

LAS — Lasersicherheit

P3A — Praktikum

20. Februar 2021

Ziele

Gegenstand dieses Versuchs sind Gefahren, die von Lasern ausgehen und wie diese durch geeignete Gegenmaßnahmen minimiert werden können. Im Versuch werden physikalische Grundlagen verschiedener sicherheitsrelevanter Aspekte untersucht. Dies erfolgt mit Lasern unterschiedlicher Wellenlängen und Betriebsarten. Im Versuch erfolgt auch das Auseinandersetzen mit Normen des Laserschutzes.

Teilversuche

1. Maximal zulässige Bestrahlung (MZB)

Die für das Auge maximal zulässige Bestrahlung (MZB) soll für die obigen Wellenlängen mit Hilfe einer im Versuchsraum ausliegenden Normschrift bestimmt werden.

2. Intensität kontinuierlicher und gepulster Laser verschiedener Wellenlängen

Für einen blauen und einen grünen Laser sowie für eine orangene LED sollen Ausgangsleistungen und Strahldurchmesser bestimmt werden. Daraus wird die Intensität der einzelnen Laserquellen abgeschätzt.

3. Klassifikation verschiedener Laser

Anhand der Messungen und der Normschrift sollen die drei Lichtquellen den Laserklassen zugeordnet werden. Besonderheiten ergeben sich dadurch, dass einer der Laser gepulst arbeitet. Mit dem Oszilloskop wird die Laserleistung als Funktion der Zeit gemessen. Daraus können Pulsenergie und Pulsleistung abgeschätzt werden.

4. Änderung von lasersicherheitsrelevanten Parametern durch verschiedene optische Instrumente

Auswirkungen eines Strahlformers (Galilei-Teleskop), von Farbfiltergläsern und einer Irisblende auf sicherheitsrelevante Parameter sollen untersucht werden.

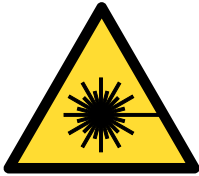
5. Gefährdung der Netzhaut

Die Gefahr eines Infrarot-Lasers durch den fokussierenden Effekt der Augenlinse soll mit Hilfe einer Retinasimulation veranschaulicht werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Physikalische Grundlagen	4
1.1	Stichworte zur Vorbereitung	4
1.2	Hintergrund des Versuchs	5
1.2.1	Gefährdung durch Laserstrahlung	5
1.2.2	Maximale zulässige Bestrahlung (MZB)	6
1.2.3	Laserklassen	7
1.2.4	Grenze zugänglicher Strahlung (GZS)	7
1.2.5	Veränderungen von sicherheitsrelevanten Parametern	7
1.2.6	Laserschutz- und Laserjustierbrillen	8
1.2.7	Sicherheitsabstand: Nominal Ocular Hazard Distance (NOHD)	9
1.2.8	Sicherheitsvorkehrungen	10
2	Technische Grundlagen	11
2.1	Beschreibung der Elemente	11
2.2	Lasercontroller	14
2.2.1	Lasercontroller LSC 2000	14
2.2.2	Lasercontroller LSC 1000	15
2.3	Transmissionskurven der Filtergläser	16
3	Durchführung und Auswertung	18
3.1	Teilversuch 1: Maximal zulässige Bestrahlung (MZB)	18
3.2	Teilversuch 2: Strahlungsleistung kontinuierlicher und gepulster Laser verschiedener Wellenlänge (Laser 473 nm, 532 nm, 590 nm)	18
3.3	Teilversuch 3: Klassifikation der Laser	20
3.3.1	Dauerstrich-Laser (CW-Laser)	20
3.3.2	Gepulste Laser	20
3.4	Teilversuch 4: Änderung von lasersicherheitsrelevanten Parametern durch verschiedene optische Instrumente	21
3.5	Teilversuch 5: Retinasimulation	22

Sicherheitshinweise



- Vor Versuchsbeginn müssen Sie die Laserbelehrung zur Kenntnis genommen haben!
- Bei Verwendung von Lasern oberhalb von Klasse 2 muss jede Person im Raum eine Justierbrille tragen! Trotz Justierbrille ist darauf zu achten, nicht in den Laserstrahl hineinzusehen.
- Die Justierbrillen sind auch für Brillenträger geeignet, es empfiehlt sich jedoch, falls möglich, Kontaktlinsen zu verwenden.
- Niemals absichtlich in den Strahl blicken. Die Augen bewusst schließen und den Kopf abwenden, wenn der Laserstrahl ins Auge trifft.
- Zur Überprüfung der Position des Laserstrahls ist es ratsam, ein Stück Papier in den Strahl zu halten.
- Uhren sowie Schmuck müssen abgelegt werden, um Reflexionen zu vermeiden.
- Berührungen des Laserstrahls mit der Haut sind zu vermeiden. Tragen Sie daher bitte Baumwollhandschuhe!

1 Physikalische Grundlagen

1.1 Stichworte zur Vorbereitung

- Dauerstrich, gepulste Laser
- Leistung (mittlere Leistung/Spitzenleistung), Intensität
- Laserklassen
- Gaußscher Strahl (Strahlprofil, Strahldurchmesser, Divergenz)
- Transmission und Optische Dichte
- IR-Detektor-Karte (Wie kann man infrarotes Licht sichtbar machen?)
- Aufgaben im Text!

Aufgabe

Zum besseren Verständnis vor Versuchsbeginn zu Hause vorzubereiten!

1. Intensitätsprofil eines Laserstrahls. Um das Intensitätsprofil eines Laserstrahls zu bestimmen, können wir nicht so ohne weiteres einfach die Intensität an verschiedenen Orten innerhalb des Strahls messen, da der Detektor unseres Power-Meters deutlich größer als die Strahlbreite des zu messenden Lasers ist. Wir haben aber die Möglichkeit, den Strahl durch eine hinreichend kleine Blende sukzessive einzuschnüren und die jeweils von der Blendenöffnung noch durchgelassene Leistung zu messen. Stellen Sie dazu eine Gleichung auf, die die von einer kreisförmigen Blende durchgelassene Leistung in Abhängigkeit des Blendendurchmessers und des radialen Intensitätsprofils $I(r)$ des Laserstrahls beschreibt. Berechnen Sie den Verlauf der durchgelassenen Leistung als Funktion des Blendendurchmessers für einen Strahl mit gaußischem Intensitätsprofil $I(r) = I_0 e^{-2(r/w)^2}$ (wobei w die $1/e$ -Halbbreite der elektrischen Feldstärke des Strahls ist, vgl. Abbildung 10) und plotten Sie diesen Verlauf. Wie lässt sich aus der resultierenden Kurve der Parameter w rekonstruieren?

2. Gefährdungsabstand. Betrachten Sie einen Laserstrahl mit gaußischem Strahlprofil, der ab einem Punkt X mit dem (vollen) Divergenzwinkel θ auseinanderläuft, wobei sich dieser Divergenzwinkel auf die $1/e$ -Punkte des Profils der elektrischen Feldstärke beziehen soll. Berechnen Sie die Intensität in der Strahlmitte als Funktion des Abstandes zum Punkt X . Wie groß ist der Abstand r_{NOHD} , bei dem die Intensität in der Strahlmitte auf die MZB abgesunken ist?

