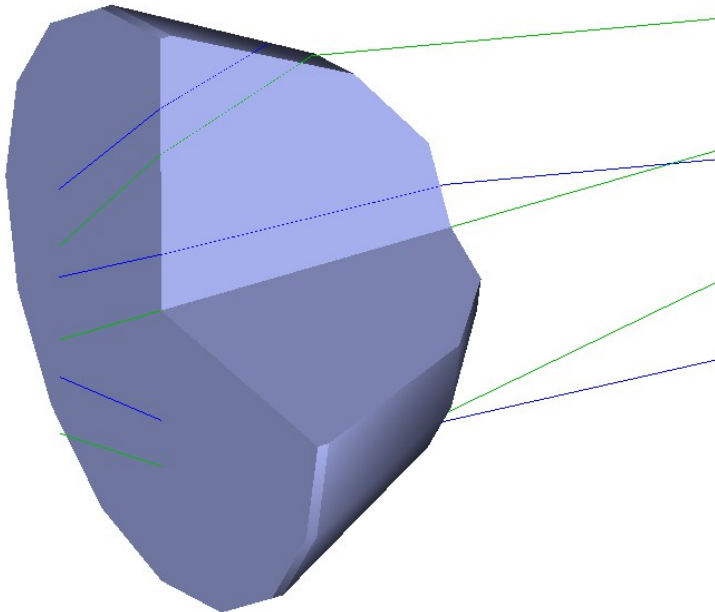


Anhang 2

Der Einfluß der Größe und Leuchtdichte einer Lichtquelle auf die Konstruktion eines Bühnenscheinwerfers.

Oder

„Warum zur Zeit eine LED als Lichtquelle für manche Bühnenscheinwerfer ungeeignet ist.“



**Ergänzung zu
Scheinwerfersysteme**

Vorwort

In der heutigen Zeit werden Optiken für Scheinwerfer mit Rechenprogrammen entwickelt. Diese Programme haben meistens eine graphische Oberfläche ähnlich wie bei CAD Zeichenprogrammen. Diese Programme sind wesentlich genauer als die Ausrechnung von Hand und es geht auch schneller.

Mit derartigen Programmen wurden die Bilder mit den Lichtstrahlen erstellt.

Ähnlich, wie bei einem Zeichenprogramm muß jedoch der Anwender wissen, was er machen möchte. Es ist also ein Grundwissen erforderlich.

In dem Heftchen "Scheinwerfersysteme" ist auf einfache und ich hoffe auch verständliche Weise erläutert, wie ein Gesamtsystem aussieht. Den einen oder anderen Leser interessiert vielleicht mehr; auf welchen Gesetzmäßigkeiten beruht alles.

Mit diesem Anhang versuche ich diese Grundlagen, ohne allzu viele Formeln, jedoch mit Bildern, verständlich zu machen. Ich hoffe, daß mir dies auch gelingt.

Insgesamt hoffe ich, daß sich kaum Fehler eingeschlichen haben. Sollte jedoch ein Leser einen Fehler finden, wäre ich ihm dankbar, wenn er mich darauf hinweisen würde, damit ich ihn beseitigen kann. Freuen würde ich mich auch über Hinweise, wie sich das Eine oder Andere verbessern ließe.

Hans Wörwag
im September 2018

©

Hans Wörwag
(REICHE & VOGEL-B.DELTSCHAFT)

Email: office@revolux.com
Internet: revolux.com

Der Einfluß der Größe und der Leuchtdichte einer Lichtquelle auf die Konstruktion eines Bühnenscheinwerfers.

1) Einleitung

In Theater werden spezielle Scheinwerfer eingesetzt. Diese Bauarten haben sich in vielen Jahren entwickelt, damit sie optimal für den Anwender sind.

Darunter sind mehrere Bauarten, NV-Spiegelscheinwerfer, Linsenscheinwerfer und Scheinwerfer mit abbildender Optik (häufig auch als Profilscheinwerfer bezeichnet) und auch Fluter, zum Beispiel Rampen.

Zu beachten ist hierbei, daß bei den meisten Scheinwerfern, möglichst ohne Nebenlicht, diese auf große Entfernungen eingesetzt werden können, dabei muß noch genügend Licht ankommen, damit die Bühne so ausgeleuchtet werden kann, wie es erforderlich ist.

Abgesehen von NV-Parabolspiegelscheinwerfer und von Fluter **muß der Lichtkegel eines Bühnenscheinwerfers in einem möglichst großen Bereich verstellbar sein!** Ansonsten läßt sich eine Bühne nicht präzise ausleuchten. Zum Beispiel soll ein projiziertes Gobo auch an der richtigen Stelle die richtige Größe haben.

Nachdem sich LEDs als Lichtquelle stark verbreiten, stellt sich technisch und konstruktiv die Frage, welche Scheinwerfertypen für den Bühnenbetrieb auch mit LEDs hergestellt werden können, ohne daß Lichtverluste auftreten oder die Scheinwerfer unhandlich werden.

Dazu ist es erforderlich, die Zusammenhänge von der Größe der Linse und des Leuchtmittels, sowie die Leuchtdichte der Lichtquelle, zu kennen. Ferner ist es wichtig die Auswirkung der Leuchtdichte der Lichtquelle zu kennen. Im Folgenden wird versucht, dies anhand von Zeichnungen zu erläutern.

Empfehlenswert ist es, das Heft „Scheinwerfersysteme - Aufbau und Wirkungsweise“ und dazu den Anhang 1 zu lesen. Das Heft kann kostenlos von unserer Internetseite heruntergeladen werden.

2) Lambert'sches Gesetz

Wird auf einer leuchtenden, **ebenen** Fläche ein beliebiger Punkt ausgewählt, dann hat der Lichtstrahl, der im rechten Winkel (also 90°) zur Fläche ist, die größte Lichtstärke beziehungsweise Intensität. Je kleiner der Winkel wird, zum Beispiel der Lichtstrahl 2, desto mehr nimmt die Intensität ab. Diese Gesetzmäßigkeit hat Herr Johann Heinrich Lambert (geboren am 26. August 1728 und gestorben am 25. September 1777) entdeckt und formuliert.

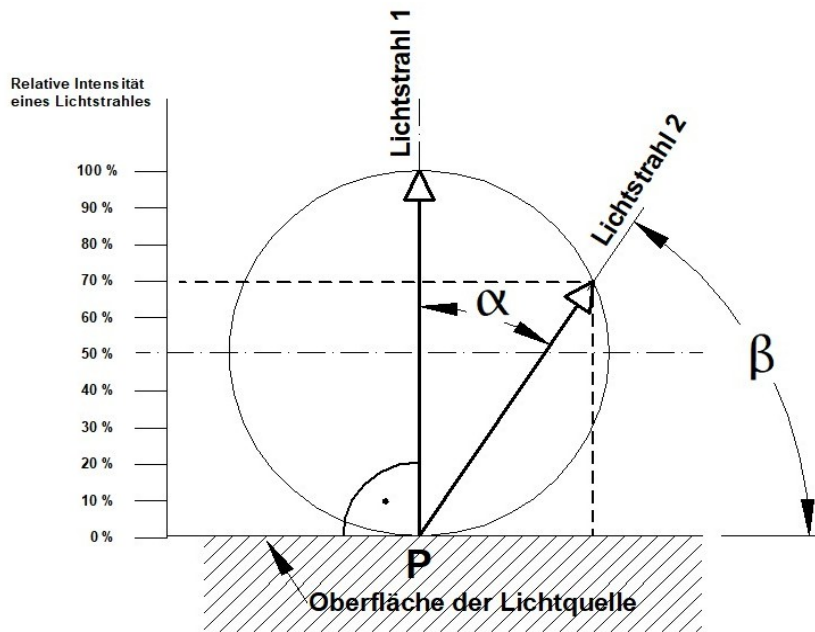


Abbildung 2.1

Beträgt der Winkel $\alpha = 0^\circ$ (der Winkel $\beta = 90^\circ$) besteht die stärkste Lichtintensität und wird in der Abbildung 2.1 mit 100 % angesetzt. Je größer der Winkel α und je geringer der Winkel β wird, desto geringer wird die Lichtintensität. Je nach Wahl des Winkels α oder β handelt es sich um eine Sinus- oder Kosinusfunktion.

