



Laserstrahlung und vergrößernde optische Instrumente

Vor der Gefährlichkeit von Laserstrahlung bei Betrachtung durch vergrößernde optische Instrumenten wird vielfach gewarnt. Aber ist die Exposition bei Betrachtung durch Mikroskope oder Fernrohre tatsächlich gefährlicher als die direkte Exposition? Einen Teil der Antwort gibt eigentlich schon der Begriff Vergrößerung. Vergrößernde optische Instrumente vergrößern alles, auch den Laserstrahl. Dadurch sinkt zumindest die Bestrahlungsstärke an der Netzhaut, sofern die Strahlung bis dorthin gelangt. Dies ist der Fall im Wellenlängenbereich 400-1400 nm. In diesem Fall ist die Gefährdung des Auges gegenüber direkter Exposition eigentlich geringer. Aber es gibt auch Ausnahmen. Dringt die Strahlung nicht bis zur Netzhaut vor, ist die Antwort schwieriger. Es ist also erforderlich, jeden Fall für sich zu betrachten. Im Folgenden werden einige Szenarien betrachtet, die bei der technischen Anwendung von Laserstrahlung häufig auftreten.

Einfache Lupen

Einfache Lupen erzeugen ein aufrechtes Bild. Die Vergrößerung ist näherungsweise gegeben durch

$$v = \frac{s}{g - e \cdot \left(1 + \frac{g}{f}\right)}$$

Dabei ist s der Sehabstand, der sich durch die Akkomodation des Auges einstellt, g der Abstand zwischen Lupe und Gegenstand (Arbeitsabstand), e der Abstand der Lupe vom Auge und f die Brennweite der Lupe. Ohne Lupe würde ein kollimierter Laserstrahl durch die Brechkraft des Auges zu einem sehr kleinen Fleck auf die Netzhaut fokussiert (Bild 1a).

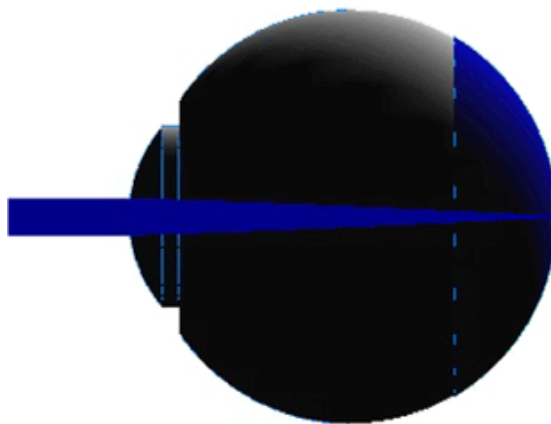


Bild 1a: Kollimierter Laserstrahl mit Auge.



Mit Lupe ändert sich daran nicht viel (Bild 1b). Dies gilt auch für den Durchmesser des Laserstrahls an der Hornhaut. Wie Bild 1c zeigt, ändert sich im Grundsatz auch dann nichts, wenn eine Strahldivergenz vorliegt. Durch die Verwendung einer Lupe ändert sich die Gefährdung von Hornhaut und Netzhaut des Auges durch Laserstrahlung im Vergleich zur direkten Exposition also nicht nennenswert.