1.2 Hintergrund des Versuchs

1.2.1 Gefährdung durch Laserstrahlung

Die Gefährdung durch Laserstrahlung beruht vor allem auf ihrer Bündelung. Diese kann zusammen mit hohen emittierten Strahlungsleistungen außergewöhnlich große Strahlungsintensitäten für biologisches Gewebe bedeuten. Der primäre Vorgang ist die Absorption von Strahlungsleistung; dies kann zu folgenden Folgereaktionen führen:

- Thermische Wirkung
- Photochemische Wirkung
- Thermoakustische Übergänge und nichtlineare Effekte

Im Folgenden sollen die verschiedenen Wirkungen kurz erläutert werden.

Thermische Wirkung

Die absorbierte Strahlungsleistung führt zur Erwärmung des absorbierenden Gewebes. Übersteigt die Erwärmung eine Grenztemperatur, kommt es primär zur Denaturierung von Eiweißen. Durch Wärmeleitung kann es auch zu Zellschädigungen im umliegenden Gewebe kommen.

Photochemische Wirkung

Die Absorption gewisser Wellenlängen führt in bestimmten Molekülen zu spezifischen chemischen Reaktionen. Bei länger anhaltender Einwirkung kann dies zu irreversiblen Veränderungen in biologischem Gewebe führen. Einige dieser Reaktionen sind abnormale, andere Überreaktionen normaler Vorgänge.

Thermoakustische Übergänge und nichtlineare Effekte

Dem Gewebe wird Energie in kurzer Zeit zugeführt, dabei steigt die Temperatur so schnell an, dass Druckwellen durch abrupte thermische Ausdehnung entstehen. Diese können zu einem Zerreißen von Gewebe führen.

Bei hinreichend starker Erwärmung können außerdem flüssige Bestandteile der Zellen in Gas umgewandelt werden. Dieser Phasenübergang kann so schnell erfolgen, dass er explosiv verläuft.

1 Physikalische Grundlagen

In medizinischen Studien wurden all diese Schadensmechanismen (auch in Kombination) nachgewiesen. Der Grad, mit dem einer dieser Mechanismen für die Schädigung verantwortlich ist, hängt von verschiedenen physikalischen Eigenschaften, wie z. B. Wellenlänge, Strahlquerschnitt, Dauer oder Intensität des Laserstrahls ab. Der dominierende Faktor ist aber die Bestrahlungsdauer. Als Anhaltspunkt gilt:

- Nanosekunden und kürzer: thermoakustische Übergänge und nicht lineare Effekte
- 1 ms bis einige Sekunden: thermische Effekte
- über 10 s: photochemische Effekte

Die Gefährdung durch Laserstrahlung ist für Auge und Haut unterschiedlich. Im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1400 nm ist die Gefährdung des Auges wesentlich größer als für die Haut. In diesem Wellenlängenbereich sind Hornhaut, Kammerwasser, Linse und Glaskörper durchlässig und die Netzhaut im Sinne einer wirkungsvollen Umwandlung von Licht besonders empfindlich. Hinzu kommt, dass im Allgemeinen durch die Augenlinse eine Fokussierung des einfallenden Lichts erfolgt. Man geht dabei von einer Zunahme der Intensität um den Faktor $2 \cdot 10^5$ aus.

Im nicht wahrnehmbaren Infrarotbereich kann das Auge besonders leicht und stark geschädigt werden, weil der Augenlidreflex nicht mehr ausgelöst wird. Im Versuch kann die Gefahr eines IR-Lasers anhand eines Modells eines menschlichen Auges beobachtet werden.

1.2.2 Maximale zulässige Bestrahlung (MZB)

Die Schädigung von biologischem Gewebe durch Laserstrahlung hängt von unterschiedlichen Einflussgrößen ab. Neben physikalischen Parametern, wie Wellenlänge, Bestrahlungsdauer, Intensität, etc. hängt sie auch von individuellen Besonderheiten der Person ab, die sich dem Laserstrahl aussetzt. Es ist deshalb nicht möglich einen einzelnen allgemeingültigen Grenzwert zu definieren. Der Gesetzgeber definiert vielmehr in einer Norm (EN60825-1) in Form einer Tabelle für verschiedene Einwirkdauern und Wellenlängen die sogenannte Maximale Zulässige Bestrahlung (MZB):

„Die MZB-Werte sind so festgelegt, dass sie unterhalb der bekannten Gefahrenpegel liegen. Sie basieren auf den besten zur Verfügung stehenden Informationen aus experimentellen Studien. Die MZB-Werte sollten als Richtwerte bei der Kontrolle von Bestrahlungen für die Konstruktion eines sicheren Produktes und als Grundlage für die Benutzerinformation angesehen werden und nicht als präzise definierte Abgrenzung zwischen sicheren und gefährlichen Pegeln. In jedem Fall sollte die Einwirkung durch Laserstrahlung so gering wie möglich sein.“ [EN60825-1]

„Sicher“ bedeutet in diesem Fall, dass die Lichtintensität nur mit geringer Wahrscheinlichkeit Schaden (am Menschen) verursacht. In Zahlen: Der MZB-Wert ist ein Zehntel der Intensität, welche im schlimmsten Fall mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit einen Schaden verursacht.

1 Physikalische Grundlagen

Den MZB-Wert für einen konkreten Laser zu bestimmen ist nicht ganz einfach. Sie bekommen im Praktikum Gelegenheit, dies zusammen mit Ihrem Betreuer für die im Versuch vorhandenen Laser durchzuführen.

Es gibt für Haut und Augen unterschiedliche MZB-Werte.

Anmerkung: In englischer Literatur wird hierfür der Begriff Maximum Permissible Exposure (MPE) verwendet.

1.2.3 Laserklassen

Damit die Gefährdung, die von einem Laser ausgeht, nicht erst (umständlich) vom Nutzer bestimmt werden muss, fordert der Gesetzgeber vom Hersteller des Lasers eine Klassifizierung in vier Klassen und einige Unterklassen. Die Klassifizierung reicht von Klasse 1 (keine Gefahr bei normalem Umgang) bis Klasse 4 (ernsthafte Gefahr für Haut und Augen). Die Einteilung der Klassen berücksichtigt die maximale zulässige Bestrahlung (MZB) von Haut und Auge.

1.2.4 Grenze zugänglicher Strahlung (GZS)

Mit der Klassifizierung eines Lasers macht der Hersteller eine Aussage über die durch den Benutzer zugängliche Strahlung. Der Gesetzgeber gibt durch eine Norm (EN60825-1) für jede Laserklasse die Grenze der zugänglichen Strahlung (GZS) vor. Überschreitet ein Laser einen Grenzwert, so ist er in die nächst höhere Klasse einzuordnen. GZS-Werte variieren je nach Wellenlänge und Emissionsdauer.

