

Was man aus virtuellen Bildern lernen kann

Ein Vergleich zwischen wahrgenommener und konstruierter Bildlage an Plan- und Wölbspiegeln



von Heinz Muckenfuß

Informationen zum Vortrag, gehalten auf der Jahrestagung der DPG, Sektion Fachdidaktik im März 1999 an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg.

Weitere Beiträge zu virtuellen Bildern können von der Homepage des Autors abgerufen werden. Die Homepage ist über <http://www.muckenfuss-physikdidaktik.de/> zu erreichen.

Erläuterungen zur Fragestellung, die im Vortrag behandelt wurde

Das vorangehende Titelbild zeigt, dass Spiegelbilder am ebenen Spiegel nur halb so groß sind, als wenn sie sich in der Spiegelebene befänden.

Wir nehmen die Spiegelbilder am ebenen Spiegel normalerweise aber nicht als verkleinert wahr, sondern ordnen ihnen stattdessen unbewusst die Entfernung zu, die einem entsprechend kleinen Netzhautbild des Gegenstandes vertrauter Größe gehört.

Misst man die Entfernung des Spiegelbildes am ebenen Spiegel mit dem Fotoapparat (z. B. Schnittbildindikator), so stimmt sie mit dem Wahrnehmungseindruck und dem gemäß dem Reflexionsgesetz konstruierten Bildort überein (doppelte Entfernung des Gegenstandes zum Spiegel).

Diese Übereinstimmung ist allerdings keineswegs trivial – genaugenommen handelt es sich um eine Ausnahme. Bei vielen anderen virtuellen Bildern entspricht der Entfernungseindruck *nicht* der physikalisch konstruierten oder der mit einem optischen Entfernungsmesser ermittelten Bildlage. Dies gilt beispielsweise an erhabenen Spiegeln (Beobachtungsspiegel, wie sie als LkW-Rückspiegel, in Kaufhäusern oder als Verkehrsspiegel verwendet werden), wenn der Beobachtungsabstand größer als 2 m ist. An solchen Spiegeln führt die Verkleinerung dazu, dass die wahrgenommene Entfernung des Spiegelbildes größer ist, als die des konstruierten Bildorts.

Situationen, in denen der Wahrnehmungseindruck nicht mit der Mathematik oder mit technischen Messergebnissen übereinstimmt, sind besonders interessant, weil sich an ihnen erkenntnistheoretische Fragen des Verhältnisses von physikalischer Theorie und unbefangener Wahrnehmung behandeln lassen.

Es ging im Vortrag nicht darum, wie man diese „Sinnestäuschungen“ vermeiden kann. Unbestritten ist, dass sich experimentell Situationen arrangieren lassen, in denen Wahrnehmung und Mathematik übereinstimmende Ergebnisse liefern. Ebenso unbestreitbar gibt es aber auch Situationen, in denen diese Übereinstimmung fehlt. Solche Situationen sollen vorgestellt und geklärt werden.

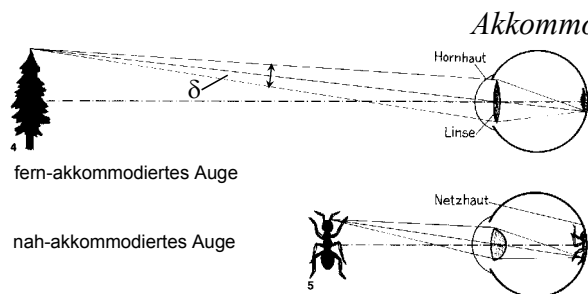
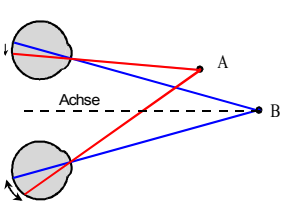
Was ist das „wirkliche“ virtuelle Bild? - Geht man davon aus, dass die wahrgenommenen Orte virtueller Bilder Artefakte des Geistes sind, dann wird es problematisch, die konstruierbaren Bildorte als die „wirklichen“ oder „richtigen“ anzusehen, die wahrgenommenen Bildorte dagegen als „Täuschungen“ zu klassifizieren.

(Versuchsanleitungen zum Thema können von der homepage des Autors abgerufen werden; Adresse auf der Titelseite).

