

Merkblatt 05

Hinweise zum Betrieb von Lasern an der Universität Konstanz

Laserschutz-
beauftragter

Die Hinweise enthalten Begriffsbestimmungen zum Laserschutz, die Definition der Laserklassen entsprechend der DIN-Norm 60825-1, eine Übersicht über die schädlichen Wirkungen der Laserstrahlen auf Auge und Haut, Hinweise auf Schutzmaßnahmen und eine Literaturübersicht. Schwerpunktmäßig werden Laser mit gebündeltem Laserstrahl im sichtbaren Spektralgebiet behandelt.

1. Begriffsbestimmungen

Lasereinrichtungen:

Lasereinrichtungen sind Geräte, Anlagen oder Versuchsaufbauten, mit denen Laserstrahlung erzeugt, übertragen oder angewendet wird. Dazu gehören auch Versuchsaufbauten und Eigenentwicklungen, in denen Laserstrahlung freigesetzt wird, sowie Lichtleiter, die mit Lasern betrieben werden. Die Vorschriften zum Laserschutz sind auch beim Betrieb von LED's mit laserähnlicher Emission zu beachten.

Laserbereich:

Ein Laserbereich ist ein abgegrenzter Bereich, in dem die Gefahr besteht, daß der MZB-Wert (Maximal Zulässige Bestrahlung) für Laserstrahlung überschritten wird. Normalerweise sind das Räume, in denen Personen durch unvorhergesehenen Laseremissionen oder zufälligen Laserstrahlreflexionen gefährdet sind.

Laserklassen:

Die Lasergeräte werden in Klassen entsprechend ihrer Gefährlichkeit für Auge und Haut in Laserklassen 1, 2, 3R, 3B und 4 eingeteilt. Für Laserstrahlung mit einem Durchmesser größer als 7 mm und divergierende Laserstrahlen gibt es die Klassen 1M, 2M und 4. Laser der früheren Laserklasse 3A fallen nach der Neufassung der DIN EN 60825-1:2001-11 in die Klassen 1M, 2M und 3R aufgeteilt.

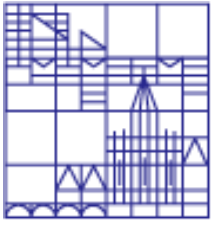
Im Folgenden werden nur die Leitlinien für die Klasseneinteilung diskutiert. Die genaue Einteilung ist in der DIN-Norm DIN EN 60825-1:2001-11 zu finden. Für Laser in der Kommunikationstechnik (Lichtleitereinrichtungen) gelten ähnlichen Klasseneinteilungen (DIN EN 60825-2:2001-05).

Jedes Lasergerät der Klasse 3B, 4 muß aus versicherungsrechtlichen Gründen vom Laserschutzbeauftragten an die Unfallkasse Baden-Württemberg [gemeldet werden](#). Versichern Sie sich beim Laserschutzbeauftragten, ob Ihr Lasergerät angemeldet ist.

MZB: Maximal zulässige Bestrahlung (engl. MPE Maximal Permissible Exposure):

Die MZB-Tabellen geben für die verschiedenen Laseranordnungen je nach den Eigenschaften der Laserstrahlung (Intensität, zu erwartende Bestrahlungsdauer, Durchmesser, Divergenz) Grenzwerte an bei deren Überschreitung mit einer Schädigung der Augen und der Haut gerechnet werden muß. Durch Abschirmungen und/oder Laserschutzbrillen muß die Laserstrahlung unter die MZB-Grenzwerte geschwächt werden. Die in den MZB-Tabellen angegebenen Bestrahlungsstärken in W/m^2 und Bestrahlungen in J/m^2 verstehen sich als Mittelwerte über eine Meßblende von 7 mm Durchmesser (Pupillengröße) gemessen im Abstand von 100 mm von der scheinbaren Laserquelle.

