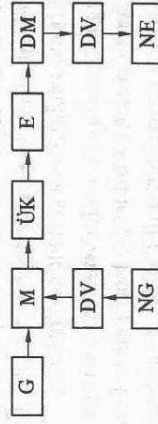


men. Diese Vorgänge werden als Modulation und Demodulation bezeichnet. Häufig soll die Nachricht nur einen bestimmten Empfängerkreis erreichen, andere Empfänger sollen durch das Aussenden der Nachricht nach Möglichkeit nicht einmal gestört werden. Das kann man durch „Adressieren“ des Trägers erreichen; z. B. durch die Auswahl einer bestimmten Frequenz der Trägerwelle. Diese wird dann nur von *den* Empfängern aufgenommen, die ihre Empfangsstation auf diese Trägerfrequenz eingestellt haben. Das ganze Übertragungssystem besteht dann im wesentlichen aus den in Fig. (11-53) dargestellten Komponenten:



G = Generator
 M = Modulator
 ÜK = Übertragungskanal
 E = Empfänger
 DV = Daten-Verarbeitung
 DM = Demodulator
 NG = Nachrichtengeber
 NE = Nachrichtenempfänger

Fig. (11-53) Block-Schaltbild eines Nachrichten-Übertragungssystems.

Der Generator G erzeugt einen adressierbaren Träger, dem im Modulator M eine vom Nachrichten-Geber NG bereitgestellte und in der Daten-Verarbeitung DV passend umformulierte Nachricht aufgeprägt wird. Der Träger transportiert diese Nachricht durch den Übertragungskanal ÜK zu einem von der Adresse angesprochenen Empfänger E, der den Träger oder einen Teil des Trägers aufnimmt und ihm im Demodulator DM die Nachricht entnimmt. Nach geeigneter Daten-rückverarbeitung DV (Rück-Übersetzung) kann diese dem Nachrichten-Empfänger NE ausghändiggt werden.

Dieses einfachste Schema einer Nachrichten-Übertragung läßt sich auf die verschiedensten Übertragungssysteme anwenden: Es gilt für die klassischen Systeme der Nachrichten-Übertragung durch Läufer oder durch Brieftauben ebenso wie für die moderneren Systeme der Übertragung durch elektrische Ströme oder durch elektromagnetische Wellen. An alle Systeme werden vor allen Dingen drei Forderungen gestellt.

- 1) Das Adressier-Verfahren soll hinreichend sicher und selektiv sein, damit die Nachricht auch bei hohem Verkehrs-Aufkommen sicher das gewünschte Ziel erreicht.

11.6. Wellen als Nachrichtenträger. Modulation von Wellen

Schallwellen und ganz besonders elektromagnetische Wellen haben die Eigenschaft, sich außerordentlich schnell durch den Raum zu bewegen. Seit eh und je haben daher Menschen versucht, Schallwellen und elektromagnetische Wellen als Träger für Nachrichten zu benutzen. Dazu ist es notwendig, dem Träger auf der Senderseite die Nachricht aufzuprägen und sie auf der Empfängerseite wieder abzuneh-

- 2) Das Modulations-Verfahren muß sicherstellen, daß die im Übertragungskanal auf den Träger einwirkenden Störungen die Nachricht nicht unleserlich machen.
- 3) Das Modulations-Verfahren soll es ermöglichen, daß über ein- und denselben Kanal in möglichst kurzer Zeit möglichst viele Nachrichten übertragen werden können.

Die Nachrichtentechnik gehört zu den technischen Disziplinen, die – im Gegensatz etwa zur Technik der Musik-Instrumente oder zur Technik des Otto-Motors – noch voll im Fluß sind. Wir sind im Rahmen dieser ersten „Einführung in die Physik“ auch nicht entfernt in der Lage, auf diese interessanten gegenwärtigen Entwicklungen im Detail einzugehen. Hier sei jedoch jedenfalls die physikalische Grundlage der Modulations-Technik etwas näher erläutert.

Die ältesten und zugleich auch die modernsten Modulations-Verfahren sind die sog. Puls-Verfahren. Die Nachricht wird in die Form einer Folge von Pulsen (Kurzzeichen) gebracht, als solche übertragen und auf der Empfängerseite entschlüsselt. Seit altersher benutzt man dabei bevorzugt eine „binäre Codierung“, das bedeutet, jeder einzelne Puls enthält nur eine „ja“-„nein“-Entscheidung. Der Unterschied zwischen „ja“ und „nein“ kann dabei auf verschiedene Weise ausgedrückt werden. Z. B. kann man die Länge des Pulses dazu heranziehen: Kurz bedeutet „ja“, lang bedeutet „nein“. Dieses Verfahren wird im Morse-Alphabet angewandt, in dem jeder Buchstabe des Alphabets in eine Folge von maximal vier solchen entweder kurzen oder langen Pulsen übersetzt wird. Eine andere Möglichkeit besteht darin, „ja“ durch einen vorhandenen, „nein“ durch einen nicht vorhandenen Puls auszudrücken. So bedeutet z. B. in der Seefahrt: *Ein* kurzer Puls aus der Dampfpeife oder Sirene: Ich richte meinen Kurs nach Steuerbord; *Zwei* kurze Pulse aus der Dampfpeife oder Sirene: Ich richte meinen Kurs nach Backbord. Dabei kommt – genau genommen – dem ersten Puls nur die Bedeutung zu: Achtung, ich gebe ein Kurs-Signal. Erst das Vorhanden- oder Nichtvorhandensein des zweiten Pulses sagt: Ich gehe nach Backbord oder ich gehe nach Steuerbord.