Einige Parameter für die Entfernungswahrnehmung

Die räumliche Wahrnehmung unseres Umfeldes ist eine Leistung des Gehirns. Ihr liegen einerseits physikalische Bedingungen in der Objektwelt zugrunde, andererseits nutzt das Gehirn für die Synthese des räumlichen Wahrnehmungseindrucks eine Vielzahl von Sinnesdaten. Die wichtigste – aber nicht die einzige – sinnesphysiologische Grundlage des Wahrnehmungsvorgangs ist die Existenz der beiden zweidimensionalen Netzhautbilder, die auf dem Wege der optischen Abbildung in den Augen entstehen. Bei Auswertung der Netzhautbilder nutzt das Gehirn viele verschiedene Daten, deren Gewichtung mit den Bedingungen der Beobachtungssituation erheblich variiert. In realen Situationen wirken meist mehrere Parameter zusammen. Einen (grobem) Überblick gibt die folgende Tabelle.¹

Wahrnehmungsparameter und Wirkungsweise

| | |
|---------------------------------|--|
| okulomotorische Faktoren |  <p><i>Akkommodation</i></p> <p>Ausgewertet wird die Stellung bzw. Anspannung des Ziliarmuskels, die mit der Brennweite der Augenlinse korreliert ist. Bei gegebener Pupillenöffnung verändert sich der Divergenzwinkel δ, den ein vom Fixationspunkt ausgehendes Lichtbündel einschließt, mit der Entfernung.</p> <p><i>Konvergenz</i></p> <p>Ein binokular fixierter Punkt erfordert die Einstellung der Augachsen unter dem Konvergenzwinkel γ. Der Konvergenzwinkel ändert sich mit der Entfernung. Wird er kleiner als ca. 2° (bei 6 cm Augabstand entspricht dies einer Entfernung des Fixationspunktes von ca. 2 m), nimmt seine Bedeutung für die Wahrnehmung rasch ab.</p> |
| stereoptische Faktoren |  <p><i>Disparität</i></p> <p>Bei räumlich ausgedehnten Objekten führen die außerhalb der Fixationsachse liegenden Punkte zu Unterschieden in den Netzhautbildern. (Der Punkt B wird jeweils in der Fovea centralis abgebildet, wogegen der Punkt A in beiden Augen auf nichtkorrespondierende Netzhautregionen fällt.)</p> <p>Zu den stereoptischen Parametern zählen neben den Lageunterschieden der Bildpunkte auf der Netzhaut z. B. auch Unterschiede in der Geschwindigkeit, mit der sich im Falle bewegter Objekte die Bildpunkte in den Netzhautbildern bewegen.</p> |
| Abbildungsfaktoren | <p>Zweidimensionale optische Abbildungen enthalten zahlreiche Hinweise auf die dritte Dimension der abgebildeten Realität. Dies gilt auch für das Netzhautbild. Zu diesen Abbildungsfaktoren gehören beispielsweise die Schatten, die Verdeckung des Hintergrundes durch Gegenstände im Vordergrund, die mit der Entfernung abnehmenden Farbkontraste (verbunden mit zunehmender Blautönung) und abnehmende Linienkontraste (Scharfzeichnung).</p> <p>Als wichtigster Abbildungsfaktor für die Entfernungswahrnehmung fungiert die Größenperspektive. Sie beruht auf der Variation des Schwinkels mit der Entfernung (s. dazu S. 3).</p> |

¹ *Literaturhinweis:* ROCK, Irvin: Wahrnehmung. Vom visuellen Reiz zum Sehen und Erkennen. Heidelberg: Spektrum-Verlag 1985. HUBEL, David H.: Auge und Gehirn. Neurobiologie des Sehens. Heidelberg: Spektrum-Verlag 1989.

Erläuterung zur Bedeutung des Schwinkels für die Entfernungswahrnehmung

- Unter dem **Schwinkel** versteht man den Winkel, dessen Scheitel im Zentralpunkt der Hauptebene des Brechungssystems liegt (näherungsweise in der Augenpupille), und dessen Schenkel von den Randstrahlen zwischen betrachtetem Gegenstand und Auge gebildet werden (Abb. 1).
- Da Zentralstrahlen ungebrochen durch das optische Zentrum des Auges verlaufen, bestimmt der Schwinkel die **Größe des Netzhautbildes**.
- Der Schwinkel und damit auch die Größe des Netzhautbildes hängen einerseits von der Gegenstandsgröße G und andererseits von der Entfernung g ab (Abb.1).
- Bei Gegenständen, die aus der Alltagserfahrung bekannt sind, schließen wir unbewusst aus dem Schwinkel (bzw. aus der Größe des Netzhautbildes) auf die Entfernung.
- Das dem „perspektivischen Sehen“ zugrundeliegende Gesetz der konstanten Größenswahrnehmung (Größenkonstanz) heißt **Emmert'sches Gesetz**. Es besagt, dass das Produkt aus *Größeneindruck* B und *Entfernung* g konstant ist:

$$B \cdot g = \text{const.}$$

(In Worten: „Je weiter etwas weg ist, desto kleiner sieht es aus“; Abb. 2.)

