

Claudia Schneeweiss  
Jürgen Eichler  
Martin Brose

# Leitfaden für Laserschutz- beauftragte

Ausbildung und Praxis



Springer Spektrum

---

# Leitfaden für Laserschutzbeauftragte

---

Claudia Schneeweiss · Jürgen Eichler  
Martin Brose

# Leitfaden für Laserschutzbeauftragte

Ausbildung und Praxis



**Springer** Spektrum

Claudia Schneeweiss  
Beuth Hochschule für Technik Berlin  
Berlin  
Deutschland

Jürgen Eichler  
Beuth Hochschule für Technik Berlin  
Berlin  
Deutschland

Martin Brose  
Fachgebiet Strahlenschutz  
BG Energie Textil Elektro  
Medienerzeugnisse  
Köln  
Deutschland

Die Darstellung von manchen Formeln und Strukturelementen war in einigen elektronischen Ausgaben nicht korrekt, dies ist nun korrigiert. Wir bitten damit verbundene Unannehmlichkeiten zu entschuldigen und danken den Lesern für Hinweise.

ISBN 978-3-662-53522-6      ISBN 978-3-662-53523-3 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-53523-3

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung: Margit Maly

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

## Vorwort

Der Arbeitsschutz in Deutschland zählt zu den Errungenschaften unserer modernen Welt. Damit dies auch so gesehen wird, ist eine enge Kooperation zwischen Vorgesetzten, Beschäftigten und Arbeitssicherheitsexperten wie dem Laserschutzbeauftragten nötig. Die Einbindung der Beschäftigten bereits in den Anschaffungsprozess eines Arbeitsmittels und die frühzeitige Diskussion über Gefährdungen und Schutzmaßnahmen erzeugen in der Regel ein hohes Maß an Einsicht, Akzeptanz und Disziplin in der betrieblichen Umsetzung. Die Funktion der Laserschutzbeauftragten hat einen hohen Stellenwert, da deren verantwortungsvolle Tätigkeit dazu beiträgt, die Beschäftigten in Sachen Laserschutz zu sensibilisieren und dadurch schwere Unfälle, bis hin zur Erblindung, zu verhindern.

Dieses Buch richtet sich an angehende und praktizierende Laserschutzbeauftragte aller Bereiche, in denen der Laser als Arbeitsmittel eingesetzt wird. Es soll zum einen als Grundlage für die Ausbildung dienen und zum anderen ein Nachschlagewerk sein, in dem die wichtigsten Themen des Laserschutzes leicht verständlich vorgestellt werden. Weiterhin soll es die Neugier wecken, sich mit weiterführender Literatur zum Thema Laserschutz zu beschäftigen und das Wissen regelmäßig zu vertiefen, um die Gefährdungen durch Laserstrahlung zu verstehen und die in der Gefährdungsbeurteilung festgelegten Schutzmaßnahmen richtig umsetzen zu können. Das Buch umfasst 10 Kapitel, an deren jeweiligem Ende das Wissen durch Fragen zum Thema überprüft werden kann.

Das Kernstück des Arbeitsschutzes ist die Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung eines Arbeitsplatzes. Diese wird von fachkundigen Personen erarbeitet, welche der Unternehmer selbst oder von ihm beauftragte Personen sein können. In der Gefährdungsbeurteilung werden alle möglichen Gefährdungen aufgelistet und dazu Schutzmaßnahmen entwickelt, welche dann von den Laserschutzbeauftragten in die Praxis umgesetzt werden. Die Laserschutzbeauftragten sind an der Erstellung der Gefährdungsbeurteilung beteiligt und müssen deshalb mit den Inhalten vertraut sein.

Der Aufbau des Buches ist eng an die *Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV)* angelehnt und entspricht den Ausbildungsinhalten unserer Laserschutzkurse. Das Buch ist daher auch gut geeignet, gesetzlich gefordertes Wissen aufzufrischen und zu ergänzen. Wir haben versucht, weitestgehend auf komplizierte Darstellungen und Berechnungen zu verzichten,

da diese eher in den Aufgabenbereich der sogenannten fachkundigen Personen gehören. Das Material für das Buch stammt aus Büchern und Veröffentlichungen, welche hinter jedem Kapitel in einer Literaturliste angegeben werden.

Als Einstieg in das Thema werden in [Kap. 1](#) die physikalischen Grundlagen der Laserstrahlung erläutert. Dieses Wissen ist notwendig, da die besonderen Eigenschaften der Laserstrahlung wie z. B. die Wellenlänge, die geringe Divergenz, hohe Leistungs- bzw. Energiedichten zum einen die vielfachen Anwendungen des Lasereinsatzes ermöglichen, zum anderen aber auch die Grundlage des Gefährdungspotenzials darstellen. Nach einer kurzen Einführung in die Begrifflichkeit und die Funktion des Lasers werden dessen Eigenschaften erläutert und der Unterschied zwischen kohärenter und inkohärenter Strahlung beschrieben. Danach wird auf den Aufbau und die Funktion eingegangen. Weiterhin werden verschiedene Lasersysteme vorgestellt, es werden die Strahlparameter wie Strahlradius und Strahldivergenz beschrieben und die Strahlführung durch Linsen und Fasern bearbeitet.

[Kapitel 2](#) beschäftigt sich mit den biologischen Wirkungen der Laserstrahlung, welche zum Verständnis der Entstehung eines Laserschadens benötigt werden. Zunächst wird auf die optischen Eigenschaften von Gewebe wie Absorption, Streuung und Reflexion von optischer Strahlung eingegangen und im Anschluss daran ein Überblick über die verschiedenen Wechselwirkungen von Laserstrahlung mit Gewebe gegeben. Je nach Bestrahlungsdauer und Leistungs- bzw. Energiedichte kommt es zu unterschiedlichen Gewebsreaktionen wie der thermischen Wirkung, der photochemischen Wirkung und nichtlinearen Effekten, welche bei sehr hohen Intensitäten auftreten können. Da die Art der Wirkung auch von der Eindringtiefe und somit von der Wellenlänge der Strahlung abhängt, wird auch darauf intensiv eingegangen. Weiterhin wird eine Übersicht über den Schadensort (Auge oder Haut) und die jeweilige Wirkung gegeben. Übungen und Lösungen runden das Thema ab.

Die meisten Anforderungen im Arbeitsschutz ergeben sich aus gesetzlichen Bestimmungen. [Kapitel 3](#) liefert hierzu wichtige Informationen der rechtlichen Grundlagen des Laserschutzes. Es werden die wesentlichen Merkmale des dualen Arbeitsschutzsystems in Deutschland erklärt, die wichtigsten Gesetze und Verordnungen betrachtet und im Anschluss daran wird auf die im Laserschutz spezifischen Regelungen eingegangen. Von großer Bedeutung ist hierbei die Verordnung zum Schutz der Arbeitnehmer vor künstlicher optischer Strahlung (OStrV) und deren Konkretisierung durch die *Technischen Regeln Laserstrahlung (TROS Laser)*, deren Inhalte beschrieben werden. Beide Papiere findet man auch im Anhang A. Eine weitere wichtige Rolle im Arbeitsschutz spielt die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), deren Vorschriften, Informationen und Regeln ebenfalls aufgezeigt und besprochen werden. Abgerundet wird das Kapitel mit Informationen zu den im Laserschutz anwendbaren Normen, welche vor allem für die Hersteller von Laseranlagen von Bedeutung sind, aber auch den Laserschutzbeauftragten wichtige Informationen liefern können.

Ein wirkungsvolles Instrument, die Beschäftigten vor Gefährdungen zu schützen, ist die Beachtung von Grenzwerten. In [Kap. 4](#) wird zunächst der Grenzwert der zugänglichen Strahlung (GZS) eingeführt. Dieser hängt in komplizierter Art und Weise von der Bestrahlungsstärke bzw. der Energiedichte und der Bestrahlungsdauer

ab und wird vom Laserhersteller angewandt, um die Laser bzw. Lasersysteme in sogenannte Laserklassen einzuteilen. Für die Anwender sind die Laserklassen ein erster Hinweis auf die Gefährdung, die von dem Lasergerät ausgehen kann. Es wurde ein System von 7 Laserklassen entwickelt, wobei die Gefährdung von unten (Klasse 1) nach oben (Klasse 4) steigt. Für eine bessere Verständlichkeit werden die Voraussetzungen für die Laserklassen beschrieben und beispielhaft Grenzwerte berechnet und aufgezeigt. Die Klassifizierung ist sehr aufwendig und erfordert viel Fachwissen und die nötige Infrastruktur zur Messung der Laserstrahlung. Daher wird diese Aufgabe meist von Experten übernommen. Um einen kleinen Einblick zu bekommen, wird in Anhang A.2 ein einfaches Beispiel einer Klassifizierung beschrieben.

