

Matthias Fuhrland, Bernd Quasthoff, Michael Möser

## **Zur Laserwirkung geodätischer Instrumente**

**Zusammenfassung:** *Die Laserwirkung geodätischer Instrumente ist ein in der Vergangenheit viel-diskutiertes Problem. In einer Diplomarbeit an der TU Dresden wurde von elf Instrumenten der Firmen Leica Geosystems, Trimble und Zeiss die Distanzmessung auf ihr Gefährdungspotential untersucht. Dieser Artikel soll die Wirkungsmechanismen im menschlichen Auge aufzeigen, das Problem des Lidschlussreflexes diskutieren und die Ergebnisse der Instrumentenuntersuchungen vorstellen.*

**Abstract:** *The impact of lasers used in geodetic instruments was often discussed in past. Within a diploma thesis at the Dresden University of Technology the ranging lasers of 11 instruments from Leica Geosystems, Trimble and Zeiss were tested with respect to their danger potential. This article will show the mechanisms of impact inside the human eye, discuss the problem of the eye shut reflex and present the results of instrumental tests.*

### **1. Motivation**

Laser besitzen in der Geodäsie ein breites Anwendungsgebiet. So werden in den Totalstationen für die Distanzmessung fast ausschließlich Laser als Strahlungsquelle verwendet. In Deutschland sind dafür Laser der Klassen 1 bis 3R zugelassen [1]. Mit zunehmender Klasse steigt dabei die zulässige Ausgangsleistung und somit das vom Laser ausgehende Gefahrenpotenzial. Bei Rotationslasern, Laserscannern, Lasertrackern und bei der Tracking-Funktion in Totalstationen wird die Laserstrahlung über einen längeren Zeitraum in das Umfeld des Instrumentes ausgesandt. Bei Rotationslasern und Laserscannern mit hohen Drehraten geht man davon aus, dass bei kurzzeitigem Blick in den Strahl aufgrund der Bewegung die Bestrahlungszeit des Auges zu gering ist, um Schäden anzurichten. Für Laserscanner mit niedrigen Drehraten gilt dies nur bedingt, bei Tachymetern nicht. Während sich die Firma Trimble bei ihren Tachymetern auf Laser der Klassen 1 und 2 beschränkt, verwenden Leica, Sokkia und Pentax auch Laser, die der Klasse 3R angehören. Bei Rotations- und Neigungslasern verwenden z.B. Topcon und Trimble Laser der Klasse 3R, gleiches gilt für Laserscanner von Trimble (Mensi), Leica, Faro und Zoller+Fröhlich.

Die von Lasern ausgehende Schadenswirkung wird sehr unterschiedlich bewertet. So sind laut der anzuwendenden Norm DIN EN 60825-1 Laser der Klasse 2 für das Auge ungefährlich, da dieses durch den Lidschlussreflex geschützt wird [2]. Dieser Reflex soll die Bestrahlungszeit auf 0,25 Sekunden begrenzen. Neuere Untersuchungen zeigen allerdings, dass dieser Reflex nur in seltenen Fällen ausgelöst wird und deshalb seine Schutzfunktion verfehlt. Es besteht also der Anlass, den Klassifizierungsansatz bzw. die tatsächliche Wirkung auf das menschliche Auge zu hinterfragen. Der Einsatz von cw-Lasern (Dauerstrich), modulierten und gepulsten Lasern ist hinsichtlich der Schadenswirkung zu differenzieren.

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU Dresden [7] wurden von elf Tachymetern der Firmen Leica, Trimble und Zeiss die Distanzmessung auf ihre tatsächliche Gefährdung für das Auge untersucht. In diesem Artikel sollen die Ergebnisse dieser Arbeit vorgestellt werden.