Die Größenkonstanz im Sinne der unbewussten aber korrekten Verrechnung von Größe und Entfernung funktioniert nur für vertraute Entfernungen (bis ca. 1 km) und vertraute Gegenstände. Es gibt zahlreiche Situationen, in denen die Wahrnehmungsleistungen für diese unbewusste „Verrechnung“ nicht ausreichen.²

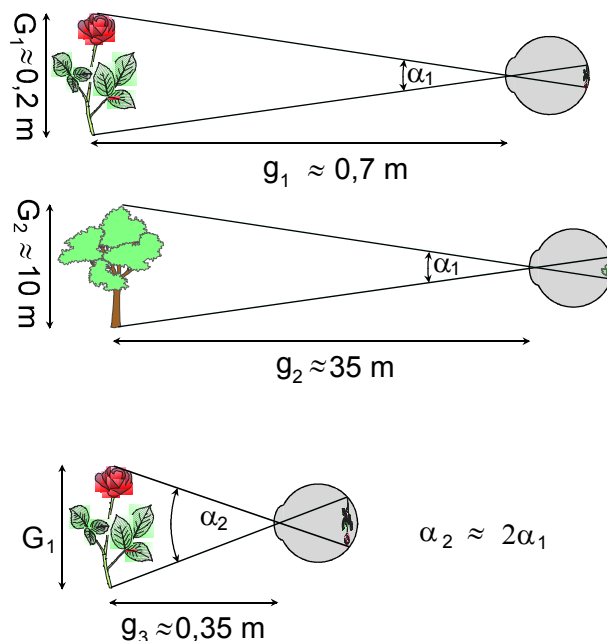


Abbildung 1



Abbildung 2

Hinweis zur Abbildung 1: Das Verhältnis G/g entspricht näherungsweise dem Bogenmaß des Winkels. Bei den kleinen Winkeln, die in der Praxis von Bedeutung sind, kann von einer Proportionalität zwischen Winkel und Entfernung ausgegangen werden (für $G = \text{const}$).

² Vergl. dazu: MUCKENFUß, Heinz: Groß und klein - nah und fern. Der Schwinkel als Leitfaden im Optikunterricht. In: Praxis der Naturwissenschaften. Physik. 45/1996 Heft 8, S. 2–8.

Erläuterung zur wahrgenommenen Lage des Spiegelbildes am ebenen Spiegel

Die gerichtete Reflexion des Lichts an einer Fläche stellt die physikalische Voraussetzung für die Wahrnehmung von Spiegelbildern dar, wenngleich sie für deren Erklärung nicht ausreicht.

Abb.1 zeigt das **Reflexionsgesetz** „ $\varphi = \beta'$ “. (φ : Winkel zwischen einfallendem Strahl und Flächennormale bzw. „Einfallslot“; β' : Winkel zwischen Flächennormale und reflektiertem Strahl).

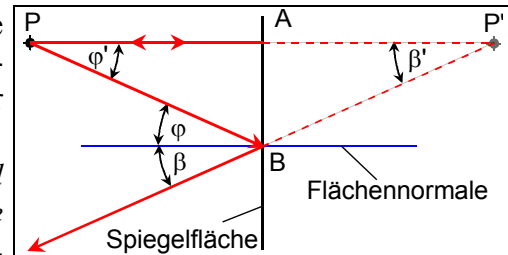


Abbildung 1

Darüber hinaus folgt aus $\varphi = \varphi' = \beta'$:

- Die Dreiecke PBA und P'AB sind kongruent.
- Alle Bildpunkte liegen im gleichen Abstand hinter der Spiegelfläche wie die zugeordneten Gegenstandspunkte davor. Der Winkel, den zwei beliebige Strahlen einschließen, wird durch die Reflexion nicht verändert ($\varphi' = \beta'$).
- Für die Reflexion im dreidimensionalen Raum ist zu beachten, dass der einfallende und der reflektierte Strahl mit der Flächennormale in einer Ebene liegen.