Der große Vorteil dieser Puls-Modulation liegt auf der Hand: Auf See ist der akustische Übertragungskanal zwischen zwei Schiffen, bedingt durch Wind, Seegang, Maschinengeräusche etc. im allgemeinen stark gestört. Eine direkte Lautsprecher-Übertragung der Worte: Ich gehe nach Backbord, usw. kann daher sehr leicht, auch wenn die Worte nur wenig verstümmelt werden, auf der Empfängerseite mißverstanden werden. Anders bei dem Puls-codierten Signal: Ob einer der beiden Pulse auf Grund von Störungen im Übertragungskanal lauter als der andere beim Empfänger ankommt, ob er verkürzt oder verlängert erscheint: Das alles hat bei der Puls-Codierung keinen Einfluß auf die codierte Nachricht. Nur wenn ein Puls völlig verloren geht, wird die Nachricht verstümmelt, dazu bedarf es aber schon sehr heftiger Störungen im Übertragungskanal.

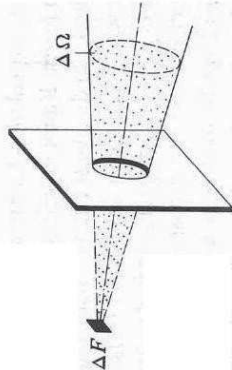


Fig. (12-1) Lichtbündel mit dem engsten Bündelquerschnitt ΔF und dem räumlichen Öffnungswinkel $\Delta\Omega$.

winkel $\Delta\Omega$ wird oft durch eine im Strahlengang befindliche „Lochblende“ begrenzt (Fig. (12-1)). Solch eine die Öffnung des Bündels bestimmende Blende wird als Aperturblende bezeichnet. Der Durchmesser des Loches wird dabei als groß gegen die Wellenlänge des Lichtes, der Abstand der Lochblende von der Lichtquelle als groß gegen die Lineardimensionen des Flächenausschnittes ΔF angenommen.

Ein einfaches Beispiel stellt das Lichtbündel dar, das von einer Bogenlampe erzeugt wird (Fig. (12-2)). Als Lichtquelle wirkt hier der glühende Krater auf der Stirnfläche der als Anode geschalteten Bogenlampenkohle, als Aperturblende wirkt ein kreisförmiges Loch im Blechgehäuse der Lampe.

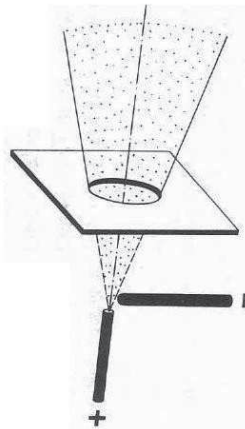


Fig. (12-2) Erzeugung eines Lichtbündels in der Bogenlampe. Vorteile der Bogenlampe: Kleine, praktisch ebene strahlende Fläche ΔF , hohe Strahlungsdichte Q , keine Strahlungsverluste durch Absorption und Streuung im Lampenkolben, jederzeit zündbereit. Nachteile: Abbrennen der Kohlen, mangelnde zeitliche Konstanz der Strahlungsdichte, Betrieb praktisch nur mit Gleichspannung, Leistungsverlust im erforderlichen Vorwiderstand.

12.1.2. Geometrie eines Lichtbündels

Unter einem Lichtbündel verstehen wir ein sich frei ausbreitendes optisches Strahlungsfeld, das aus einem bestimmten Flächenausschnitt ΔF heraus einen bestimmten Raumwinkel¹ $\Delta\Omega$ ausfüllt (Fig. (12-1)). Der Flächenausschnitt ΔF kann im einfachsten Fall aus der strahlenden Fläche einer ebenen Lichtquelle oder einem Ausschnitt aus der strahlenden Fläche einer ebenen Lichtquelle bestehen. Dieser Flächenausschnitt ΔF bildet den engsten Querschnitt des Lichtbündels. Der Raum-

¹ Der ebene Winkel ist definiert als das Verhältnis

$$\text{Ebener Winkel} = \frac{\text{Länge eines Kreisbogen-Abschnittes}}{\text{Kreisbogenradius}}$$

Unter einem Raumwinkel versteht man analog das Verhältnis

$$\text{Raumwinkel} = \frac{\text{Fläche eines Kugelschalen-Ausschnittes}}{(\text{Radius der Kugelschale})^2}$$

Beim Experimentieren mit solchen Lichtbündeln fällt zunächst die Tatsache auf, daß Lichtbündel im leeren Raum unsichtbar sind. Sichtbar wird ein Lichtbündel nur dann, wenn es direkt in das Auge einfällt, oder wenn es an Streuteilchen (z. B. Staub, Zigarettenasche etc.), die in das Bündel eingebracht werden, so gestreut wird, daß ein Teil des Streu-Lichtes direkt in das Auge einfällt. Auch reine atmosphärische Luft bewirkt schon ein gewisses, wenn auch sehr geringes Maß an Lichtstreuung. Das ist die Ursache dafür, daß auch der wolkenlose Tageshimmel hell erscheint. Seine blaue Farbe rührt daher, daß die Luftteilchen kürzerwelliges Licht sehr viel stärker streuen als längerwelliges. Dies gilt allgemein für die Streulänge des Lichtes ist (Rayleigh-Streuung). Der Ausdruck „einen blauen Dunst vor-machen“ hat diese Beobachtung direkt in die Umgangssprache übernommen.

Zu einem Lichtbündel mit besonders einfacher Geometrie gelangen wir, wenn der Flächenausschnitt ΔF aus der Lichtquelle und die Aperturblende beide einen kreisförmigen Querschnitt besitzen. Sind weiter der Flächenausschnitt ΔF und die Aperturblende zueinander parallel orientiert und befindet sich der Mittelpunkt der Aperturblende auf der Mittelsenkrechten auf dem Flächenausschnitt ΔF , so hat das Lichtbündel überall einen kreisförmigen Querschnitt und ist rotationssymmetrisch zu seiner Längsachse. Zur geometrischen Beschreibung des Bündels genügt es in diesem Fall, den Durchmesser Δx der Quelle und den ebenen Öffnungswinkel oder Aperturwinkel Δu anzugeben, unter dem der Rand der Aperturblende von der Lichtquelle her gegen den Mittelpunkt der Aperturblende gesehen wird (Fig. (12-3)).