Die Klassifizierung eines konkreten Lasers ist nicht ganz einfach. Sie bekommen im Praktikum Gelegenheit dies zusammen mit Ihrem Betreuer für die im Versuch vorhandenen Laser durchzuführen.

Anmerkung: In englischer Literatur wird hierfür der Begriff Accessible Emission Limit (AEL) verwendet.

1.2.5 Veränderungen von sicherheitsrelevanten Parametern

Lasersicherheitsrelevante Parameter können durch optische Elemente wie Linsen, Strahlaufweiter, Filter, Blenden, etc. verändert werden.

Linsen

Der Einfluss von Linsen ist leicht nachvollziehbar. Geht man z. B. (idealisiert) von einem parallelen Strahlenbündel aus, so erhöht sich bei einer Sammellinse die Lichtintensität zum Brennpunkt hin. Hinter dem Brennpunkt sowie bei einer Zerstreuunglinse nimmt die Lichtintensität ab. Ob der MZB-Wert über- oder unterschritten wird ist demnach von den verwendeten Linsen und von den Abständen der Person zum Experiment abhängig und muss im Einzelfall stets berücksichtigt werden (siehe auch Abschnitt 1.2.7).

Strahlaufweiter

Strahlaufweiter dienen dem Aufweiten des Strahldurchmessers. Eine mögliche Realisierung eines Strahlaufweiters ist das Galilei-Teleskop. Dieses besteht aus einer konkaven und einer konvexen Linse (siehe Abbildung 1).

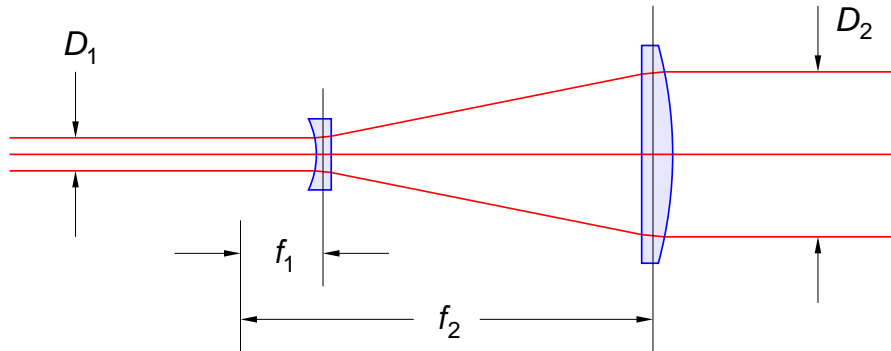


Abbildung 1: Schema des Galilei-Teleskops als Strahlaufweiter

Die Vergrößerung des Strahldurchmessers ergibt sich zu:

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{f_2}{|f_1|}$$

mit: D_1 Durchmesser des Eingangsstrahles, D_2 Durchmesser des Ausgangsstrahles, f_1 Brennweite der konkaven Linse, f_2 Brennweite der konvexen Linse.

Berechnen Sie zur Vorbereitung den Vergrößerungsfaktor für das im Versuch zur Verfügung stehende Galilei-Teleskop (Brennweiten siehe Abschnitt 2). Im Versuch ist es auch möglich sich den Strahlaufweiter aus Einzellinsen zusammen zu bauen. Dadurch sind weitere Vergrößerungsfaktoren möglich.

Filter

Eine andere Möglichkeit, die Strahlungsleistung zu verändern, ist die Verwendung von optischen Filtern. Der Versuch enthält drei Filter mit unterschiedlichen Absorptionseigenschaften. Im Versuch können alle Filter mit allen Lasern getestet werden. Durch Vergleich der Strahlungsleistung vor und hinter dem Filter kann so auf die Transmission bei verschiedenen Wellenlängen geschlossen werden.

Blende

Schließlich kann die Strahlungsleistung auch durch die Verwendung einer Blende verändert werden. Eine Blende verändert nur den Strahldurchmesser, nicht aber die Intensität der Laserstrahlung. Um den Einfluss einer Blende zu untersuchen, ist im Versuch eine variable Irisblende vorhanden. Dadurch kann die Strahlungsleistung bei verschiedenen Öffnungsgrößen überprüft werden. Wegen des gaußschen Strahlprofils der verwendeten Laser ist die transmittierte Laserleistung nicht einfach proportional zum Quadrat der Blendenapertur.

1.2.6 Laserschutz- und Laserjustierbrillen

Ist die maximal zulässige Bestrahlung des Auges überschritten, muss ein Augenschutz getragen werden. Beim Augenschutz unterscheidet man zwischen *Laserschutz-* und *Laserjustierbrillen*. Eine geeignete Laserschutzbrille bietet Schutz vor den erwähnten Schäden des Laserlichts. Wegen ihrer starken Filterung hat das Tragen aber unter Umständen zur Folge, dass sie das Laserlicht soweit reduziert, dass die zum Einstellen der Apparatur notwendige Sichtbarkeit nicht mehr ausreicht. In diesem Fall (wie im Praktikum) empfiehlt sich das Tragen von Justierbrillen. Diese reduzieren das Laserlicht auf eine Intensität, die der eines Lasers der Klasse 2 entspricht, d. h. der Lidschlussreflex des Auges ist hinreichend schnell, um Augenschäden zu verhindern.

Für Laserschutz- und Laserjustierbrillen ist nicht nur die optische Dichte (OD) der Filtergläser wichtig, vielmehr muss die Brille auch leistungstarker Strahlung standhalten.

Darüberhinaus ist die Wirkung gepulster Laser anders als die von CW-Lasern (continuous wave). Daher unterscheidet die Klassifizierung für Laserschutz- und Laserjustierbrillen im Allgemeinen zwischen CW-Laserlicht, langpulsigen Lasern, Q-switched Lasern und Femtosekundenlasern.

Anforderungen und Kennzeichnung von Laserschutzbrillen werden in der EU-Norm EN 207 und für Justierbrillen in EN 208 geregelt. Schutzbrillen sind in die zehn Abstufungen L1 bis L10 und Justierbrillen in die fünf Sicherheitsebenen R1 bis R5 unterteilt.

Im Versuch werden die Transmissionseigenschaften verschiedener Laserschutz- bzw. Laserjustierbrillen untersucht.

1.2.7 Sicherheitsabstand: Nominal Ocular Hazard Distance (NOHD)

Laserstrahlen sind für gewöhnlich nicht völlig kollimiert, sondern zeigen eine Divergenz, welche stark vom Lasertyp abhängt. Darüber hinaus kann die Divergenz durch die Verwendung von Linsen stark vergrößert werden (siehe Abschnitt 1.2.5). Die Versuchslaser haben sehr unterschiedliche Divergenzwinkel, welche von einigen mrad bis zu mehreren Grad reichen. Da die Intensität des Laserlichts von der Divergenz und somit vom Abstand zur Quelle abhängt, definiert man einen Sicherheitsabstand: Nominal Ocular Hazard Distance (NOHD). Dieser ist so definiert, dass bei ihm die Bestrahlungsstärke gerade den MZB-Wert erreicht.