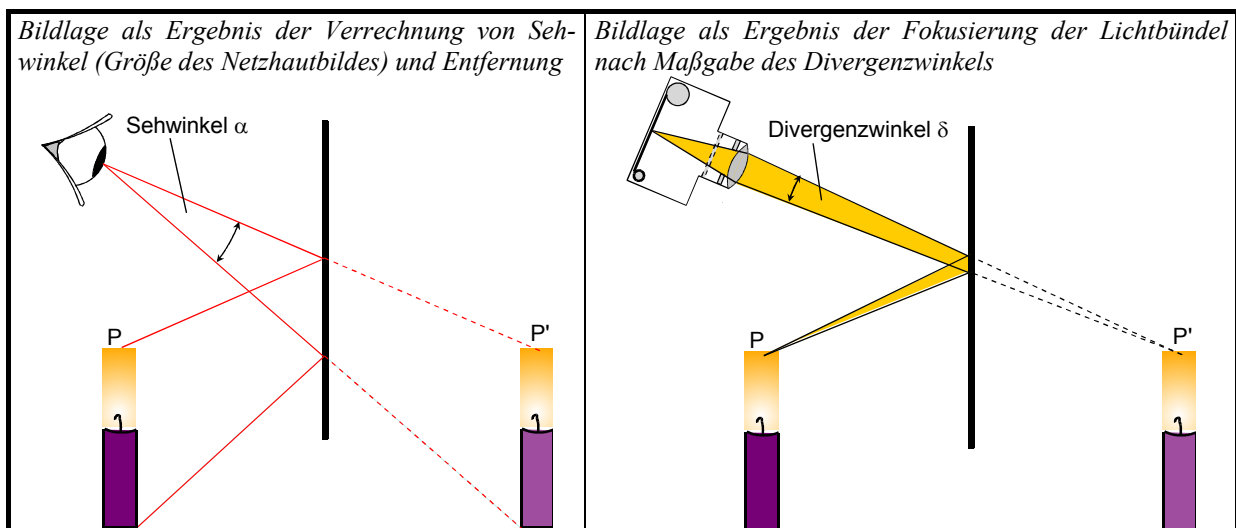


Abbildung 2

Abbildung 3

Die **Wahrnehmung** der Entfernung bei Spiegelbildern beruht in vielen praktischen Fällen auf der Größewahrnehmung (Emmert'sches Gesetz, s. S. 3). Dies gilt vor allem, wenn der Lichtweg vom Gegenstand zum Auge größer als 2 – 3 m ist. Physikalisch fungiert dann der **Sehwinkel** als Wahrnehmungsparameter. Eine Bildkonstruktion, die diesem Sachverhalt Rechnung trägt, zeigt Abbildung 2. Da der Sehwinkel durch die Reflexion am ebenen Spiegel nicht verändert wird, entspricht die wahrgenommene Entfernung des virtuellen Bildes dem realen Lichtweg. (Akkommodation der Augenlinse und der Konvergenzwinkel fungieren nur bei sehr kleinen Abständen als relevante Wahrnehmungsparameter.)

Optische Abbildungsgeräte müssen für scharfe Bilder *fokussiert* werden. Dabei richtet sich die Entfernungseinstellung nach dem dem **Divergenzwinkel** δ , unter dem die Lichtbündel in das Objektiv fallen. Der Divergenzwinkel stimmt mit dem Winkel des Bündels überein, das vom virtuellen Bildpunkt ausgehend ins Objektiv fällt. Die Entfernungseinstellung eines Abbildungsgerätes entspricht daher der Länge des geometrisch konstruierten Lichtwegs für die Abbildung des virtuellen Bildpunktes.

Die Begründungen für wahrgenommene und apparativ gemessene Bildlagen sind daher verschieden.

Der Lichtweg am erhabenen Spiegel (Wölbspiegel)

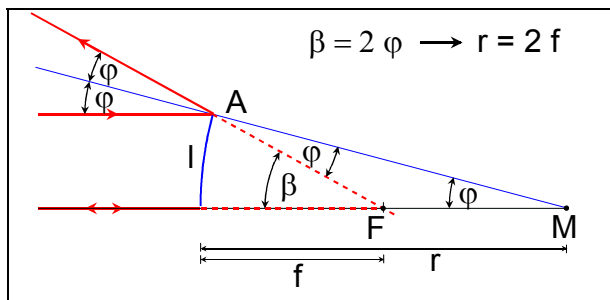


Abbildung 1

Zu einem beliebigen Strahl, der unter dem Einfallswinkel φ auf die reflektierende Fläche des Wölbspiegels fällt, kann ein paralleler Radialstrahl gezeichnet werden. Dieser trifft senkrecht auf die Spiegelfläche, verläuft in Richtung des Spiegelmittelpunkts M und wird in sich reflektiert.

Die rückwärtigen Verlängerungen der reflektierten Strahlen schneiden sich im Punkt F .

Da β ein Außenwinkel im Dreieck FMA ist, gilt $\beta = 2 \varphi$. Für den Abstand f des Punktes F von der Spiegelfläche gilt dann für kleine Winkel:

$$\beta = 2 \varphi \approx \frac{l}{f}$$

$$\varphi = \frac{l}{r} \rightarrow 2 \frac{l}{r} = \frac{l}{f} \quad \text{oder}$$

$$f = \frac{r}{2}$$

Damit gilt für alle Strahlen, die in einem relativ geringen Abstand zu einem Radialstrahl parallel zu diesem auf die Spiegelfläche fallen, dass sie sich im Punkt F schneiden. (Weit vom Radialstrahl entfernt einfallende Strahlen schneiden den Radialstrahl innerhalb von f ; s. Abb. 2. Dies führt zu Bildunschärfen.)