GZS: Grenzwerte der zugänglichen Strahlung (engl. AEL Accessible Emission Limit)



Merkblatt 05

Hinweise zum Betrieb von Lasern an der Universität Konstanz

Laserschutz-
beauftragter

Die GZS-Werte geben die maximalen Stärke der Laserstrahlung in den einzelnen Laserklassen an. Bei Überschreitung der Grenzwerte einer Laserklasse gehört der Laser zur nächst höheren Laserklasse in der Reihe 1, 2, 3R, 3B, 4. Wird für parallele Laserstrahlung mit einer Breite größer der Pupillenbreite (7 mm) oder für stark divergierende Laserstrahlung der Grenzwert der Klassen 1M bzw. 2M (2M für Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich) überschritten, so muß die Laserstrahlung der Klasse 4 zugeordnet werden. Die in den GZS-Tabellen angegebenen Werte für die Strahlungsleistung in W und Strahlungsenergie in J werden bei parallelen Lichtbündeln durch eine Blende mit einem Durchmesser von 50 mm im Abstand von 2000 mm von der scheinbaren Laserquelle gemessen. Bei divergenten Lichtbündeln hat die Meßblende bei punktförmigen Laserquellen einen Durchmesser von 7 mm und ist 14 mm von der Laserquelle entfernt aufzustellen. Genauere Angaben zu den Meßblenden für die nicht sichtbaren Spektralbereiche, ausgedehnte Lichtquellen und Pulsfolgen sind in der DIN EN 60825-1 zu finden.

Zu beachten ist, daß die Blenden für die Angaben der Bestrahlung (J/m^2) und die Bestrahlungsstärke (W/m^2) mit 7 mm im Abstand von 100 mm anders definiert sind als die Meßblenden für die Gesamtstrahlungsenergie (J) und Strahlungsleistung (W).

2. Abgrenzung Laserklassen, Schutzmaßnahmen

Die Zugehörigkeit zu den Laserklassen muß vom Hersteller des Lasers angegeben werden. Durch die Öffnung bzw. den Verschluß von Gehäusen, die Laser enthalten, ändert sich die Laserklasse im Laserbereich um die Apparatur. Bei Modifikationen und bei der Entwicklung von Laserapparaturen muß die Laserklasse anhand der DIN Normen bestimmt werden. Grundsätzlich sind alle Laserbereiche und alle Laserapparaturen durch Warnschilder mit den in den Vorschriften geregelten Symbolen und Texten zu kennzeichnen.

Klasse 1:

Zur Klasse 1 gehören Laser, deren Emission auch bei dauernder Bestrahlung (30000 Sek. = 8,3 Stunden) ins Auge unter den MZB-Werten liegt. Zu dieser Klasse zählt man auch vollständig abgeschirmte (gekapselte) Laser höherer Klassen. Laser der Klasse 1 sind ungefährlich und benötigen abgesehen von der Beschilderung keine Schutzmaßnahmen.

Typische Klasse 1-Lasergeräte sind Laserdrucker und CD-Player

Der Grenzwert für Laser der Klasse 1 ist im sichtbaren Spektralbereich wellenlängenabhängig. Er liegt jedoch stets unter 1 mW. Für 532 nm liegt der Wert wegen der thermischen Schädigung der Netzhaut bei 0,39 mW.

Klasse 2:

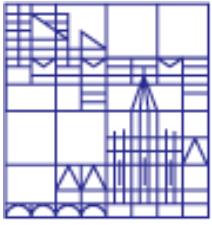
Zu den Lasern der Klasse 2 zählt man Laser im sichtbaren Spektralbereich, für die eine Begrenzung der Bestrahlungszeit durch den Lidschlußreflex erwartet werden kann. Für die Reflexzeit nimmt man einen Wert von 0,25 Sekunden an. Falls der Lidschlußreflex nicht durch Medikamente unterdrückt ist, sind auch Laser der Klasse 2 ungefährlich. Als Schutzmaßnahme reicht die Beschilderung.

Typische Laser: Laserpointer, $\lambda = 670 \text{ nm}$, Leistung $< 1 \text{ mW}$

Grenzwert für Dauerstrichlaser im Sichtbaren: 1 mW

Klasse 3R:

Zu dieser Klasse gehören Laser, die die Grenzwerte der Klassen 1 bzw. 2 um nicht mehr als das Fünffache überschreiten. Bei Lasern dieser Klasse treten bereits Augenschädigungen auf. Als Schutzmaßnahme muß eine Anzeige (Lampe, Warnsignal) vorhanden sein, daß der Strahl aktuell in



Merkblatt 05

Hinweise zum Betrieb von Lasern an der Universität Konstanz

Laserschutz-
beauftragter

Betrieb ist. Der Strahl muß durch einen Strahlfänger begrenzt sein. Es müssen Vorkehrungen gegen unbeabsichtigt Reflexionen getroffen werden. Für das Bedienungspersonal muß eine Unterweisung über die beim Betrieb von Lasern zu beachtenden Regelungen stattfinden.

