

In Tabelle 1.4 wurde noch eine Zusammenfassung dargestellt.

Lage des Gegenstands (Gegenstandsweite $g$ )	Lage des Bilds (Bildweite $b$ )	Eigenschaften des Bilds	Abbildungsmaßstab
$g = 2f$ in doppelter Brennweite von der Linse entfernt	$b = g = 2f$ in doppelter Brennweite von der Linse entfernt	umgekehrt, seitenvertauscht, reell	$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} = 1$
$g = f$ im Brennpunkt der Linse	$b \rightarrow \infty$	Im Endlichen entsteht kein Bild	$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} \rightarrow \infty$
$2f < g < \infty$	$b = \frac{fg}{g-f}$ zwischen einfacher und doppelter Brennweite der Linse	umgekehrt, seitenvertauscht, verkleinert, reell	$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} < 1$
$f < g < 2f$ zwischen einfacher und doppelter Brennweite der Linse	$b = \frac{fg}{g-f}$ ausserhalb der doppelten Brennweite der Linse	umgekehrt, seitenvertauscht, vergrössert, reell	$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} > 1$
$0 < g < f$ zwischen der Linse und dem Brennpunkt	$b = \frac{fg}{g-f}$ (negativ) auf der Gegenstandsseite	aufrecht, seitenrichtig, vergrössert, virtuell	$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} > -\infty$ und $< -1$

Tabelle 1.4: Zusammenfassung

### 1.4.7 Das Auge

#### 1.4.7.1 Die optische Abbildung mit dem Auge

Das Auge erzeugt, ähnlich wie eine Kamera, Bilder auf einer lichtempfindlichen Schicht, der Netzhaut. Der Augapfel hat einen Durchmesser von etwa 25 mm und kann in der Augenhöhle durch 6 Muskeln bewegt werden. Die Linse bildet zusammen mit der Hornhaut, der Flüssigkeit in der vorderen Augenkammer und dem Glaskörper das optische System des Auges (siehe Abbildung 1.23).

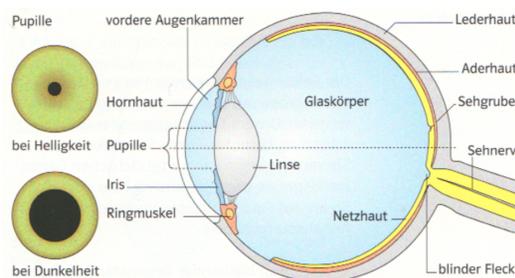


Abbildung 1.23: Horizontalschnitt (also Blick von oben) durch das rechte Auge.

Die von der farbigen Iris umgebene Pupille begrenzt die Helligkeit auf der Netzhaut, indem sie den Durchmesser der Lichtbündel von  $64 \text{ mm}^2$  bei wenig Licht auf  $4 \text{ mm}^2$  bei viel Licht ändern kann.

Diese Anpassung an die Lichtverhältnisse nennt man Adaption. Die Brennweite des optischen Systems beträgt etwa 17 mm. Die Netzhaut befindet sich also zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite. Es entsteht ein reelles, verkleinertes und umgekehrtes Bild. Ein bewusstes Zusammenwirken von Auge und Gehirn lässt uns die Umwelt lagerichtig wahrnehmen. Das Bild entsteht auf der Netzhaut mit über 130 Millionen Sehzellen, die einen Abstand von etwa 0.007 mm haben. Am Ausgang der Sehnerven sind im Auge keine Sinneszellen vorhanden. Man bezeichnet diese Stelle als blinder Fleck. Entfernen oder nähern sich Gegenstände, so muss wegen der konstanten Bildweite im Auge die Brennweite durch die elastische Augenlinse verändert werden. Sie wird von einem Ringmuskel in gestreckter Form festgehalten. Zieht sich dieser zusammen, so krümmt sich die Linse stärker und die Brennweite wird kleiner.

Die Brennweite kann auf diese Weise zwischen 13 mm und 18 mm verändert werden (siehe Abbildung 1.24). Diese Anpassung heisst Akkommodation.