Der Punkt F heißt *virtueller Brennpunkt*. Diese Überlegungen gelten in Bezug auf Radialstrahlen beliebiger Richtung. Zu jedem Radialstrahl gehört dann ein dem Brennpunkt F entsprechender Bildpunkt.

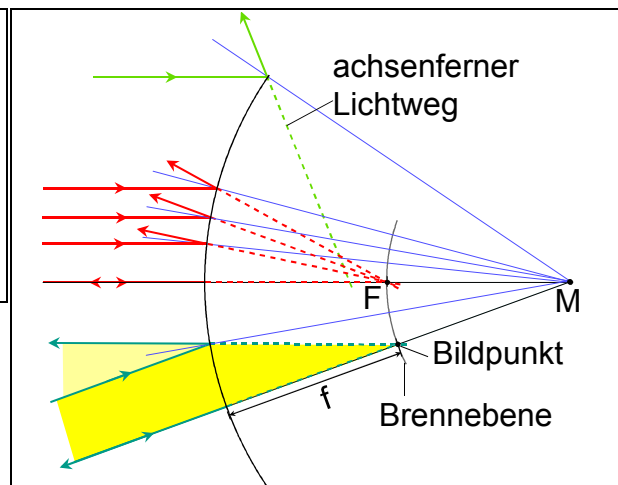


Abbildung 2

Lichtbündel mit parallelen Randstrahlen, wie sie von weit entfernten Gegenstandspunkten auf den Spiegel treffen, werden deshalb so reflektiert als gingen die Strahlen von einem Bildpunkt aus, der zur Spiegelfläche den Abstand $\frac{1}{2} r = f$ hat.

Die Bildpunkte paralleler Lichtbündel beliebiger Richtung liegen deshalb in einer sphärischen Fläche, der sog. *Brennfläche*. Weit entfernte Gegenstände werden deshalb in der Brennfläche abgebildet.

Lichtbündel, die von Gegenstandspunkten ausgehen, die sich in *endlicher* Entfernung g von der Spiegelfläche befinden, schließen einen Divergenzwinkel $\delta > 0$ ein. Abb. 3 zeigt, dass in diesem Fall die Bildpunkte innerhalb der Brennweite f liegen ($b < f$). Der Grund liegt in der Aufweitung des Divergenzwinkels ($\delta_r > \delta_e$) aufgrund der nichtparallelen Einfallslotte (Abb. 3).

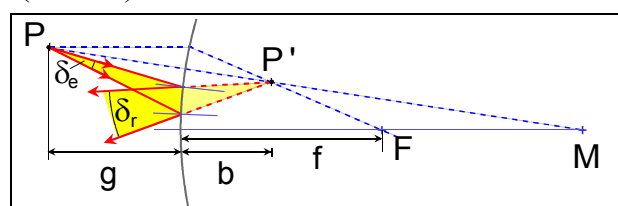


Abbildung 3

Vergleich der geometrischen Bildlagen, Bildgrößen und Sehwinkel bei Plan- und Wölbspiegeln

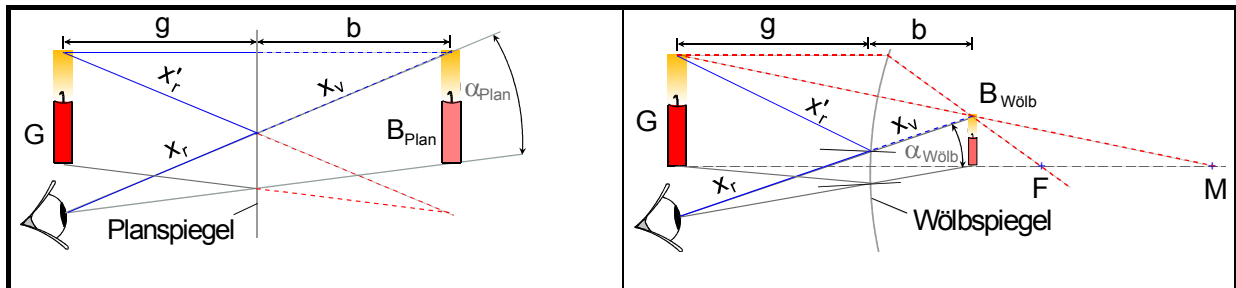


Abbildung 1

Abbildung 2

Abbildung 1 zeigt die Bildkonstruktion für die Bildlage und Bildgröße am Planspiegel. Merkmale:

- Der Lichtweg $x_r + x_v$ für einen virtuellen Bildpunkt ist gleich lang wie der reelle Lichtweg $x_r + x'_r$ vom Gegenstand zum Auge.
- Die Bildgröße ist gleich der Gegenstandsgröße
- Der Sehwinkel α_{Plan} entspricht dem Sehwinkel, unter dem der Gegenstand bei einem Beobachtungsabstand gesehen wird, der dem reellen Lichtweg entspricht.