Typische Laser: HeNe-Laser, $\lambda = 632 \text{ nm}$, Leistung 5 mW

Grenzwert für Dauerstrichlaser im Sichtbaren: 5 mW

Klasse 3B:

Die dieser Klasse gehören Laser, deren Emission bei direktem Blick in den Strahl für das Auge (auch bei Berücksichtigung des Lidschlußreflexes) sehr schädlich ist. Es treten bereits irreversible Augenschädigungen auf. Die Haut wird durch Laser dieser Klasse bei kurzzeitigen zufälligen Bestrahlungen noch nicht geschädigt. Zusätzlich zu den Schutzmaßnahmen in der Klasse 3R sind folgende Vorkehrungen zu beachten: Die Strahlaustrittsöffnung muß deutlich gekennzeichnet sein. In Raumbereichen, die vom Laserstrahl getroffen werden können, müssen Schutzbrillen getragen werden. Dabei ist auch zu berücksichtigen, daß unbeabsichtigte Reflexe auftreten können. Eine Abschirmung des eigentlichen Laserbereiches durch Raumteiler oder Vorhänge ist dringend zu empfehlen, wenn sich benachbart zum Laserbereich andere Arbeitsplätze befinden. Arbeiten mehrere Personen innerhalb des Laserbereiches muß **vor** jedem Einschalten des Lasers eine Warnmitteilung erfolgen. Der aktuelle Einschaltzustand des Lasers muß durch ein Warnlicht am Eingang zum Laserbereich gekennzeichnet sein. Bei Betrieb eines Lasers der Klasse 3B und 4 muß vom Betreiber ein Laserschutzbeauftragter benannt sein.

Typische Klasse 3B-Laser sind: schwache Argon-Laser, die auf einzelnen Linien betrieben werden (200 mW), Diodenlaser $\lambda=690 \text{ nm}$, 30 mW.

Grenzwert in der Klasse 3B für Dauerstrichlaser im Sichtbaren: 0.5 W, für Pulslaser 30 mJ.

Klasse 4:

Laser, deren Emission auch bei nur kurzzeitiger zufälliger Bestrahlung sowohl für das Auge wie für die Haut schädlich ist. Bei Lasern der Klasse 4 ist bereits der Blick auf einen diffusen Reflex in 13 cm Abstand bei 10 Sekunden Beobachtungszeit schädlich. Je nach Stärke des Lasers können in der Laserklasse 4 erhebliche Hautverletzungen auftreten. Bei Bestrahlung von brennbaren oder entzündlichen Substanzen muß mit besonderer Vorsicht gearbeitet werden. Die bereits bei der Klasse 3B erwähnten Schutzmaßnahmen gelten in verschärfter Form. So müssen Laser, bei denen starke Streustrahlung auftritt, gegebenenfalls ferngesteuert in einem eigenen Raum mit Laserschutzsichtfenstern betrieben werden. Für eine solche Laserapparatur muß eine Automatik vorhanden sein, die den Laser abschaltet, wenn der Laserbereich betreten wird.

Beachte: Bei schwächeren Lasern reicht das Tragen von Handschuhen, bei stärkeren Lasern (z.B. in der Materialbearbeitung) muß die Laserapparatur vollständig abgeschirmt sein.

Typische Laser der Klasse 4: Excimerlaser (200 mJ/Puls), Argonlaser im Breitbandbetrieb (>0.5 W), CO₂ Laser zur Materialbearbeitung.

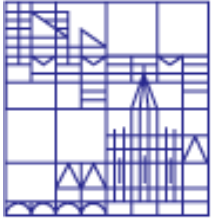
Klassen 1M und 2M:

Die neu eingerichteten Laserklassen erfassen die beiden folgenden Fälle:

(a) Es liegt ein paralleler Laserstrahl mit einem Durchmesser größer 7 mm (Pupillendurchmesser) vor

(b) Die Laserstrahlung divergiert stark.

Ohne Verwendung von optischen Instrumenten gelten für die beiden Fälle die Grenzwerte der Klasse 1 und im sichtbaren Spektralbereich der Klasse 2. Damit müssen für Laser der Klassen 1M und 2M abgesehen von der Beschilderung keine besonderen Schutzmaßnahmen ergriffen werden.