Die Gegenstände in 25 cm Entfernung lassen sich besonders klar und deutlich erkennen. Völlig entspannt ist das Auge, wenn die Lichtstrahlen nahezu parallel eintreffen. Unter 10 cm Abstand kann ein Gegenstand selbst mit Anstrengung nicht mehr deutlich gesehen werden.

### 1.4.7.2 Der Sehwinkel

Mit einer Münze am ausgestreckten Arm lässt sich die Vollmondscheibe völlig verdecken. Das Flugzeug kann grösser erscheinen als die Sonne. Wenn wir einen Gegenstand genau betrachten wollen, dann bringen wir ihn näher ans Auge. Die Bildgrösse auf der Netzhaut ist durch den Sehwinkel bestimmt (siehe Abbildung 1.25), unter dem man den Gegenstand sieht.

Der Sehwinkel bestimmt die Bildgrösse. Je grösser der Sehwinkel, desto grösser wird das Bild auf der Netzhaut.

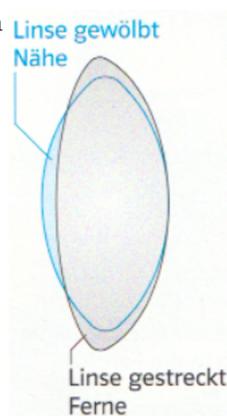


Abbildung 1.24: Veränderung der Brennweite zwischen 13 mm und 18 mm.

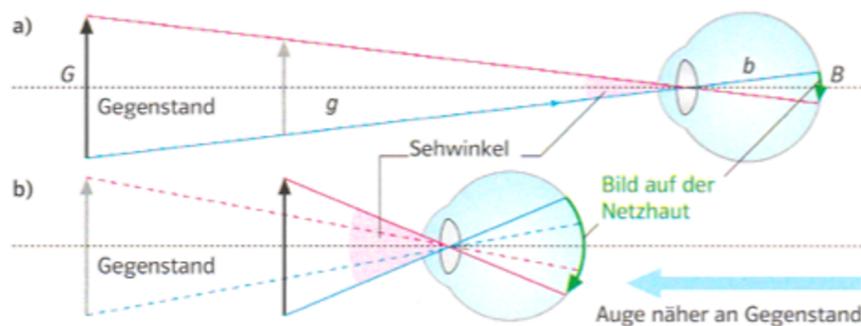


Abbildung 1.25: Der Sehwinkel.

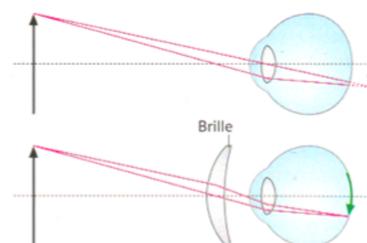
Der Sehwinkel hängt sowohl von der Gegenstandsgrösse als auch von der Gegenstandsweite ab. Unsere Entfernungs- oder Grössenschätzung beruht auf dem Sehwinkel. Sie versagt, wenn wir zur tatsächlichen Gegenstandsgrösse oder Entfernung keinen Vergleich oder Anhaltspunkt haben. Bei gleich bleibender Gegenstandsgrösse wird der Sehwinkel mit wachsender Gegenstandsweite (Entfernung) kleiner.

Erscheinen zwei entfernte, verschieden grosse Gegenstände unter gleichen Sehwinkel, so sind die jeweiligen Quotienten von Gegenstandsgrösse  $G$  zu Gegenstandsweite  $g$  gleich. Es gilt:  $G_1 : g_1 = G_2 : g_2 = \dots$

Für kleine Sehwinkel sind Gegenstandsgrösse und Gegenstandsweite annähernd proportional.

### 1.4.7.3 Fehlsichtigkeit

Durch Akkommodation können Gegenstände aus unterschiedlichen Entfernungen scharf auf der Netzhaut abgebildet werden. Oft gelingt dies nicht, weil die Strahlen nicht hinreichend stark gebrochen werden oder der Augapfel zu kurz ist, so dass ein Bildpunkt erst hinter der Netzhaut entstehen würde. Das Bild auf der Netzhaut wird unscharf. Dieser Sehfehler heisst Weitsichtigkeit (siehe Abbildung 1.26).