Die endlichen Abmessungen der Lichtquellen führen dazu, daß Lichtbündel – schon vom Standpunkt einfacher geometrischer Überlegungen her – niemals ganz scharf berandet sein können. In der Konstruktion der Fig. (12-3) ist ja zu berücksichtigen, daß von jedem infinitesimalen Flächenelement der Lichtquelle ein durch die Aperturblende berandetes Teilbündel (infinitesimaler Intensität) ausgeht; erst die Summe aller dieser Teilbündel bildet das eingangs besprochene, wirklich vorhandene Bündel. Wie in Fig. (12-4)) dargestellt, können aber nur zu dem

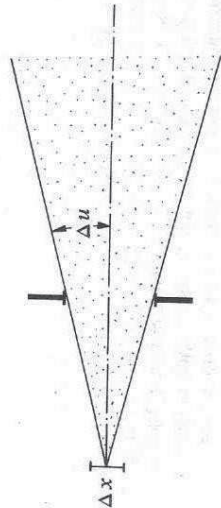
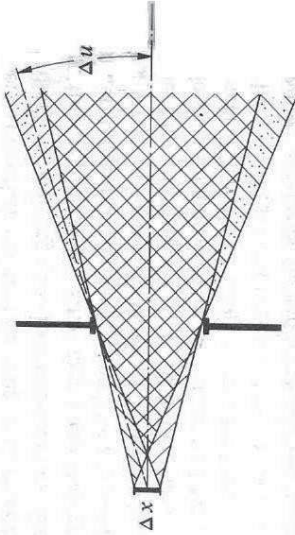


Fig. (12-3) „Ebene“ Koordinaten eines Lichtbündels: Durchmesser Δx des kleinsten Bündelquerschnittes und ebener Öffnungswinkel Δu .

Fig. (12-4) Wegen der endlichen Abmessungen Δx der Lichtquelle ist der von der Aperturblende freigegebene Bündel-Öffnungswinkel Δu nie scharf berandet.



inneren kariert gezeichneten Kern des Lichtbündel alle diese Teilbündel in gleicher Weise beitragen, zu den punktiert gezeichneten Randbereichen trägt nur ein Teil dieser Teilbündel bei. In diesen Randbereichen nimmt also die Bündelintensität nach außen hin ab.

In den Fig. (12-3) und (12-4) fiel die Längsachse des Lichtbündels mit der Mittelsenkrechten auf der flächenhaften Lichtquelle zusammen. Diese Mittelsenkrechte auf der Lichtquelle wollen wir im folgenden als „optische Achse“ der Anordnung bezeichnen. Fig. (12-5) demonstriert den nächst allgemeineren Fall, in dem der Mittelpunkt der Aperturblende außerhalb der optischen Achse gelegen ist. Die Längsachse des von der Aperturblende ausgeblendeten Lichtbündels ist hier um den Winkel ϑ gegen die optische Achse geneigt.

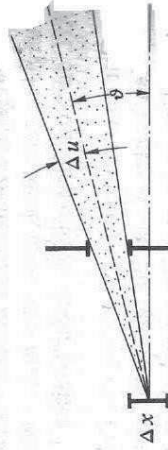


Fig. (12-5) Ein unter dem Neigungswinkel ϑ gegen die optische Achse abgestrahltes Bündel mit dem Öffnungswinkel Δu .

Lassen wir jetzt in einem Gedankenversuch (Fig. (12-6)) den Durchmesser Δx der Lichtquelle und gleichzeitig den Durchmesser der Aperturblende und damit den Öffnungswinkel Δu des Bündels immer kleiner werden, so nähert sich das Lichtbündel immer mehr der abstrakten Vorstellung eines Lichtstrahls, der die punktförmige Lichtquelle unter dem Neigungswinkel ϑ gegen die optische Achse verläßt und sich im übrigen geradlinig in den Raum hinein ausbreitet.

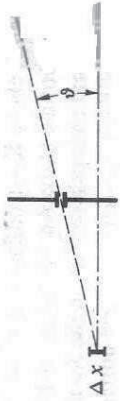


Fig. (12-6) Gedanklicher Übergang zum Lichtstrahl durch gleichzeitige Verkleinerung des kleinsten Bündel-Durchmessers Δx und des Öffnungswinkels Δu .

Bei der wirklichen Durchführung solch eines Experimentes zeigt sich allerdings, daß diese Vorstellung eines Lichtstrahles nur eine gedankliche Abstraktion darstellt; experimentell realisieren kann man Lichtstrahlen nicht. Beim allmählichen Zuziehen der Aperturblende wird nämlich zwar anfangs der Öffnungswinkel des Bündels, wie erwartet, immer kleiner; wenn der Durchmesser der Aperturblende aber in die Größenordnung einiger Wellenlängen des Lichtes kommt, beginnt der Rand des Bündels deutlich unschärfer zu werden und bei weiterem Schließen der Blende wird schließlich der Öffnungswinkel des Bündels hinter der Blende wieder größer statt kleiner. Dieses Phänomen hat nichts mit der oben besprochenen geometrisch bedingten und durch die endlichen Abmessungen der Lichtquelle hervorgerufenen Unschärfe der Bündelränder zu tun; im Gegenteil, das Phänomen wird sogar umso deutlicher, je kleiner die Abmessungen der Lichtquelle gewählt werden. Man bezeichnet dieses Phänomen als Beugung des Lichtes an der Bündelberandung (Aperturblende); in der Quantenphysik wird diese Beugung als Orts-Impuls-Unschärfe der Lichtquanten interpretiert. Lichtstrahlen sind realisierbar also nur in einer Näherung, in der man die Orts-Impuls-Unschärfe der Lichtquanten vernachlässigt.

eingangs ausgeführt – nach dem Zweiten Hauptsatz der Wärmelehre nicht möglich.