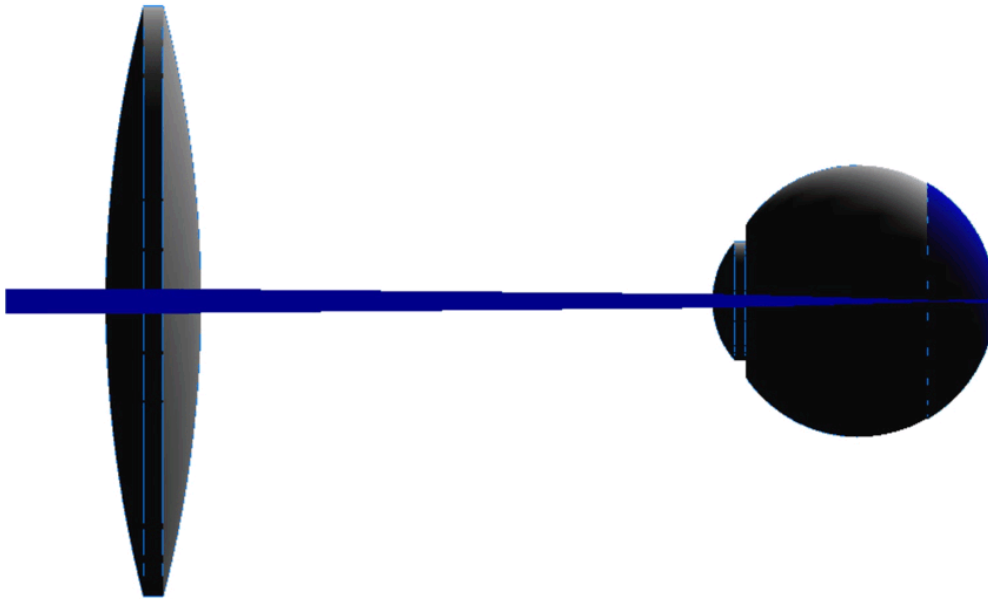


Bild 1b: Kollimierter Laserstrahl mit Auge und Lupe

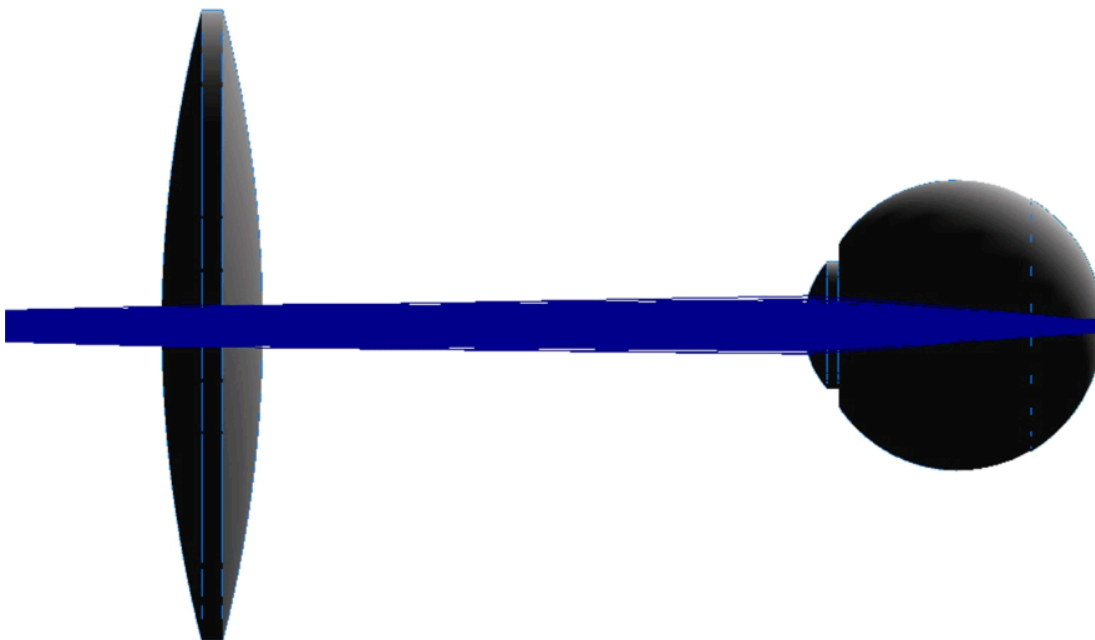


Bild 1c: Divergender Laserstrahl mit Auge und Lupe



Mikroskop

Mikroskope bestehen im wesentlichen aus zwei Linsen, dem Objektiv und Okular (Bild 2a).