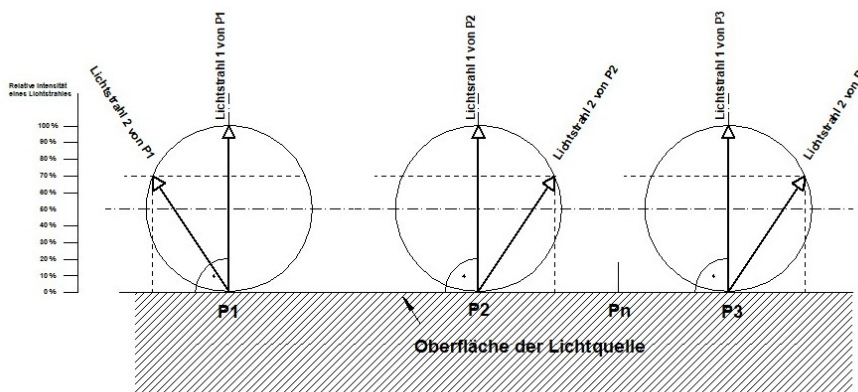


Abbildung 2.2

In Abbildung 2.2 sind 3 Punkte ausgewählt, an jedem Punkt ergibt sich die selbe Verteilungskurve. Im Beispiel sind die Punkte 1 und 3 symmetrisch zum Punkt 2 gewählt.

Die Verteilungskurve gilt für alle, beliebige Punkte P_n auf der Oberfläche.

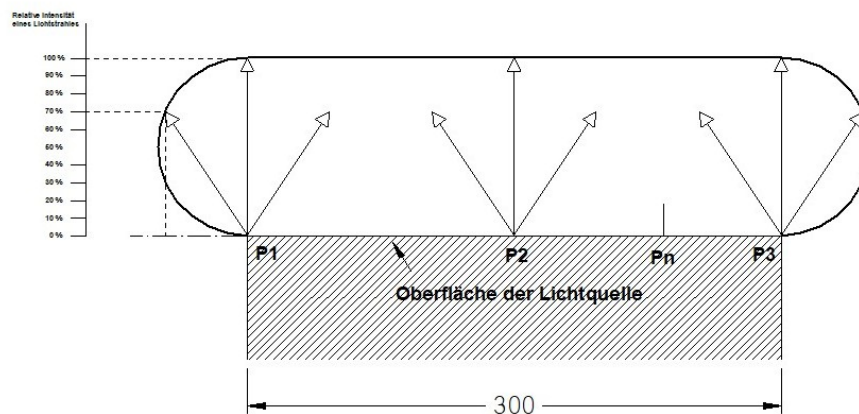


Abbildung 2.3

In Abbildung 2.3 ist die Länge der leuchtenden Fläche mit 300 mm angenommen und die Punkte P_1 und P_3 liegen ganz außen am Rand. P_2 ist wieder in der Mitte. Nun lassen sich alle Maximalwerte verbinden und es entsteht eine Lichtverteilungskurve über die Strecke von 300 mm. Alle, unendlich viele, werden verbunden.

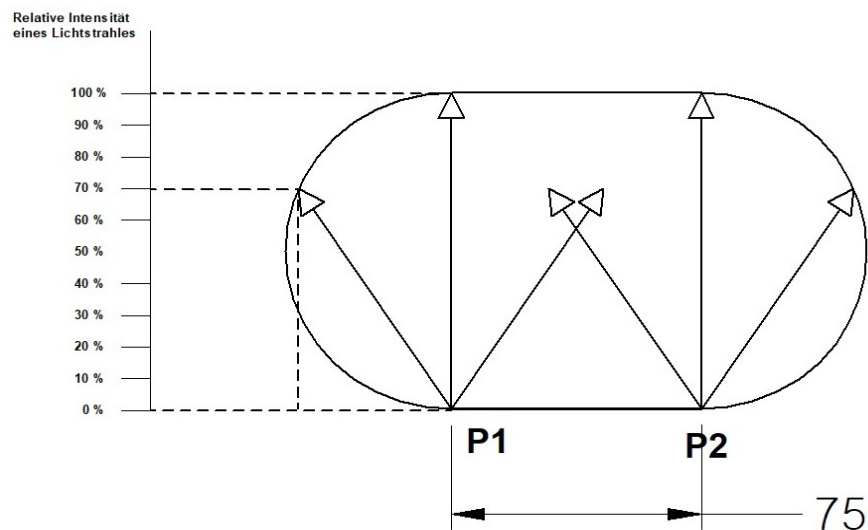


Abbildung 2.4

In Abbildung 2.4 ist die Strecke der leuchtenden Fläche auf 75 mm verkürzt und die Lichtverteilungskurve nähert sich den bekannten Lichtverteilungskurven von Leuchtmitteln.

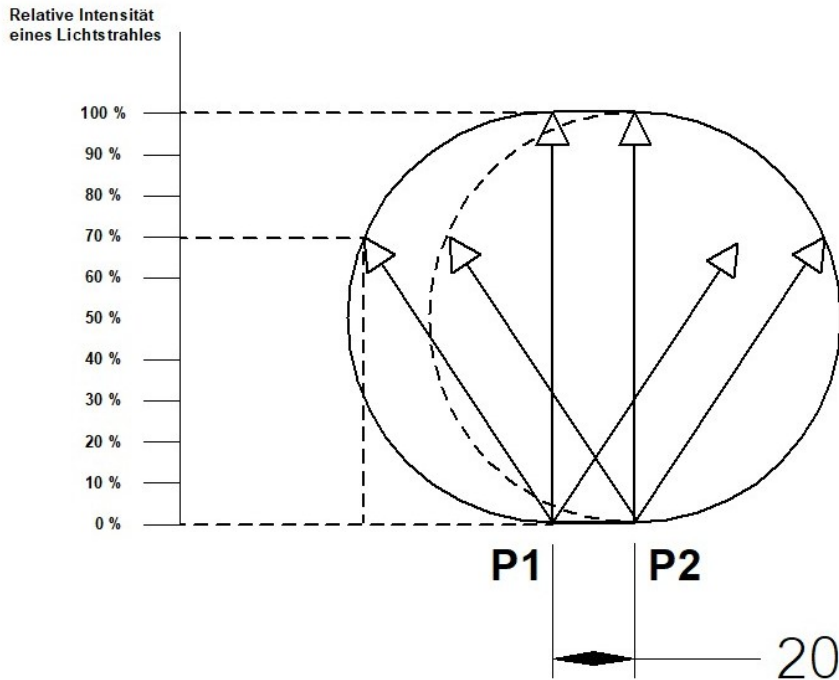


Abbildung 2.5

Und in Abbildung 2.5 entspricht die Strecke einer einseitig gesockelten Halogenlampe 2,5 KW.

Anmerkung: Zwei Pfeile gehen nicht bis zur Kurve der Lichtverteilung. Das liegt daran, daß die zwei Punkte P1 und P2 versetzt sind und deren Kreise ebenfalls. Siehe den gestrichelten Halbkreis vom Punkt P2. Werden sie aufsummiert entsprechen sie den Pfeilen ganz links und ganz rechts.

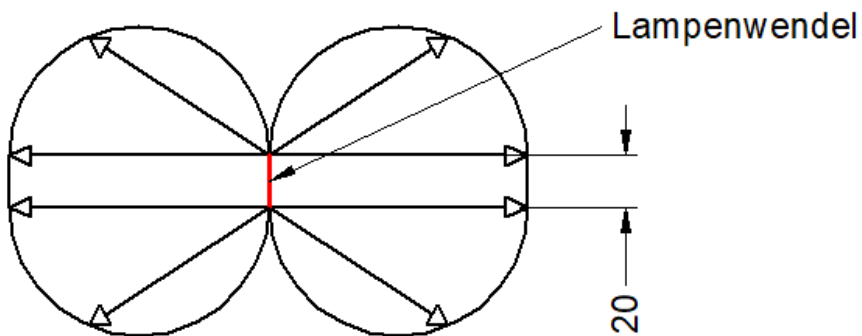


Abbildung 2.6

Wird die Lichtverteilungskurve von Abbildung 2.6 gespiegelt und um 90° gedreht, dann ergibt sich die bekannte, schematische Lichtverteilungskurve einer 2,0 oder 2,5 KW Halogenlampe für Bühnen- und Studioscheinwerfer. Die Lichtverteilungskurve entspricht recht gut einer real gemessenen Lichtverteilungskurve.

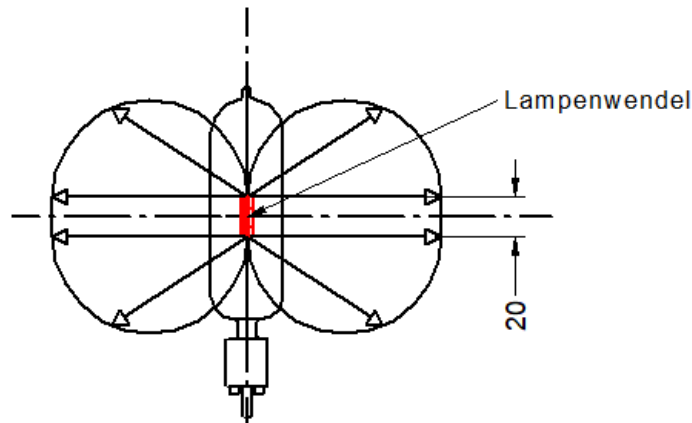


Abbildung 2.7

In Abbildung 2.7 ist das Leuchtmittel, die Halogenlampe 2,5 KW mit der Lichtverteilungskurve dargestellt.