Abbildung 2 zeigt die Bildkonstruktion für die Bildlage und Bildgröße am erhabenen Spiegel. Merkmale:

- Der Lichtweg $x_r + x_v$ für einen virtuellen Bildpunkt ist kürzer als der reelle Lichtweg $x_r + x'_r$ vom Gegenstand zum Auge.
- Die Bildgröße ist kleiner als die Gegenstandsgröße.
- Wegen der kleineren Bildgröße trotz des verkürzten Lichtweges $x_r + x_v$ ist der Sehwinkel $\alpha_{wölb}$ kleiner als derjenige, unter dem der wirkliche Gegenstand bei dem Lichtweg $x_r + x_v$ gesehen wird.

Abbildung 3 zeigt den Sehwinkelvergleich der virtuellen Bilder am Plan- und Wölbspiegel bei gleicher Gegenstandsweite. (Abb. 3 ist durch Übereinanderlegen der Abb.1 und Abb. 2 erzeugt.) Es zeigt sich: Der Sehwinkel $\alpha_{wölb}$ ist kleiner als beim Planspiegel. Die unbewusst zugeordnete Entfernung ist daher größer als beim Planspiegel.

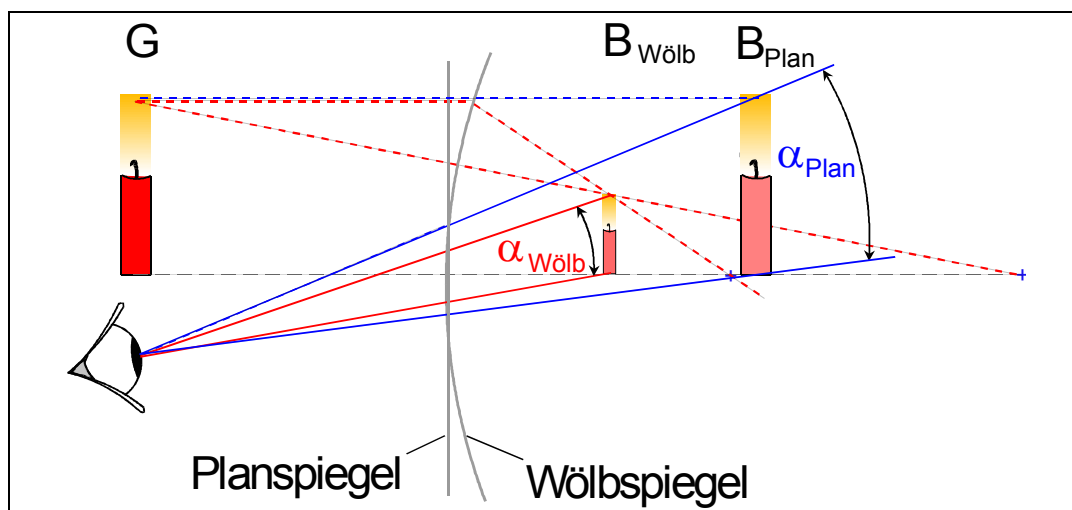
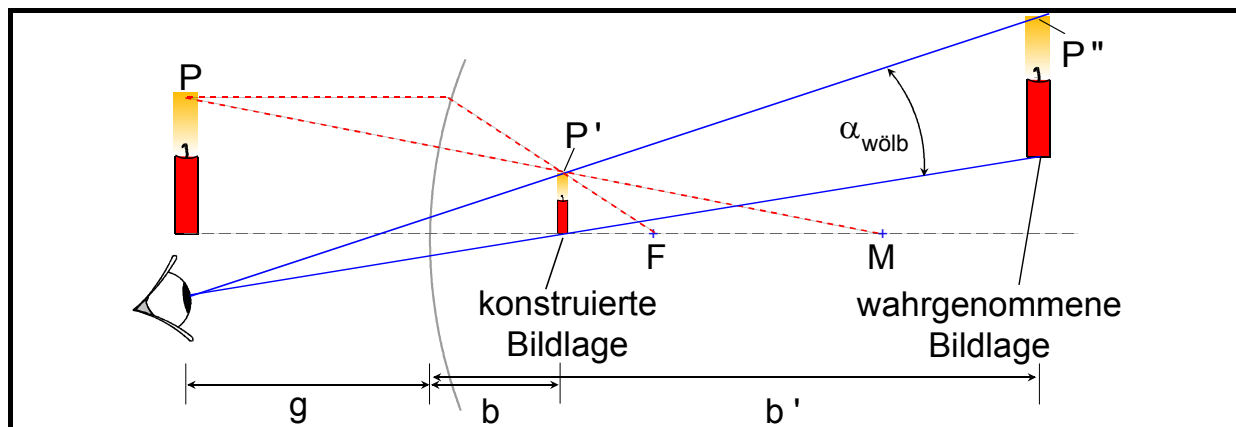