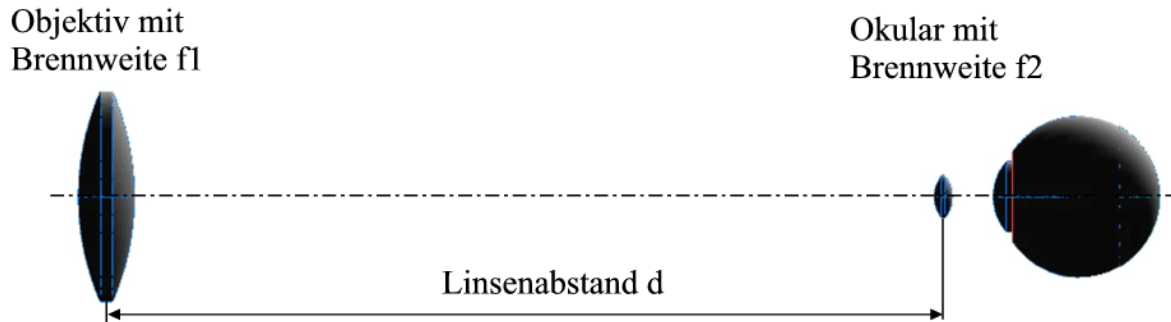


Bild 2a: Prinzip eines Mikroskops

Das Objektiv bildet einen Gegenstand etwa in den Brennpunkt des Okulars ab. Diese Anordnung erzeugt ein umgekehrtes Bild, das aber meist durch prismatische Umlenkung aufrecht erscheint. Da diese auf einen Laserstrahl keinen Einfluss hat, wurde sie im Bild weg gelassen. Die Vergrößerung eines Mikroskops ist gegeben durch

$$v = s \cdot \frac{d - f_1 - f_2}{f_1 \cdot f_2} .$$

Dabei sind f_1 und f_2 die Brennweiten von Objektiv und Okular, d ist der Abstand beider Linsen und s der Sehabstand. Als Sehabstand wird meist $s = 250$ mm gewählt, da man einen kleinen Gegenstand auch mit bloßem Auge etwa aus dieser Entfernung betrachten würde. Der Linsenabstand d wird so bemessen, dass ein Gegenstand im Abstand g vor dem Objektiv scharf gesehen wird. Hierdurch ergibt sich als weitere Bedingung

$$g = \frac{f_1 \cdot d - f_1 \cdot f_2}{d - f_1 - f_2} .$$

Wenn ein kollimierter Laserstrahl durch das Objektiv in das Mikroskop gelangt, wird er in Hornhautnähe fokussiert und dort je nach Wellenlänge absorbiert oder durch die Brechkraft des Auges vergrößert auf die Netzhaut abgebildet. Im Beispiel Bild 2b ergibt sich mit den Brennweiten $f_1 = 75$ mm und $f_2 = 10$ mm, sowie dem Linsenabstand $d = 120$ mm und dem Abstand $g = 150$ mm vom Objektiv eine etwa 10-fache Vergrößerung für das Mikroskop. Dabei handelt es sich um typische Werte für technische Mikroskope. Wissenschaftliche Mikroskope sind auf wesentlich geringere Objektivabstände ausgelegt und können bis zu 1600-facher Vergrößerung aufweisen.



Objektiv mit
Brennweite f_1

Okular mit
Brennweite f_2

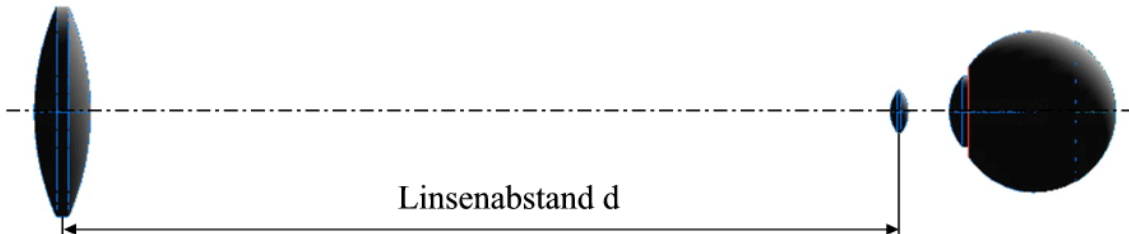


Bild 2b: Mikroskop mit objektivseitig auftreffendem kollimiertem Laserstrahl

Die Bestrahlungsstärke an der Netzhaut ist also abhängig von der Vergrößerung des Mikroskops und stets kleiner als bei direkter Exposition. Ähnlich sieht es bei einem konvergent oder divergent einfallendem Laserstrahl aus (Bilder 2c und 2d). Laserstrahlung bei Wellenlängen, die bereits von der Hornhaut absorbiert werden (z.B. CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 10600 nm), ist daher gefährlicher als bei direkter Exposition. Laserstrahlung bei Wellenlängen, die ungehindert bis zur Netzhaut vordringen (z.B. Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm), ist dagegen weniger gefährlich als bei direkter Exposition. Andererseits wären Hornhautschäden eventuell noch durch eine Hornhauttransplantation beherrschbar, während Netzhautschäden bisher als irreparabel gelten.