12.2.5. Informations-Übertragung bei der optischen Abbildung

Die Nachrichten-Übertragung beim Rundfunk und beim Fernsehen (vgl. Abschn. 11.6.) beruht darauf, daß die Nachricht einer elektromagnetischen Trägerwelle aufgeprägt, mit dieser durch den Raum transportiert und im Empfangsgerät der Trägerwelle wieder entnommen wird. Die Trägerwelle selbst wird als harmonisch-periodische Welle bestimmter Frequenz von einem Sender ausgestrahlt und auf der Empfängerseite von einem auf diese Frequenz abgestimmten Empfangsgerät aufgenommen. Das Aufprägen der Nachricht auf die Trägerwelle wird als Modulation, die Entnahme auf der Empfängerseite als Demodulation bezeichnet.

Die optische Abbildung kann ebenfalls als eine Nachrichtenübertragung aufgefaßt werden, in der die Helligkeits- und Farbverteilung eines Gegenstandes G in der Objektebene OE (Fig. (12–79)) auf eine geometrisch ähnliche Helligkeits- und

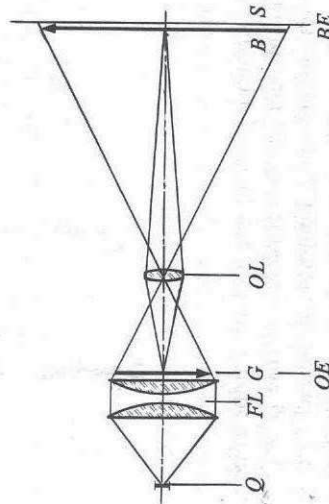


Fig. (12–79) Optische Abbildung als Nachrichten-Übertragung der Helligkeits- und Farb-Verteilung eines Gegenstandes G von der Objektebene OE auf die Bildebene BE .

Farbverteilung des Bildes B in der mehr oder weniger entfernten Bildebene BE übertragen wird. Träger der Nachricht ist dabei das von der Lichtquelle Q ausgesandte Lichtbündel. Diesem Träger wird in der Objektebene OE die Struktur des Gegenstandes G aufgeprägt, in der Bildebene BE des Objektivs OL gibt der Träger diese Struktur wieder her. Das Verfahren entspricht also ganz dem in Fig. (11–53) dargestellten allgemeinen Schema der Nachrichtenübertragung. In zwei Punkten allerdings unterscheidet sich die optische Abbildung von den in Abschn. 11.6. besprochenen Verfahrenen:

1. Beim Rundfunk und beim Fernsehen kann man im allgemeinen an jedem Ort eine Vielzahl von Programmen empfangen. Die Auswahl eines bestimmten Pro-

grammes erfolgt durch „Einstellen“ auf den betreffenden Sender, d. h. durch Abstimmen des Empfangsgerätes auf die Trägerwelle mit der richtigen Frequenz. Auch bei der optischen Abbildung ist es möglich, eine Vielzahl von „Programmen“ gleichzeitig auszustrahlen (man denke nur an die Abbildung räumlicher, also dreidimensional ausgedehnter Szenen); die Auswahl eines bestimmten Programmes erfolgt durch Einstellen des Schirmes in die richtige Binde- und in die richtige Bildebene BE . Dafür kommt es bei der optischen Abbildung auf die Frequenz der Trägerwelle nicht an; die Trägerwelle braucht auch keineswegs harmonisch-periodisch, also monofrequenz zu sein. Die Selektion des Programmes erfolgt also beim Rundfunk über die Frequenz der Trägerwelle, bei der Abbildung über den Ort des Bildes.

2. Beim Rundfunk ist das zu übertragende Signal ein zeitlicher Ablauf; z. B. der zeitliche Ablauf von Schallwellen bei der Übertragung von Sprache oder Musik. Auch beim Fernsehen wird ein zeitliches Signal übertragen. Das zu übertragende Bild wird hier nämlich 25 mal in der Sekunde zeilenweise abgetastet und auf diese Weise in ca. $5,2 \cdot 10^5$ quadratische Objekt-Flächenelemente (625 Zeilen mal 833 Spalten) zerlegt. Das Fernseh-Signal besteht also aus der zeitlichen Folge der Helligkeit dieser Objekt-Flächenelemente. (Um das Bild-Flimmern herabzusetzen, zerlegt man in Wirklichkeit nicht 25 mal in der sec in ein „Ganzbild“, sondern 50 mal in der sec in ein „Halbbild“, dabei enthält das erste Halbbild jeweils die erste, dritte, fünfte, ... Zeile des zu übertragenden Bildes, das darauf folgende zweite Halbbild die dazwischen liegende zweite, vierte, sechste, ... Zeile des Bildes, usw.)

Beim Rundfunk und beim Fernsehen handelt es sich also um die Übertragung des zeitlichen Verlaufs einer Signalfunktion $u_s(t)$. Bei der optischen Abbildung ist das zu übertragende Signal dagegen die räumliche Helligkeits- (und Farb-) Verteilung. Hier geht es um die direkte Übertragung der räumlichen Struktur dieser Verteilung $G(x, y)$ (ohne vorheriges Umwandeln der räumlichen Struktur in einen zeitlichen Verlauf durch zeilenweises Abtasten). Dem entsprechend wird auch das Träger-Lichtbündel durch das zu übertragende Signal bei der optischen Abbildung nicht zeitlich, sondern räumlich moduliert.