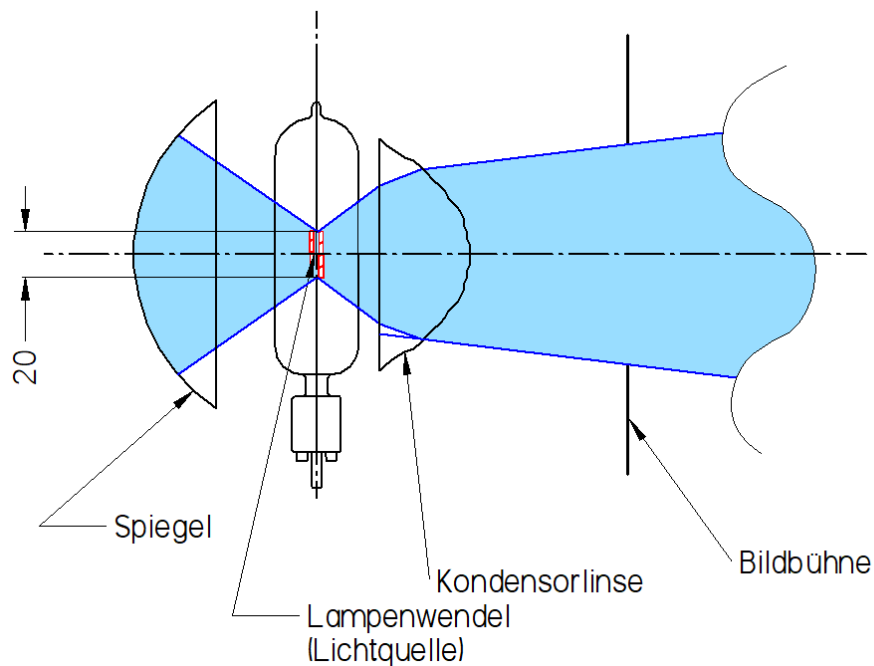


Abbildung 2.8

Und in Abbildung 2.8 ist das gesamte Kondensorsystem mit Kugelspiegel und Bildbühne dargestellt. Also der Teil des Scheinwerfers, der das Licht sammelt und ausrichtet. Rechts von der Bildbühne kommt dann die Abbildungsoptik, siehe Abbildung 3.1, die hier nicht gezeichnet ist.

Die Halogenlampe 2,5 KW für Theater gibt bei Nennleistung 65.000 Lumen ab. Da das Wendel 2 Seiten hat werden davon etwa die Hälfte in Richtung der Kondensorlinse und die andere Hälfte in Richtung des Kugelspiegels abgegeben. Die Hälfte, die in Richtung

des Kugelspiegels abgestrahlt wird, wird vom Kugelspiegel reflektiert und die Lichtstrahlen treffen wieder auf die Fläche des Lampenwendels. Am Kugelspiegel entstehen Verluste. Größere jedoch am Wendel der Lampe. Dort treffen die Lichtstrahlen zum Teil auf das Wendel und werden dort absorbiert; also vernichtet. Bei vorsichtiger Abschätzung, die auch durch Messungen bestätigt wurden, ist mit einem Verlust von etwa 50% zu rechnen. Letztendlich werden die restlichen 50 % in Richtung der Kondensorlinse abgestrahlt. Insgesamt werden also etwa 75% von den 65.000 Lumen in Richtung Kondensator abgestrahlt. Das sind 48.750 Lumen. Die Abmessungen des Wendels sind 20 x 20 mm (Diagonale 28,28 mm) und ergeben eine Fläche von 400 mm² in beiden Richtungen, zum Kugelspiegel und zur Kondensorlinse. Allerdings werden die 48.750 Lumen letztlich in Richtung Kondensatorlinse abgestrahlt, so daß bei dem obigen Aufbau mit Spiegel sich diese auf eine Fläche beziehen lassen. Es ergibt sich somit eine nutzbare Leuchtdichte in Richtung Kondensator von $48.750 \text{ lm} / 400 \text{ mm}^2 = 120 \text{ lm/mm}^2$ (abgerundet).

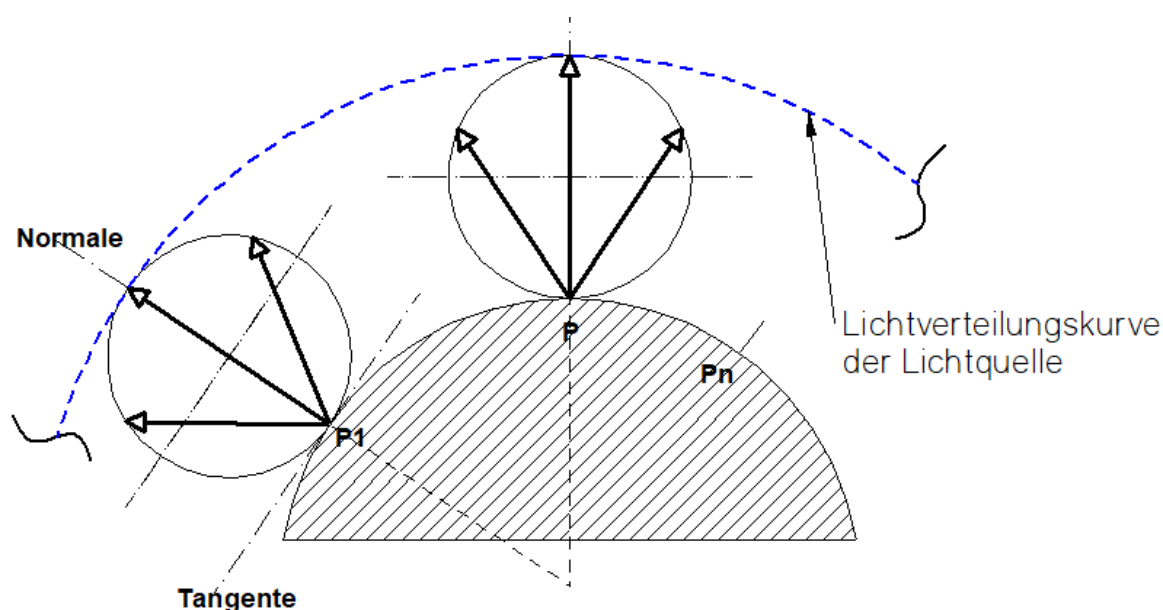


Abbildung 2.9

In Abbildung 2.9 ist schematisch die Lichtverteilung auf einer gekrümmten Fläche dargestellt. Im Beispiel handelt es sich um einen Kreisabschnitt.

3) Strahlengang an der Asphäre (Kondensorlinse) mit einer Halogenlampe 2,5 KW und den Wendelabmessungen 20 x 20 mm.

Die Auswirkungen der „endlichen, realen Größe“ einer Lichtquelle auf den Wirkungsgrad eines Bühnenscheinwerfer, wird hier anhand einer Asphäre (Kondensorlinse) und einer Halogenlampe 2,5 KW mit der Wendelabmessungen 20 x 20 mm erläutert.

Für Theater, aber auch für andere Anwendungsfälle, ist ein typischer und wesentlicher Scheinwerfer, ein Scheinwerfer mit Abbildungsoptik. Mit einem derartigen Scheinwerfer ist es zum Beispiel möglich, den Vorhang im Portal, also Links oder Rechts, der Bühne, dunkel zu halten und gleichzeitig ganz kurz daneben helles Licht zu projizieren. Natürlich betrifft diese Möglichkeit alle Bereiche auf der Bühne. Gleichzeitig ist es auch möglich eine Vorlage, ein Gobo oder Dia, zu projizieren und auch ebenfalls, falls erforderlich abzugrenzen. Diese Geräte werden nach DIN, je nach Konstruktionsart, als Kondensorlinsenscheinwerfer oder Ellipsenspiegelscheinwerfer benannt. Für beide Konstruktionsarten hat sich jedoch der amerikanische Begriff „Profilscheinwerfer“ verbreitet. Scheinwerfer mit sehr engem Lichtkegel und scharfer Abbildung der Bildbühne, werden auch Verfolger genannt.