Der für die Laserschutzbeauftragten wichtigere Grenzwert ist der in [Kap. 5](#) beschriebene sogenannte Expositionsgrenzwert (EGW), welcher die Grenzen von Leistungs- bzw. Energiedichte angibt, ab welchen mit einem Augen- bzw. Hautschaden zu rechnen ist. Es werden typische Expositionsdauern aufgezeigt und die sogenannte „scheinbare Quelle“ erklärt, welche die Größe des Netzhautbildes bestimmt und Einfluss auf die Höhe des EGW hat. Im Anschluss daran wird erklärt, wie Expositionsgrenzwerte sowohl anhand einer vereinfachten Tabelle als auch ausführlichen Tabellen aus der *TROS Laserstrahlung* (Teil 2) ermittelt werden können. Dies wird anhand eines Beispiels verdeutlicht. Abschließend werden die Einflüsse der Expositionsdauer und mehrerer Wellenlängen auf den EGW skizziert.

[Kapitel 6](#) beschreibt mögliche Gefährdungen durch Laserstrahlung, welche die Grundlage der Gefährdungsbeurteilung eines Laserarbeitsplatzes darstellen. Es wird zwischen direkter und indirekter Gefährdung unterschieden. Die direkte Gefährdung entsteht durch direkte, reflektierte oder gestreute Laserstrahlung. Sie betrifft nur die Augen und die Haut, da die Laserstrahlung relativ schnell vom Gewebe absorbiert wird und nicht zu den Organen vordringen kann. Der Schaden wird durch die Laserstrahlung selbst verursacht und kann je nach Wellenlänge unterschiedliche Bereiche betreffen. Es wird beschrieben, welche Gefährdungen bei der Einwirkung von Laserstrahlung im UV-Bereich, im sichtbaren- und im infraroten Bereich auf Auge und Haut auftreten und welche Wirkung diese haben kann.

Daneben gibt es noch weitere Handlungsfelder durch verschiedene indirekte Gefährdungen, die beim Einsatz von Laseranlagen auftreten können. Da jeder Laser ein elektrisches Gerät ist, muss die elektrische Sicherheit beachtet werden. Dies ist jedoch nicht die Aufgabe der Laserschutzbeauftragten, sondern die von Fachkräften für elektrische Sicherheit. In Expertenkreisen inzwischen unbestritten ist die indirekte Gefährdung durch die Blendung im sichtbaren Wellenlängenbereich. Bereits sehr kleine Laserleistungen können dazu führen, dass Personen nach einer Bestrahlung der Augen einige Minuten lang nichts sehen. Dies ist in verschiedenen Arbeitssituationen wie z. B. dem Führen eines Fahrzeugs oder dem Arbeiten auf Leitern ein ernst zu nehmendes Problem, da die Sehbehinderung zu einem Unfall führen kann. Eine weitere indirekte Gefährdung kann durch inkohärente optische Strahlung entstehen, wie sie z. B. beim Schweißen von Materialien entsteht. Dort, wo mit extrem kurz gepulster Laserstrahlung gearbeitet wird, ist außerdem mit der Entstehung von Röntgenstrahlung zu rechnen. Kann dies nicht ausgeschlossen

werden, so ist ein Strahlenschutzbeauftragter hinzuzuziehen, der die Gefährdung beurteilen und gegebenenfalls Schutzmaßnahmen festlegen muss. Weitere nicht zu unterschätzende Gefährdungen bestehen in der Brand- und Explosionsgefahr von Stoffen und Gemischen, welche durch Laserstrahlung in Brand gesetzt bzw. zur Explosion gebracht werden können, und die Entstehung von toxischen und infektiösen Stoffen bei der Einwirkung von Laserstrahlung.

Wurde im Unternehmen festgestellt, dass vom Laserarbeitsplatz Gefährdungen ausgehen, so müssen dementsprechende Schutzmaßnahmen getroffen werden, welche in [Kap. 7](#) beschrieben sind. Bereits im Arbeitsschutzgesetz ist festgelegt, in welcher Reihenfolge Schutzmaßnahmen zu treffen sind. Es wird das sogenannte TOP-Prinzip gefordert, welches bedeutet, dass zunächst technische und bauliche, dann organisatorische und zuallerletzt persönliche Schutzmaßnahmen getroffen werden sollen. Im Laserschutz wurde dem TOP-Prinzip noch die sogenannte Substitution vorangestellt, was bedeutet, dass der Unternehmer vor dem Kauf bzw. Einsatz eines Arbeitsmittels prüfen soll, ob es ein geeignetes anderes Arbeitsmittel mit geringerer Gefährdung gibt, und dieses dementsprechend einsetzt. Die Struktur dieses Kapitels ist so aufgebaut, dass zunächst die Substitution mit Beispielen erklärt wird und dann verschiedene technische Schutzmaßnahmen beschrieben werden, welche aber nur eine Auswahl darstellen. Danach beschäftigt sich das Kapitel mit den organisatorischen Schutzmaßnahmen wie der Bestellung der Laserschutzbeauftragten, dem wichtigen Thema der Unterweisung der Mitarbeiter, dem Abgrenzen und Kennzeichnen des Laserbereichs sowie dessen Zugangsregelung. Es wird beschrieben, wie eine Betriebsanweisung für die Beschäftigten auszusehen hat, wann die Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge Anwendung findet und wie man sich nach einem Unfall verhalten muss. Der letzte Abschnitt widmet sich dem Thema der persönlichen Schutzmaßnahmen mit dem Schwerpunkt auf Laserschutzbrillen und Laserjustierbrillen. Um die richtigen Brillen anschaffen und beurteilen zu können, ist einiges an Wissen erforderlich. Es wird erklärt, nach welchem Prinzip Schutzbrillen arbeiten und was sich hinter der Kennzeichnung auf dem Gestell oder den Filtern verbirgt. Weiterhin werden beispielhaft mithilfe von Tabellen Schutzstufen von Brillen für den Schutz vor Strahlung aus Dauerstrich- und Impulslasern ermittelt. Zum Schluss werden Hinweise zum Arbeiten mit Schutzbrillen im Laserbereich gegeben und kurz auf Schutzkleidung eingegangen.

[Kapitel 8](#) beschäftigt sich mit den Aufgaben und der Verantwortung der Laserschutzbeauftragten. Es wird ein Überblick über die Themen der Bestellung der Laserschutzbeauftragten, deren erforderlichen Kenntnissen, den Aufgaben und der Verantwortung gegeben. Auf die in vielen Jahren immer wieder auftauchenden Fragen aus der Praxis der Laserschutzbeauftragten wird, zusammen mit den Antworten, am Ende des Kapitels eingegangen.

In [Kap. 9](#) wird das Thema Gefährdungsbeurteilung bearbeitet. Es wird geklärt, was darunter zu verstehen ist, welche Inhalte sie laut OStrV haben muss und wer an der Durchführung beteiligt wird. Die Gefährdungsbeurteilung muss nach § 3 und § 5 der OStrV von sogenannten fachkundigen Personen durchgeführt werden. Es wird beschrieben, wer eine solche Person ist und welche Kenntnisse sie haben muss. Weiterhin wird darauf eingegangen, nach welchen Grundsätzen man zu handeln hat,



wie Informationen ermittelt werden und wie die Gefährdungsbeurteilung durchzuführen, zu dokumentieren und zu aktualisieren ist.

Das letzte [Kap. 10](#) befasst sich mit den Bestimmungen für besondere Laseranwendungen. Es wird darauf eingegangen, welche speziellen Schutzmaßnahmen für Showlaser, Vermessungslaser, Laser zu Unterrichtszwecken, medizinische Laser und Laser für Lichtwellenleiterkommunikationssysteme zu treffen sind.