Die Analogie zwischen der Nachrichten-Übertragung zeitlicher und räumlicher Signale legt die Erwartung nahe, daß die Nachrichten-Aufnahme- und Übertragungsfähigkeit des Trägers bei der optischen Abbildung in ähnlicher Weise begrenzt ist, wie es für die Übertragung zeitlicher Signale der Fall ist. Wie in Abschn. 11.6. ausgeführt, kann eine durch die Signalfunktion $u_s(t)$ modulierte Trägerwelle, die in ihrer Dauer auf das Zeit-Intervall Δt und in ihrem Spektrum auf die Frequenz-Bandbreite $\Delta \nu$ beschränkt ist, nur eine endliche und abzählbare Menge von Informationsquanten enthalten. Diese Anzahl ist nach Gl. (11.77) gegeben durch

$$Z_t = \Delta \nu \cdot \Delta t.$$

Analoge Verhältnisse gelten für Lichtbündel, die durch eine Objektstruktur $G(x, y)$ räumlich moduliert worden sind. Ein Lichtbündel (Fig. (12–80)), das in der Objektebene OE ein Objekt mit der Fläche ΔF durchsetzt und durch eine Aperturblende AB auf den Raumwinkel $\Delta\Omega$ begrenzt ist, vermag nur eine *erzählbare* Menge an räumlichen Informationsquanten aufzunehmen. Für ein Lichtbündel mit der (mittleren) Wellenlänge λ beträgt diese Anzahl

$$Z_t = \frac{\Delta F}{\lambda^2} \cdot \Delta\Omega. \quad (12.52)$$

Die Zahl der räumlichen Informationsquanten ist also gegeben durch das Produkt aus der in Wellenlängen gemessenen Fläche der Objektstruktur und dem räumlichen Öffnungswinkel des Bündels.

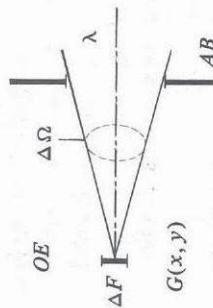


Fig. (12–80) Ein in der Objektebene OE auf den kleinsten Querschnitt ΔF und durch eine Aperturblende AB auf den Öffnungswinkel $\Delta\Omega$ begrenztes Lichtbündel der Wellenlänge λ .

Im folgenden wollen wir versuchen, dieses hier vorweggenommene Ergebnis zu begründen und zu erläutern. Dazu erinnern wir uns zunächst an die bereits in Abschn. 12.1.2. erwähnte Beobachtung, daß sich die räumlichen Abmessungen von Lichtbündeln nicht beliebig verringern lassen. Es ist z. B. nicht möglich, ein Lichtbündel (Fig. (12–6)) durch Verkleinern der Senderfläche und der Aperturblende auf einen „Lichtstrahl“ zusammenzuziehen. Vielmehr würde solch ein Bündel hinter der Aperturblende infolge von Beugung an der Bündelberandung (vgl. Abschn. 11.2.1.) wieder in einen größeren Öffnungswinkel auseinanderlaufen. Quantitativ zeigt sich beim Experimentieren mit kreisförmig berandeten Bündeln, daß das Produkt aus der Senderfläche ΔF und dem räumlichen Öffnungswinkel $\Delta\Omega$ niemals kleiner gemacht werden kann als das Quadrat der Wellenlänge λ des Bündels

$$\Delta F \cdot \Delta\Omega \gtrsim \lambda^2. \quad (12.53)$$

Dabei ist zu beachten, daß beispielsweise eine scharfe Berandung des engsten Bündelquerschnittes ΔF zu einer unscharfen, verwaschenen Berandung des Bündelöffnungswinkels $\Delta\Omega$ führt und daß umgekehrt eine scharfe Berandung des Öffnungswinkels $\Delta\Omega'$ bei der Abbildung zu einem unscharfen engsten Bündelquerschnitt $\Delta F'$ führt. Im allgemeinen werden *beide* Berandungen unscharf sein. Folglich müßten zum Festlegen genauer Zahlenwerte in Gl. (12.53) zunächst die in dieser Gleichung enthaltenen Intervallbreiten $\Delta F, \Delta\Omega$ genau definiert werden. Da es für das nachfolgende jedoch auf Zahlenfaktoren in der Größenordnung π überhaupt nicht ankommt, wollen wir auf eine detaillierte Diskussion der Verteilung der Strahlungsleistung über die Querschnittsfläche und über den Öffnungswinkel verzichten und betrachten die in Gl. (12.53) enthaltenen Intervallbreiten ΔF und $\Delta\Omega$ wieder – ähnlich wie in den Gln. (11.75) und (11.76) – als „effektive“, nur bis auf Zahlen-Faktoren von der Größenordnung π definierte, mittlere Breiten.

Lichtbündel sind also – entgegen landläufiger Meinung – in ihren räumlichen Abmessungen nicht beliebig unterteilbar. Zu jeder Wellenlänge existiert ein Bündel mit kleinstmöglichen räumlichen Abmessungen, wir wollen es ein *räumliches Elementarbündel* nennen. Seine Abmessungen sind durch das Gleichheitszeichen in der Ungleichung (12.53) bestimmt (vgl. Abschn. 12.4.2.):

$$(\Delta F \cdot \Delta\Omega)_{E.B.} = \lambda^2. \quad (12.54)$$

Zwar ist es möglich, den kleinsten Bündelquerschnitt ΔF durch Blenden oder durch verkleinernde Abbildung unbegrenzt herabzusetzen, doch wird dabei der Öffnungswinkel $\Delta\Omega$ des Bündels hinter der Blende bzw. hinter der Abbildung in entsprechendem Maße größer. Umgekehrt ist es ebenfalls möglich, den Öffnungswinkel $\Delta\Omega$ eines Lichtbündels so klein zu machen, wie man nur will (Herstellen eines Parallel-Lichtbündels); jedoch gelingt dies nur dann, wenn man den Bündelquerschnitt ΔF entsprechend Gl. (12.53) unbegrenzt anwachsen läßt; anderenfalls würde nämlich der Öffnungswinkel $\Delta\Omega$ infolge von Beugung an der Bündelberandung wieder größer werden. Es ist also das *Produkt* aus kleinstem Bündelquerschnitt ΔF und räumlichem Öffnungswinkel $\Delta\Omega$, das die Abmessungen des räumlichen Elementarbündels kennzeichnet.