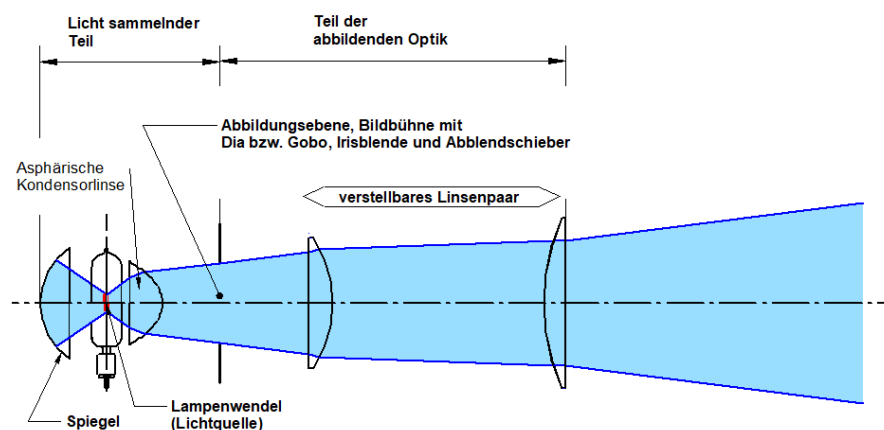


Abbildung 3.1

In Abbildung 3.1 ist ein einfacher, jedoch in der Praxis erfolgreicher, Kondensorlinsenscheinwerfer abgebildet. Die blaue Fläche zeigt jene Fläche, in denen sich Lichtstrahlen und die Strahlen der Abbildung befinden.

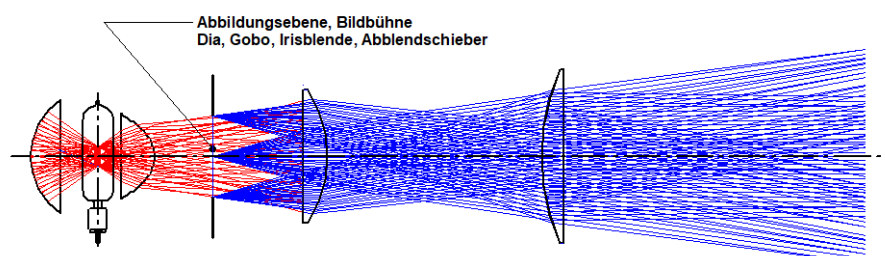


Abbildung 3.2

Dabei handelt es sich um zwei Strahlengänge. Der erste Strahlengang ist „real“, es sind

die Lichtstrahlen des Leuchtmittels, in der Abbildung 3.2 rot und nur bis zur ersten Linse dargestellt. Der zweite Strahlengang ist „virtuell“ und es handelt sich dabei um den Strahlengang der Abbildungsoptik. Dieser Strahlengang beginnt auf der Bildbühne und ist in Abbildung 3.2 blau dargestellt.

Um eine scharfe Abbildung zu erhalten müssen sich für jeden beliebigen Punkt auf der Bildbühne (Dia) der Lichtstrahl (rot) und der Strahl der Abbildungsoptik (blau) auf der Leinwand, also im projizierten Bild, genau treffen. Näheres wird in dem Heft „Scheinwerfersysteme - Aufbau und Wirkungsweise“ erläutert.

Im Folgendem wird der Strahlengang von der Lichtquelle bis zur Bildbühne betrachtet um daraus Hinweise für den Wirkungsgrad des Scheinwerfer zu erhalten.

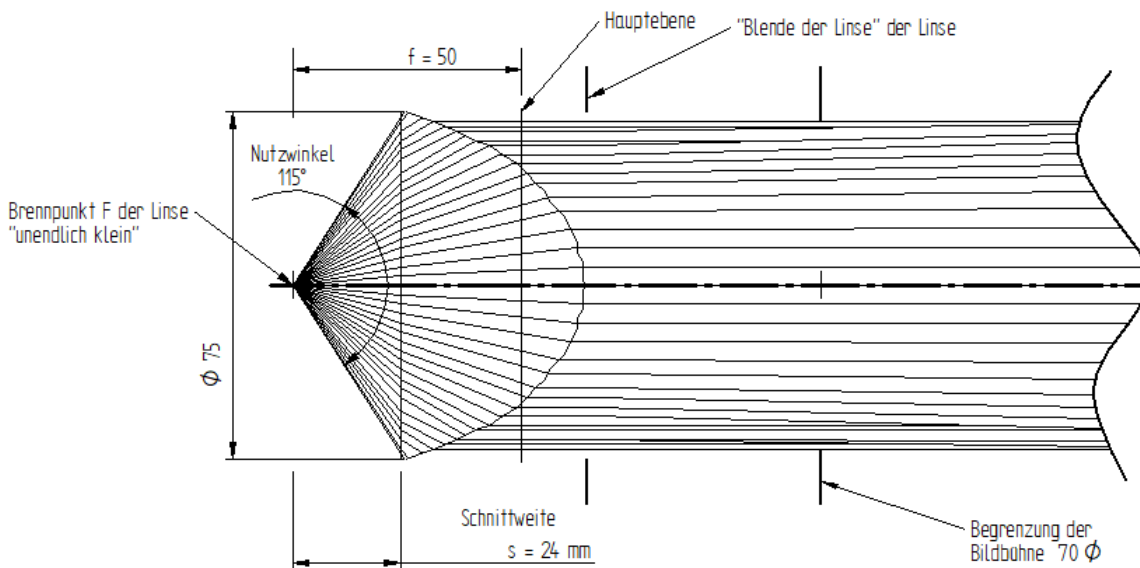


Abbildung 3.3

In Abbildung 3.3 ist in „üblicher“ Weise der Strahlengang einer Asphäre wiedergegeben. Dabei ist die Lichtquelle „unendlich“ klein, also in der Zeichnung ein Punkt.

In Wirklichkeit gibt es keine „unendlich“ kleine Lichtquelle. Jede Lichtquelle hat eine endliche Größe. Wie sich diese auswirkt, wird nun erläutert. Im Folgenden wird immer die selbe Asphäre den Zeichnungen zu Grunde gelegt. Damit werden die Abbildungen leichter vergleichbar. In Abbildung 3.3 wird der Winkel mit den Lichtstrahlen, die von der Linse erfaßt werden, als Nutzwinkel bezeichnet. Im Folgenden wird dieser Ausdruck beibehalten. Der Nutzwinkel ist ein relativer Vergleichswert. Entsprechend der Gesetzmäßigkeit der Lambertschen Verteilung muß die Art der Strahlenverteilung mit betrachtet werden

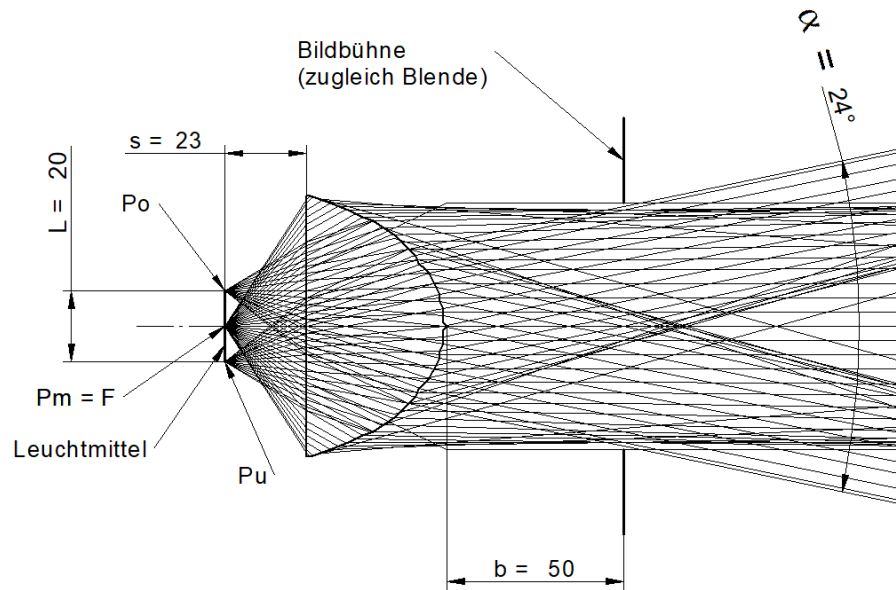


Abbildung 3.4

In Abbildung 3.4 wird nun anstatt dem unendlich kleinen Punkt, eine Halogenlampe 2,5 W mit einer Wendelabmessung von 20 x 20 mm (Diagonale 28,28 mm) als Lichtquelle verwendet. Nun ergibt sich ein ganz anderes Bild. Viele Lichtstrahlen sind plötzlich streuend und nicht mehr parallel zur optischen Achse, obwohl die Lichtquelle zentriert im Brennpunkt der Linse steht. Die Lichtstrahlen, die vom dem Punkt Pm, also dem Brennpunkt der Linse und Mittelpunkt der Lichtquelle, entsprechen der Abbildung 3.3. Das ist zu erwarten. Die Strahlen von den Endpunkten Po und Pu der Linse weichen von der optischen Achse erheblich ab und streuen nach unten oder oben.