Um den Laserschutzbeauftragten die Arbeit zu erleichtern, wurden einige nützliche Dokumente entworfen und zusammengetragen, welche im Anhang zu finden sind. So gibt es zum Beispiel den Entwurf einer tabellarischen Gefährdungsbeurteilung, in welcher Schutzmaßnahmen für die unterschiedlichsten Laseranwendungen gesammelt wurden. Weiterhin gibt es Beispiele für die Bestellung von Laserschutzbeauftragten, für eine Betriebsanweisung und ein Unterweisungsprotokoll. Neben der OStrV findet man dort auch Tabellen, mit deren Hilfe Expositionsgrenzwerte berechnet werden können, Berechnungsbeispiele und eine Formelsammlung, in der die wichtigsten Berechnungsformeln zum Laserschutz zusammengetragen wurden.

Die Autorin und die Autoren haben sich mit dem Genderaspekt der Sprache befasst und soweit wie möglich genderneutrale Formen benutzt. Wo dies aus Gründen der Lesbarkeit nicht möglich ist, sind bei der Benutzung der männlichen Form immer auch die Frauen mit gemeint.

Berlin und Köln,  
im Winter 2016

Claudia Schneeweiss,  
Jürgen Eichler,  
Martin Brose

---

## Danksagung

Die Basis dieses Buches wurde durch eine langjährige Tätigkeit im Labor für Laseranwendungen der Beuth Hochschule für Technik Berlin gelegt und durch einen Kooperationsvertrag zwischen der Beuth Hochschule und der Akademie für Lasersicherheit gefördert. An der Entwicklung dieses Buches waren neben den Autoren viele weitere Menschen beteiligt, die durch thematische Diskussionen, Vorarbeiten auf dem Gebiet des Laserschutzes und mit Korrekturen geholfen haben, das Buch zu verwirklichen.

Ganz besonders möchten wir uns bei unseren Ansprechpartnerinnen vom Springer Verlag, Frau Margit Maly und Frau Stella Schmoll bedanken, die uns während des Entstehungsprozesses des Buches begleitet haben und uns immer mit Rat und Tat zur Seite standen.

Ein großer Dank geht an Herrn Prof. Dr. Tassilo Seidler von der Beuth Hochschule für Technik Berlin, der uns mit Kompetenz und Fachwissen zum Thema biologische Wirkungen beraten hat.

Ein weiterer Dank richtet sich an Prof. Dr. Hans-Dieter Reidenbach von der Fachhochschule Köln, der uns fachkundig unterstützt hat und dessen jahrelange Forschungen auf dem Gebiet des Laserschutzes zum Inhalt dieses Buches beigetragen haben.

Bedanken möchten wir uns auch bei Herrn Christian Schäfer für die technische Unterstützung und bei Herrn Dr. Wolfgang Grothaus für seine stets hilfreiche Kritik und Anregungen.

Wichtige Unterstützung und Informationen haben wir in den vergangenen Jahren von Herrn Carsten Stoldt, Malte Gomolka und Thomas Kerkhoff von der BG ETEM, sowie von Frau Dr. Ljiljana Udovicic und Herrn Günter Ott von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin erhalten, wofür wir uns herzlich bedanken.

Einige Bilder wurden uns von Firmen überlassen, die in den jeweiligen Bildlegenden zitiert sind. Auch ihnen gehört unser Dank.