Eine Sammellinse als Brille verkürzt durch zusätzliche Brechung die Bildweite, so dass eine scharfe Abbildung auf der Netzhaut entsteht.

Abbildung 1.26: Weitsichtiges Auge.

Im Alter lässt sich wegen der nachlassenden Elastizität der Linse die Brennweite des Auges oft nicht mehr genügend verringern, so dass auch hier eine Sammellinse als Brille erforderlich wird. Man spricht dann von Altersweitsichtigkeit. Werden dagegen die Strahlen im Auge zu stark gebrochen oder ist der Augapfel zu lang (siehe Abbildung 1.27), so liegen die Bildpunkte vor der Netzhaut. Diesen Sehfehler nennt man Kurzsichtigkeit. Hier lässt sich die Gesamtbrechung durch Brillen mit Zerstreuungslinsen abschwächen.

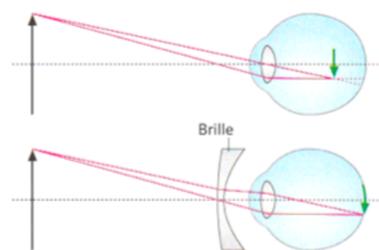


Abbildung 1.27: Kurzsichtiges Auge.

Bei Brillengläsern gibt man meist nicht die Brennweite  $f$ , sondern die Brechkraft  $D = 1/f$  an.  $D$  wird in Dioptrien (dpt) gemessen. Es ist 1 Dioptrie = 1 dpt = 1/m.

### 1.4.8 Das Mikroskop

Mit einem Lichtmikroskop kann man sehr grosse Vergrößerungen (bis zu 1600-fach) erzielen. Es besteht aus mindestens zwei Linsen. Die eine befindet sich im Objektiv (lat. objectum, d.h. dem Gegenstand zugewandt), die andere im Okular (lat. oculus, d.h. dem Auge zugewandt). Die Linse im Objektiv ist eine stark brechende Sammellinse. Ihre Brennweite beträgt nur einige Millimeter. Das ist nötig, damit man das zu beobachtende Objekt möglichst nahe an das Objektiv rücken kann.

Das Objektiv erzeugt im Mikroskop ein stark vergrössertes Zwischenbild (siehe Abbildung 1.28). Dieses wird nun durch die zweite Linse im Okular wie mit einer Lupe betrachtet und erscheint dadurch noch mehr vergrössert. Das Mikroskop vergrössert für sehr nahe Gegenstände den Sehwinkel erheblich.

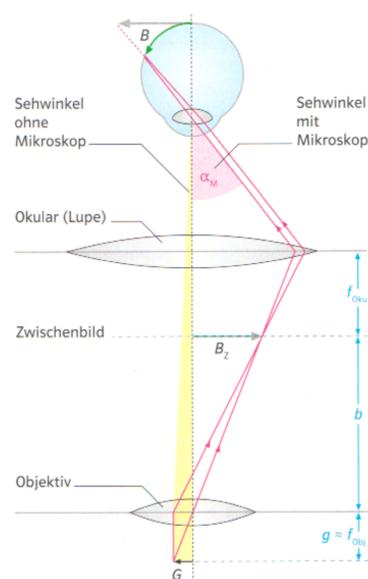


Abbildung 1.28: Bildentstehung beim Mikroskop.

Die meisten Mikroskope haben mehrere Objektive. Das Okular steckt lose im oberen Teil des Mikroskops und kann auch durch ein anderes ersetzt werden. Durch die Auswahl von Objektiv und Okular kann man die Vergrößerung festlegen. Steht z.B. auf dem Objektiv "25x" und auf dem Okular "8x", dann vergrössert das Mikroskop  $25 \times 8 = 200$ -fach.

Die Vergrößerung des Mikroskops ist das Produkt aus dem Objektiv- und der Okularvergrößerung.

Je stärker ein Mikroskop vergrössert, desto weniger Licht kommt von der Lichtquelle durch das Mikroskop in unser Auge. Meistens werden deshalb die dünnen, durchsichtigen Untersuchungsobjekte von unten durchleuchtet.

Dicke, undurchsichtige Objekte werden durch eine im Mikroskop eingebaute Lampe von oben oder von der Seite beleuchtet.