Im Falle einer Laserquelle mit einem (vollen) Divergenzwinkel θ , kann der Sicherheitsabstand r_{NOHD} wie folgt berechnet werden:

$$r_{\text{NOHD}} = \frac{1}{\theta} \left(\sqrt{\frac{8P}{\pi \text{MZB}}} - d \right)$$

mit der Laserleistung P und dem Strahldurchmesser d an der Laseraustrittsöffnung.

Anmerkung: Auch gestreutes Laserlicht zeigt eine starke Divergenz (abhängig von der Oberfläche).

Im Versuch bestimmen Sie den Sicherheitsabstand bei Verwendung einer Sammellinse. Es besteht aber auch die Möglichkeit, diesen für eine Streuscheibe zu bestimmen.

1.2.8 Sicherheitsvorkehrungen

Das im Versuch vorhandene Lasersystem ist nach der Europäischen Norm EN 60825-1 als Klasse 3B-Laser und in einigen Fällen als Klasse 3R-Laser klassifiziert.

Es ist daher vorgeschrieben, geeignete Laserschutzbrillen und Laserschutzwände zu benutzen, um sich vor Streustrahlung von optischen Instrumenten während des Messens zu schützen. Die Experimente sollten nur in Anwesenheit einer sicherheitstechnisch eingewiesenen Person durchgeführt werden.

Die folgenden Warnschilder müssen in der Laborumgebung angebracht sein:



Abbildung 2: Sicherheitsschild, Warnhinweis Laserklasse 3R und Warnhinweis Laserklasse 3B

2 Technische Grundlagen

2.1 Beschreibung der Elemente

In Abbildung 3 ist der Versuchsaufbau abgebildet. Die verschiedenen Komponenten sind mit der englischen Bezeichnung „Part 1“ bis „Part 16“ beschriftet (Nr. siehe auch Abbildung 3).

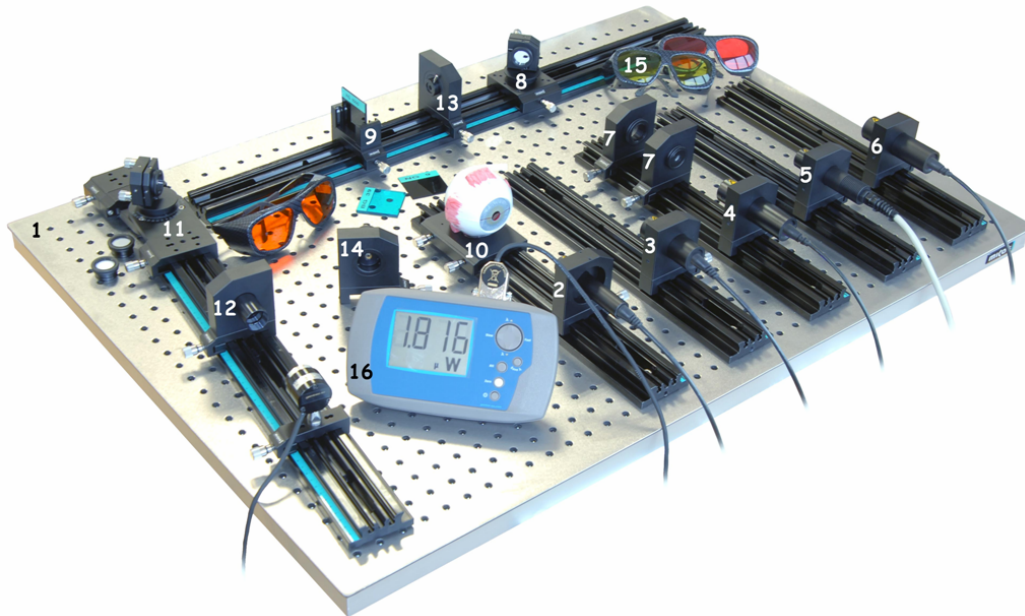


Abbildung 3: Übersicht der Bauelemente

Die Komponenten haben folgende Funktion:

Bauelement 1: Basisplatte mit mehreren optischen Schienen

Eine $1\text{ m} \times 0,7\text{ m}$ optische Edelstahllochrasterplatte (im Laborjargon auch „Breadboard“) mit einer Lochmatrix bildet die Grundlage für Lasersicherheitsexperimente. Sie ist mit fünf parallelen optischen Schienen ausgestattet auf denen die fünf Versuchslaser angebracht sind. Die horizontalen optischen Schienen werden als Halterung für einen Umlenkspiegel und alle weiteren optischen Instrumente verwendet.

Bauelement 2: Gepulste Laserquelle mit 473 nm (blau)

Die mittlere Ausgangsleistung des 473 nm-Lasermoduls ist 2 mW. Die Wiederholrate liegt bei 1 kHz. Der vorliegende Laser ist als Klasse 3B-Laser klassifiziert. Es wird eine Vorwärmzeit von 10 bis 15 Minuten empfohlen.

Bauelement 3: Laserquelle mit 532 nm (grün)

Die Ausgangsleistung des 532 nm Dauerstrichlasers liegt bei 5 mW. Der vorliegende Laser ist als Klasse 3B-Laser klassifiziert. Es wird eine Vorwärmzeit von etwa 5 Minuten empfohlen.

Bauelement 4: Hochleistungsleuchtdiode (LED) mit 590 nm (orange)

Die Ausgangsleistung des 590 nm CW-LED-Moduls liegt bei etwa 10 mW. Moderne Leuchtdioden können ebenfalls Lichtintensitäten erzeugen, die entsprechend kollimiert gefährlich für das menschliche Auge sein können. Das Licht muss nicht kohärent bzw. aus stimulierter Emission entstanden sein, um gefährlich zu sein. Daher sollte man sie ebenfalls entsprechend den Laserstandards behandeln.¹

Bauelement 5: Laserquelle mit 635 nm (rot)

Die Ausgangsleistung der 635 nm CW-Laserdiode liegt bei 10 mW. Der Laser ist als Klasse 3B-Laser klassifiziert. Es wird eine Vorwärmzeit von etwa 5 Minuten empfohlen.

Bauelement 6: Laserquelle mit 1064 nm (Infrarot)

Die Ausgangsleistung des 1064 nm CW-Infrarotlasermoduls liegt bei etwa 100 mW (**sehr gefährlich!**). Der Laser ist als Klasse 3B-Laser klassifiziert. Es wird eine Vorwärmzeit von etwa 5 Minuten empfohlen.

Bauelement 7: Linsen

Die Linsen sind in Reiter für das Schienensystem eingebaut. Die Linsen können als Einzeloptik oder in Kombination benutzt werden. Es stehen eine konkave und zwei konvexe Linsen mit Brennweiten von $f = -10\text{ mm}$, $f = 40\text{ mm}$ bzw. $f = 80\text{ mm}$ zur Verfügung.

Bauelement 8: Umlenkspiegel

Der Umlenkspiegel wird verwendet, um den gewünschten Laser auf die horizontale Schiene umzulenken, wo dann verschiedene Messungen mit dem Strahl durchgeführt werden können.

