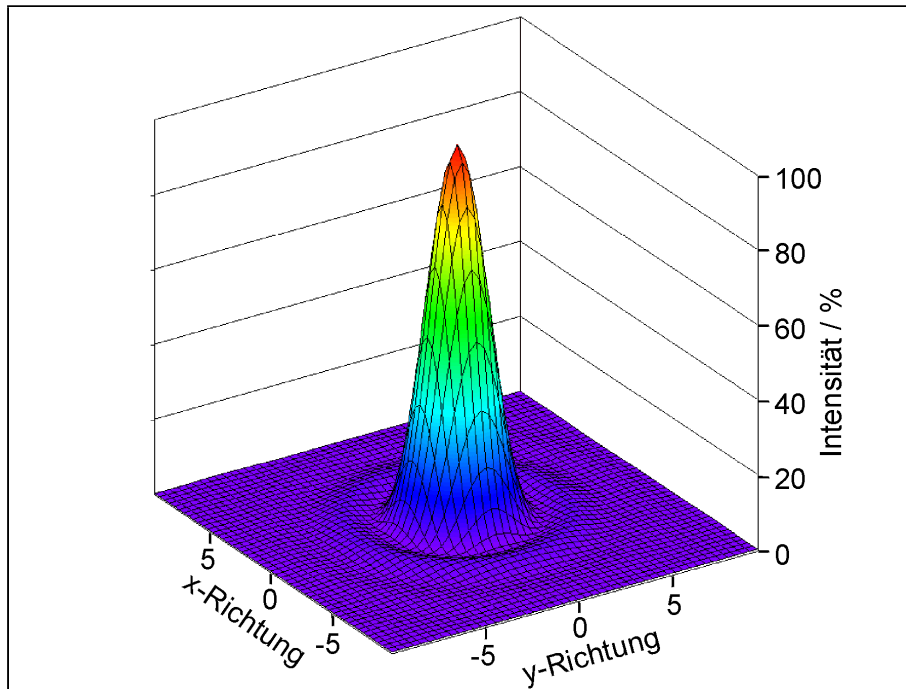


Abb. 4.3: Intensitätsverteilung eines Laserspots über die Projektionsfläche durch Beugung an einer Lochblende

gewählten Spotfläche ist, kann die jeweilige Lichtleistung innerhalb durch die entsprechende Kreisfläche geteilt werden:

$$I_m(r) = P_S(r)/\pi r^2 \quad (4.6)$$

Diese Funktion ist ebenfalls in Abb.4.2 eingezeichnet.

Als Ergebnis dieser Überlegungen wird ein effektiver Laserspotdurchmesser d_{eff} für die Messungen am SMSC durch den Bereich definiert, in dem die Lichtintensität größer als 33,3% des Maximums im Mittelpunkt des Laserspots ist. Der Anteil der Lichtleistung in diesem Bereich beträgt 61,7% der Gesamtlichtleistung.

Die Lichtintensität des Laserspots wird berechnet, indem die gemessenen Gesamtlichtleistung durch die Laserspotfläche geteilt wird. Für die Berechnung der Laserspotfläche wird der oben definierte effektive Durchmesser verwendet. Dabei wird so getan, als ob ein idealer Laserspot mit einer konstanten Lichtintensität (100%) vorliegen würde, tatsächlich variiert die Intensität jedoch von 100% bis 33% und beträgt im flächengewichteten Mittel 61,7%.

Der effektive Laserspotdurchmesser kann bestimmt werden, indem eine Klinge durch den Strahl bewegt wird, wobei die nicht ausgeblendete Lichtleistung mit einer Photozelle gemessen wird. Das bei einem Laserspot mit Airy-Intensitätsprofil zu erwartende Meßsignal wurde numerisch simuliert, die Ergebnisse sind in Abb.4.4 gezeigt.

Wird ein Laserspot auf eine Fläche projiziert, so wird die Intensitätsverteilung

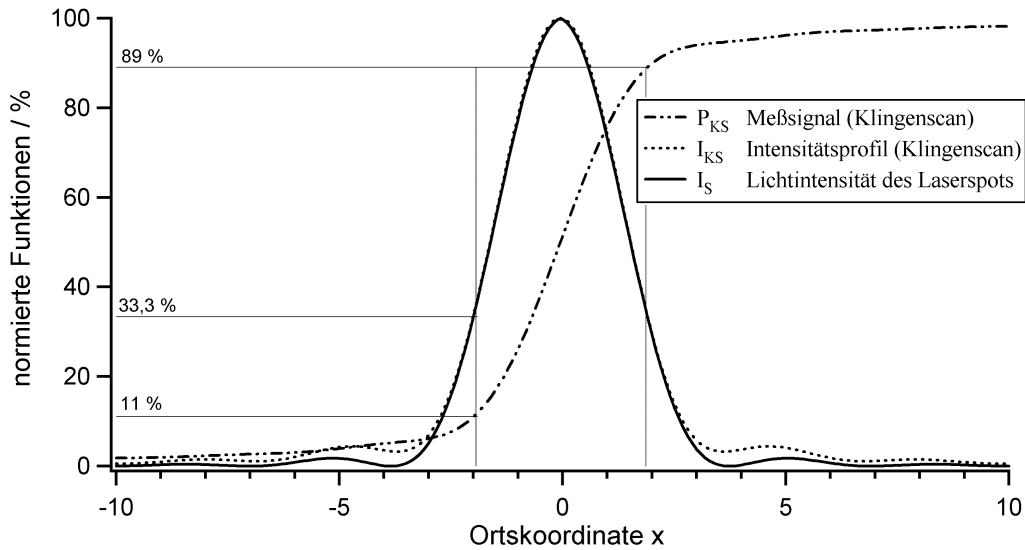


Abb. 4.4: Bestimmung des effektiven Laserspotdurchmessers nach der Klingenscan-Methode

durch Gl.4.1 wiedergegeben, wobei wegen der Rotationssymmetrie des Spots jede Richtung innerhalb der Fläche gleichwertig ist. Die x-Richtung ist die Bewegungsrichtung während des Scans, die y-Richtung senkrecht dazu und parallel zur Klingenkante. Daraus wurde für eine große Fläche die Intensitätsverteilung eines Spots berechnet, von der der zentrale Bereich in Abb.4.3 wiedergegeben ist.

Um den Fehler geringer zu halten, wurde für die Simulationen ein in x- und y-Richtung jeweils zehnmal größerer Bereich verwendet. Diese Intensitätsverteilung wurde über y integriert, wodurch das Intensitätsprofil I_{KS} (Abb.4.4) erhalten wird. Zum Vergleich ist in Abb.4.4 auch die Lichtintensität I_S des Laserspots entlang des Querschnitts eingezeichnet. Beide Kurven unterscheiden sich nur im Bereich des ersten Beugungsminimums wesentlich. Das Intensitätsprofil I_{KS} würde bei der Klingenscan-Messung erhalten werden, wenn ein schmaler Spalt statt der Klinge über den Spot bewegt würde. Das Meßsignal bei der Messung mit der Klingenkante P_{KS} ist das Integral von I_{KS} über x. Man erkennt aus Abb.4.4, daß einer Laserintensität von 33,3% von der Maximalintensität ein Meßsignal von 11% bzw. 89% des maximal gemessenen Wertes entspricht.

Daher kann aus dem Meßsignal aus der Distanz der Punkte mit 11% und 89% des maximalen Meßsignals direkt der effektive Laserspotdurchmesser erhalten werden.