Objektiv mit
Brennweite f_1

Okular mit
Brennweite f_2



Bild 2c: Mikroskop mit objektivseitig auftreffendem divergentem Laserstrahl

Objektiv mit
Brennweite f_1

Okular mit
Brennweite f_2



Bild 2d: Mikroskop mit objektivseitig auftreffendem konvergentem Laserstrahl

Ab einem gewissen Durchmesser des Laserstrahls erfolgt ein Beschneiden des Laserstrahls durch die maximale Apertur des Mikroskops. Dadurch gelangt nur ein Teil der Laserleistung zum Auge. Die Bestrahlungsstärken in der Nähe der Hornhaut oder gegebenenfalls an der Netzhaut verringern sich dadurch jedoch kaum. Die Pupille des Auges kann ebenfalls begrenzend wirken. Aber auch dies würde die Bestrahlungsstärken kaum mindern.



Von praktischer Bedeutung sind die vorstehenden Betrachtungen beispielsweise bei der mikroskopischen Beobachtung von Laserschweißvorgängen, auf die wir später noch näher eingehen werden, und bei der Verwendung von Laserbeleuchtungen in der Mikroskopie.

Fernrohr

Fernrohre und Mikroskope unterscheiden sich von Mikroskopen hauptsächlich dadurch, dass sie auf sehr große Objektivabstände und die Beobachtung bei Akkomodation des Auges auf Unendlich ausgelegt sind. Die Vergrößerung ist gegeben durch

$$v = \frac{f_1}{f_2} .$$

Daneben unterscheidet man zwei Ausführungsformen.

Beim astronomische Fernrohr sind Objektiv und Okular Sammellinsen (Bild 3). Es entsteht ein umgekehrtes Bild. Für die Abbildung von Laserstrahlen, die durch Objektiv und Okular ins Auge gelangen, gilt daher das Gleiche, wie für das Mikroskop: Ein kollimierter Laserstrahl, der durch das Objektiv in das Teleskop gelangt, wird auf die Netzhaut vergrößert abgebildet (Bild 3).

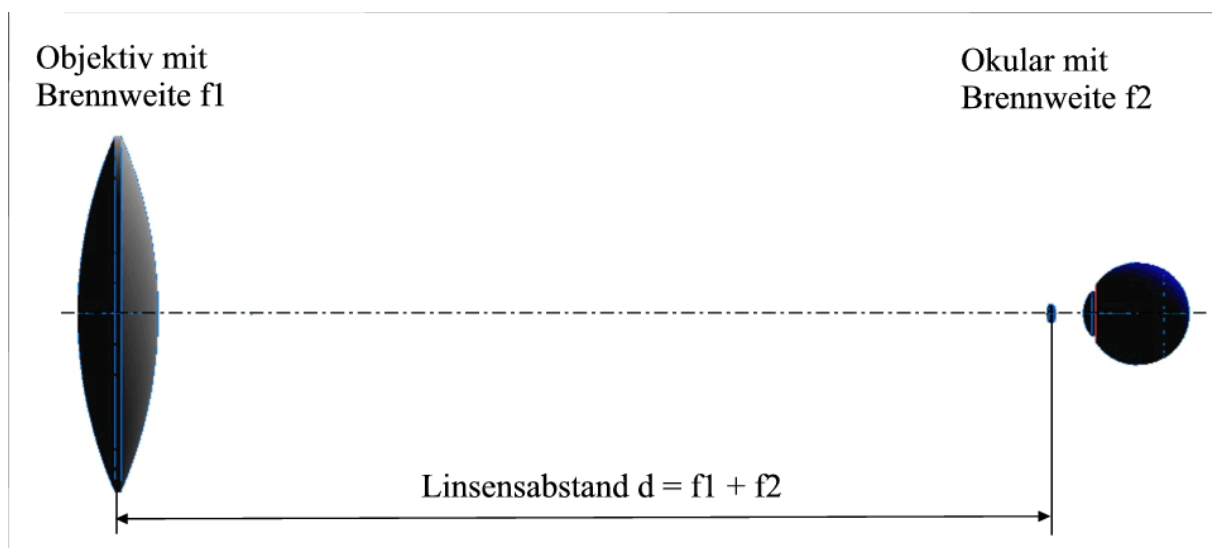


Bild 3: Astronomisches Fernrohr

Mit Bildumkehr wird diese Bauweise am häufigsten angewandt, beispielsweise beim Feldstecher, sowie bei Zielfernrohren für Vermessungsgeräte oder Jagd.