---

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Physikalische Eigenschaften von Laserstrahlung</b> | <b>1</b> |
| 1.1      | Eigenschaften von optischer Strahlung                 | 2        |
| 1.1.1    | Wellenoptik   | 2        |
| 1.1.2    | Inkohärente Strahlung (normale Lichtquellen)          | 4        |
| 1.1.3    | Kohärente Strahlung (Laser)                           | 5        |
| 1.1.4    | Spontane Emission (normale Lichtquellen)              | 5        |
| 1.1.5    | Stimulierte Emission (Laser)                          | 6        |
| 1.2      | Aufbau und Funktion eines Lasers                      | 7        |
| 1.2.1    | Lasermedium   | 7        |
| 1.2.2    | Resonator   | 8        |
| 1.2.3    | Energiezufuhr   | 8        |
| 1.2.4    | Beschreibung von Lasertypen                           | 9        |
| 1.2.5    | Gaslaser  | 10       |
| 1.2.6    | Festkörperlaser                                       | 11       |
| 1.2.7    | Faserlaser  | 13       |
| 1.2.8    | Scheibenlaser   | 14       |
| 1.2.9    | Halbleiter- oder Diodenlaser                          | 14       |
| 1.2.10   | Flüssigkeits- oder Farbstofflaser                     | 15       |
| 1.3      | Eigenschaften von Laserstrahlung                      | 16       |
| 1.3.1    | Allgemeine Eigenschaften                              | 16       |
| 1.3.2    | Dauerstrichlaser: Leistung und Leistungsdichte        | 17       |
| 1.3.3    | Impulslaser: Energie und Energiedichte                | 18       |
| 1.3.4    | Parameter bei der Exposition                          | 19       |
| 1.4      | Strahlparameter und Ausbreitung von Laserstrahlung    | 20       |
| 1.4.1    | Strahlradius  | 20       |
| 1.4.2    | Strahldivergenz                                       | 21       |
| 1.4.3    | Fokussierung durch eine Linse                         | 22       |
| 1.4.4    | Austritt aus einer optischen Faser                    | 22       |
| 1.4.5    | Sicherheitsabstand (NOHD)                             | 22       |
| 1.5      | Übungen   | 23       |
|          | Literatur   | 24       |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>2</b> | <b>Biologische Wirkung von Laserstrahlung</b>                         | 25 |
| 2.1      | Optische Eigenschaften von Gewebe                                     | 26 |
| 2.1.1    | Absorption  | 27 |
| 2.1.2    | Streuung  | 29 |
| 2.1.3    | Reflexion   | 30 |
| 2.2      | Wechselwirkung von Laserstrahlung und Gewebe                          | 30 |
| 2.2.1    | Thermische Wirkung  | 31 |
| 2.2.2    | Fotochemische Wirkung   | 33 |
| 2.2.3    | Fotoablation  | 34 |
| 2.2.4    | Fotodisruption  | 35 |
| 2.2.5    | Selektive Fotothermolyse  | 36 |
| 2.3      | Gefährdungen des Auges  | 36 |
| 2.3.1    | Eindringtiefen optischer Strahlung ins Auge                           | 37 |
| 2.3.2    | Bündelung von Laserstrahlung auf der Netzhaut                         | 39 |
| 2.3.3    | Thermische Schäden an der Netzhaut                                    | 41 |
| 2.3.4    | Thermische Schäden an der Hornhaut                                    | 41 |
| 2.3.5    | Fotochemische Schäden   | 41 |
| 2.4      | Gefährdungen der Haut   | 42 |
| 2.4.1    | Eindringtiefe optischer Strahlung in die Haut                         | 42 |
| 2.4.2    | Thermische Schäden der Haut   | 43 |
| 2.4.3    | Fotochemische Schäden der Haut  | 44 |
| 2.4.4    | Übersicht: Wirkung von Laserstrahlen                                  | 44 |
| 2.5      | Übungen   | 44 |
|          | Literatur   | 47 |
| <b>3</b> | <b>Rechtliche Grundlagen</b>  | 49 |
| 3.1      | Staatliche Regelungen des Laserschutzes                               | 51 |
| 3.1.1    | EU-Richtlinie 2006/25/EG  | 51 |
| 3.1.2    | Arbeitsschutzgesetz   | 52 |
| 3.1.3    | Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer<br>Strahlung (OStrV) | 53 |
| 3.1.4    | Betriebssicherheitsverordnung (BetrSiV)                               | 53 |
| 3.1.5    | Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)                                     | 54 |
| 3.1.6    | Technische Regeln Laserstrahlung (TROS Laserstrahlung)                | 54 |
| 3.1.7    | Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge<br>(ArbMedVV)            | 57 |
| 3.2      | Vorschriften- und Regelwerk der DGUV                                  | 58 |
| 3.2.1    | DGUV-Vorschriften und Regeln  | 58 |
| 3.2.2    | Fachausschussinformationen  | 59 |
| 3.3      | Normen und Regeln der Technik   | 60 |
| 3.3.1    | Normen zum Laserschutz  | 61 |
| 3.4      | Übungen   | 61 |
|          | Literatur   | 63 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| <b>4</b> | <b>Grenzwerte der zugänglichen Strahlung und Laserklassen</b> | 65  |
| 4.1      | Grenzwert der zugänglichen Strahlung (GZS)                    | 66  |
| 4.1.1    | Grenzwerte und Klassifizierung                                | 66  |
| 4.1.2    | Zeitbasen   | 66  |
| 4.2      | Laserklassen  | 67  |
| 4.2.1    | Klasse 1  | 68  |
| 4.2.2    | Klasse 1C   | 70  |
| 4.2.3    | Klasse 1 M  | 71  |
| 4.2.4    | Klasse 2  | 73  |
| 4.2.5    | Klasse 2 M  | 73  |
| 4.2.6    | Klasse 3A (anzuwenden bis März 1997)                          | 76  |
| 4.2.7    | Klasse 3R   | 76  |
| 4.2.8    | Klasse 3B   | 78  |
| 4.2.9    | Klasse 4  | 79  |
| 4.3      | Übungen   | 81  |
|          | Literatur   | 82  |
| <b>5</b> | <b>Expositionsgrenzwert (EGW)</b>                             | 85  |
| 5.1      | Allgemeines über Expositionsgrenzwerte                        | 86  |
| 5.1.1    | Definition des Expositionsgrenzwertes                         | 86  |
| 5.1.2    | Expositionsdauer  | 87  |
| 5.1.3    | Scheinbare Quelle, Korrekturfaktor $C_E$                      | 87  |
| 5.2      | Ermittlung der Expositionsgrenzwerte (EGW)                    | 88  |
| 5.2.1    | Vereinfachte Expositionsgrenzwerte                            | 89  |
| 5.2.2    | Einfluss der Expositionsdauer auf den Expositionsgrenzwert    | 91  |
| 5.2.3    | Expositionsgrenzwerte bei mehreren Wellenlängen               | 91  |
| 5.2.4    | Umgang mit den Expositionsgrenzwerten                         | 92  |
| 5.3      | Übungen   | 93  |
|          | Literatur   | 96  |
| <b>6</b> | <b>Gefährdungen durch Laserstrahlung</b>                      | 97  |
| 6.1      | Direkte Gefährdung  | 98  |
| 6.1.1    | Direkter, reflektierter und gestreuter Laserstrahl            | 98  |
| 6.1.2    | Gefährdung von Auge und Haut                                  | 98  |
| 6.2      | Indirekte Gefährdung  | 101 |
| 6.2.1    | Elektrische Gefährdung  | 101 |
| 6.2.2    | Blendung durch sichtbare Laserstrahlung                       | 102 |
| 6.2.3    | Inkohärente optische Strahlung                                | 103 |
| 6.2.4    | Röntgenstrahlung  | 104 |
| 6.2.5    | Explosible Atmosphären und brennbare Stoffe                   | 104 |
| 6.2.6    | Toxische oder infektiöse Stoffe                               | 106 |
| 6.2.7    | Lärm  | 107 |
| 6.3      | Übungen   | 107 |
|          | Literatur   | 109 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| <b>7</b> | <b>Auswahl und Durchführung von Schutzmaßnahmen</b> .....                | 111 |
| 7.1      | Substitutionsprüfung .....   | 112 |
| 7.2      | Technische Schutzmaßnahmen .....   | 113 |
| 7.2.1    | Technische Schutzmaßnahmen des Herstellers .....                         | 113 |
| 7.2.2    | Technische Schutzmaßnahmen des Anwenders .....                           | 117 |
| 7.3      | Organisatorische Schutzmaßnahmen .....                                   | 119 |
| 7.3.1    | Bestellung von Laserschutzbeauftragten .....                             | 120 |
| 7.3.2    | Unterweisung .....   | 120 |
| 7.3.3    | Laserbereich .....   | 122 |
| 7.3.4    | Zugangsregelung zu Laserbereichen .....                                  | 125 |
| 7.3.5    | Betriebsanweisung .....  | 125 |
| 7.3.6    | Arbeitsmedizinische Vorsorge .....                                       | 126 |
| 7.3.7    | Verhalten nach einem Unfall .....  | 126 |
| 7.4      | Persönliche Schutzausrüstung (PSA), insbesondere Schutzbrillen ...       | 127 |
| 7.4.1    | Anwendungsbereiche .....   | 127 |
| 7.4.2    | Funktion von Laserschutzbrillen .....                                    | 127 |
| 7.4.3    | Schutzstufen für Laserschutzbrillen .....                                | 128 |
| 7.4.4    | Schutzstufe für Dauerstrichlaser D .....                                 | 131 |
| 7.4.5    | Schutzstufe für Impulslaser I und R .....                                | 132 |
| 7.4.6    | Schutzstufe für Impulslaser M .....                                      | 135 |
| 7.4.7    | Schutzstufen für Laserjustierbrillen .....                               | 135 |
| 7.4.8    | Auswahl von Laserschutzbrillen und -justierbrillen .....                 | 137 |
| 7.4.9    | Kennzeichnung von Laserschutzbrillen<br>und Laserjustierbrillen .....    | 140 |
| 7.5      | Schutzkleidung .....   | 143 |
| 7.5.1    | Schutzhandschuhe .....   | 144 |
| 7.5.2    | Laserschutzkleidung .....  | 144 |
| 7.5.3    | Hautschutz gegen UV-Strahlung .....                                      | 146 |
| 7.6      | Hinweise zum Arbeiten im Laserbereich .....                              | 147 |
| 7.7      | Übungen .....  | 147 |
|          | Literatur .....  | 149 |
| <b>8</b> | <b>Aufgaben und Verantwortung der Laserschutzbeauftragten</b> .....      | 151 |
| 8.1      | Bestellung zu Laserschutzbeauftragten .....                              | 152 |
| 8.1.1    | Wer kann zum Laserschutzbeauftragten bestellt werden? ...                | 152 |
| 8.1.2    | Kriterien bei der Auswahl der Laserschutzbeauftragten .....              | 152 |
| 8.1.3    | Unterstützung der Laserschutzbeauftragten durch den<br>Arbeitgeber ..... | 152 |
| 8.2      | Kenntnisse der Laserschutzbeauftragten .....                             | 152 |
| 8.3      | Aufgaben der Laserschutzbeauftragten .....                               | 153 |
| 8.3.1    | Verantwortung der Laserschutzbeauftragten .....                          | 154 |
| 8.4      | Anzahl der Laserschutzbeauftragten .....                                 | 155 |
| 8.5      | Stellung der Laserschutzbeauftragten .....                               | 156 |
| 8.6      | Praxis der Laserschutzbeauftragten .....                                 | 156 |
|          | Literatur .....  | 164 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| <b>9</b> | <b>Inhalte und Beispiele der Gefährdungsbeurteilung</b>         | 165 |
| 9.1      | OStrV und Gefährdungsbeurteilung                                | 166 |
| 9.1.1    | Wichtige Punkte bei der Erstellung der Gefährdungsbeurteilung   | 167 |
| 9.1.2    | Aktualisierung der Gefährdungsbeurteilung                       | 167 |
| 9.1.3    | Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung                        | 167 |
| 9.2      | Fachkundige Personen  | 168 |
| 9.2.1    | Verantwortung für die Durchführung der Gefährdungsbeurteilung   | 168 |
| 9.2.2    | Fachkundige für die Durchführung der Gefährdungsbeurteilung     | 168 |
| 9.2.3    | Fachkundige für die Durchführung von Messungen und Berechnungen | 169 |
| 9.3      | Grundsätze bei der Beurteilung von Gefährdungen                 | 169 |
| 9.3.1    | Erste Schritte  | 169 |
| 9.3.2    | Kontinuierlicher Prozess  | 169 |
| 9.3.3    | Arbeitsplatz- und personenbezogene Gefährdungsbeurteilung       | 171 |
| 9.3.4    | Überprüfung der Gefährdungsbeurteilung                          | 171 |
| 9.3.5    | Betriebszustände  | 171 |
| 9.3.6    | Worst Case  | 172 |
| 9.3.7    | Grenzwertprinzip bei der direkten Gefährdung                    | 172 |
| 9.3.8    | Indirekte Gefährdungen  | 172 |
| 9.3.9    | Gleichartige Arbeitsplätze                                      | 173 |
| 9.3.10   | Tätigkeitsanalyse   | 173 |
| 9.3.11   | Berücksichtigung besonders gefährdeter Personen                 | 173 |
| 9.3.12   | Arbeitsmedizinische Vorsorge                                    | 173 |
| 9.3.13   | Fremdwartung  | 173 |
| 9.4      | Ermittlung der Information                                      | 174 |
| 9.4.1    | Unterlagen zu Lasergeräten                                      | 174 |
| 9.4.2    | Risikobeurteilung durch den Hersteller                          | 174 |
| 9.4.3    | Laserklassen  | 174 |
| 9.4.4    | Technische Daten  | 175 |
| 9.4.5    | Berechnung der Expositionsgrenzwerte                            | 175 |
| 9.4.6    | Messung der Expositionswerte                                    | 175 |
| 9.4.7    | Show- und Projektionslaser                                      | 175 |
| 9.5      | Durchführung der Gefährdungsbeurteilung                         | 175 |
| 9.5.1    | Gefährdungen durch Laserstrahlung                               | 175 |
| 9.5.2    | Das Team bei der Erstellung der Gefährdungsbeurteilung          | 176 |
| 9.5.3    | Substitutionsprüfung  | 176 |
| 9.5.4    | Prozessschritte   | 176 |
| 9.6      | Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung                        | 178 |
| 9.7      | Übungen   | 179 |
|          | Literatur   | 180 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>10 Bestimmungen für besondere Anwendungen</b> .....  | 181 |
| 10.1 Lasereinrichtungen für Vorführ- und Anzeigezwecke .....  | 181 |
| 10.1.1 Auszug aus der DGUV 11 .....   | 181 |
| 10.1.2 Auszüge aus der DGUV Information 203-036 .....   | 182 |
| 10.2 Lasereinrichtungen für Leitstrahlverfahren und<br>Vermessungsarbeiten .....  | 183 |
| 10.3 Lasereinrichtungen für Unterrichtszwecke .....   | 184 |
| 10.4 Lasereinrichtungen für medizinische Anwendung .....  | 185 |
| 10.5 Lichtwellenleiter-Übertragungsstrecken in Fernmeldeanlagen<br>und Informationsverarbeitungsanlagen mit Lasersendern .....  | 186 |
| 10.5.1 Auszug aus der DGUV 11 .....   | 186 |
| 10.5.2 Wichtiges aus der DGUV Information 203-039 .....   | 186 |
| Literatur .....   | 188 |
| <b>11 Anhang</b> .....  | 189 |
| 11.1 A.1 Arbeitshilfe zur Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung<br>nach OStrV .....   | 190 |
| 11.1.1 Überblick über Verordnungen und Normen .....   | 190 |
| 11.1.2 Technische Informationen .....   | 191 |
| 11.1.3 Gefährdungsbeurteilung nach §3 OStrV und TROS<br>Laserstrahlung .....  | 192 |
| 11.2 A.2 Beispiel einer Laserklassifizierung .....  | 208 |
| 11.2.1 Vorgehensweise .....   | 208 |
| 11.2.2 Berechnungen .....   | 208 |
| 11.3 A.3 Formular zur Bestellung von Laserschutzbeauftragten .....  | 210 |
| 11.3.1 Aufgaben .....   | 210 |
| 11.3.2 Übertragung von Unternehmerpflichten .....   | 210 |
| 11.4 A.4 Formular für die jährliche Unterweisung .....  | 211 |
| 11.4.1 Nachweis der jährlichen Unterweisung zum Laserschutz<br>nach OStrV (§ 8) .....   | 211 |
| 11.5 A.5 Beispiel für eine Betriebsanweisung .....  | 212 |
| 11.6 A.6 Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung –<br>OStrV vom 30. November 2016 .....  | 213 |
| 11.6.1 Abschnitt 1 Anwendungsbereich<br>und Begriffsbestimmungen .....  | 214 |
| 11.6.2 Abschnitt 2 Ermittlung und Bewertung der Gefährdungen<br>durch künstliche optische Strahlung; Messungen .....  | 216 |
| 11.6.3 Abschnitt 3 Expositionsgrenzwerte für und<br>Schutzmaßnahmen gegen künstliche optische Strahlung ...   | 218 |
| 11.6.4 Abschnitt 4 Unterweisung der Beschäftigten bei<br>Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung;<br>Beratung durch den Ausschuss für Betriebssicherheit ..... | 219 |
| 11.6.5 Abschnitt 5 Ausnahmen; Straftaten<br>und Ordnungswidrigkeiten .....  | 220 |