Welche Folgen hat nun die Existenz eines Bündels mit kleinsten räumlichen Abmessungen für die optische Abbildung? Um diese Frage anzugehen, betrachten wir in Fig. (12–81) oben die Abbildung einer strahlenden Fläche ΔF auf das Bild $\Delta F'$ unter Verwendung eines Bündels mit dem Öffnungswinkel $\Delta\Omega$ bzw. $\Delta\Omega'$. Wir fragen zunächst nach dem Zusammenhang zwischen den genannten Größen auf der Objekt- und auf der Bildseite. Nach der Abbe'schen sinus-Bedingung Gl. (12.50) gilt

$$\Delta F \cdot \sin^2 \Delta u = \Delta F' \cdot \sin^2 \Delta u'. \quad (12.55)$$

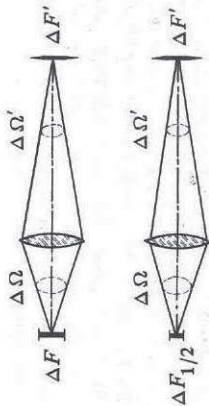


Fig. (12-81) Oben: Abbildung eines Flächenausschnittes ΔF durch ein räumliches Elementarbandel. Unten: Trotz Verkleinerung des Objekt-Flächenausschnittes behält das Bild im wesentlichen die gleiche Größe wie vorher. Die Bildränder sind allerdings in beiden Fällen unscharf.

Bei nicht zu großen Öffnungswinkeln ist nach Gl. (12.17) $\Delta\Omega = \pi(\Delta u)^2$, so daß wir für den Bereich der Gauß'schen Optik ($\sin \Delta u \approx \Delta u$) erhalten

$$\Delta F \cdot \Delta\Omega = \Delta F' \cdot \Delta\Omega' \quad (12.56)$$

In Worten: Bei der optischen Abbildung ist das Produkt aus Objektfläche ΔF und räumlichem Öffnungswinkel $\Delta\Omega$ – unabhängig vom gewählten Abbildungsmaßstab – eine Konstante.

Entsprechen speziell die räumlichen Abmessungen $\Delta F \cdot \Delta\Omega$ des Lichtbündels auf der Objektseite denen eines räumlichen Elementarbandels

$$\Delta F \cdot \Delta\Omega = (\Delta F \cdot \Delta\Omega)_{E.B.} = \lambda^2,$$

so bleibt dieses Bündel auch auf der Bildseite ein räumliches Elementarbandel, unabhängig davon, welcher Abbildungsmaßstab gewählt worden ist. Bei Benutzung einer scharf berandeten Aperturblende hat das zur Folge, daß das Bild $\Delta F'$ nicht mehr scharf berandet ist; das ist in Fig. (12-81) oben durch auslaufende Bildränder angedeutet.

Solch ein räumliches Elementarbandel vermag – außer der Tatsache, daß es am gegebenen Ort vorhanden ist – keine zusätzliche räumliche Information zu transportieren. Ersetzt man nämlich z. B. in der in Fig. (12-81) oben dargestellten Anordnung die strahlende Fläche ΔF durch eine Fläche mit nur dem halben Durchmesser $\Delta F_{1/2}$ (Fig. (12-81) unten), so ändert sich auf der Bildseite – von Feinheiten abgesehen – nur die Helligkeit des Bildes, nicht aber seine Größe. Die Größe des Bildes $\Delta F'$ wird nämlich unter diesen Umständen gar nicht durch die Größe des Objektes $\Delta F_{1/2}$ bestimmt, sondern ist eine Folge des gewählten bildseitigen Öffnungswinkels $\Delta\Omega'$, und zwar in dem Sinne, daß auch bildseitig die Bedingung für die räumlichen Abmessungen des Elementarbandels

$$(\Delta F' \cdot \Delta\Omega')_{E.B.} = \lambda^2 \quad (12.57)$$

erfüllt ist. Das zur Abbildung benutzte Elementarbandel ist nicht in der Lage, die Information „kleineres Objekt“ aufzunehmen und auf die Bildseite zu übertragen.

Das soll noch durch ein weiteres Beispiel erläutert werden: im oberen Teilbild der Fig. (12-82) wird wieder ein Objekt mit der Fläche ΔF auf ein Bild $\Delta F'$ abgebildet. Das übertragende Lichtbündel soll wieder – objekt- und bildseitig – ein räumliches Elementarbandel sein. Im unteren Teilbild wird nun durch eine zusätzliche Aperturblende der Öffnungswinkel $\Delta\Omega$ des abbildenden Bündels verringert: Bei der Abbildung großer Flächenausschnitte mit weit geöffneten Bündeln hat solch eine Beschränkung des Öffnungswinkels nur die früher besprochene Abnahme an Bild-Helligkeit zur Folge. Beim Arbeiten mit einem einzelnen räumlichen Elementarbandel hat sie aber (Fig. (12-82) unten) außerdem eine Zunahme der „Bildgröße“ $\Delta F'$ zur Folge, denn zu einem Bündel mit dem bildseitigen Öffnungswinkel $\Delta\Omega'$ gehört nach Gl. (12.57) der kleinstmögliche Querschnitt $\Delta F' = \lambda^2/\Delta\Omega'$. Die Bildgröße wird also auch hier wieder durch den Öffnungswinkel des zur Abbildung verwandten Lichtbündels und nicht durch die Struktur des Objektes bestimmt.

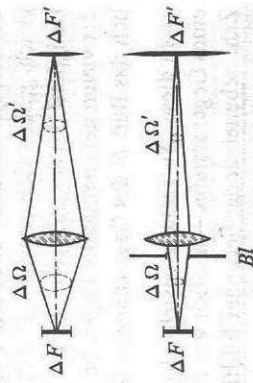


Fig. (12-82) Oben: Abbildung eines Flächenausschnittes ΔF durch ein räumliches Elementarbandel. Unten: Bei Verkleinerung des Öffnungswinkels $\Delta\Omega$ nimmt das Bild $\Delta F'$ an Größe zu. Die Bildränder sind oben und unten unscharf.