Beim holländisches Fernrohr ist das Objektiv eine Sammellinse und das Okular eine Zerstreuungslinse (Bild 4). Es entsteht ein aufrechtes Bild. Da bei gleicher Vergrößerung wie beim astronomischen Fernrohr der Abstand zwischen den beiden Linsen sehr kurz wird ($d =$



f_2), werden solche Fernrohre insgesamt relativ kurz und somit auch leicht, zumal auch eine Bildumkehr entfällt. Man verwendet diese Bauweise deshalb gerne beim Opernglas. Bei dieser Variante kommt es sowohl im Bereich der Hornhaut also auch an der Netzhaut zu einer Vergrößerung des Laserstrahldurchmessers. Von praktischer Bedeutung ist dies, wenn man mit einem Opernglas versehentlich einen Laserpointer beobachtet (nahezu kollimierte Strahlung mit einem Durchmesser von einigen Millimetern). Wie die vorstehenden Ausführungen zeigen, bleibt dieser Zwischenfall ohne Folgen, falls der Laserpointer nicht unzulässigerweise oberhalb der Grenzwerte für Laserklasse 2 nach DIN EN 60825-1 liegt. Man wird aber vermutlich heftig erschrecken, wenn plötzlich die ganze Netzhaut mit grüner oder roter Strahlung beaufschlagt wird, und vielleicht auch ein wenig geblendet sein. Man sollte diesen Fall also nicht absichtlich herbeiführen.

Objektiv mit Brennweite f_1

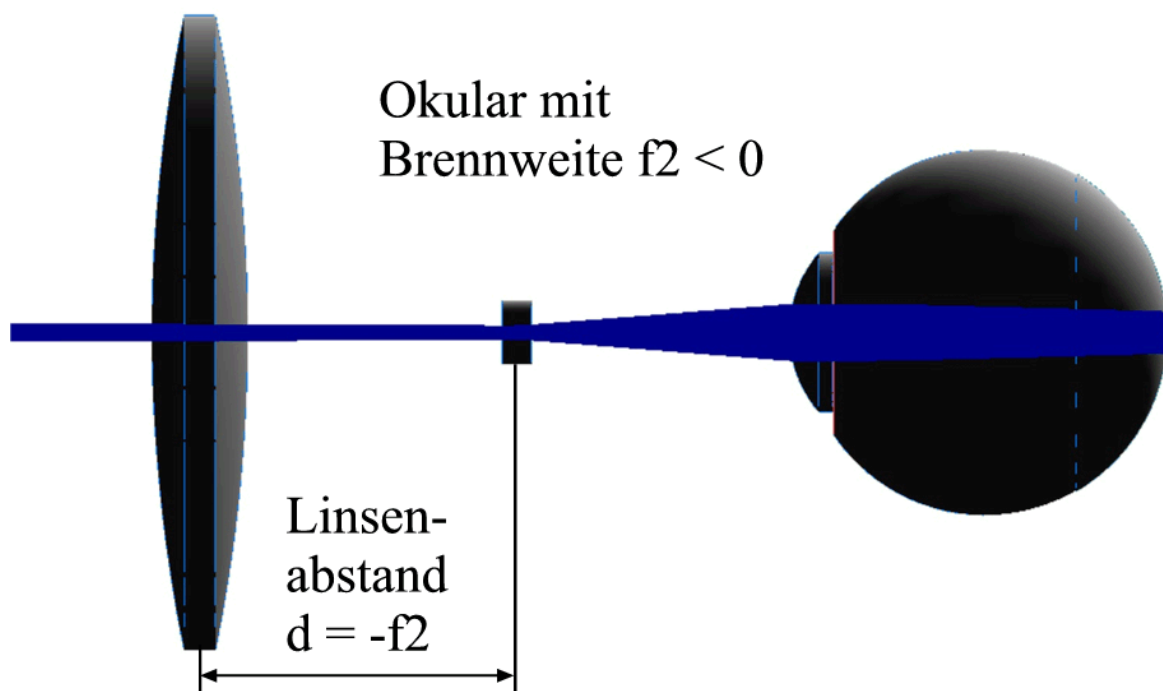


Bild 4: Galileisches Fernrohr mit objektivseitig auftreffendem, kollimierten Laserstrahl

Mikroskop mit paraxial eingekoppeltem Laserstrahl

Bild 5 zeigt eine Anordnung, wie sie beispielsweise in kleinen Laserschweißanlagen auf Basis von Nd:YAG-Lasern mit einer Wellenlänge von 1064 nm verwendet wird.