## 2. Klassifizierung von Lasern

Die bei der Klassifizierung von Lasereinrichtungen zu verwendenden Messverfahren sind in der DIN EN 60825-1 geregelt. Außerdem sind dort die Grenzwerte der zugänglichen Strahlung (GZS) als Laserklassengrenzwerte festgelegt. Diese sind von der Emissionsdauer und der Wellenlänge des Lasers abhängig. Die Unterteilung der Laserklassen erfolgt entsprechend der von der Strahlung ausgehenden Gefährdung in sieben Klassen von 1 (ungefährlich) bis 4 (sehr gefährlich). Die entsprechenden Klassendefinitionen zeigt die Tabelle 1. Neben der Klassendefinition sind darin die maximalen Ausgangsleistungen für den sichtbaren und den nahen Infrarotbereich (700-1050 nm), die maximale Ausgangsleistung für einen Dauerstrichlaser (cw-Laser) und die maximale Impulspitzenleistung für einen Impulslaser mit Impulsbreiten zwischen  $10^{-11}$  und  $10^{-9}$  s dargestellt. Diese Impulszeiten sind typisch für die Distanzmessgeräte der heutigen Generation. Wie oben bereits erwähnt, sind die Laserklassengrenzwerte von der Wellenlänge abhängig. Während im sichtbaren Bereich ein einheitlicher Grenzwert existiert, fließt im Bereich von 700 nm bis 1050 nm die Wellenlänge direkt in den Grenzwert ein. Dabei steigt mit zunehmender Wellenlänge die zulässige Leistung. Für sehr kurze Emissionszeiten werden die Grenzwerte als Energiewerte angegeben.

Laserklasse	Definition	zulässige cw-Leistung		zulässige Impulspitzenleistung	
		sichtbar	infrarot	sichtbar	infrarot
1	Die zugängliche Laserstrahlung ist ungefährlich.	0,39 mW	0,39 mW	1 W	10,4 W
1M	Die zugängliche Laserstrahlung ist ungefährlich, solange sich keine optisch sammelnden Instrumente im Strahlengang befinden.	0,39 mW	0,39 mW	1 W	10,4 W
2	Die zugängliche Strahlung liegt im sichtbaren Bereich (400-700 nm), Bei kurzzeitiger Einwirkung (0,25 s) ist sie ungefährlich. Es wird davon ausgegangen, dass das Auge bei zufälliger Bestrahlung durch den Lidschlussreflex geschützt ist.	1 mW		1 W	10,4 W
2M	Die zugängliche Strahlung liegt im sichtbaren Bereich (400-700 nm). Bei kurzzeitiger Einwirkung (0,25 s) ist sie ungefährlich, wenn sich keine optisch sammelnden Instrumente im Strahlengang befinden. Es wird davon ausgegangen, dass das Auge bei zufälliger Bestrahlung durch den Lidschlussreflex geschützt ist.	1 mW		1 W	10,4 W
3R	Die zugängliche Laserstrahlung ist für das Auge gefährlich. Im sichtbaren Bereich ist die Leistung für einen Dauerstrichlaser auf 5 mW begrenzt.	5 mW	2-10 mW	5 W	5-25 W
3B	Die zugängliche Laserstrahlung ist für das Auge gefährlich, häufig auch für die Haut.	0,5 W	0,5 W	$3 \cdot 10^7$ W	$3 \cdot 10^7$ - $1,5 \cdot 10^8$ W
4	Die zugängliche Strahlung ist für Auge und Haut gefährlich.	> 0,5 W	> 0,5 W	> $3 \cdot 10^7$ W	> $3 \cdot 10^7$ - $1,5 \cdot 10^8$ W

**Tab. 1: Definition der Laserklassen**

Die in der Tabelle 1 angegebenen max. Impulsspitzenleistungen stellen den Extremfall für Impulsbreiten von  $10^{-9}$  s bis  $10^{-11}$  s. Laser der Klassen 1M und 2M emittieren eine stark divergente Strahlung. Wird diese durch sammelnde Optiken, z. B. Fernrohr, betrachtet, wird die divergente Strahlung wieder auf einen Punkt kleinster Ausmaße fokussiert. Dabei entstehen Bestrahlungsstärken, die einem Laser der Klasse 3B entsprechen.