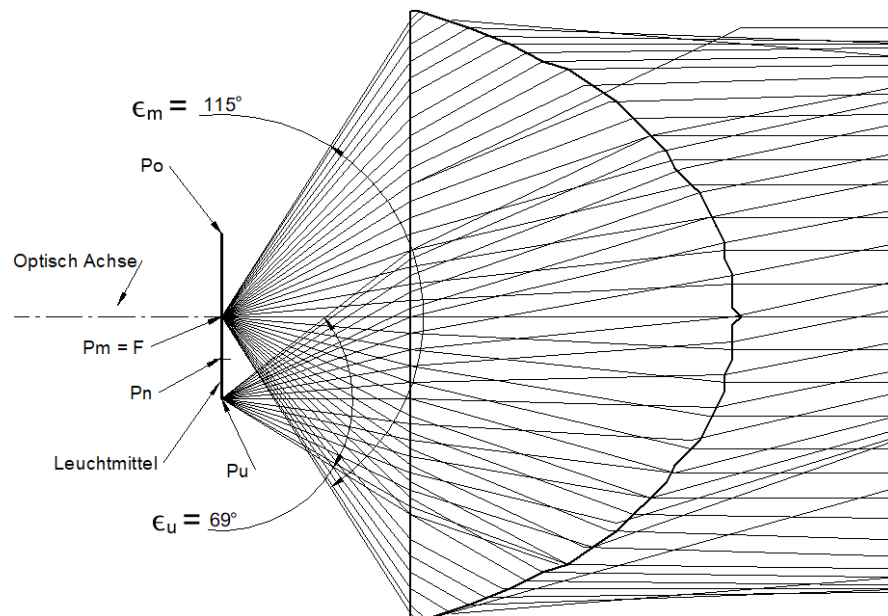


Abbildung 3.5

Damit die Abbildung 3.5 übersichtlicher wird, wurden die Lichtstrahlen, die vom Punkt Po ausgehen weggelassen. Sie entsprechen jener Lichtstrahlen die vom Punkt Pu ausgehen,

wenn die Lichtstrahlen von Pu an der optischen Achse gespiegelt werden.

Der Nutzwinkel der Lichtstrahlen, die von Pu ausgehen werden hier mit ϵ_u bezeichnet. Dieser Winkel wird durch die Blende/Bildbühne begrenzt. Siehe dazu Abbildung 3.5. Wird der Abstand zwischen der Linse und der Blende / Bildbühne verkürzt, wird ϵ_u größer. Wird der Abstand vergrößert, wird ϵ_u kleiner. Durch diese Änderungen verändert sich auch der Winkel aller Lichtstrahlen nach der Blende und dieser beeinflusst die Auslegung der abbildenden Optik aus. Damit diese nicht zu groß wird, sollte normalerweise der Lichtkegel nach der Bildbühne möglichst eng bleiben. Ansonsten können sich größere Lichtverluste durch die abbildende Optik entstehen.

Zu beachten ist, daß die Blende / Bildbühne Lichtstrahlen ausblendet, die dann „verloren“ sind.

In diesem Heft wird auf diesen Zusammenhang nur hingewiesen.

Auffallend ist, daß in dem Beispiel der Nutzwinkel ϵ_m in der Mitte 115° beträgt und außen der Nutzwinkel ϵ_u nur noch 69° ! Er sinkt also von 100% um 40% auf 60% ab!

Aus Abbildung 3.5 ergibt sich, daß in der Mitte der Lichtquelle sich der größte Nutzwinkel ergibt. Wird ein beliebiger Punkt Pn betrachtet, der von der Mitte nach außen, also von Pm nach Po oder Pu wandert, dann nimmt der Nutzwinkel ab. Daraus ergibt sich, daß eine Lichtquelle möglichst klein sein muß, um an der Asphäre einen möglichst großen Wirkungsgrad zu erzielen.

Andererseits genügt eine kleine Lichtquelle alleine noch nicht, sie muß auch möglichst viel Licht erzeugen, also Lumen. Genauer ausgedrückt, die Leuchtdichte - Lumen/mm² - muß möglichst hoch sein.

Anmerkung:

Bei den meisten elektrisch betriebenen Leuchtmittel kann die Leuchtdichte durch eine Spannungserhöhung ebenfalls erhöht werden, dabei nimmt auch die Eigentemperatur des Leuchtmittels zu. Allerdings sinkt dann die Lebensdauer. Bei einer zu großen Spannungserhöhung ist deshalb das Leuchtmittel sofort zerstört. Früher wurde diese Möglichkeit manchmal benutzt um einen Blitz auf der Bühne zu erzeugen. Dazu wurde an eine NV-Lampe eine hohe Spannung angelegt, so daß die Lampe unter Abgabe eines Blitzes explodierte.

Gegenüber einer Spannungserhöhung sind Glühlampen weniger empfindlich als LEDs. LEDs sind, wie alle elektronische Bauteile, gegenüber einer Übersteigerung der Nennspannung sehr empfindlich.

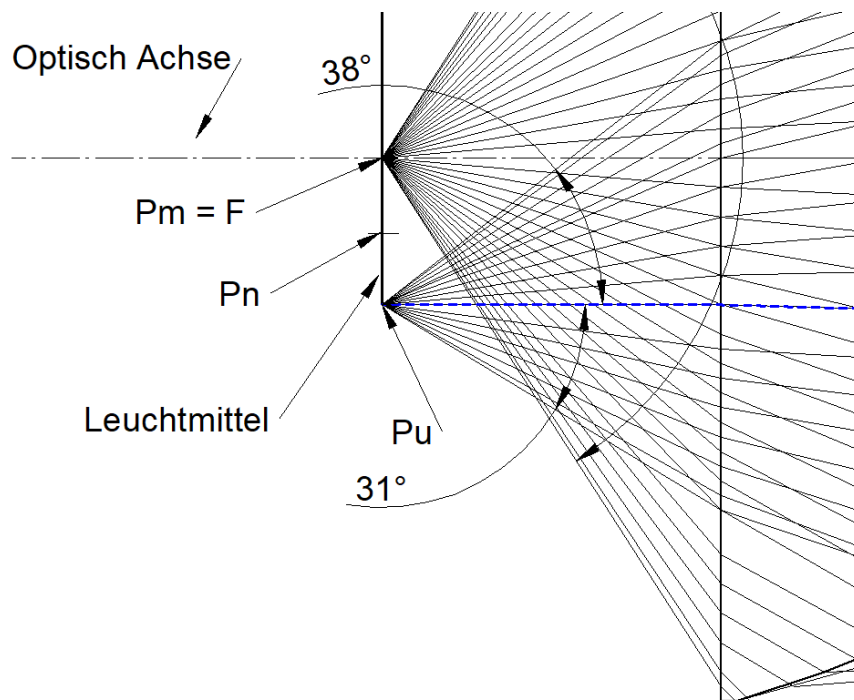


Abbildung 3.6

In Abbildung 3.6 sind die Lichtstrahlen, die vom Punkt P_u ausgehen und von der Linse erfaßt werden, etwas deutlicher dargestellt. Die blaue, gestrichelte Linie verläuft parallel zur optischen Achse der Linse. Der Lichtstrahl in dieser Richtung hat wiederum 100 % Intensität, die anderen Lichtstrahlen nehmen entsprechend des Lambert'schen Gesetzes ab. (In der Zeichnung sind diese Strahlen länger, aber die Intensität nimmt entsprechend dem Lambert'schen Gesetz ab.)

Der Lichtkegel nach der Bildbühne, Abbildung 3.4 Winkel α , läßt sich leicht beeinflussen. Wie schon erläutert durch Verschieben der Bildbühne; aber auch durch Verändern des Abstandes s , also der Lichtquelle zur Asphäre. (siehe Abbildung 3.4) Wird der Abstand s vergrößert, dann wird eine Abbildung im „endlichen“ erzeugt.