### 1.4.9 Das Fernrohr

Die Wirkungsweise eines Fernrohrs kann mit der eines Mikroskops verglichen werden. Auch hier entsteht zunächst ein Zwischenbild, das aber aufgrund der grossen Gegenstandsweite stark verkleinert wird (siehe Abbildung 1.29). Das Zwischenbild wird durch das Okular betrachtet, welches als Lupe wirkt. Insgesamt erscheint der Gegenstand dem Auge unter einem grösseren Sehwinkel, das Fernrohr vergrössert den Gegenstand. Verwendet man ein Objektiv mit längerer Brennweite, so wird das Zwischenbild grösser.

Demgegenüber nimmt die Vergrößerung durch das Okular zu, wenn man dessen Brennweite verringert.

Die Vergrößerung des Fernrohrs beträgt:

$$V_F = \frac{f_{Obj}}{f_{Oku}} \quad (1.4.1)$$

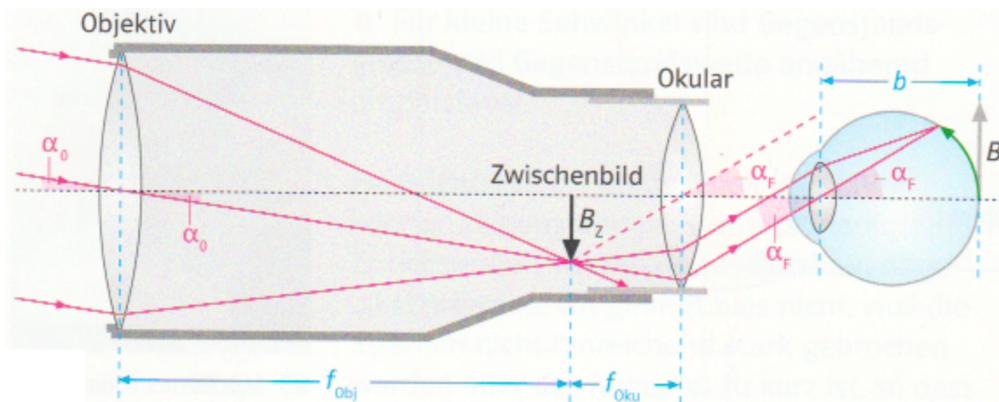


Abbildung 1.29: Der Strahlengang am Fernrohr.

Das Fernrohr nach Abbildung 1.29 hat einen Nachteil: Das Bild erscheint gegenüber dem Gegenstand kopfstehend. Das stört nicht, wenn man das Fernrohr bei astronomischen Beobachtungen einsetzt. Man verwendet daher auch die Bezeichnung astronomisches Fernrohr. Es wurde von den Astronomen und Mathematiker Johannes Kepler (1571 – 1630) entwickelt.

Möchte man das Prinzip des astronomischen Fernrohrs bei irdischen Beobachtungen einsetzen, muss das Bild aufrecht erscheinen. Dazu kann eine weitere Sammellinse zwischen Objektiv und Okular gebracht werden. Solche terrestrischen Fernrohre sind wegen ihrer grossen Länge allerdings recht unhandlich. Dieser Nachteil wird bei Prismengläsern umgegangen (siehe Abbildung 1.30), Die Prismen kehren das Bild um und bewirken gleichzeitig eine Verkürzung der Baulänge.

Bereits vor Kepler entwickelten holländische Brillenmacher Fernrohre, die aus einer Sammell- und einer Zerstreuungslinse bestanden. Diese Holländischen bzw. Galilei'schen Fernrohre erzeugen ein aufrechtes Bild.