Bauelement 9: Filterhalter

Damit können verschiedene Filtergläser in den Strahl eingebracht werden. Drei unterschiedliche Filtergläser stehen zur Verfügung: NG9, BG39 und RG1000.

Bauelement 10: Augenmodell

Ein menschliches Augenmodell im Maßstab 4:1 ist mit einer bikonvexen Linse mit einer Brennweite von $f = 60\text{ mm}$ ausgestattet. In der Brennebene kann ein schwarzes Papier angebracht werden. Die Linse simuliert den optischen Apparat des Auges, während das schwarze Papier die Netzhaut darstellt. Es werden die Auswirkungen von Laserstrahlen auf das menschliche Auge veranschaulicht.

¹Seit einigen Jahren ist die Klassifikation von LEDs nicht mehr Bestandteil der DIN EN 60825, sondern wird nach den Richtlinien der DIN EN 62471 „Photobiological safety of lamps and lamp systems“ behandelt. Da eine komplette Analyse zu komplex und aufwendig ist, werden die LEDs in diesem Praktikumsversuch nach den Richtlinien der Lasersicherheit klassifiziert.

Bauelement 11: Strahlablenker mit verstellbarem Gelenk

Auf diesem Modul können entweder ein Spiegel oder verschiedene Streuplatten befestigt werden.

Bauelement 12: Strahlaufweiter (Laserteleskop nach Galilei)

Der Hauptbestandteil dieses Bauteils besteht aus einer konkaven und einer konvexen Linse mit einer Brennweite von $f = -10\text{ mm}$ bzw. $f = 60\text{ mm}$.

Bauelement 13: Irisblende

Eine stufenlos einstellbare Irisblende kann zur Veränderung des Strahldurchmessers verwendet werden.

Bauelement 14: PIN-Photodetektor mit BNC-Kabel

Die PIN-Photodiode kann durch den BNC-Anschluss mit einem Oszilloskop verbunden werden. Die Verbindung kann mit dem BNC-Kabel hergestellt werden. Die Reaktionszeit der PIN-Diode ist für die Messung der Pulslänge hinreichend klein.

Bauelement 15: Laserschutz- bzw. Laserjustierbrillen

Die drei verschiedenen Brillen dienen zur Charakterisierung ihrer Transmissionseigenschaften bei unterschiedlichen Wellenlängen.

Bauelement 16: Powermeter mit Detektorkopf

Das Powermeter dient zur Detektierung einer Laserleistung zwischen 6 nW und 300 mW .

2.2 Lasercontroller

Für die Laser kommen zwei unterschiedliche Stromquellen zum Einsatz.

2.2.1 Lasercontroller LSC 2000

Das Frontpanel dieses Lasercontrollers ist in Abbildung 4 dargestellt.

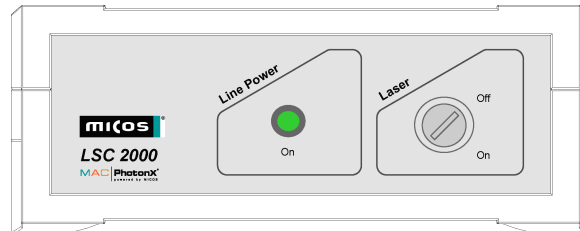


Abbildung 4: LSC 2000 Vorderseite

Sektion „Line Power“

Die grün leuchtende LED zeigt an, dass die Hauptstromversorgung an der Rückseite des Controllers eingeschaltet ist. Wenn der Hauptstromversorgungsschalter eingeschaltet ist, kann der Laser verwendet werden.

Sektion „Laser“

Nach DIN EN 60825-1 dürfen nur autorisierte Personen mit einem Schlüssel den Laser in Betrieb nehmen können.

Beachten Sie die Anschaltzeit der Laser von einigen Sekunden und die Aufwärmzeiten von einigen Minuten. Erst nach dieser Zeit wird Laserlicht mit den spezifizierten Parametern emittiert.

Zusätzlich zum Schlüsselschalter befindet sich auf der Geräterückseite ein Schalter. Prüfen Sie ggf., ob dieser eingeschaltet ist. Nach Betrieb sollte dieser ausgeschaltet werden (vgl. Abbildung 5).

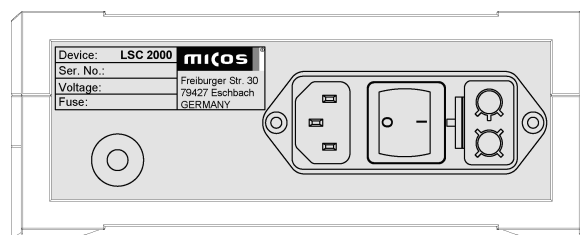


Abbildung 5: LSC 2000 Rückseite

2.2.2 Lasercontroller LSC 1000

Die rote Laserdiode wird mit dem Controller LSC 1000 betrieben (siehe Abbildung 6). Dieser kann sowohl im CW-Modus als auch in einer 1 kHz Modulation verwendet werden. Zusätzlich ist der LSC 1000 mit einem Photodiodenverstärker ausgestattet, welcher zum Detektieren des gepulsten Signals mit dem SI-PIN Photodetektor eingesetzt werden kann.



Abbildung 6: LSC 1000 Vorderseite

Sektion „Main“

Die grün leuchtende LED zeigt an, dass die Hauptstromversorgung an der Rückseite des Controllers eingeschaltet ist.

Sektion „Source“

Autorisierte Personen können mit dem nach DIN EN 60825-1 standardisierten Schlüssel den Laser in Betrieb nehmen.

Sektion „Modulator“

Eine 1 kHz-Rechteckmodulation kann ein- oder ausgeschaltet werden.

Sektion „Photo Amplifier“ (wird hier nicht verwendet!)

Der PIN-Photodetektor kann mit einem BNC-Kabel am Anschluss „Photo Diode“ angeschlossen werden. Am Einstellknopf „Gain Factor“ kann der Verstärkungsfaktor des Photoverstärkers eingestellt werden. Der Faktor ist an der Skala ablesbar. Die Feinjustierung kann mit dem Potentiometer, markiert als „Gain Variation“, vorgenommen werden. Die Photodiodenspannungskopplung im Verstärkungspfad kann mit dem Schalter „Coupling“ als AC oder DC gewählt werden. Am Anschluss „Output“ kann das verstärkte Eingangssignal abgegriffen werden und an einem Oszilloskop visualisiert werden.