Abbildung 3

Vergleich der wahrgenommenen mit der geometrischen Bildlage bei Wölbspiegeln



Die Abbildung zeigt die geometrisch konstruierte und die wahrgenommene Bildlage am erhabenen Spiegel für ein Objekt in endlicher Gegenstandsweite g :

- Der geometrisch konstruierte Bildpunkt P' liefert die virtuelle Bildweite b . Abbildungsgeräte müssen für scharfe Bilder auf diese Bildweite b fokussiert werden.
- Bei kurzen reellen Lichtwegen bzw. kleinen Beobachtungsabständen nehmen wir auch mit dem Auge das virtuelle Bild in der Bildweite b wahr. Denn dann sind die okulomotorischen Entfernungsparameter maßgebend (s. S. 2). Wie beim Fotoapparat bestimmt in diesen Fällen der Divergenzwinkel δ den Entfernungseindruck. Das Objekt wird dann bewusst verkleinert und in der Entfernung b wahrgenommen.
- Wächst der reelle Lichtweg auf mehr als 2–3 Meter an, bestimmt der Sehwinkel den Wahrnehmungseindruck. In diesem Fall verrechnet das Gehirn für den Wahrnehmungseindruck die Bildgröße und den Entfernungseindruck nach dem Emmertschen Gesetz. Da wir mit der wirklichen Größe des Objektes vertraut sind, wird dem Bild eine Entfernung zugeschrieben, die dem Sehwinkel entspricht. Da dieser Sehwinkel verkleinert ist, wird der wahrgenommene Bildpunkt P'' unbewusst in die größere Entfernung b'' verlegt.

Verallgemeinerungen

Die gemäß dem Reflexions- und Brechungsgesetz konstruierbaren Orte für virtuelle Bilder stimmen nur in Ausnahmefällen mit den wahrgenommenen Bildorten überein (weitere Beispiele s. folgende Seite). Dies zeigt, dass formale Bildkonstruktionen Wahrnehmungseindrücke nicht kausal erklären können. In sehr vielen Alltagssituationen ist der Sehwinkel α der wichtigste Parameter für die Tiefenwahrnehmung. Der Konstruktion virtueller Bilder liegt jedoch der Divergenzwinkel δ zugrunde, unter dem ein Lichtbündel vom mathematisch-konstruktiven Bildpunkt auszugehen scheint. Der Divergenzwinkel kann zu anderen Bildorten führen als denjenigen, die sich gemäß den wahrnehmungspsychologischen Gesetzen aus dem Sehwinkel ergeben. In diesen Fällen entsteht eine Diskrepanz zwischen der Wahrnehmung und der Bildkonstruktion. Damit ist immer zu rechnen, wenn sich der Sehwinkel nicht proportional oder gar mit anderem Vorzeichen verändert als der Divergenzwinkel.³

Geometrische Bildpunkt-konstruktionen sind andererseits für die Erklärung der Wahrnehmungseindrücke nicht entbehrlich. Sie liefern in jedem Fall die Richtung, in der die Bildpunkte wahrgenommen werden und in vielen Fällen auch die Bildgröße, über die der Sehwinkel festgelegt ist (z. B. erhabener Spiegel).

³ Weitere Erklärungen und Bildfälle siehe: MUCKENFUß, Heinz: Zur Didaktik virtueller Bilder. Phänomen und physikalisches Konstrukt. In: Praxis der Naturwissenschaften. Physik. 45/1996 Heft 8, S. 9–14

Weitere Beispiele zur wahrgenommenen bzw. geometrischen Bildlage von virtuellen Bildern

Langbrennweitige **Hohlspiegel**, wie sie z. B. als Toilettenspiegel verwendet werden, erzeugen bei Beobachtungsabständen von $g < f$ vergrößerte virtuelle Bilder (Sehwinkelvergrößerung).

Der Divergenzwinkel wird dagegen verkleinert. Letzteres führt zu einer virtuellen Bildweite von $b \gg g$. Trotz der dadurch notwendigen Akkommodation der Augenlinse auf große Entfernung, stellt sich wegen der Sehwinkelvergrößerung eher der gegenteilige Wahrnehmungseindruck ein.