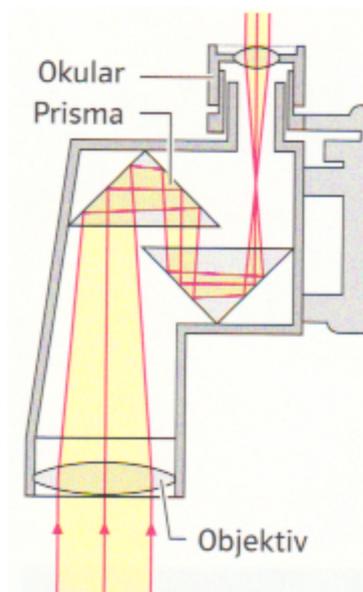
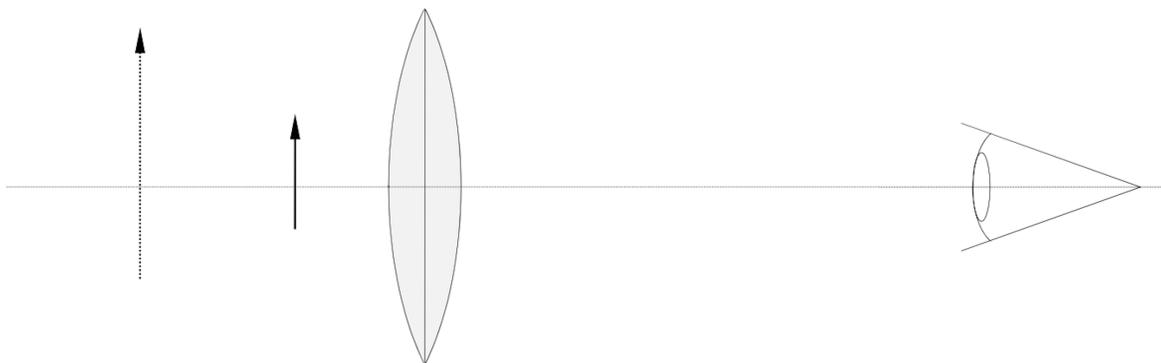


Abbildung 1.30: Prismenglas.

### 1.4.10 Die Lupe

Will man sich einen kleinen Gegenstand ansehen, hält man ihn möglichst dicht vor das Auge. So vergrößert sich das Bild auf der Netzhaut, das heisst der Sehwinkel wird grösser. Ein kleinerer Abstand als etwa 10 cm ist aber nicht möglich, weil dann die Grenzen der Akkommodation erreicht sind.

Abhilfe verschafft man sich mit einer Lupe: Steht der Gegenstand innerhalb der Brennweite einer Sammellinse ( $g < f$ ), so wird gegenstandsseitig ein vergrößertes, aufrechtes und virtuelles Bild erzeugt. Nun kann man dieses vergrößerte Bild betrachten. Es erscheint unter einem grösseren Sehwinkel.



$\alpha$ : Sehwinkel ohne Lupe  
 $\beta$ : Sehwinkel mit Lupe

Abbildung 1.31: Die Lupe.

Verwendet man also eine einzelne Sammellinse zum vergrößernden Betrachten, so spricht man von einer Lupe.

### 1.4.11 Der Projektor

#### 1.4.11.1 Der Diaprojektor

Die Kondensorlinse sammelt das Licht der Lampe auf das Dia und leuchtet es gleichmässig aus. Genau genommen, sammelt sie das gesamte auftreffende Licht in das Objektiv (die Lichtquelle wird ins Objektiv abgebildet). Das Dia (also der Gegenstand) wird durch das Objektiv auf die Leinwand abgebildet. Es muss seitenverkehrt und auf dem Kopf in den Diahalter geschoben werden.

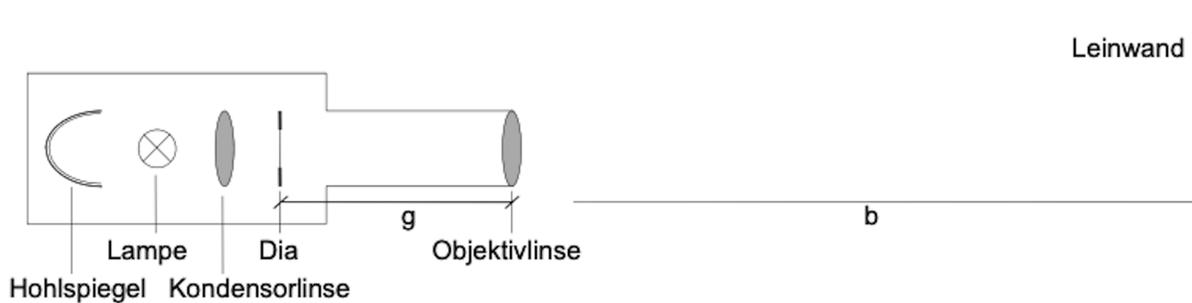


Abbildung 1.32: Der Diaprojektor.