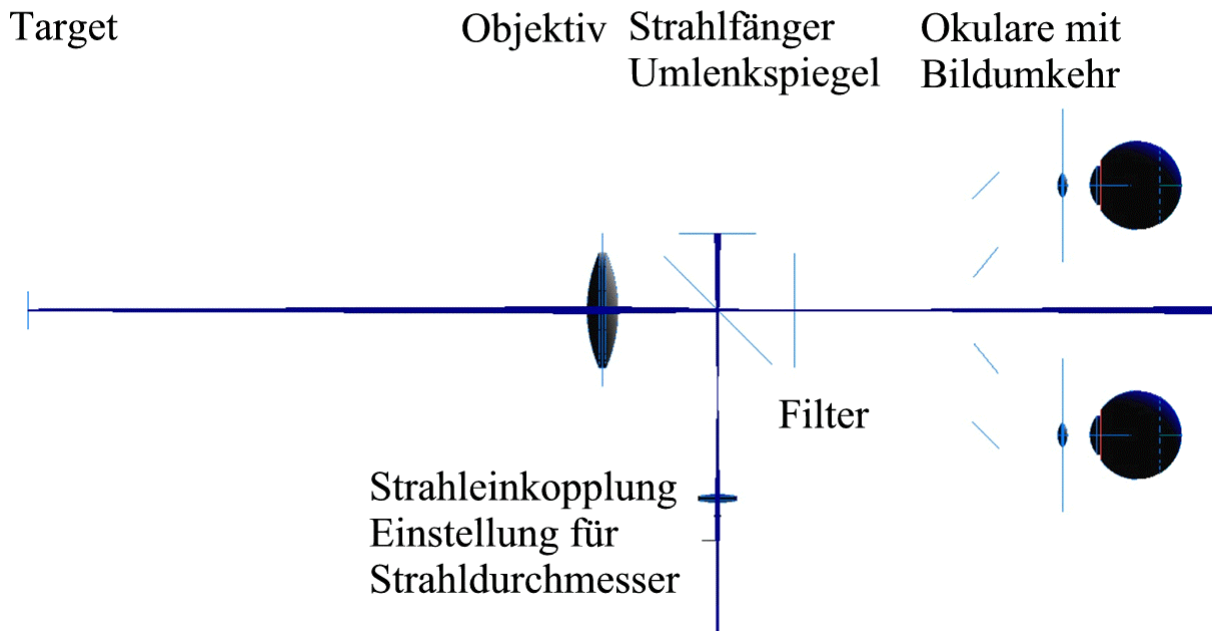


Bild 5: Mikroskop mit paraxial eingekoppeltem Laserstrahl

Dabei wird der Laserstrahl über einen Umlenkspiegel zentral in das Objektiv eingekoppelt und dann auf das Target gerichtet. Der Umlenkspiegel ist für den sichtbaren Wellenlängenbereich hochtransparent und für die Laserwellenlänge hochreflektierend. Der Durchmesser des Laserstrahls am Target wird über ein Teleskop eingestellt, dass im Bild ersatzweise durch eine einzige Linse dargestellt ist. Ein Teil der Strahlung wird vom Target in das Mikroskop reflektiert. Aber auch in diesem Fall gilt für die Abbildung des Laserstrahls in das Auge das bereits Gesagte.

Da der Umlenkspiegel einen gewissen, wenn auch kleinen Teil der reflektierten Laserstrahlung durchlässt, kann ein zusätzliches Schutzfilter erforderlich sein. Die Auslegung des Filters erfolgt üblicherweise nach DIN EN 207 Anhang B. Dabei werden aus den Laserdaten, mit denen das Filter beaufschlagt wird, erforderliche Schutzstufen für die betreffenden Betriebsarten ermittelt. In diese Auslegungsrechnungen gehen die Grenzwerte für die zulässige Strahlung nach DIN EN 60825-1 und die Zeitstandfestigkeit des Filters gegenüber der Laserstrahlung ein.