Lupen (kurzbrennweitige Sammellinsen) vergrößern den Sehwinkel. Er entspricht bei maximaler Vergrößerung dem Sehwinkel, der sich bei Betrachtung des Gegenstand in einer Entfernung von $g = f$ einstellt. (Normalerweise werden Gegenstände in der deutlichen Sehweite von ca. 25 cm betrachtet.)

Für $g = f$ lässt sich kein virtuelles Bild konstruieren ($b = \infty$). Es entsteht aber ein vergrößertes Netzhautbild, das nicht „unendlich weit“ entfernt zu sein scheint.

In Schulbüchern wird für die **Lupe** häufig der Fall $g < f$ dargestellt, obwohl die Lupe dann nicht optimal genutzt wird. Der Grund dafür liegt vielleicht in der Möglichkeit, für diesen Fall ein virtuelles Bild konstruieren zu können. Der geometrische Bildort liegt aber in relativ großer Ferne, was wieder dem Wahrnehmungseindruck widerspricht.

Beim Schnorcheln werden z. B. Muscheln durch die **Taucherbrille** vergrößert wahrgenommen. Die wirkliche Größe stellt sich meist erst heraus, wenn die Funde am Strand begutachtet werden.

Die Brechung an der Taucherbrille führt zu einer Sehwinkelvergrößerung. Die optische Verringerung der scheinbaren Bildweite wird aber meist nicht wahrgenommen, weil im Wasser Vergleichsparameter fehlen. (Motorische Signale, wie z. B. ein ausgestreckter Arm, liefern u. U. sogar die wirkliche Entfernung.)

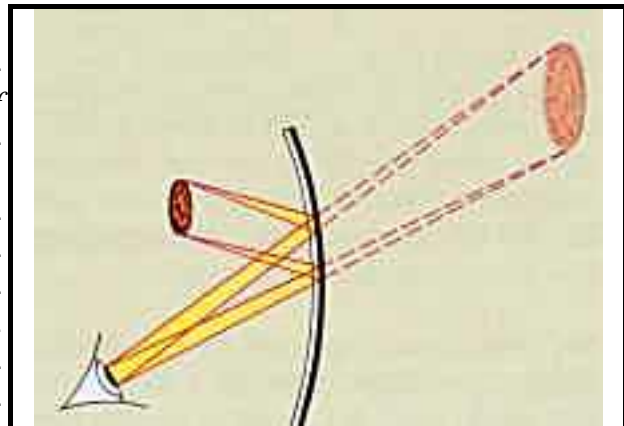


Abbildung 1

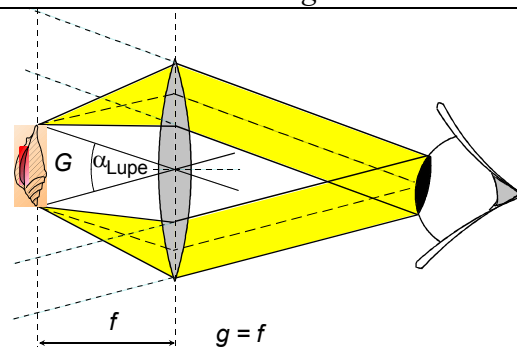


Abbildung 2

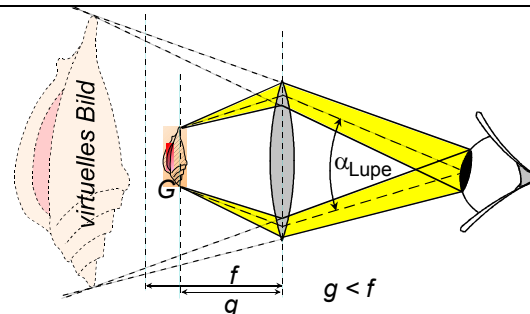


Abbildung 3

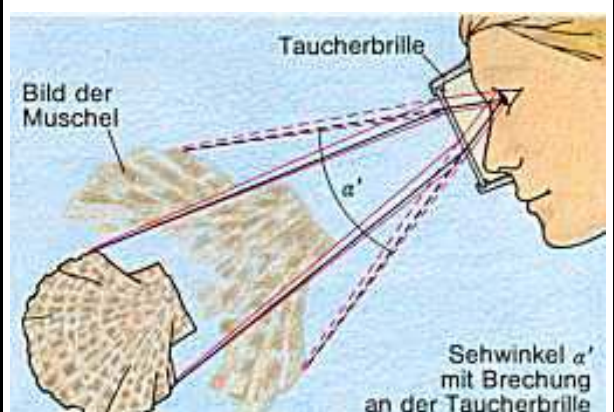


Abbildung 4