2.3 Transmissionskurven der Filtergläser

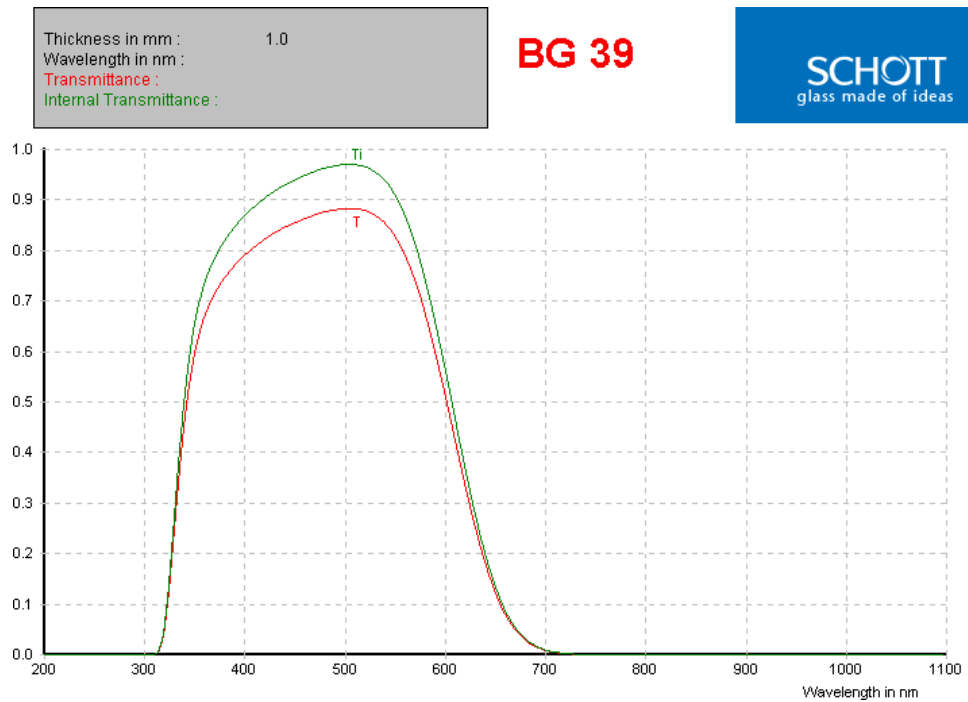


Abbildung 7: Transmissionskurve BG39

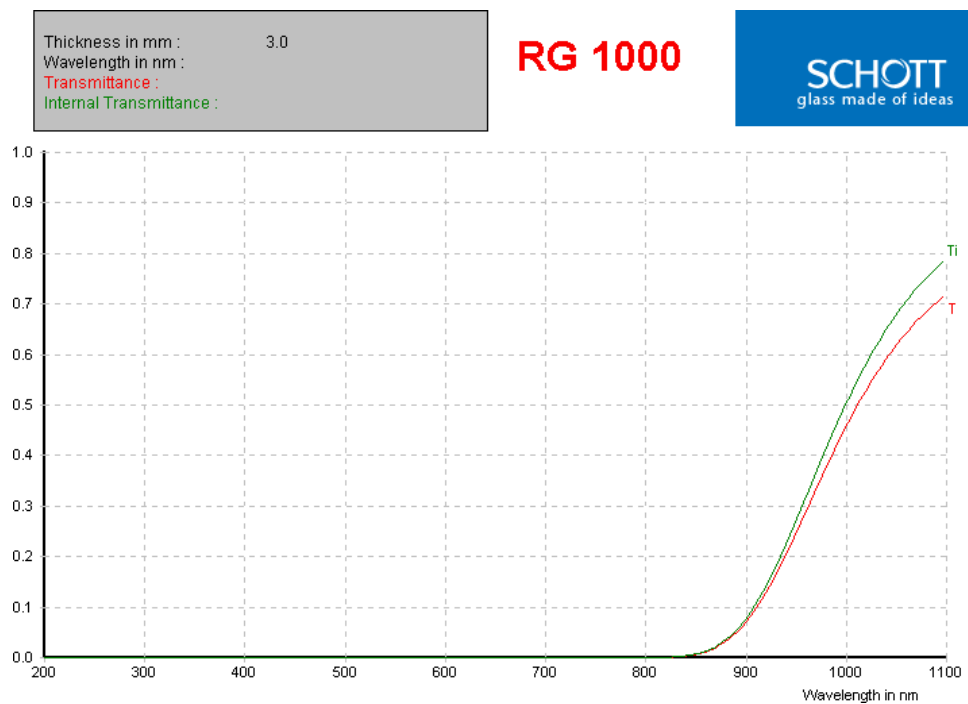


Abbildung 8: Transmissionskurve RG1000

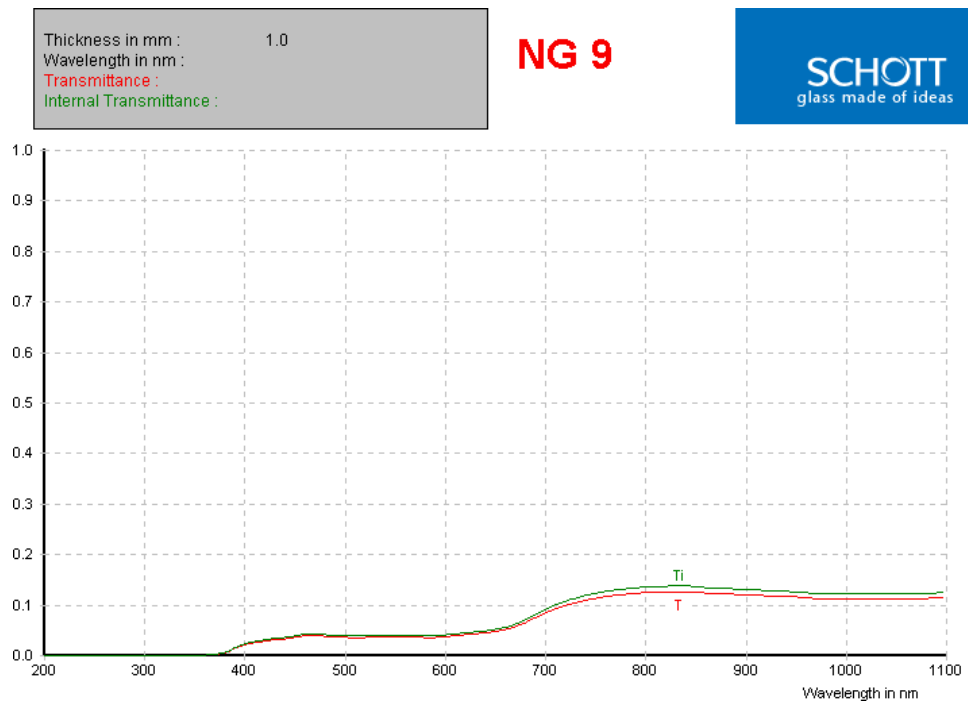


Abbildung 9: Transmissionskurve NG9

3 Durchführung und Auswertung

3.1 Teilversuch 1: Maximal zulässige Bestrahlung (MZB)

Schalten Sie zunächst alle Laser (außer dem Infraroten) ein und decken Sie sie mit einer Blende ab, damit die Laser ihre Erwärmungsphase durchlaufen können, bevor Sie mit den Messungen beginnen. Während dieser Zeit können Sie sich bereits mit der Normschrift EN 60825-1 vertraut machen. Diese liegt im Versuchsraum aus. Bestimmen Sie mit ihr für die drei Farben blau (473 nm), grün (532 nm) und orange (590 nm) die jeweilige maximal zulässige Bestrahlung (MZB) für das menschliche Auge (siehe Seite 277 (VDE 508, 4. Auflage) bzw. 64 (EN 60825-1:2014)). Hierfür notwendige C-Werte finden Sie auf Seite 270 (VDE 508, 4. Auflage) bzw. 40 (EN 60825-1:2014). Gehen Sie von einer Einwirkdauer der Strahlung von 4 Stunden aus (ungefähre Dauer des Praktikumsversuchs).