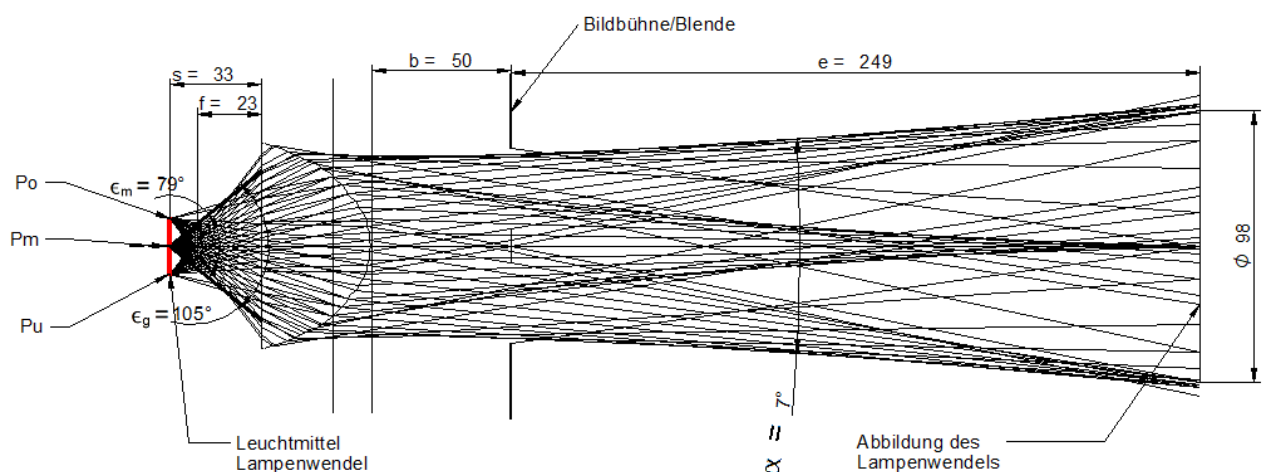


Abbildung 3.7

Gegenüber der Abbildung 3.4 wurde in der Abbildung 3.7 der Abstand s von der

Lichtquelle zur Asphäre um 10 mm auf 33 mm erhöht. Entsprechend dem optischen Gesetz ergibt sich nun eine Abbildung; das Lampenwendel wird abgebildet. Der Lichtkegel nach der Blende hat sich durch die Vergrößerung von s auf $\alpha = 7^\circ$ verringert. Allerdings haben sich auch die Nutzwinkel verändert.

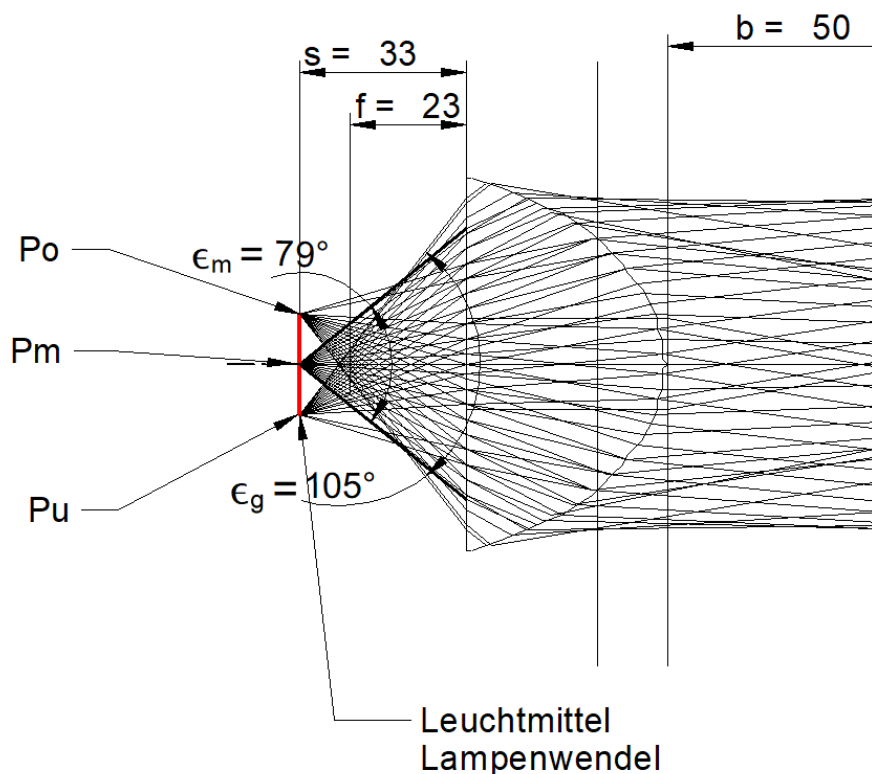


Abbildung 3.8

Abbildung 3.8 zeigt einen Ausschnitt von der Abbildung 3.7. Der Nutzwinkel ϵ_m entsteht durch die Lichtstrahlen von P_m . Diese sind die „stärksten“ und wurden um 36° von 115° auf 79° verringert. Das entspricht ca. 31 % ! Allerdings erreichen nun mehr Lichtstrahlen von P_u und P_o die Asphäre. Diese Strahlen sind jedoch, wie schon dargelegt wurde und aus Abbildung 3.8 ersichtlich ist, wesentlich schwächer. Insgesamt gleichen sie den Verlust von ϵ_m etwas aus, jedoch bei weitem nicht vollständig! Der Nutzwinkel aller Strahlen entspricht $\epsilon_g = 105^\circ$.

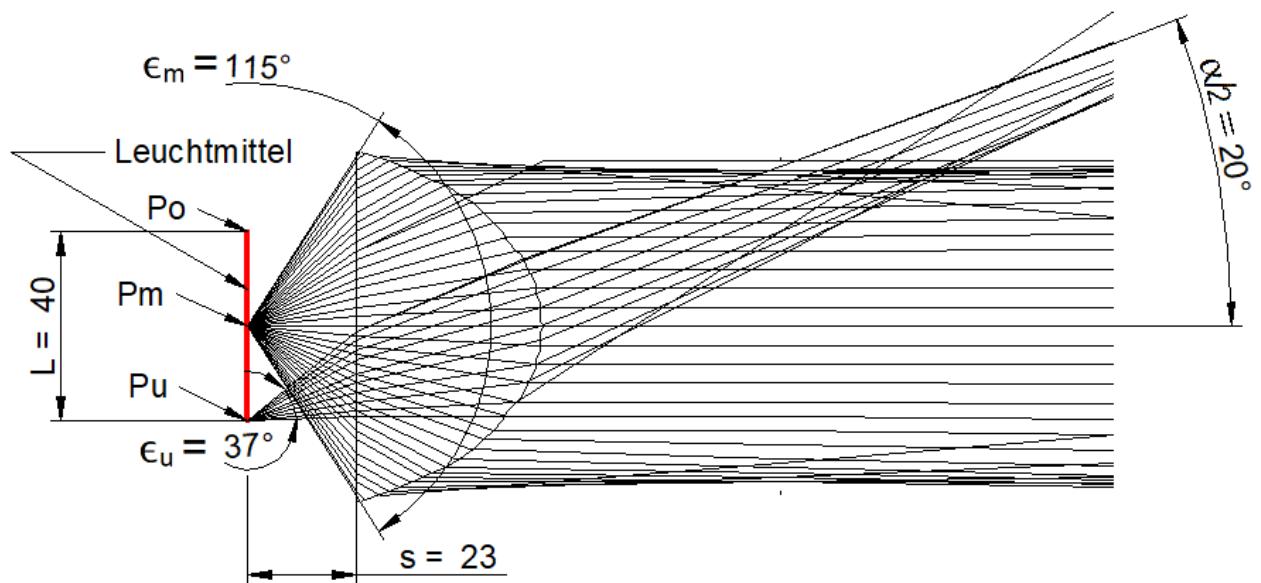


Abbildung 3.9

Um den Zusammenhang besser zu verdeutlichen wurde in der Abbildung 3.9 die Größe der Lichtquelle von 20 mm auf 40 mm verdoppelt und im Brennpunkt belassen. Deutlich wird, daß je größer der Abstand von Pu zu Pm wird, desto mehr nimmt der Nutzwinkel von Pu ab und die Lichtstrahlen werden schwächer.