---

|         |   |            |
|---------|---|------------|
| 11.7    | A.7 Formelsammlung und Begriffe . . . . .                                       | 222        |
| 11.7.1  | Physikalische Begriffe . . . . .  | 222        |
| 11.7.2  | Mathematische Begriffe . . . . .  | 222        |
| 11.7.3  | Strahlparameter . . . . .   | 222        |
| 11.8    | A.8 Erweiterte Aufgabensammlung . . . . .                                       | 224        |
| 11.8.1  | Berechnungen zur Energiedichte (=Bestrahlung) $H$ . . . . .                     | 224        |
| 11.8.2  | Berechnungen zur Impulsenergie $Q$ und<br>Impulsspitzenleistung $P_p$ . . . . . | 225        |
| 11.8.3  | Aufgaben zu Wellenlängen . . . . .  | 226        |
| 11.8.4  | Berechnungen zur Strahldivergenz $\varphi$ . . . . .                            | 226        |
| 11.8.5  | Berechnungen zu Expositionsgrenzwerten . . . . .                                | 227        |
| 11.8.6  | Berechnungen zu ausgedehnte Quellen<br>(diffuse Reflexion) . . . . .            | 228        |
| 11.8.7  | Berechnungen zur fotochemischen und thermischen<br>Netzhautschädigung . . . . . | 229        |
| 11.8.8  | Berechnungen zum Sicherheitsabstand NOHD . . . . .                              | 229        |
| 11.8.9  | Berechnungen zur Fokussierung mit einer Linse . . . . .                         | 230        |
| 11.8.10 | Berechnungen zu Laserschutzbrillen . . . . .                                    | 231        |
| 11.9    | A.9 Beispielhafte Berechnungen für die Gefährdungsbeurteilung . . . . .         | 232        |
|         | <b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>  | <b>237</b> |

## Inhaltsverzeichnis

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.1    | Eigenschaften von optischer Strahlung              | 2  |
| 1.1.1  | Wellenoptik  | 2  |
| 1.1.2  | Inkohärente Strahlung (normale Lichtquellen)       | 4  |
| 1.1.3  | Kohärente Strahlung (Laser)                        | 5  |
| 1.1.4  | Spontane Emission (normale Lichtquellen)           | 5  |
| 1.1.5  | Stimulierte Emission (Laser)                       | 6  |
| 1.2    | Aufbau und Funktion eines Lasers                   | 7  |
| 1.2.1  | Lasermedium  | 7  |
| 1.2.2  | Resonator  | 8  |
| 1.2.3  | Energiezufuhr                                      | 8  |
| 1.2.4  | Beschreibung von Lasertypen                        | 9  |
| 1.2.5  | Gaslaser   | 10 |
| 1.2.6  | Festkörperlaser                                    | 11 |
| 1.2.7  | Faserlaser   | 13 |
| 1.2.8  | Scheibenlaser                                      | 14 |
| 1.2.9  | Halbleiter- oder Diodenlaser                       | 14 |
| 1.2.10 | Flüssigkeits- oder Farbstofflaser                  | 15 |
| 1.3    | Eigenschaften von Laserstrahlung                   | 16 |
| 1.3.1  | Allgemeine Eigenschaften                           | 16 |
| 1.3.2  | Dauerstrichlaser: Leistung und Leistungsdichte     | 17 |
| 1.3.3  | Impulslaser: Energie und Energiedichte             | 18 |
| 1.3.4  | Parameter bei der Exposition                       | 19 |
| 1.4    | Strahlparameter und Ausbreitung von Laserstrahlung | 20 |
| 1.4.1  | Strahlradius                                       | 20 |
| 1.4.2  | Strahldivergenz                                    | 21 |
| 1.4.3  | Fokussierung durch eine Linse                      | 22 |
| 1.4.4  | Austritt aus einer optischen Faser                 | 22 |
| 1.4.5  | Sicherheitsabstand (NOHD)                          | 22 |
| 1.5    | Übungen  | 23 |
|        | Literatur  | 24 |

Die physikalischen Eigenschaften der Laserstrahlung bilden eine der Grundlagen des Laserstrahlenschutzes. In diesem Kapitel werden die Natur und das Verhalten der optischen Strahlung im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Spektralbereich mit Wellenlängen von 100 nm bis 1 mm beschrieben. Es wird auf den Unterschied zwischen der inkohärenten Strahlung aus normalen Lichtquellen und der kohärenten Laserstrahlung eingegangen. Nach der Beschreibung des prinzipiellen Aufbaus der Laser wird ein Überblick über die häufigsten kommerziellen Lasertypen und deren Einsatzgebiete gegeben.