3.2 Teilversuch 2: Strahlungsleistung kontinuierlicher und gepulster Laser verschiedener Wellenlänge (Laser 473 nm, 532 nm, 590 nm)

Bestimmung der Ausgangsleistungen

Für die zwei Laser und die LED der oben aufgeführten Wellenlängen ist die Ausgangsleistung zu bestimmen. Dafür ist das Leistungsmessgerät (Powermeter) mit entsprechendem Messbereich zu verwenden. Überlegen Sie sich dafür einen geeigneten Versuchsaufbau (ggf. mit Umlenkspiegel).

Das Powermeter hat drei Bestandteile: den Detektorkopf, einen optionalen Filter (Attenuator) und eine Schutzkappe. Die Schutzkappe muss bei den Messungen abgenommen werden. Sie hat eine Rundung in der Mitte und kann deshalb für die Ausrichtung des Laserstrahls ins Zentrum des Powermeters verwendet werden.

Hinweis zum Umgang mit dem Messgerät:

Um mit dem Powermeter die richtigen Leistungen zu messen, sind vier Dinge zu beachten:

- Stellen Sie die Wellenlänge des Lasers ein, mit dem Sie gerade arbeiten. Bestätigen Sie die Eingabe mit der Taste „Save λ “.
- Führen Sie vor jeder Messung einen Nullabgleich durch. Dazu blockieren Sie den Laserstrahl und betätigen einmal die „Zero“-Taste.
- Im Messkopf ist ein Filter eingebaut, der diesen vor zu starker Strahlung schützt. Da das Powermeter für Messungen kleiner Strahlungsleistungen prinzipiell auch ohne Filter betrieben werden kann, muss dem Messgerät mit dem Bedienknopf „Att“ mitgeteilt werden, dass ein Filter verwendet wird („Att“ ist die englische Abkürzung für Attenuation).
- Der Messkopf ist nur im Zentrum sensitiv ($\varnothing \approx 5\text{ mm}$). Der Laserstrahl muss den Messkopf deshalb zentral treffen.

Schutzabstufungen der Laserschutzbrillen und Filtergläser

In diesem Teilversuch sollen Sie sich außerdem mit den Schutzabstufungen der drei Brillen in Abhängigkeit der vorhandenen Wellenlängen (473 nm, 532 nm und 590 nm) beschäftigen.

Bestimmen Sie den Abschwächungsfaktor der Laserschutzbrillen bei den drei Wellenlängen für jede der drei Brillen. Durch Vergleich der durchs Brillenglas transmittierten Leistung mit der Ausgangsleistung des Lasers soll in der Auswertung zu Hause die optische Dichte $\log_{10} \frac{P_0}{P}$ bestimmt werden.

Es stehen auch noch Filtergläser zur Verfügung: RG1000, NG9 und BG39. Diese kann man bei vorhandener Zeit ebenfalls noch untersuchen. Im Versuchsraum, in dieser Anleitung unter Kapitel 2.3 und im Internet finden Sie die Datenblätter mit den Transmissionseigenschaften (Transmission in Abhängigkeit der Wellenlänge):

- http://www.schott.com/d/advanced_optics/a1138abb-eab0-4996-b31b-6032be69d452/1.5/schott-longpass-rg1000-jun-2017-en.pdf
- http://www.schott.com/d/advanced_optics/297bc6b7-4f93-4df7-8348-2fe1e0f810b8/1.5/schott-neutral-density-ng9-jun-2017-en.pdf
- http://www.schott.com/d/advanced_optics/4dfdb14e-be6b-453b-850e-1eec963259c3/1.6/schott-bandpass-bg39-jun-2017-en.pdf

Bestimmung des Strahldurchmessers

Das Strahlprofil der verwendeten Laser ist Gauß-förmig. Bestimmen Sie jeweils experimentell den $1/e^2$ -Durchmesser (dieser ist so definiert, dass die Intensität auf $1/e^2 \approx 14$ Prozent abgesunken ist).

Verwenden Sie dazu die Irisblende und den Messschieber. Hinweis: eine mit einem Gauß-förmigen Strahlprofil konzentrisch bestrahlte Irisblende transmittiert bei einem $1/e^2$ -Durchmesser $T \approx 86$ Prozent (86%-Durchmesser).

Auswertungen (evtl. für eine Messung vor Ort, für restliche Messungen zu Hause):

Schließen Sie nun mit Hilfe von Abbildung 10 auf den 99%-Durchmesser ($T \approx 99$ Prozent) und bestimmen Sie damit die mittlere Intensität des Strahlquerschnitts [W/m^2] der Laserquellen blau und grün.

Berücksichtigen Sie nun das Gaußsche Strahlprofil und berechnen Sie aus den vorher bestimmten Größen die maximale Intensität des Gaußprofils.

Hinweis: Die gesamte Strahlungsleistung P eines zylindrischen Gaußstrahls (wie in Abbildung 10) beträgt:

$$P = \frac{\pi}{2} w^2 I_0$$

wobei I_0 die maximale Intensität darstellt (zur Definition von w siehe Abbildung 10).

Vergleichen Sie die Intensitäten mit den Grenzwerten der Norm aus Teilversuch 1. Was sagt Ihnen der Vergleich über die Gefährlichkeit der Laser im Versuchsraum?

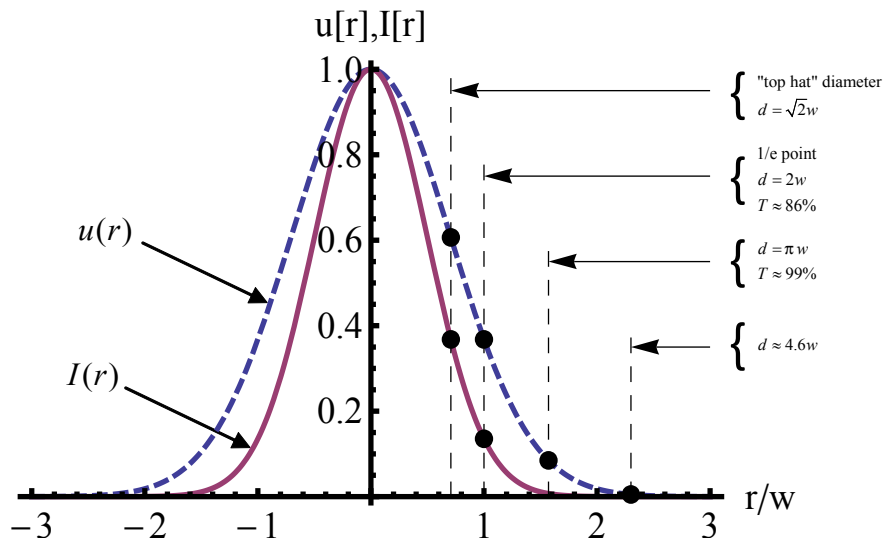


Abbildung 10: Wichtige Durchmesser eines zylindrischen Gaußstrahls. $u[r]$: elektrische Feldstärke in Abhängigkeit des Radiuses r , $I[r]$: Intensität, w : Radius, bei dem die elektrische Feldstärke auf $1/e$ der maximalen Feldstärke abgesunken ist.