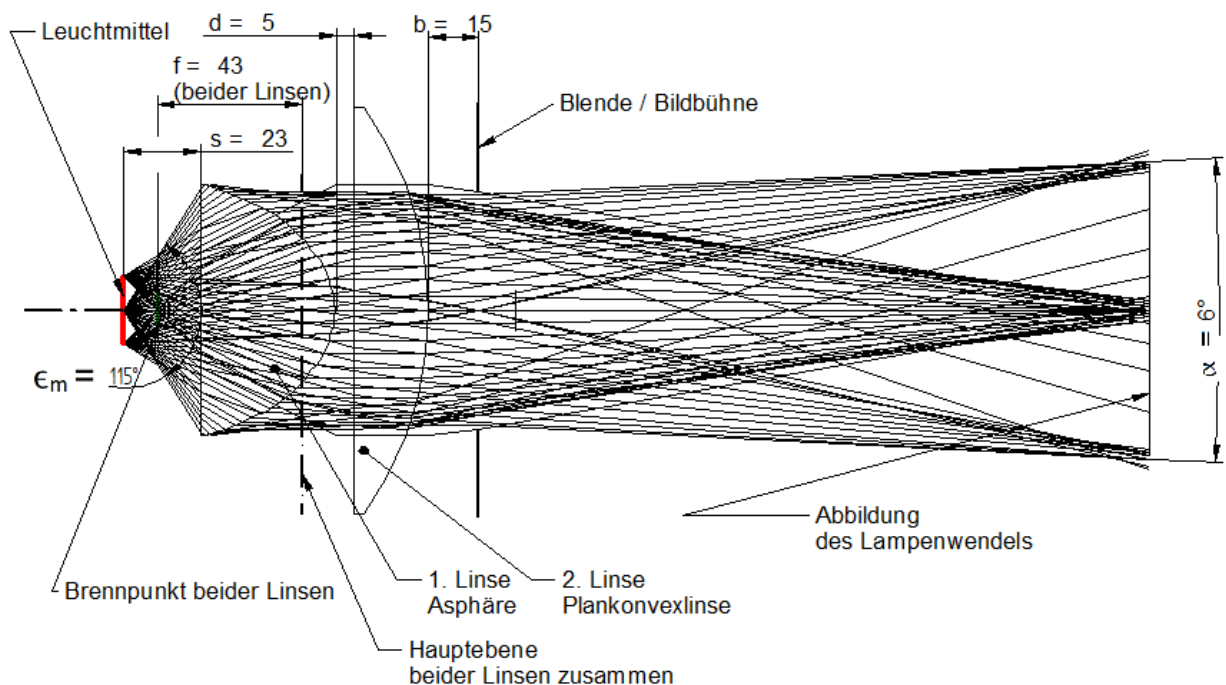


Abbildung 3.10

Abschließend wird hier noch in Abbildung 3.10 aufgezeigt, daß durch eine zusätzliche

Linse, im Beispiel eine Plankonvexlinse, sich der Lichtkegel, Winkel α , nach dem Licht sammelnden System ebenfalls verringern läßt. Um die Abbildungen sinnvoll vergleichen zu können, wurde die Lichtquelle im Brennpunkt der Kondensorlinse belassen und nicht in den gemeinsamen Brennpunkt beider Linsen gestellt. Der Winkel α hat sich nun auf 6° verringert. Und der Winkel ϵ_m ist wieder bei 115° . Dieses Licht sammelnde System hat demnach einen recht hohen Wirkungsgrad und läßt sich leicht an eine abbildende Optik anpassen.

Es lassen sich auch mehrere Linsen anwenden. Diese „schlucken“ jedoch durch Reflexion und Absorption immer etwas Licht. Wesentlich dürfte sein, daß sich die Plankonvexlinse aus Abbildung 3.10 auch nach der Bildbühne/Blende sinnvoll anbringen läßt. Sie sollte dann so im Scheinwerfer eingebaut sein, daß sie sich nicht verschieben läßt. Dazu muß die Bildbühne mit der Plankonvexlinse vertauscht werden.

Die Asphäre hat eine Brennweite von 50 mm und die Plankonvexlinse von 200 mm. Der Abstand beträgt 5 mm und es ergibt sich eine Gesamtbrennweite $f = 43,4$ mm.

In diesem Kapitel wurde erläutert, daß der Wirkungsgrad eines Licht sammelnden Systems von der Brennweite des optischen Mittels, in den Beispielen eine asphärische Kondensorlinse, und der Größe des Leuchtmittels, sowie der Größe des optischen Mittels, also im Beispiel der Kondensorlinse abhängig ist.

Dies trifft allgemein zu, wird in der Abbildung 3.11 anhand eines Parabolspiegels kurz dargestellt. Dies läßt sich genauso auf einen Ellipsenspiegel übertragen. Der Leser möge sich eine Vergrößerung der Lichtquelle selber vorstellen.

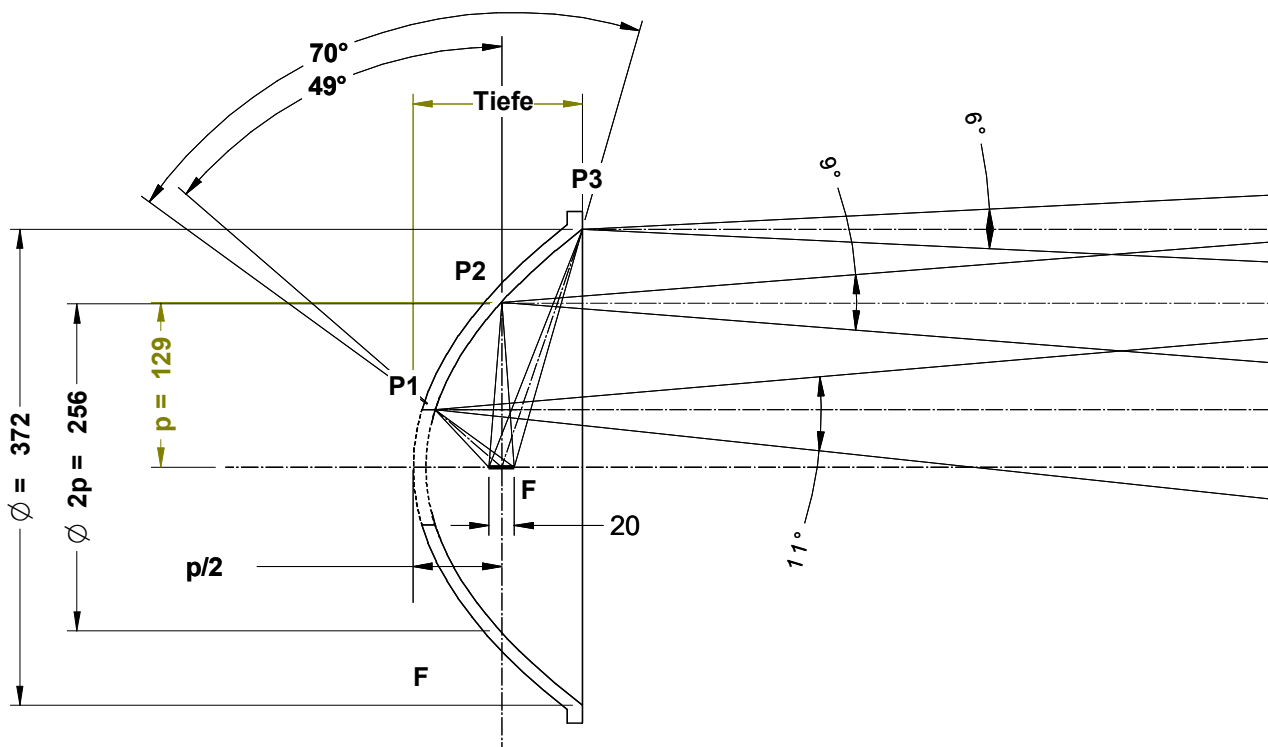


Abbildung 3.11

In diesem Kapitel wurde erläutert, daß der Wirkungsgrad eines Licht sammelnden Systems von der Brennweite des optischen Mittels und in den Beispielen eine asphärische

Kondensorlinse, und der Größe des Leuchtmittels, sowie der Größe des optischen Mittels, also im Beispiel der Kondensorlinse abhängig ist.

Dies trifft allgemein zu, wie in der Abbildung 3.11 anhand eines Parabolspiegel-Scheinwerfers zu sehen ist. Offensichtlich läßt sich bei der Verwendung eines Spiegels als Licht sammelndes Bauteil, eine LED als Lichtquelle nicht verwenden, da der erforderliche Kühlkörper zuviel vom Spiegel reflektiertes Licht absorbieren, also vernichten würde.

Je größer die Lichtquelle bei F wird, desto größer wird die Streuung des Parabolspiegelscheinwerfers bei konstanter Spiegelgröße, oder auch umgekehrt.

(Näheres siehe auch das Heft „Scheinwerfersysteme - Aufbau und Wirkungsweise“.)