#### 1.4.11.2 Der Hellraumprojektor

Der Spiegel projiziert das Bild, das die Sammellinse erzeugt, an die Wand und dreht es um; man muss somit nicht in Spiegelschrift auf die Folie schreiben.

Die sehr grosse Kondensorlinse wäre in der üblichen Ausführung zu dick und wird daher durch eine Fresnellinse ersetzt.

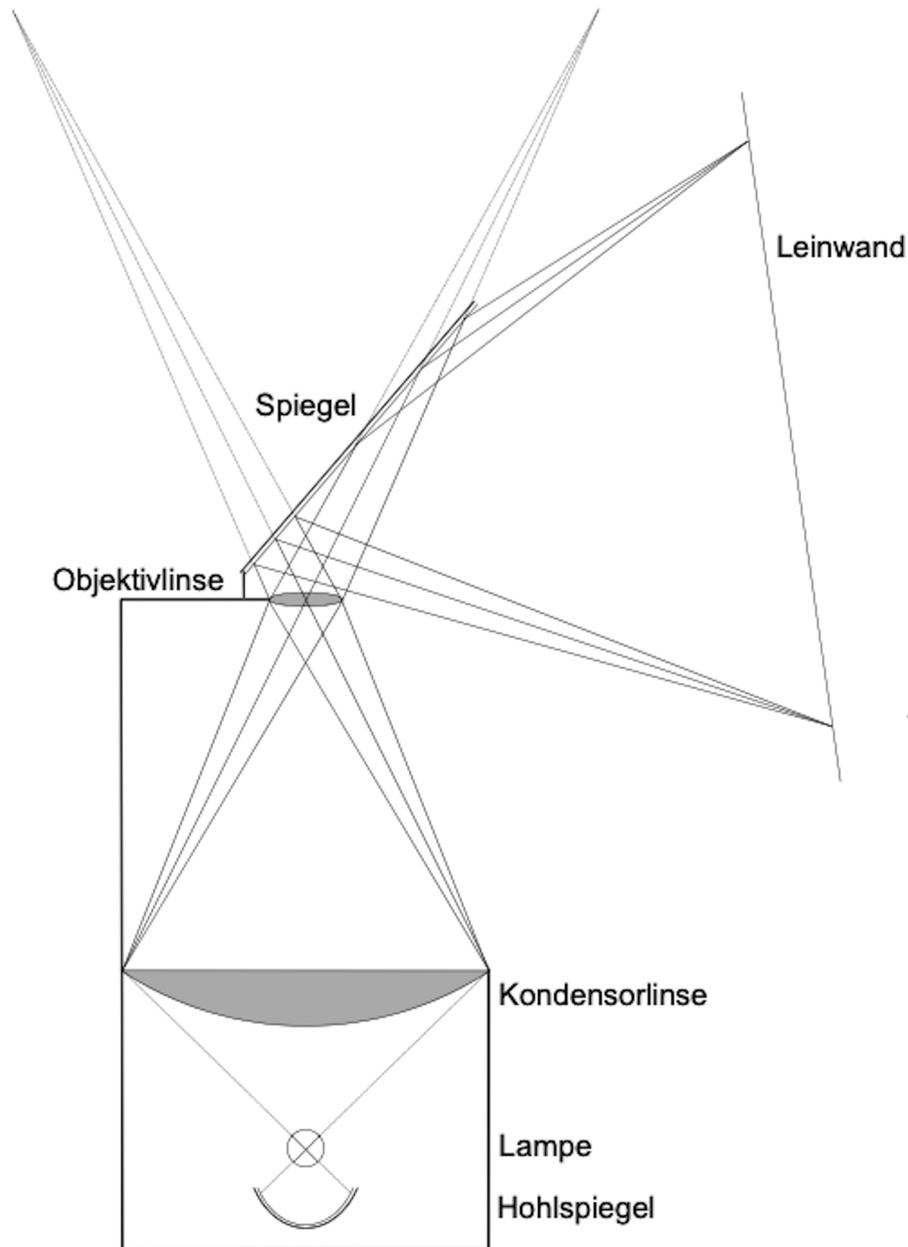


Abbildung 1.33: Der Hellraumprojektor.