Das bei den Klassen 2 und 2M zur Anwendung kommende Sicherheitskonzept des Lidschlussreflexes wird heute kontrovers betrachtet. So wird in der DIN EN 60825-1 davon ausgegangen, dass die besagten Laser im Auge einen Reiz auslösen, wodurch das Augenlid sich innerhalb von 0,25 s schließt und somit das Auge vor gefährlicher Strahlung schützt. Untersuchungen von Prof. Reidenbach an der Fachhochschule Köln zeigen aber andere Ergebnisse [3]. Dort wurden 500 Probanden auf ihren Lidschlussreflex untersucht. Bei Strahlung mit einer Wellenlänge von 670 nm (rot) wurde nur bei 16 % der untersuchten Personen ein Lidschlussreflex festgestellt. Er kann also nur als Zusatzschutz angesehen werden, womit das Sicherheitskonzept der Laserklassen 2 und 2M in Frage zu stellen ist.

Gepulste Laser, Rotationslaser und schnell rotierende Laserscanner dürfen nach Tabelle 1 wesentlich höhere Pulsleistungen haben als die Klassifizierung für cw-Laser impliziert. Technisch realisierbar sind Pulsleistungen von über 10 W auch bei Halbleiterlasern. Aus dem Prinzip der Modenkopplung resultiert mit geringerer Pulsbreite eine höhere Leistung. [8] führt aus, wie vorteilhaft aus Sicht des Tachymeter-Herstellers es sei, die Pulsfolgefrequenz zu senken, um bei gleicher Durchschnittsleistung die Einzelpulsleistung und damit die Reichweite zu erhöhen. Dies kann aber für die Gewebeoberfläche im Auge nicht dasselbe bedeuten. Bildlich gesprochen ist es ein Unterschied, eine  $3000^{\circ}\text{C}$  heiße Herdplatte eine Zehntelsekunde lang zu berühren oder eine  $30^{\circ}\text{C}$  warme Herdplatte 10 Sekunden lang zu berühren. Dazu kommt, dass die Wirkung von Impulsfolgen bei der Klassifizierung überhaupt nicht berücksichtigt wird. Auch die neueren Entwicklungen im Bereich der Pico- und Femtosekundenlaser, die z.B. beim SLR (Satellite Laser Ranging) eingesetzt werden, sind noch nicht in den Klassifizierungsregeln berücksichtigt.

Die Hersteller von Lasern und Laser-Einrichtungen sind selbst für die Klassifizierung verantwortlich. Trotzdem ist eine Kontrolle seitens der Nutzer sinnvoll, um eventuelle Schäden durch falsche Klassifizierung zu vermeiden. Wie die Untersuchungen diverser Laserpointer für Präsentationen in der Lehre (z.B. Vorlesungen) und Veröffentlichungen anderer Forschergruppen [6] gezeigt haben, sind bei Laserpointern, die der Klasse 1 oder 2 zugeordnet waren, Leistungen von bis zu 9 mW gemessen worden, was der Klasse 3B entspräche. Gelegentlich findet man auch Produkte, die laut Datenblatt nur nach der amerikanischen Norm 21CFR §1040.0 (Code of federal regulations) klassifiziert sind. Wenn die Laserleistungen nicht angegeben sind, ist eine Zuordnung zu den Klassen der DIN nicht immer möglich. Neben der richtigen Klassifizierung ist auch der richtige Umgang mit Laserquellen entscheidend, damit das Klassifizierungskonzept aufgeht. Während Arbeitsschutzbestimmungen den professionellen Umgang schulen und regeln, gibt es für den Freizeitbereich keine wirksame Reglementierung. Berichte über Kinder, die als Mutprobe bewusst in den Laserstrahl blicken, sind keine Seltenheit. Hier besteht Aufklärungsbedarf über die Folgen.

### **3. Biologische Wirkung von Laserstrahlung**

Die Hauptgefährdung durch Laserstrahlung geht von ihrer meist geringen Divergenz aus und betrifft besonders das Auge. Während bei ausgedehnten Objekten die Abbildung auf ein großes Netzhautareal erfolgt, wird bei der stark gebündelten Laserstrahlung die gesamte Laserleistung auf eine Fläche kleinster Ausmaße fokussiert. Es entstehen somit um einen Faktor  $10^5$ - $10^6$  erhöhte Bestrahlungsstärken (= auf die Fläche bezogene Leistung). Wird ein die Pupille ausfüllender Laser ( $\varnothing$  7mm) der Klasse 2 mit einer Leistung P von 1 mW im Auge fokussiert, bestrahlt dieser eine Netzhautfläche mit einem Durchmesser  $D \leq 10 \mu\text{m}$ .