Die wichtigsten Parameter von kontinuierlicher Laserstrahlung sind neben der Wellenlänge die Laserleistung, der Strahlradius und die Bestrahlungsdauer. Aus der Laserleistung und dem Strahlradius bzw. der Strahlfläche errechnet man die Leistungsdichte (Leistung/Fläche), die man auch Bestrahlungsstärke  $E$  nennt. Im Fall eines Unfalls bestimmt diese Größe zusammen mit der Bestrahlungsdauer und der Wellenlänge das Ausmaß der Schädigung.

Die Beschreibung gepulster Strahlung erfordert zusätzliche Angaben wie mittlere Leistung, Impulsenergie, Impulsdauer und Impulsfolgefrequenz. Aus der Impulsenergie und der Strahlfläche errechnet man die Energiedichte  $H$  (Energie/Fläche) für einen Einzelimpuls.

Weiterhin wird die Ausbreitung von Laserstrahlung beschrieben, die durch die Strahldivergenz bestimmt wird. Es wird kurz auf Formeln für die Fokussierung durch Linsen und den Sicherheitsabstand NOHD eingegangen.

---

## 1.1 Eigenschaften von optischer Strahlung

Um den Laser zu entwickeln, waren theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Natur des Lichtes eine wichtige Voraussetzung. Bereits im 17. Jahrhundert standen sich die Teilchentheorie von Newton und die Wellentheorie von Huygens gegenüber. Die aktuelle Erklärung, was Licht darstellt, begann im Jahre 1905 mit der Theorie von Einstein, welche die Teilchen- und Wellentheorie des Lichts zusammenführt. Diesen doppelten Charakter von Licht nennt man Dualismus. Licht ist demnach eine Kombination aus Teilchen und Wellen. In manchen Situationen treten die Welleneigenschaften hervor, in anderen der Teilchencharakter. Die Lichtteilchen nennt man Photonen. Für die Lasersicherheit reicht es aus, sich mit den Welleneigenschaften des Lichtes zu beschäftigen. Unter Licht oder optischer Strahlung verstehen wir im Folgenden auch die benachbarten Bereiche im infraroten und ultravioletten Bereich.

### 1.1.1 Wellenoptik

Licht, beziehungsweise optische Strahlung im Allgemeinen, stellt eine elektromagnetische Welle dar, ähnlich wie eine Radiowelle. Allerdings ist die Wellenlänge von Licht kürzer. Die Wellenlänge wird im Folgenden in Nanometer, abgekürzt nm, angegeben ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0,000\ 000\ 001 \text{ m}$ ). Alle elektromagnetischen Wellen

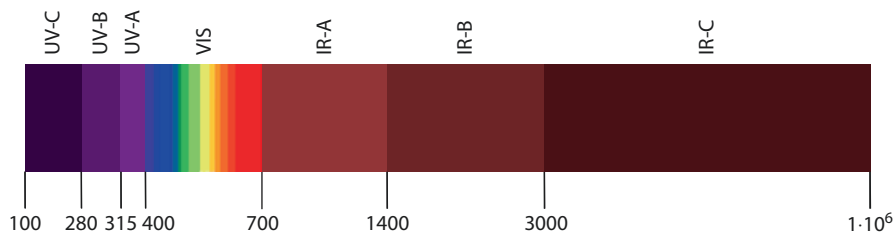
breiten sich mit der sogenannten Lichtgeschwindigkeit  $c$  von rund 300.000 km/s =  $3 \cdot 10^8$  m/s aus. Dieser Wert gilt für Vakuum und Luft. In optischen (durchsichtigen) Werkstoffen ist die Geschwindigkeit des Lichtes um eine Materialkonstante  $n$  kleiner, wobei  $n$  die Brechzahl oder den Brechungsindex darstellt (z. B. Glas  $n \approx 1,5$ ). Im Folgenden werden die Bereiche der optischen Strahlung, die in der Lasertechnik von Bedeutung sind, dargestellt.

### Sichtbares Licht VIS

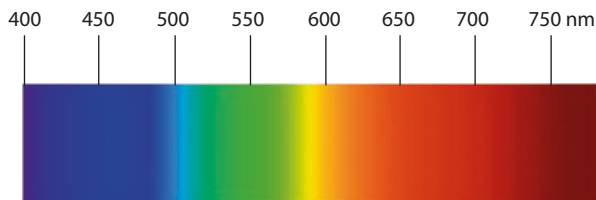
Im Laserschutz wird das sichtbare Licht in einem Bereich von 400 bis 700 nm definiert [1]. Diesen Bereich kürzt man mit VIS (*visible* = sichtbar) ab. Er erstreckt sich von violett über blau, grün, gelb bis rot (Abb. 1.1 und 1.2). Die spektrale Empfindlichkeit des Auges ist in Abb. 1.3 dargestellt. Die Grenzen des sichtbaren Bereiches sind nicht scharf und man sieht auch Strahlung außerhalb dieser Grenzen, allerdings mit sehr geringer Empfindlichkeit.

### Ultraviolette Strahlung UV

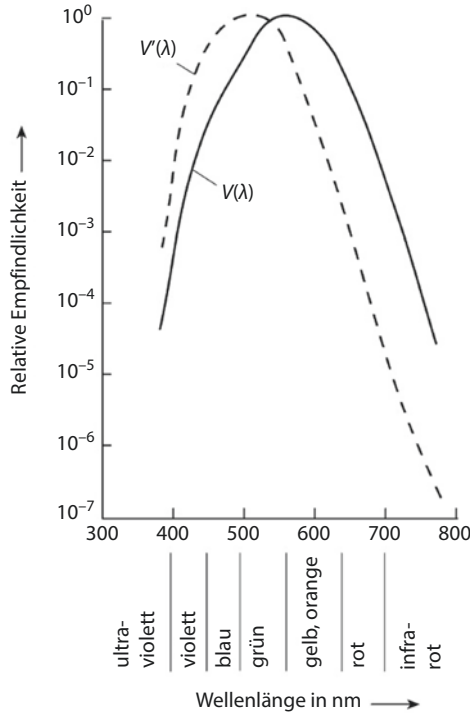
Unterhalb von 400 nm schließt sich der ultraviolette Bereich UV mit den Teilbereichen A, B und C an [1]. Ultraviolette Strahlung UV-A umfasst 315–400 nm, UV-B 280–315 nm und UV-C 100–280 nm (Abb. 1.1). Während UV-A etwas tiefer in die Haut eindringt und u. a. für die vorübergehende Bräunung und für die Alterung der Haut verantwortlich ist, wird UV-B in den oberen Hautschichten absorbiert und erzeugt eine dauerhafte Bräunung. Dieser Bereich ist direkter als UV-A für das Entstehen von



**Abb. 1.1** Wellenlängen von ultravioletter, sichtbarer und infraroter Strahlung. Alle Angaben in nm. Der Laserschutz umfasst die Wellenlängen von 100 nm bis 1 mm [1]



**Abb. 1.2** Im Laserschutz wird die sichtbare Laserstrahlung im Bereich VIS von 400 bis 700 nm [1] definiert. In verschiedenen Dokumenten (z. B. CIE 018.2-1983, The Basis of Physical Photometry, 2. Auflage (Nachdruck 1996) [2]) wird der sichtbare Bereich jedoch von 380 bis 780 nm festgelegt



**Abb. 1.3** Relative spektrale Empfindlichkeit des Auges in Abhängigkeit von der Wellenlänge für Tagessehen  $V$  und Nachtsehen  $V'$  (aus [3])

Hautkrebs verantwortlich. Die UV-C-Strahlung der Sonne wird in der Lufthülle absorbiert, sodass sie nicht bis zur Erdoberfläche vordringt. Sie entsteht jedoch in Lasern und anderen künstlichen Quellen und stellt dabei eine bedeutende Gefährdung dar.