Merkblatt 05

Hinweise zum Betrieb von Lasern an der Universität Konstanz

Laserschutz-
beauftragter

Bei Verwendung von optischen Instrumenten (Fernrohr, Hohlspiegel) gelten im Fall (a) die folgenden Grenzwerte:

Die Laserleistung bzw. die Laserenergie eines Lasers der Klasse 1M bzw. 2M, die durch eine Meßblende mit einem Durchmesser von 50 mm im Abstand von 2000 mm von der scheinbaren Laserquelle aufgestellt wird, muß unter dem Grenzwert der Klasse 3B (d.h. 30 mJ bzw. 0,5 W) bleiben.

Im Fall (b) muß die Laserstrahlung, die durch eine Blende mit einem Durchmesser von 7 mm im Abstand von 14 mm von der scheinbaren Lichtquelle aufgestellt wird, unter den Grenzwerten für die Laserstrahlung der Klasse 3B (d.h. 30 mJ bzw. 0,5 W) bleiben.

Laser der Klasse 1M und 2M können damit bereits schwere Augenschäden verursachen, wenn mit lichtsammelnden optischen Instrumenten (Fernrohre, Mikroskope, Hohlspiegel) in den Strahl geblickt wird. Eine Feinabstufung des Gefährungsgrades zwischen 1M bzw. 2M und der Stufe 4 wird bei breiten bzw. divergierenden Laserstrahlen nicht gemacht.

Typische Laser der Klasse 1M und 2M sind durch Linsen aufgeweitete Laserstrahlen und Strahlengänge in Mikroskopen.

3. Schädigende Wirkung von Laserlicht in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Grundsätzlich wirkt Laserlicht auf Auge und Haut in gleicherweise schädigend wie inkohärentes Licht gleicher Frequenz und Bestrahlungsstärke. Die Krankheitsbilder bei Überschreitung der MZB-Werte sind daher bei vergleichbaren Bestrahlungsintensitäten identisch mit den bei intensivem Tageslicht auftretenden Augen- und Hautschädigungen. Im Auge können spezielle Augenentzündungen und Linsentrübungen (Grauer Star, Kataraktbildung) auftreten, allgemein kommt es auf der Haut je nach Lichtintensität zu Schädigungen, die von der Erythembildung (Sonnenbrand) und vorzeitiger Alterung der Haut bis zur Möglichkeit der Auslösung von Hautkrebs bei intensiver UV-Bestrahlung reichen. Neben direkten thermischen und photochemischen Zellschädigungen kommt es bei intensiven ns-Pulsen zum Zerplatzen der von Laserpulsen getroffenen Zellen durch die Stoßwellen, die durch die plötzliche Erhitzung der getroffenen Hautpartien ausgelöst werden. Bei höchsten Laserintensitäten erfolgt Ionisation der vom Laserstrahl getroffenen Flächen mit Bildung eines Plasmas.

Im einzelnen können bei Überschreitung der MZB-Werte in den verschiedenen Wellenlängenbereichen die folgenden Schäden auftreten:

UV-Gebiet: Wegen Absorption der Strahlung in der Hornhaut keine Bestrahlung der Netzhaut.

UV-C: 100 nm -280 nm, Eindringtiefe kleiner 1 mm, zwischen 100 nm und 180 nm Absorption der Strahlung durch die Luft, Wirkung:

Haut: Erythembildung (Rötung) besonders intensiv unter 280 nm, in der Folge Pigmentbildung

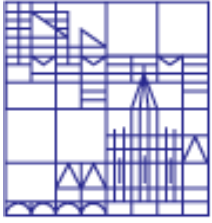
Auge: Photokeratitis (Hornhautentzündung) besonders intensiv bei 270 nm

Photokonjunktivitis (Bindehautentzündung) besonders intensiv bei 260 nm

UV-B: 280 nm -315 nm, Wirkung:

Haut: Erythembildung (Rötung) besonders intensiv bei 297 nm, in der Folge Pigmentbildung

Auge: Photokeratitis (Hornhautentzündung)



Merkblatt 05

Hinweise zum Betrieb von Lasern an der Universität Konstanz

Laserschutz-
beauftragter

UV-A: 315 nm -380 nm, Eindringtiefe in die Haut: einige Millimeter, Wirkung:
Haut: Direkte Pigmentierung der Haut ohne vorherige Erythembildung (Rötung), Schwellwert für die Pigmentierung: 10^5 J/m^2
Auge: Möglicherweise Beitrag zur Bildung des Grauen Stars.