Dort entsteht nach folgender Gleichung

$$H = \frac{P}{0,25 \cdot \pi \cdot D^2}$$

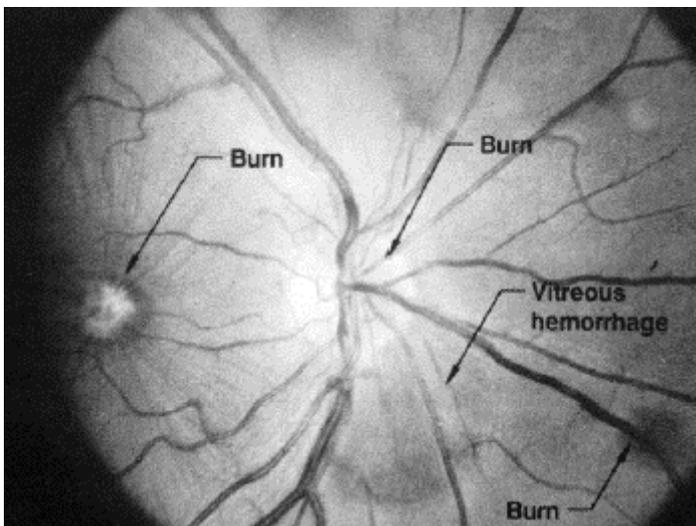
eine mittlere Bestrahlungsstärke  $H$  von ca.  $1,3 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$ . Das ist zirka um den Faktor 20 mehr als beim direkten Blick in die im Zenit stehende Sonne. Die Wirkung von Laserstrahlung auf biologisches Gewebe ist von folgenden Größen abhängig:

- Wellenlänge
- Bestrahlung bzw. Bestrahlungsstärke
- Einwirkungsdauer (Impulsdauer und –wiederholfrequenz)
- Größe der bestrahlten Fläche
- Absorption im Gewebe (abhängig von den Gewebeeigenschaften)

Der am Gewebe entstehende Schaden basiert auf der Absorption von optischer Strahlung. Diese ist wellenlängenabhängig, d. h. welches Gewebe wie geschädigt wird, wird durch die Wellenlänge der Strahlung bestimmt. Grundsätzlich werden in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke und der Einwirkungsdauer bzw. der Impulsdauer drei Wirkungsmechanismen unterschieden [9].

**Photochemische Effekte** treten bei Bestrahlung im UV-Bereich und im kurzwelligen sichtbaren Bereich des Lichtes auf. Für die Auslösung dieser Effekte sind Bestrahlungszeiten von 1-1000 s nötig. Die Bestrahlungsstärke beträgt dabei maximal  $10 \text{ W/cm}^2$ . Die absorbierte Strahlung löst im Gewebe chemische Reaktionen aus, welche irreversible Veränderungen an Auge und Haut verursachen können. Zu den photochemischen Wirkungen zählen die Linsentrübung (Grauer Star), die Horn- und Bindehautentzündung beim Auge sowie die Bildung von Hautkarzinomen (Hautkrebs).