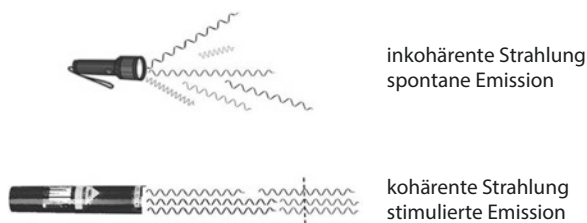
### Infrarote Strahlung IR

Oberhalb von 700 nm beginnt der infrarote Bereich IR mit den Teilbereichen A, B und C. Die IR-A-Strahlung reicht von 700 bis 1400 nm [1]. Diese Strahlung dringt zumindest teilweise bis zur Netzhaut vor. Der IR-B Bereich umfasst Wellenlängen von 1400 bis 3000 nm, darüber liegt die IR-C-Strahlung.

#### 1.1.2 Inkohärente Strahlung (normale Lichtquellen)

In den Texten zum Schutz vor optischer Strahlung wird zwischen *inkohärenter* und *kohärenter* Strahlung unterschieden [1, 4]. Normale künstliche Lichtquellen und die Sonne erzeugen inkohärente Strahlung, die reine Laserstrahlung ist dagegen kohärent.

Licht wird in Atomen oder Molekülen erzeugt. Voraussetzung dafür ist, dass diese Teilchen vorher Energie aufnehmen. Bei der Energieaufnahme werden Elektronen aus einem niedrigeren in einen höheren Energiezustand gebracht. Man sagt auch, die Elektronen bewegen sich auf einer höheren Umlaufbahn um den jeweiligen



**Abb. 1.4** Unterschied zwischen der inkohärenten Strahlung von normalen Lichtquellen und kohärenter Strahlung aus einem Laser

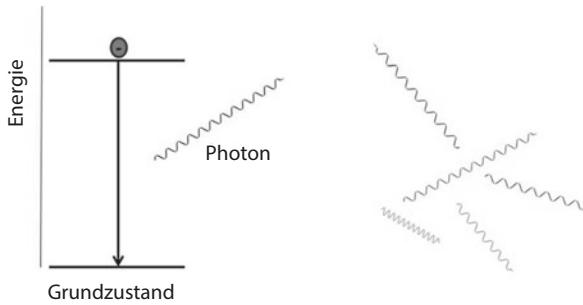
Atomkern. Diese Bahn ist instabil und die Elektronen gehen wieder auf eine tiefere Bahn bzw. in einen niedrigeren Energiezustand zurück. Bei diesem Prozess wird die aufgenommene Energie wieder frei und als Strahlung oder Lichtwelle abgegeben. Dabei strahlt jedes einzelne Atom eine Lichtwelle ab. Diese Lichtwelle von einem Atom wird als Lichtteilchen oder Photon bezeichnet. Bei inkohärenter Strahlung strahlen die einzelnen Atome ihre Lichtwellen spontan und chaotisch in den Raum, zu verschiedenen Zeiten, in alle Richtungen und mit unterschiedlichen Wellenlängen (Abb. 1.4) ab. Diesen Vorgang nennt man *spontane Emission*. Es entsteht ein nicht zusammenhängender (=inkohärenter) Wellenzug. Normales Licht stellt somit eine unregelmäßige Wellenbewegung dar [3, 5–8].

### 1.1.3 Kohärente Strahlung (Laser)

Wie bei der inkohärenten Strahlung müssen die Atome bei der kohärenten Strahlung zunächst Energie aufnehmen. Die kohärente Strahlung wird hierbei durch *stimulierte Emission* erzeugt. Bei der stimulierten Emission sind die Atome synchronisiert, d. h. sie strahlen im gleichen Takt, in die gleiche Richtung und mit gleicher Wellenlänge. Durch die Überlagerung dieser einzelnen gleichartigen Wellen entsteht ein sehr gleichmäßiger Wellenzug, der sich nahezu parallel ausbreiten kann (Abb. 1.4). Diese zusammenhängende Welle bezeichnet man als kohärent (=zusammenhängend) [3, 6–8]. Während normale Lichtquellen inkohärente Strahlung abgeben [4], ist Laserstrahlung kohärent [1].

### 1.1.4 Spontane Emission (normale Lichtquellen)

Die inkohärente Strahlung wird durch spontane Emission erzeugt. Durch Energiezufuhr (z. B. thermische Anregung, elektrischer Strom) werden in Atomen/Molekülen höhere oder angeregte Energiezustände besetzt (Abb. 1.5). Diese entsprechen weiter außen liegenden Elektronenbahnen um das Atom. Diese höheren Zustände gehen nach einer kurzen Zeit unter Aussendung einer Lichtwelle in den unteren Zustand über. Die dabei emittierte Lichtwelle kann als Photon angesehen werden. Es lässt sich nur statistisch vorhersagen, wann und in welche Richtung das Licht abgestrahlt wird. Man spricht daher von spontaner Emission.

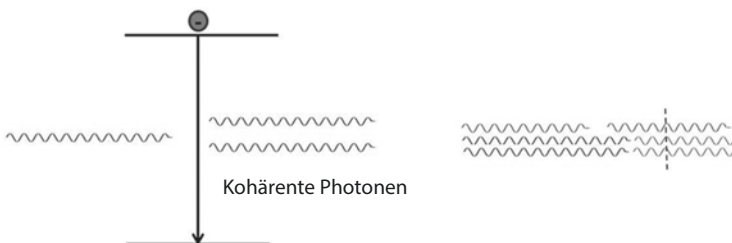


**Abb. 1.5** Spontane Emission von Licht bei normalen (inkohärenten) Lichtquellen: **a** Beim Übergang eines Atoms von einem höheren Energiezustand in einen tieferen wird Licht abgestrahlt. **b** Einzelne Atome strahlen die Wellen (Photonen) unabhängig voneinander in verschiedene Richtungen

### 1.1.5 Stimulierte Emission (Laser)

#### Lichtverstärkung

Das Wort Laser ist ein Kunstwort aus den ersten Buchstaben des amerikanischen Begriffs *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Übersetzt bedeutet dies: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Der Laser mit seiner kohärenten Strahlung beruht also auf der stimulierten Emission. Im Gegensatz zur spontanen Emission strahlt das Atom nicht von allein, sondern durch eine Einwirkung von außen. Trifft eine Lichtwelle auf ein Atom, welches sich in einem energiereichen Zustand befindet, so kann die Welle das Atom synchronisieren. Infolgedessen strahlt das Atom seine Energie im gleichen Takt und in gleicher Richtung wie die einfallende Welle ab. Die Wellenzüge der einzelnen Atome überlagern sich zu einer gleichmäßigen Wellenbewegung. Voraussetzung dafür ist, dass die Wellenlänge des eingestrahnten Lichtes genau auf den Energiezustand des Atoms abgestimmt ist (Abb. 1.6). Durch die stimulierte Emission findet also eine Verstärkung von Licht statt. Es entsteht kohärente Strahlung. Im Teilchenbild kann man auch sagen: Aus einem Photon werden zwei, die exakt gleich sind.



**Abb. 1.6** Stimulierte Emission von Licht im Laser: **a** Durch die Wirkung einer einfallenden Lichtwelle (Photon) wird das Atom synchronisiert und zur Abstrahlung von Licht gezwungen. **b** Die Atome strahlen in die gleiche Richtung mit gleicher Wellenlänge und im gleichen Takt. Die Wellen überlagern sich zu einer gleichmäßigen kohärenten Gesamtwelle, dem Laserstrahl

Eine Lichtverstärkung tritt dann auf, wenn die entstehende Lichtwelle nicht wieder von den Atomen absorbiert wird. Die stimulierte Emission muss also häufiger auftreten als die Absorption. Dies kann nur durch Erzeugung einer sogenannten Inversion erreicht werden. Eine Inversion liegt dann vor, wenn sich mehr Atome im energiereichen als im unteren energieärmeren Zustand befinden. Dies kann durch ganz bestimmte Mechanismen der Energiezufuhr erreicht werden.