VIS: Sichtbarer Bereich des Spektrums (380 nm- 780 nm)
In diesem Bereich kann die Strahlung bis zur Netzhaut vordringen. Wegen der fokussierenden Wirkung ist die Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut um einen Faktor 10^5 - 10^6 höher als auf der Hornhaut. Dies erklärt die höhere Empfindlichkeit des Auges im Vergleich zur Haut.
380 nm - 500 nm: Photochemische Schäden (Maximum 435nm-440nm)
500 nm - 780 nm: Thermische Schäden an der Netzhaut

IR-Gebiet: Nur im nahen IR noch Eindringtiefe bis zur Netzhaut sonst Absorption der Strahlung in der Hornhaut.

IR-A: 780 nm -1400 nm:
780 nm - 1000 nm: Ein Teil der Strahlung kann noch bis zur Netzhaut vordringen und dort thermische Schäden verursachen
ab 1000 nm Absorption durch das Zellwasser in den vorderen Augenbereichen, bei Absorption der Strahlung in Iris und Linse: Kataraktbildung (=Linsentrübung, Grauer Star) möglich

IR-B: 1400 nm -3000 nm:
Wegen der hohen Absorption der Strahlung durch das Zellwasser ist beim Auge nur die Hornhaut gefährdet. Da keine Fokussierung der Strahlung im Auge erfolgt, sind die Grenzwerte für Auge und Haut ähnlich hoch. Im Bereich um 1500 nm besitzt Wasser ein Transmissionsfenster. In diesem Bereich kann die Strahlung etwa 5 mm tief ins Auge eindringen, so daß sich die entstehende Wärme auf einen größeren Bereich verteilen kann.

IR-C: 3000 nm -1 mm: Wegen der hohen Absorption der Strahlung durch das Zellwasser ist die Eindringtiefe der Strahlung in die Haut unter 1 mm. Bei hohen Laserintensitäten sind thermische Schädigungen auf der Hautoberfläche möglich.

4. Persönliche Schutzmaßnahmen für Augen und Haut

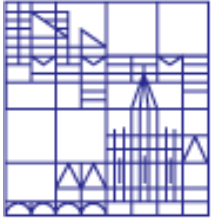
Augenschutz:

Durch eine Laserschutzbrille muß die maximal am Auge auftretende Bestrahlungsstärke auf den MZB-Wert bei der verwendeten Laserwellenlänge gesenkt werden. Für die Akzeptanz der Laserbrillen ist wichtig, daß in Bereichen außerhalb der verwendeten Laserfrequenzen die Transmission der Laserschutzbrille hoch ist. Beim Kauf von Laserschutzbrillen machen die Firmen (Übersicht beim Laserschutzbeauftragten) entsprechende Vorschläge. Dazu müssen bei CW-Lasern die Intensität, bei Pulslasern die Energie eines Pulses und die Pulsfrequenz, außerdem der Durchmesser und die Wellenlänge des Laserstrahls angegeben werden.

Man unterscheidet Schutzbrillen und Justierbrillen.

Schutzbrillen senken die Intensität des Laserstrahls bei Blick in den Strahl unter den MZB-Wert.

Justierbrillen ermöglichen den Schutz bei gleichzeitig sichtbarem Strahlpunkt. Der MZB-Wert wird während des Justiervorganges geringfügig überschritten.



Merkblatt 05

Hinweise zum Betrieb von Lasern an der Universität Konstanz

Laserschutz-
beauftragter

Hautschutz:

Falls die Gefahr besteht, daß die Haut der Laserstrahlung ausgesetzt wird, ist die Verwendung von Schutzhandschuhen, die die Laserstrahlung gefahrlos absorbieren, vorgeschrieben. Für Excimerlaser mit 200 mJ Pulsenergie genügen übliche Stoffhandschuhe. Einfache Handschuhe aus Baumwollgewebe sind in der Chemikalienausgabe erhältlich.