Die **thermischen Wirkungen** überdecken die photochemischen Effekte und benötigen höhere Bestrahlungsstärken (ca.  $10\text{-}10^6 \text{ W/cm}^2$ ). Sie treten sowohl bei Dauerstrich- als auch bei Impulslasern auf. Durch die vom Gewebe absorbierte Strahlungsenergie entstehen dort Temperaturerhöhungen. In Abhängigkeit von der Größe des Temperaturanstiegs setzen verschiedene Wärmewirkungen ein. Temperaturanstiege um max. 3 K erzeugen keine irreversiblen Schäden. Wird das Gewebe auf ca.  $40\text{-}45 \text{ °C}$  erwärmt, d. h. es sind Temperaturanstiege von 4 bis 9 K zu verzeichnen, setzen Prozesse wie die Eiweißdenaturierung ein, welche bei längerer Einwirkung dauerhafte Schäden verursachen können. Mit zunehmender Temperaturerhöhung genügen immer kürzere Bestrahlungszeiten, um irreversible Schäden hervorzurufen. Thermische Schäden sind im Gegensatz zu den photochemischen abhängig von der Größe der bestrahlten Fläche. Beim Auge ist dies die Bildgröße des Strahls auf der Netzhaut. Durch die Wärmeableitung ins umliegende Gewebe vergrößert sich der Bereich der Erwärmung. Bei Überschreitung der thermischen Toleranzgrenzen können also auch außerhalb der bestrahlten Fläche Schäden entstehen.



**Abb. 1: Netzhautverletzungen**

Bei kurzen Impulsen bis  $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ s}$  ist die Wärmeableitung sehr gering [10]. Die Gewebereaktion ist hier nur auf die Dauer der Bestrahlung beschränkt. Laser mit kurzen Impulsen (10 ps-1 ms) und hohen Bestrahlungsstärken (ca.  $10^6\text{-}10^{13} \text{ W/cm}^2$ ) erzeugen

**nichtlineare Wirkungen.** Die Energie wird dem Gewebe in sehr kurzer Zeit zugeführt. Die entstehende Wärme kann in dieser kurzen Zeit nicht in das umliegende Gewebe abgeleitet werden, so dass die Temperatur im bestrahlten Gewebe sehr schnell stark ansteigt. Dadurch werden die flüssigen Zellbestandteile in Gas umgewandelt. Diese Phasenübergänge geschehen so schnell, dass sie explosiv verlaufen können, d. h. die Zellen zerreißen. Dadurch können Druckwellen (akustische Stoßwellen) entstehen, welche Verschiebungen im Gewebe erzeugen, wodurch es ebenfalls zu Zerreißungen kommen kann. Es können so auch Gewebeteile beschädigt werden, die keiner Strahlung ausgesetzt wurden. Die Abbildung 1 zeigt durch Laserstrahlung hervorgerufene Verbrennungen (burn) und Blutungen (vitreous hemorrhage) am Augenhintergrund.

Ein besonderes Augenmerk bei der Betrachtung der Wirkungsmechanismen gilt den Impulsfolgen. Experimente haben immer wieder gezeigt, dass hier eine erhöhte Schadenswahrscheinlichkeit auftritt [10]. Allerdings konnten die Ursachen bis heute nicht vollständig geklärt werden. Studien zeigen außerdem, dass auch bei Zeitabständen von mehreren Stunden zwischen den einzelnen Impulsen, die Impulse noch additiv wirken. Die Wirkung durch die Impulsfolge ist somit größer als durch einen Einzelimpuls, obwohl die dem Gewebe zugeführte Energie gleich ist. Gleichzeitig wurde beobachtet, dass mit zunehmender Anzahl der Impulse innerhalb einer Folge, der Schwellwert für die Entstehung eines Schadens sinkt. Es wird heute vermutet, dass erst bei einem zeitlichen Abstand von 96 Stunden zwischen zwei Impulsen, diese nicht mehr additiv wirken.