### 1.4.12 Der Fotoapparat

Jeder Fotoapparat hat die folgenden Bauteile:

- Das Objektiv besteht aus einem Linsensystem mit mehreren hintereinanderliegenden Linsen, die Abbildungsfehler korrigieren und wie eine einzige Sammellinse wirken. Bei gewöhnlichen Objektiven beträgt die Brennweite meist 50 mm.
- Die Blende ist ein kreisrundes Loch, dessen Durchmesser eingestellt werden kann; sie befindet sich zwischen den Linsen des Objektivs. Mit ihr können die Durchmesser der Lichtbündel verändert werden, die in die Kamera fallen.
- Der Verschluss ist eine Klappe; er verhindert, dass das Licht durch das Objektiv auf den Film gelangt. Er kann für einstellbare Zeiten geöffnet werden, so dass der Film genau während dieser Zeitspanne belichtet wird; gewöhnlich für  $1/125$  s.

- Der Film oder der Bildsensor (CCD, APS oder CMOS) sind lichtempfindlich und befinden sich vor der Rückwand der lichtdicht verschlossenen Kamera. Sie halten das Bild chemisch, respektive elektronisch fest.

Um gute Bilder zu bekommen, muss man die Bildweite so einstellen, dass auf dem Film ein scharfes Bild entsteht. Bei sehr fernen Gegenständen (Einstellung unendlich) ist die Bildweite so gross wie die Brennweite. Bei nahen Gegenständen ist sie grösser. Um sowohl ferne wie auch nahe Gegenstände fotografieren zu können, kann das Objektiv verschoben werden. Das geschieht durch Drehen in einem Gewinde. Die Entfernungsskala auf der Objektivfassung hilft, die richtige Bildweite einzustellen (siehe Abbildung 1.34). Die Einstellung  $\infty$  gilt etwa bis zur hundertfachen Brennweite.



Abbildung 1.34: Einstellungen bei einem Fotoapparat: Entfernung ca. 1.2 m, Blende 11, Schärfentiefe von ca. 0.8 m bis 5 m.

Um den Film richtig zu belichten, benötigt man eine ganz bestimmte Lichtmenge. Diese lässt sich sowohl mit der Blende als auch mit dem Verschluss regeln: Viel Licht trifft auf den Film, wenn man die Blende ganz weit (kleiner Zahlenwert auf dem Einstellring; vgl. Abbildung 1.34) und dem Verschluss lange (ebenfalls kleiner Einstellwert) öffnet. Weniger Licht kommt auf den Film bei umgekehrten Einstellungen. Wie viel Licht für ein gutes Foto nötig ist, muss man abschätzen oder mit einem Belichtungsmesser messen. Ein solcher ist heute in der Regel in jeder Kamera eingebaut. Ob man dann die Lichtmenge mit der Blende oder mit der Verschlusszeit regelt, hängt vom Motiv und der gewünschten Bildgestaltung ab: Für schnellbewegte Objekte sind kurze Verschlusszeiten nötig.

Wenn man eine bestimmte Entfernung an der Kamera eingestellt hat, dann werden auf dem Film nicht nur die Gegenstände scharf erscheinen, die sich genau in dieser Entfernung befinden. Auch Gegenstände in einem etwas geringeren oder etwas grösseren Abstand erscheinen auf dem Foto in ausreichender Schärfe.

Diesen Entfernungsbereich, aus dem scharf abgebildet wird, nennt man die Schärfentiefe. Er hängt direkt von der Grösse der Blende, also vom Durchmesser des in die Kamera eintretenden Lichtbündels ab. Bei vielen Fotoapparaten kann der Bereich der Schärfentiefe für einen fest eingestellten Blendenwert auf dem Entfernungseinstellring abgelesen werden (siehe Abbildung 1.34).