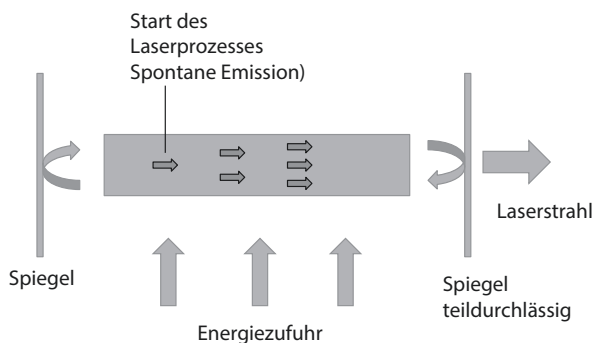
### Lasers

Die stimulierte Emission erklärt die Verstärkung von Licht, wie sie im Wort Laser angedeutet wird. Sie stellt also den grundlegenden Effekt dar, der zum Laser führt. Auf dieser Basis können im Folgenden der Aufbau und die Funktion eines Lasers erklärt werden [3, 6–8].

## 1.2 Aufbau und Funktion eines Lasers

### 1.2.1 Lasermedium

Ein Laser besteht im Prinzip aus dem sogenannten Lasermedium (oder aktivem Medium), dem Resonator und der Energiezufuhr. Die Strahlung entsteht im Lasermedium. Dieses besteht aus Atomen oder Molekülen im Zustand eines Gases, eines Festkörpers, eines Halbleiters oder einer Flüssigkeit. Das Lasermedium hat in der Regel eine längliche Form (Abb. 1.7). Die Atome oder Moleküle werden in diesem Material durch Zufuhr von Energie angeregt, d. h. sie nehmen Energie auf. Dieser energiereiche Zustand ist instabil und die Atome können die Energie in Form von Strahlung wieder abgeben. Dies kann durch spontane oder stimulierte Emission geschehen.



**Abb. 1.7** Aufbau eines Lasers. Der Laser besteht aus einem Lasermedium, einer Energiezufuhr sowie zwei Spiegeln (Resonator), wobei der eine Spiegel vollständig reflektiert und der andere Spiegel teildurchlässig ist. Die vom Lasermedium aufgenommene Energie wird bevorzugt durch stimulierte Emission abgestrahlt. Durch den Resonator wird die Strahlung hin und her gespiegelt, wodurch die Verstärkung des Laserstrahls erhöht wird. Der externe Laserstrahl tritt aus dem teildurchlässigen Spiegel aus



## Inversion

Beim Laser erfolgt eine sehr intensive Anregung, sodass sich mehr Atome im energiereichen als im normalen energiearmen Zustand befinden. Diese sogenannte Inversion hat zur Folge, dass die stimulierte Emission stark wird und die Absorption gering. Damit ist das Lasermedium in der Lage, Licht durch die stimulierte Emission zu verstärken. Das Lasermedium stellt also einen Lichtverstärker dar. Hierbei bleibt zunächst die Frage offen, wie der Laser startet.

## Start des Lasers

Im Lasermedium tritt natürlich auch spontane Emission auf, die nicht zur Laserstrahlung beiträgt und somit zu Energieverlusten führt. Das Lasermedium ist daher so gewählt, dass die spontane Emission klein bleibt – aber sie bleibt stets vorhanden, wenn auch nur schwach.

Diese schwache spontane Emission gibt das Startsignal für den Laser. Per Zufall strahlt ein Atom spontan genau in axialer Richtung des Lasermediums (Abb. 1.7). Diese Startwelle wird nun durch stimulierte Emission verstärkt und läuft durch das Material, wobei sie längs des Weges laufend stärker wird.

## 1.2.2 Resonator

### Laserspiegel

Um den Weg und damit die Verstärkung weiter zu vergrößern, stellt man einen Spiegel auf, der den Strahl wieder in das Lasermedium zurück reflektiert (Abb. 1.7). Ein zweiter Spiegel auf der anderen Seite des Mediums hat die gleiche Aufgabe. Der Laserstrahl läuft also zwischen den beiden Spiegeln hin und her und wird dabei verstärkt, bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Der Start des Lasers durch die spontane Emission läuft unmessbar schnell ab, also praktisch sofort.

Die beiden Laserspiegel bilden den sogenannten Resonator, der die geometrischen Daten des Laserstrahls bestimmt. Zur Vereinfachung der Justierung und zur Strahlformung benutzt man Hohlspiegel mit großem Krümmungsradius. Der eine Spiegel hat einen Reflexionsgrad von 100 % und der andere, an dem der Laserstrahl austritt, einen Reflexionsgrad unterhalb von 100 %. Beträgt der Reflexionsgrad beispielsweise 95 %, tritt die Differenz zu 100 %, also 5 %, aus dem Resonator aus.

## 1.2.3 Energiezufuhr

Zur Anregung der Atome oder Moleküle im Lasermedium (Gas, Festkörper, Halbleiter, Flüssigkeit) muss diesen Energie zugeführt werden. Diesen Vorgang nennt man Pumpen. Bei Gaslasern fließt ein elektrischer Strom durch das Gas, wodurch eine elektrische Entladung entsteht und Energie auf die Atome oder Moleküle übertragen wird. Festkörperlaser sind Isolatoren und die Energiezufuhr wird optisch durch Einstrahlung von Licht erreicht. Bei Halbleiterlasern erfolgt eine Anregung, ähnlich wie bei Leuchtdioden, direkt durch elektrischen Strom.

### 1.2.4 Beschreibung von Lasertypen

Entsprechend dem jeweiligen Lasermedium unterscheidet man:

- Gaslaser,
- Festkörperlaser,
- Halbleiter oder Diodenlaser,
- Flüssigkeitslaser.

Die verschiedenen Lasersysteme werden im Folgenden beschrieben und in [Tab. 1.1](#) beispielhaft zusammengefasst.

**Tab. 1.1** Vereinfachte Übersicht über die Eigenschaften und Anwendungen von wichtigen kommerziellen Lasern [3]

| Laser                                | Wellenlänge [nm]     | Leistung [W] | Impulsenergie [J] | Anwendungen  |
|--------------------------------------|----------------------|--------------|-------------------|--|
| <i>Gaslaser</i>                      |                      |              |                   |  |
| Excimerlaser                         | 193–351              |              | 0,1–1             | Augenheilkunde, Spektroskopie, Materialbearbeitung |
| He-Ne-Laser                          | 633                  | mW           |                   | Messtechnik  |
| Argonlaser (Ar)                      | 351–523              | mW–W         |                   | Messtechnik, Spektroskopie                         |
| Stickstofflaser (N <sub>2</sub> )    | 337                  |              | mJ                | Pumplaser, Spektroskopie                           |
| CO <sub>2</sub> -Laser               | 10600                | W–kW         |                   | Materialbearbeitung, Medizin                       |
| <i>Festkörperlaser</i>               |                      |              |                   |  |
| Alexandritlaser                      | 755                  |              | J                 | Medizin, Kosmetik                                  |
| Rubinlaser                           | 694                  |              | J                 | Kosmetik   |
| Nd-Laser                             | 1064 u. a.           | W–kW         | mJ–J              | Materialbearbeitung, Medizin                       |
| Faserlaser                           | Typisch 1030–1070 nm | W            | mJ–J              | Materialbearbeitung                                |
| Ho-Laser                             | 2000                 |              | J                 | Urologie   |
| Er-Laser                             | 1550 u. 3000         |              | mJ–J              | Telekommunikation, Medizin                         |
| Frequenzvervielfach. Festkörperlaser | VIS bis UV           | mW–W         | mJ–J              | Spektroskopie, Medizin, Show                       |
| Ti:Saphir-Laser                      | 700–950              |              | mJ                | Erzeugung von fs- und ps-Impulsen                  |
| <i>Halbleiterlaser</i>               |                      |              |                   |  |
| Verschiedene                         | 380–2000             | mW–kW        |                   | Nahezu alle Bereiche                               |
| <i>Farbstofflaser</i>                |                      |              |                   |  |
| Verschiedene                         | 300–3000             | W            | mJ–J              | Abstimmbare, Dermatologie, Spektroskopie           |