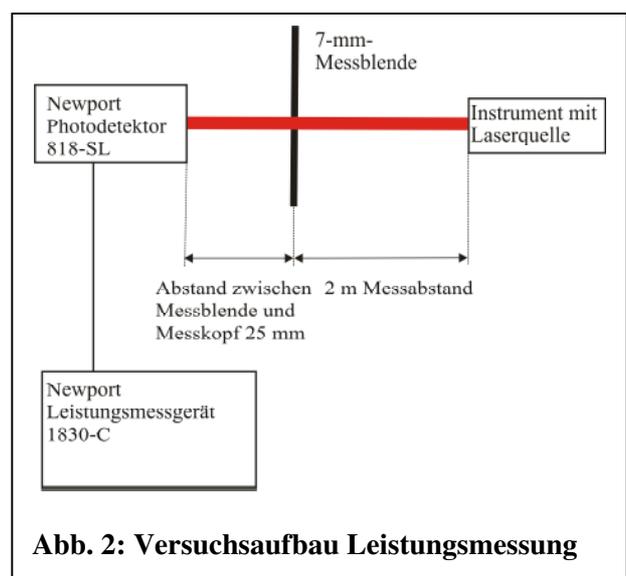
Sämtliche Netzhautverletzungen können sowohl zum vorübergehenden als auch zum dauerhaften Ausfall des Sehvermögens führen. Die Abnahme des Sehvermögens wird von der betroffenen Person normalerweise nur wahrgenommen, wenn der Bereich der Fovea in der Macula, also der Punkt des schärfsten Sehens, betroffen ist. Im schlimmsten Fall kann dies eine völlige Erblindung nach sich ziehen. Das gilt auch, wenn der blinde Fleck, also die Einmündung des Sehnervs in die Netzhaut, von der Laserstrahlung getroffen wird.

## 4. Labor-Untersuchungen

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU Dresden wurde die Distanzmessung von elf Tachymetern der Firmen Leica, Trimble und Zeiss auf ihre tatsächliche Gefährdung für das Auge untersucht.

### 4.1. Leistungsmessung

Zunächst wurden bei allen Instrumenten die Wellenlänge und die Leistung bestimmt. Bei der Leistungsmessung sind in Abhängigkeit von der Wellenlänge, die in der DIN EN 60825-1 definierten Messabstände und Messblendendurchmesser zu verwenden. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 2 dargestellt. Da bei den untersuchten Instrumenten Bestrahlungszeiten von mehr als 10 s auszuschließen sind, wurden hier nur die Messabstände und Blendendurchmesser für thermische Grenzwerte benutzt.



**Abb. 2: Versuchsaufbau Leistungsmessung**

Die ermittelten Leistungs- und Wellenlängenwerte dienen zum einen dem Vergleich mit den Herstellerangaben und zum anderen der Ermittlung der Laserklasse des im jeweiligen Messmodus benutzten Lasers. Da die Integrationszeit des Leistungsmessgerätes die Dauer eines Impulses über-

steigt, wurden hier nur die mittleren Ausgangsleistungen bestimmt. In Tabelle 2 sind die Messergebnisse den Herstellerangaben [5] gegenübergestellt.

Die gemessenen Leistungen liegen im vom Hersteller angegebenen Bereich bzw. darunter. Die Abweichungen von max. 0,03 mW liegen im Bereich der Messgenauigkeit. Die Laser der Instrumente Leica TCA2003 und Zeiss S10 sowie der im Standardmessmodus beim Trimble 5602DR300+ weisen im Vergleich zu den anderen eine höhere Divergenz auf. Dadurch trifft bereits bei einem Abstand von 2 m nur noch ein geringer Teil der Laserstrahlung den Detektor und es werden deutlich geringere Leistungen gemessen.

Instrument	Messmodus	Leistung laut Hersteller [mW]	gemessene Leistung [mW]	Spotdurchmesser [ $\mu\text{m}$ ] bei 25m	Bestrahlungsstärke [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ]	Spotdurchmesser [ $\mu\text{m}$ ] bei 50m	Bestrahlungsstärke [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ]
LEICA TCR1103	RL	0,95	0,93	31,3	86,52	30,8	20,33
	standard	0,33	0,27	23,3	23,36	23,7	3,92
LEICA TCRP1202	RL	4,75	4	28,6	154,05	29,2	26,71
	standard	0,33	0,2	22,7	13,16	26,3	1,67
TCA2003	standard	0,14	0,01	28,5	1,92	30,5	2,21
LEICA TCRM1102	RL	0,95	0,95	27,6	37,86	29,6	9,39
	standard	0,33	0,28	28	26,65	38,5	2,67
LEICA Disto	RL	0,95	0,98	21,7	8,78	25,9	1,35
ZEISS S10	standard	0,22	0,01	24,9	1,66	36,1	1,68
TRIMBLE 3602DR	RL	1	1,03	26,1	7,4	28,3	0,11
	standard	0,017	0,018	30,3	0,04	37,6	$\approx 0$
TRIMBLE 5602DR	RL	1	1	28,5	3,86	38	0,44
	standard	0,017	0,018	32,3	$\approx 0$	37,1	$\approx 0$
TRIMBLE 5602DR300+	RL	1	0,81	42,1	1,61	53,3	1,08
	standard	0,48	0,03	35,4	1,85	39,2	0,92