3.3 Teilversuch 3: Klassifikation der Laser

3.3.1 Dauerstrich-Laser (CW-Laser)

Der grüne Laser ist ein Dauerstrich-Laser. Klassifizieren Sie diesen Laser mit Ihren bisherigen Messungen gemäß der Norm EN 60825-1 (siehe Seite 264ff (VDE 508, 4. Auflage) bzw. 34ff (EN 60825-1:2014)). In welche Klasse würde die orangene LED eingestuft werden, wenn Sie auch hier die Laserrichtlinien der Norm zugrunde legen.

3.3.2 Gepulste Laser

Das Laserlicht des blauen Lasers ist gepulst. Sie können die Pulse sogar mit bloßem Auge sichtbar machen: Wenn Sie ein A4-Blatt zweimal falten (oder ein ähnlich starres, kleines und handliches raues Material nehmen) und dieses dann sehr schnell entlang der Ausbreitungsrichtung des Strahles bewegen, so dass Sie aufgrund der Trägheit ihres Auges den „Strahl“ sehen, können Sie die einzelnen Laserpulse als „kleine Punkte“ wahrnehmen. Bei einem der CW-Laser hingegen werden Sie nur einen „Strich“ sehen.

Um die Pulsdauer und Wiederholrate zu messen, wird der Si-PIN-Photodetektor und ein Oszilloskop verwendet. Der Photodetektor wird mittels eines BNC Kabels direkt mit dem Oszilloskop verbunden. Die Laserleistung des blauen Lasers ist mit Hilfe des Photodiodesignals auf dem Oszilloskop als Funktion der Zeit auszuwerten.

Bestimmen Sie nun mit Hilfe des zeitaufgelösten Signals die Pulsleistung und die Pulsenergie (unter Annahme eines Rechteckpulses). Benutzen Sie hierzu die Cursorfunktion am

Oszilloskop. Drucken Sie den Pulszug aus und übernehmen Sie den Ausdruck auch in Ihr Laborheft.

Hinweis zum Drucken: Stellen Sie am USB-Umschalter neben den Druckern die Nummer Ihres Messplatzes ein. Nach einmaligem Drücken der „Print“-Taste am Oszilloskop wird die aktuelle Anzeige des Oszilloskops ausgedruckt.

Klassifizieren Sie nun den blauen Laser gemäß der Norm EN 60825-1.

3.4 Teilversuch 4: Änderung von lasersicherheitsrelevanten Parametern durch verschiedene optische Instrumente

1. Für den Laser der Wellenlänge 635 nm muss der divergente Strahl mit der bi-konvexen Linse ($f = 80 \text{ mm}$) kollimiert werden (Abbildung gemäß Abbildungsgleichung $\rightarrow \infty$). In welchem Abstand vom Laser muss die Linse montiert werden um den Strahl zu kollimieren? Machen Sie erst eine theoretische Überlegung und verifizieren Sie diese anschließend experimentell.
2. Durch den Einsatz eines Galilei-Teleskops soll der Strahldurchmesser des grünen Lasers geändert werden. In welchem Abstand und in welcher Reihenfolge müssen die konkave ($f = -1 \text{ cm}$) und die konvexe ($f = +8 \text{ cm}$) Linse verwendet werden, um den Strahldurchmesser um den Faktor 8 zu vergrößern? Wie ändert sich dabei die Intensität?
3. Der Durchmesser des grünen Laserstrahls soll mit einer Irisblende schrittweise verringert werden. Durch Messung der Leistung nach der Iris und der jeweils zugehörigen Blendenöffnung soll ein Diagramm, mit transmittierter Leistung gegen Strahldurchmesser, aufgenommen werden. Versuchen Sie mindestens sechs Wertepaare zu messen. Verwenden Sie, um eine akzeptable räumliche Auflösung zu erhalten, wieder das Galilei-Teleskop als Strahlaufweiter.

Auswertung zu Hause: Erstellen Sie das Diagramm von transmittierter Leistung gegen Strahldurchmesser. Wie steht die erhaltene Kurve mit dem gaußförmigen Intensitätsprofil des Laserstrahls in Zusammenhang?

4. Mit der $f = 40 \text{ mm}$ Linse (oder alternativ der $f = 80 \text{ mm}$ Linse) vor dem zweiten Umlenkspiegel und dem Leistungsmesser nach dem zweiten Spiegel können Sie den Divergenzwinkel mit Linse bestimmen. Fokussieren Sie dazu den grünen Laserstrahl auf den zweiten Umlenkspiegel.

Hier wird also nicht der Divergenzwinkel des Lasers bestimmt, sondern die Divergenz des Strahls nach Durchgang durch eine Linse (erheblich größere Divergenz als mit Laser alleine).

Den Divergenzwinkel bestimmen Sie über die Messung des $1/e^2$ -Wertes der Intensität.

Auswertung zu Hause: Bestimmen Sie den Divergenzwinkel und aus diesem den Sicherheitsabstand r_{NOHD} für den Strahlengang nach dem Fokus der gewählten Linse. Nehmen Sie eine Bestrahlungsdauer von 150 s an. Diskutieren Sie Ihr Ergebnis.

3.5 Teilversuch 5: Retinasimulation

⚠ Achtung: Für diesen Teilversuch müssen alle anwesenden Gruppen die vorherigen Teilversuche abgeschlossen haben! Ab sofort müssen alle im Raum befindlichen Personen die Laserschutzbrille für Infrarotstrahlung tragen! ⚠

Die Gefährdung der Netzhaut durch den fokussierenden Effekt der Augenlinse soll mit Hilfe des Modellauges veranschaulicht werden. Sie müssen das Modellauge hierzu zerlegen. Es bleibt während des Versuchs offen. Zum Sichtbarmachen des Strahles liegt eine IR-Detektorkarte bereit.

Ein schwarzer Aufkleber, der im Brennpunkt der Linse ($f = 60\text{ mm}$) befestigt wird, entzündet sich nach kurzer Zeit durch Bestrahlung mit dem Infrarotlaser. Dazu kleben Sie den Aufkleber so auf, dass etwa die Hälfte frei über den Metallträger ragt. Zum Justieren des Strahlengangs über den Umlenkspiegel durch die Mitte der Linse kann die IR-Detektorkarte verwendet werden. Der Fokus sollte knapp oberhalb des Metallträgers auf dem schwarzen Aufkleber liegen. Beobachten Sie die Wirkung der IR-Strahlung und kleben Sie anschließend den schwarzen Aufkleber in Ihr Protokoll.