Diese Beispiele machen deutlich, daß ein einzelnes Elementarbandel gar keine Eigenschaften der räumlichen Struktur des Objektes zu übertragen vermag. Elementarbandel sind informationsmäßig „leer“. Ein auf dem Schirm aufgefangenes Elementarbandel zeigt lediglich an, daß unter dem gegebenen Neigungswinkel ϑ (in den Fig. (12-81) und (12-82) war $\vartheta = 0$ gewählt) objektseitig ein Elementarbandel gegebener Strahlungsleistung vorhanden ist. Die Größe des von diesem Elementarbandel auf dem Schirm entworfenen Lichtflecks $\Delta F'$ wird entsprechend Gl. (12.57) ausschließlich durch die Wellenlänge λ und den bildseitigen Öffnungswinkel $\Delta\Omega'$ bestimmt.

Die Abbildung eines ausgedehnten Objektes ΔF mit Hilfe von Licht der Wellenlänge λ unter Verwendung des Öffnungswinkels $\Delta\Omega$ kann man sich nun folgendermaßen vorstellen (Fig. (12-83)): Man denke sich das Objekt G in eine große

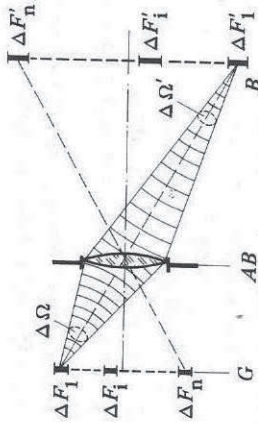


Fig. (12-83) Bei der Abbildung eines Gegenstandes G auf das Bild B überträgt jedes räumliche Elementarbandel unabhängig von allen anderen die Information von einem Flächenelement ΔF_i des Objektes auf das zugehörige Flächenelement $\Delta F'_i$ des Bildes.

Zahl kleiner Flächenelemente ΔF_i zerlegt. Die Größe dieser Flächenelemente ΔF_i sei dadurch gegeben, daß das von jedem solchen Flächenelement ΔF_i ausgehende und durch die Aperturblende AB berandete Bündel (in Fig. (12-83) ist nur ein solches Bündel gezeichnet) gerade ein räumliches Elementarbandel darstellt. Jedes dieser Elementarbandel erzeugt auf dem Schirm einen Bildfleck $\Delta F'_i$, dessen Größe durch den bildseitigen Öffnungswinkel $\Delta\Omega'$ bestimmt wird. Die Helligkeit dieser Bildflecken hängt ebenfalls von diesem, für alle Bildflecken gleich großen Öffnungswinkel $\Delta\Omega'$ ab und ist im übrigen proportional zu der Helligkeit des zugehörigen Objekt-Flächenelementes ΔF_i . Das Zusammenwirken der vielen nebeneinander liegenden Bildflecken $\Delta F'_i$ auf dem Schirm ergibt schließlich das Bild B des Gegenstandes G .

In dieser Auffassung besteht also das von einem Linsensystem entworfene Bild eines Gegenstandes – ähnlich wie das Rasterbild einer Zeitung – aus einer großen Zahl nebeneinander liegender Bildflecken. Alle diese Bildflecken entstehen unabhängig voneinander durch je ein räumliches Elementarbandel. Die Größe dieser Bildflecken wird bei gegebener Wellenlänge durch den bildseitigen Öffnungswinkel $\Delta\Omega'$ und damit durch die Aperturblende AB bestimmt. Das Linsensystem selbst spielt nur die Rolle des fokussierenden Bauelementes, das die von den einzelnen Flächenelementen ΔF_i des Objektes ausgehenden divergenten Bündel in der Ebene des Bildes gerade wieder auf einen engsten Querschnitt $\Delta F'_i$ zusammenzieht.

Die Anzahl der voneinander unabhängigen Bildflecken („Rasterpunkte“), aus denen sich ein Bild zusammensetzt, ist demnach gleich der Anzahl der räumlichen Elementarbandel, die zu der Abbildung beitragen. Diese Anzahl wird einerseits durch die Wellenlänge λ des die Abbildung vermittelnden Lichtbündels, andererseits durch die Objektgröße ΔF und den von der Aperturblende zugelassenen Öffnungswinkel $\Delta\Omega$ bestimmt. Für ein von der Objektfläche ΔF ausgehendes und durch die Aperturblende AB auf den Öffnungswinkel $\Delta\Omega$ begrenztes Lichtbün-

del der Wellenlänge λ (Fig. (12-80)) beträgt diese Anzahl nach Gl. (12.54)

$$Z_r = \frac{\Delta F}{\lambda^2} \cdot \Delta\Omega. \tag{12.58}$$

Bei endlicher Objektgröße ΔF ist dies natürlich immer eine endliche Zahl. Wir haben damit das in Gl. (12.52) vorweggenommene Ergebnis auf die Existenz des räumlichen Elementarbündels (Gl. (12.54)) zurückgeführt.

Nehmen wir beispielsweise an, daß die Helligkeit der Bildflecken in einer besonders primitiven Bildübertragung nur zwei Stufen besäße, nämlich hell oder dunkel, so ist die Anzahl Z_r der bei der Abbildung verwandten räumlichen Elementarbandel auch gleich der Anzahl der binären (ja- oder nein-)Informationen, die das Lichtbündel vom Objekt zum Bild transportiert.

Wegen der endlichen Ausdehnung der den einzelnen Elementarbündeln zugeordneten Objekt-Flächenelemente ΔF_i und Bild-Flächenelemente $\Delta F'_i$ (Fig. (12-83)) gehen bei der optischen Abbildung Feinheiten der Objektstruktur, die unterhalb einer kritischen Größe liegen, verloren. Dieses Phänomen bedingt das begrenzte Auflösungsvermögen der optischen Abbildung. Das kleinste Flächenelement ΔF_{\min} , das bei der Abbildung eines Objekts der Größe ΔF unter Verwendung des Öffnungswinkels $\Delta\Omega$ richtig wiedergegeben werden kann, hat nach dem Gln. (12.54) bzw. (12.58) die Ausdehnung

$$\Delta F_{\min} = \frac{\Delta F}{Z_r} = \frac{\lambda^2}{\Delta\Omega}. \tag{12.59}$$

Struktur-Elemente des Objekts, die feiner als ΔF_{\min} sind, werden von dem abbildenden Lichtbündel nicht übertragen, sie werden gewissermaßen von der Aperturblende herausgefiltert. Eine Steigerung des Auflösungsvermögens der Abbildung ist nach Gl. (12.59) nur entweder durch Verminderung der Wellenlänge λ oder durch Vergrößerung des Öffnungswinkels $\Delta\Omega$ möglich.