Tab. 2: Ergebnisse der Leistungsmessung und Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut

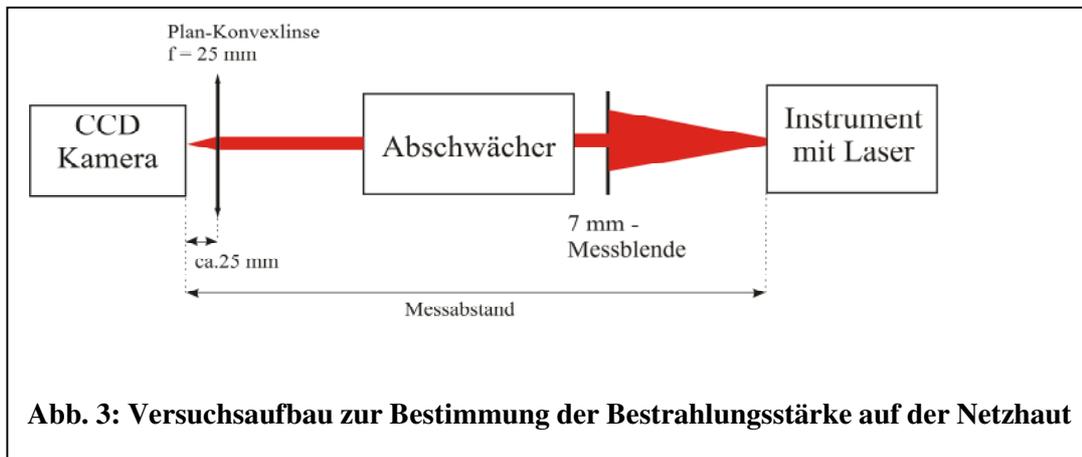
## 4.2. Bestimmung der Bestrahlungsstärke

Zur Bestimmung der Laserwirkung am Auge wurden die Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut sowie die Größe des auf der Netzhaut abgebildeten Laserpunktes und dessen Leistungsverteilung ermittelt. Diese Messungen sollten für drei Messabstände (2 m, 25 m, 50 m) erfolgen, um die Gefährdung durch Laserstrahlung auf ihre Entfernungsabhängigkeit zu untersuchen. Da aber im Nahbereich die durch die Laser erzeugte Bestrahlungsstärke trotz größter Filter den CCD-Sensor der verwendeten Kamera zerstören würde, wurde dort nur die Leistung gemessen. Zur Berechnung der Bestrahlungsstärke wurde dann eine Netzhautfläche mit einem Durchmesser von 10  $\mu\text{m}$  angenommen.

Bei dem Versuchsaufbau zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke wurde ein Modellauge (Abb. 3) verwendet, welches die fokussierende Wirkung des menschlichen Auges modelliert. Die Pupille wird durch eine 7-mm-Blende ersetzt. Diese begrenzt die Fläche des einfallenden Strahls. Die benutzte Blende stellt den ungünstigsten Fall dar, da die größtmögliche Pupillenweite 7 mm beträgt und somit der stärkste Lichteinfall modelliert wird. Die Gesamtbrechkraft des Auges beträgt ca. 58 dpt. Das entspricht einer Brennweite von ca. 23 mm. In dem hier konstruierten Modellauge wurde eine Plan-Konvexlinse mit einer Brennweite von 25 mm eingesetzt. In Anlehnung an die Anatomie des menschlichen Auges befindet sich ca. 25 mm hinter der Linse eine CCD-Kamera, die das Bild des einfallenden Lasers aufnimmt. Sie fungiert somit als Netzhaut. Da durch die verwendete Linse

sehr hohe Bestrahlungsstärken entstehen, befindet sich zwischen Blende und Linse ein Abschwächer, der die empfindliche CCD-Kamera schützt.