4) Ergebnis

- 1. Aus dem Lambert'schen Gesetz (Kapitel 2) ergibt sich, daß sich der stärkste Lichtstrahl eines beliebigen Punktes auf der Oberfläche einer Lichtquelle immer im rechten Winkel zur Oberfläche der Lichtquelle ergibt und die davon abweichenden Lichtstrahlen an Stärke beziehungsweise Intensität abnehmen. (Auf einer gekrümmten Oberfläche ist die Tangente beziehungsweise Normale in dem betrachteten Punkt zu nehmen.)**
- 2. Aus Kapitel 3) ergibt sich, daß sich der stärkste Lichtstrahl immer in der Mitte der Lichtquelle befindet. (Bei zur optischen Achse zentrierter Anordnung.) Sämtliche Lichtstrahlen der Lichtquelle nehmen mit zunehmender Entfernung ihres Ursprungs P_n vom Mittelpunkt der Lichtquelle an Intensität ab. Diese Zusammenhänge sind unabhängig von der Leistung der Lichtquelle.**
- 3. Die oben genannte Zusammenhänge sind unabhängig von der Leuchtdichte, umgekehrt ebenfalls. Je höher die Leuchtdichte ist, desto mehr Licht wird von dem Kondensor verarbeitet und die Beleuchtungsstärke des Scheinwerfers nimmt entsprechend zu. Dieser Zusammenhang ist linear.**

Wie schon erläutert ergibt sich für eine Halogenlampe 2,5 KW eine nutzbare Leuchtdichte von $48.750 \text{ lm} / 400 \text{ mm}^2 = 120 \text{ lm/mm}^2$ (abgerundet).

Eine LED mit 30 mm Durchmesser gibt 7.600 Lumen ab, bei einer elektrischen Leistung von 120 Watt. (Stand 2015). Die LED hat eine Fläche von $706,5 \text{ mm}^2$ und demnach eine Leuchtdichte von $7.600 \text{ lm} / 700 \text{ mm}^2 = 10,86 \text{ lm/mm}^2$ und gerundet 11 lm/mm^2 .

Das Verhältnis zur Halogenlampe beträgt also:

$\text{Halogenlampe} / \text{LED} = 120 \text{ lm/mm}^2 / 11 \text{ lm/mm}^2 = 10,9 / 1$. Bei einem Einbau der LED mit 30 mm Durchmesser in einen Kondensorlinsenscheinwerfer mit einem Kondensor dessen Größe dem hier dargestellten entspricht, würde etwa 1/10 Licht aus dem Scheinwerfer herauskommen, im Vergleich zur Verwendung einer Halogenlampe 2,5 KW.

Würde diese LED mit 30 mm Durchmesser in einen vorhandenen Scheinwerfer mit einem Kondensorsystem eingebaut, wäre der Wirkungsgrad katastrophal. Es würden nur noch etwa 10% Licht im Vergleich zu einer Halogenlampe 2,5 KW erzielt. Durch eine andere Konstruktion läßt sich dieses Verhältnis kaum ändern.

Falls mit einer LED ebenfalls 48.750 Lumen erzielt werden sollten, wäre etwa eine Fläche von $48.750 \text{ [lm]} / 10,9 \text{ [lm / mm}^2\text{]} = 4.431,8 \text{ [mm}^2\text{]}$, also rund 4.400 mm^2 erforderlich. Das entspricht einem Quadrat von $66,3 \times 66,3 \text{ mm}$ oder einem Kreis mit einem Durchmesser von $74,85 \text{ mm}$, also ca. 75 mm . Da die Fläche im Quadrat zunimmt ist nun die erforderliche LED seitlich, im Schnitt betrachtet, nicht 10 x größer sondern an den Kanten eines Quadrats gemessen „nur noch“ $66,3 \text{ mm} / 20 \text{ mm} = \text{etwa } 3,3 \text{ mal größer}$.

Der elektrische Verbrauch wird durch das Flächenverhältnis abgeschätzt. Also $4.400 \text{ [mm}^2\text{]} / 700 \text{ [mm}^2\text{]} = 120 \text{ Watt]} / x$ und ergibt $x = 754 \text{ Watt}$. Also etwa 750 Watt . Die Ersparnis gegenüber der Halogenlampe sind somit etwa 1.750 Watt , also 70% .

Ein herkömmlicher Bühnenscheinwerfer mit abbildender Optik und mit LED würde demnach etwa 3,3 mal größer sein müssen, um vergleichbare, lichttechnische Werte zu erreichen und würde etwa 70% Strom einsparen!

Als Beispiel wird ein herkömmlicher Kondensorlinsenscheinwerfer mit für eine Halogenlampe $2,5 \text{ KW}$ und einem Öffnungswinkel von 11° bis 30° betrachtet. Mit der Halogenlampe ist er etwa 800 mm lang und etwa 300 mm breit. Daraus würde mit einer LED ein unhandlicher Scheinwerfer, mit einer Länge von etwa 2.640 und einer Breite von 990 mm werden! Ein derartiges Gerät ist nicht verwendbar.

(Da die Kondensorlinse größer sein müsste wird auch die Bildbühne größer. Aus dem optischen Gesetz $b/B = f/e$ ergibt sich dann bei gleich großer Abbildung und gleicher Entfernung eine entsprechend längere Brennweite f .)

Da in allen Abbildungen ein Kondensator üblicher Größe und immer der selbe Kondensator verwendet wurde, trifft der Vergleich zu.

Allerdings lassen sich bei LEDs als Lichtquelle Kunststofflinsen verwenden, da das Licht kaum einen Infrarotanteil hat und deshalb auch manchmal als „kaltes Licht“ bezeichnet wird. Mit feinen Stufenlinsen aus Kunststoff lassen sich bei LEDs ein geeigneter Kondensator aufbauen. Trotzdem wird das Gerät zwangsläufig größer. Siehe hierzu auch das Heft „Scheinwerfersysteme - Aufbau und Wirkungsweise“.

Anmerkung zur Klarstellung:

Es gibt sogenannte „Beamer“, LED-Scheinwerfer, der aus vielen LEDs aufgebaut ist und mitunter ebenfalls relativ enge Lichtkegel erzeugt. Mit diesen Geräten kann jedoch nichts abgebildet werden, sie sind also nicht vergleichbar.

LEDs sind für Fluter, Horizontleuchten und Rampen gut geeignet. Bei diesen Leuchten lassen sich auch leicht Geräte herstellen, die eine Farbveränderung, also eine „Farbmischung“ ermöglichen.

Für Bühnenscheinwerfer mit abbildende Optik kann anstatt einer Halogenleuchte auch eine Entladungslampe, zum Beispiel eine Halogenmetaldampflampe („HMI“ Warenzeichen von Osram) verwendet werden. Allerdings benötigt ein derartiger Scheinwerfer ein Zünd- und Vorschaltgerät, sowie einen elektromechanischen Verdunkler, da sich die Helligkeit einer derartigen Lampe nicht von 0% bis 100% in ihrer Helligkeit steuern lässt. Im Vergleich zu einem Scheinwerfer mit Halogenlampe als Lichtquelle entstehen zusätzlich sehr hohe Kosten für den Scheinwerfer. Darüber hinaus weicht die Farbtemperatur einer

Halogenmetaldampflampe vom menschlichen Empfinden erheblich ab und deshalb müssen häufig Filter verwendet werden, die ihrerseits Licht „kosten“. Der Lichtverlust durch einen Filter kann leicht 50% erreichen.

Es ist naheliegend, aber trotzdem möchte ich darauf hinweisen, daß die Vorgehensweise, die hier anhand einer Kondensorlinse erläutert wurde, für jede Linse im gesamten optischen Aufbau eines Scheinwerfers erforderlich ist, um ein Optimum zu erreichen. Beim abbildenden Teil des System sind sowohl die realen Strahlen des Lichtes als auch die virtuellen Strahlen des optisch abbildenden Teiles zu untersuchen. Im Normalfall wird eine Konstrukteur parallel zu den eher theoretischen Untersuchungen dazu auf einer optische Bank praktische Untersuchungen durchführen.

Es wurden die grundlegenden Zusammenhänge erläutert, die für die Konstruktion eines Scheinwerfers mit abbildender Optik bestehen. Dabei stellte sich heraus, daß zur Zeit nicht bei allen Bühnenscheinwerfer eine Halogenlampe durch eine LED ersetzt werden kann. Dazu ist die Leuchtdichte einer LED einfach zu niedrig. In vielen Fällen ist auch die Verwendung einer Entladungslampe nicht angebracht. Dazu möge der Leser sich eine kleine Bühne, zum Beispiel eine Schulbühne oder Vereinsbühne vorstellen. Die Kosten wären viel zu hoch und die erforderliche Zündspannung und der hohe UV-Anteil im Licht beim Umgang der Geräte zu gefährlich. Personen, die keine passende Ausbildung haben, sollten deshalb solche Geräte nicht einsetzen, insbesondere keine Jugendliche.