Als Beispiel betrachten wir die Aufnahme eines Porträts unter Benutzung einer Kleinbild-Kamera (Fig. (12-84)). Der Abstand a zwischen Kamera und Objekt betrage $a \approx 2$ m. Das Kamera-Objektiv habe die Brennweite $f = 9$ cm und das Öffnungsverhältnis $1 : 2,8$. Die von dem Kleinbildfilm (Bildfläche $\Delta F' = 24 \times 36$ mm²) unter diesen Umständen erfaßte Objekt-Fläche (Gesichtsfeld) beträgt $\Delta F = 46 \times 69$ cm² $\approx 0,32$ m² (Fig. (12-84) unten). Bei einer mittleren Wellenlänge von $\lambda \approx 0,55$ μ m beträgt dann das Verhältnis $\Delta F/\lambda^2 \approx 10^{12}$. Das bedeutet, ein Objektiv, das den Öffnungswinkel $\Delta\Omega = 1$ zuließe, würde bei dieser Abbildung 10^{12} räumliche Elementarbandel erfassen und dementsprechend ein aus 10^{12} voneinander unabhängigen Bildflecken bestehendes Bild zeichnen.

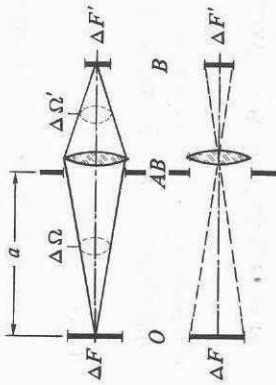


Fig. (12-84) Zur Bestimmung des Auflösungsvermögens bei der optischen Abbildung. Oben: Verlauf eines von einem Flächenelement auf der optischen Achse ausgehenden Lichtbündels. Unten: Verlauf der Achsen eines von der Spitze und eines vom Fußpunkt des Gegenstandes ausgehenden Bündels.

In Wirklichkeit ist aber der Öffnungswinkel, den die Kleinbildkamera bei 2 m Objekt-Abstand erfaßt, viel kleiner. Aus dem Öffnungsverhältnis 1 : 2,8 (vgl. Gl. (12.36)) und der Brennweite $f = 9$ cm folgt für den Durchmesser der Eintrittspupille des Kamera-Objektives $2r \approx 3,2$ cm. Der im Objektabstand $a = 2$ m vom Objektiv erfaßte räumliche Öffnungswinkel (Fig. (12-84) oben) beträgt dann

$$\Delta\Omega \approx \frac{\pi r^2}{a^2} \approx 2 \cdot 10^{-4}. \text{ Für die Anzahl } Z_r \text{ der die Abbildung vermittelnden Elementarbild oder die Anzahl der voneinander unabhängigen Bildflecken oder „Rasterpunkte“ erhalten wir somit}$$

$$Z_r = \frac{\Delta F}{\lambda^2} \cdot \Delta\Omega \approx 2 \cdot 10^8.$$

Daraus ergibt sich für das kleinste, im Bild wiedergegebene Detail der Objektstruktur eine Fläche von

$$\Delta F_{\min} = \frac{\Delta F}{Z_r} \approx 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2,$$

entsprechend einem Scheibchendurchmesser von etwas weniger als einem halben Zehntel Millimeter. Details der Objektstruktur mit Linearabmessungen unterhalb dieser Größenordnung werden also von dem abbildenden System nicht übertragen.

Häufig wird das Auflösungsvermögen eines abbildenden Systems direkt auf die *Linearabmessungen* des Objektes und auf den *ebenen* statt auf den *räumlichen* Öffnungswinkel bezogen. Ausgedrückt mit den ebenen Bündelkoordinaten $\Delta x, \Delta u$ (Fig. (12-85)) besitzt das räumliche Elementarbild die Abmessungen (vgl. Abschn. 12.4.2.)

$$(\Delta x \cdot \sin \Delta u)_{\text{E.B.}} = \frac{\lambda}{2}. \tag{12.60}$$

Bei gegebenem Öffnungswinkel Δu hat das kleinste, in der Abbildung wiedergegebene Län-

Fig. (12-85) Die ebenen Bündel-Koordinaten: Kleinster Bündeldurchmesser Δx und ebener Bündelöffnungswinkel Δu .



gen-Element Δx_{\min} der Objekt-Struktur daher die Größe

$$\Delta x_{\min} = \frac{\lambda/2}{\sin \Delta u}. \tag{12.61}$$

Anders ausgedrückt: Zwei Struktur-Elemente (z. B. Striche) in der Objektstruktur gelangen in der optischen Abbildung nur dann getrennt zur Wiedergabe, wenn die die beiden Strukturelemente *enthaltenden* (z. B. lichtschwächeren) Lichtflecken des Bildes mindestens durch einen das Struktur-Element *nicht* enthaltenden (z. B. helleren) Lichtfleck voneinander getrennt sind. Nach Gl. (12.61) bedeutet dies, das der Abstand ϵ zwischen den abzubildenden Strukturelementen des Objektes mindestens

$$\epsilon \gtrsim 2 \cdot \Delta x_{\min} = \frac{\lambda}{\sin \Delta u} \tag{12.62}$$

betragen muß; anderenfalls würden die beiden Struktur-Elemente im Bild zu einem einzigen verfließen. Gl. (12.62) wird oft schlechthin als „das Auflösungsvermögen“ der optischen Abbildung bezeichnet.