Ein etwas komplexerer Fall ist die paraxiale Einkopplung des Laserstrahls in ein Stereomikroskop (Bild 6a). Eigentlich kann der Laserstrahl bei dieser Anordnung kaum in eines der beiden Augen gelangen, es sei denn die Reflexion am Target erfolgt nicht lotrecht (Bild 6b). Damit entspricht die maximal mögliche Bestrahlung des Auges aber dem zuvor behandelten monokularen Mikroskop.

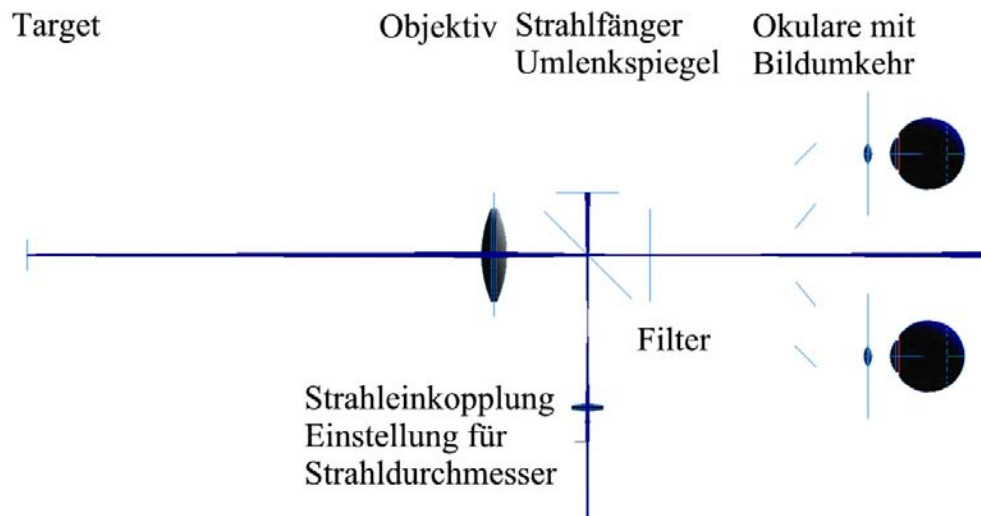


Bild 6a: Stereomikroskop mit paraxialer Einkopplung und lotrechtem Einfall am Target

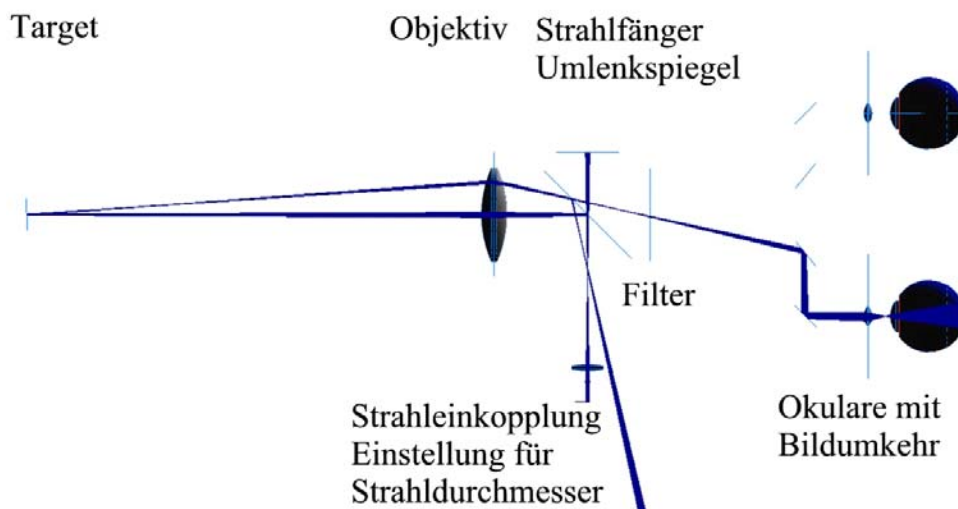


Bild 6b: Stereomikroskop mit paraxialer Einkopplung und schrägem Einfall am Target

*Offenhäuser+Berger GmbH
Krumme Straße 25
D-89518 Heidenheim*

*Tel. 07321 48061 5
Fax 0732148061 6
eMail info@offenhaeuser-berger.de*

29. Februar 2008