5. Allgemeine Hinweise

Bei der Aufstellung der Laserapparatur ist auf folgende Punkte zu achten:

- Der Laserstrahl oder die gesamte Laserapparatur muß durch Strahlenschutzaufbauten soweit wie möglich abgeschirmt werden. Reflektierende Bauelemente müssen aus dem Strahlbereich entfernt werden. Wird die Laserapparatur in Zimmern mit Fenstern betrieben, so ist besonders darauf zu achten, daß keine Laserstrahlung nach Außen dringen kann.
- Laserbereiche der Klasse 3R, 3B und 4 müssen an den Zugängen mit Warnschildern gekennzeichnet sein, die über die Art der Laserstrahlung Auskunft geben.
- Bei Lasern der Klasse 3B und 4 müssen an den Zugängen Warnlampen angebracht werden, die bei Betrieb des Lasers aufleuchten.
- Das Lasergerät muß mit Warnschildern im Raum kenntlich gemacht werden. Bei Lasern der Klasse 3B und 4 muß die Austrittsöffnung der Laserstrahlung durch ein Warnschild gekennzeichnet sein.
- Bei Arbeiten im Laserbereich muß eine geeignete Schutzbrille getragen werden. Dies gilt besonders für Arbeiten an den experimentellen Aufbauten und Servicearbeiten der Laserapparatur, bei denen ein erhöhtes Risiko besteht, vom Laserstrahl unerwartet getroffen zu werden. Für Justierarbeiten, bei denen der Verlauf des Laserstrahles noch sichtbar bleiben soll, können Justierbrillen verwendet werden.
- Der Laserstrahl soll nicht in Augenhöhe des Experimentators verlaufen, da dadurch die Wahrscheinlichkeit von unerwarteten Laserreflexionen in die Augen erhöht wird.
- Bei Justierarbeiten am Laser, bei denen der Laser öfter ein- und ausgeschaltet werden muß, sollte sich grundsätzlich nur eine Person im Laserbereich aufhalten, damit keine Schäden durch unvermutetes Einschalten des Strahles durch eine zweite Person entstehen.

Bei der Beschaffung von Warnlampen, Warnschildern und Schutzbrillen sind die Laserschutzbeauftragten behilflich.

6. Literatur

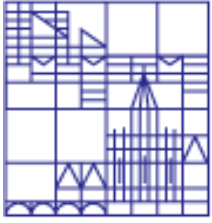
DIN EN 60825-1:2001-11

Strahlungssicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1, Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen und Benutzer-Richtlinien

VDE-Verlag und Beuth Verlag (einzusehen bei den Laserschutzbeauftragten)

[BGI 832](#)

Betrieb von Lasereinrichtungen, Anwendung der Unfallverhütungsvorschrift "Laserstrahlung" ([BGV B2](#)) auf neue Laserklassern nach DIN EN 60825-1:2001-11 (im Internet verfügbar bei der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik)



Merkblatt 05

Hinweise zum Betrieb von Lasern an der Universität Konstanz

Laserschutz-
beauftragter

[Unfallverhütungsvorschrift Laserstrahlung, GUV-V B2](#), Badischer Gemeindeunfallversicherungsverband (zu erhalten bei den Laserschutzbeauftragten und dem Sicherheitsingenieur, sowie im Internet). Bisher (7/2002) sind die neuen Laserschutzklassen noch nicht im Text verarbeitet.

Besonders empfehlenswert:

E. Sutter, P. Schreiber, G. Ott, Handbuch Laserstahlenschutz, Grundlagen, Vorschriften, Schutzmaßnahmen, Springer-Verlag, 1989, (Uni-Bibliothek, phy 784 vu/s96)

J. Eichler, Laser und Strahlenschutz, Vieweg (1992) (Uni-Bibliothek, bio 986vh/e42)

DIN-VDE-Taschenbuch: Laser, Sicherheitstechnische Festlegungen für Lasergeräte und -anlagen Normen. Beuth Verlag (1998)

Eine Zusammenstellung der für den Betrieb von Lasern einschlägigen Normen findet man in der [BGI 832](#) "Betrieb von Lasereinrichtungen" herausgegeben von der Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektrotechnik.

Empfehlenswert: Suche im Internet unter den Stichworten: "Lasersicherheit", "Laser safety", [Internetseiten der Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektrotechnik](#), [Internetseiten des Beuth-Verlages zu den DIN-Normen](#),

7. Laserschutzbeauftragte an der Universität Konstanz

Für den Fachbereich Physik: P. Leiderer, Tel. 3793,
E-Mail: Paul.Leiderer@uni-konstanz.de

Für die übrigen Bereiche: J. Boneberg, Tel. 2256
E-Mail: Johannes.Boneberg@uni-konstanz.de