Die Bestrahlungsstärke, die der Peak des Lasers auf der Netzhaut erzeugt, wurde über die gemessenen Intensitäten in Kombination mit der Belichtungszeit bestimmt. Im Fernbereich wurden Durchmesser von 20-50 mm bei ca. 80-95 % der Peakintensität gemessen (siehe Tab. 2). Die Größe des auf der Netzhaut abgebildeten Laserspots hängt neben der Divergenz auch von der spektralen Reinheit (Bandbreite) der Laserstrahlung ab.



**Abb. 3: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut**

### 4.3. Untersuchungsergebnisse

Beim Vergleich der Messergebnisse mit den Herstellerangaben lagen alle ermittelten Wellenlängen und Leistungen im vom Hersteller angegebenen Bereich. Lediglich beim Leica TCRP1202 lag die ermittelte Leistung 0,75 mW unter der vom Hersteller mit 4,75 mW angegebenen Ausgangsleistung. Die Überprüfung der Klassifizierung ergab keine Abweichungen von den Herstellerangaben.

Aufgrund der ermittelten Wellenlängen und Bestrahlungsstärken kommen für die untersuchten Laser nur thermische Schädigungsmechanismen in Frage. Zur Abschätzung der entstehenden thermischen Wirkung wurde die Temperaturerhöhung in der Netzhaut nach den Temperaturmodellen von Mainster [12] und Birngruber [13] berechnet. Dabei ist den nach dem Modell von Birngruber berechneten Temperaturanstiegen ein größerer Stellenwert einzuräumen, da dieses Modell auf praktische Untersuchungen an Augen von Kaninchen und Affen beruht. Die so berechneten Temperaturerhöhungen wurden für die Bewertung der von den untersuchten Distanzmessern ausgehenden Gefährdung für das menschliche Auge herangezogen. Im Standardmessmodus werden ausschließlich Laser der Klasse 1 verwendet. Dabei handelt es sich um rote oder infrarote Laser, die im Dauerstrich- oder Impulsbetrieb arbeiten. Sie erzeugen sowohl im Nahbereich als auch bei größeren Entfernungen Temperaturerhöhungen unterhalb von  $1^\circ\text{C}$ . Sie stellen somit keine Gefahr für das Auge dar.

Im reflektorlosen Messmodus kommen rote Laser der Klassen 2 und 3R zum Einsatz. Diese Laser sind besonders im Nahbereich für das Auge gefährlich. Während Laser der Klasse 2 im Nahbereich (2 m) bereits innerhalb von 0,25 s Temperaturerhöhungen bis  $2^\circ\text{C}$  erzeugen, liegen sämtliche berechnete Temperaturanstiege unterhalb von  $1^\circ\text{C}$ , wenn die Entfernung 25 m und mehr beträgt. Laser der Klasse 2 erzeugen also nur im Nahbereich vorübergehende Augenschäden. Arbeiten diese Laser allerdings mit Wellenlängen um 500 nm, also im Bereich von grünem statt rotem Licht, ist die Strahlungsabsorption im Auge größer und es können höhere Temperaturen entstehen. Diese können bei längerer Bestrahlung, also beim Versagen des Lidschlussreflexes, irreversible Augenschäden nach sich ziehen. Hinzu kommen bei gepulsten Lasern aller Klassen noch die nichtlinearen Wir-

kungen und die additive Wirkung der Pulsfolgen, die im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht untersucht werden konnten.

Laser der Klasse 3R besitzen eine höhere Ausgangsleistung und verursachen deshalb schon bei kurzzeitigen Bestrahlungen ( $< 0,25$  s) Augenschäden. So erzeugt der im Leica TCRP1202 verwendete Laser der Klasse 3R einen Anstieg der Temperatur um  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , wenn zwischen Instrument und Betrachter nur 2 m liegen. Hier ist bereits bei kurzzeitigen Bestrahlungen mit irreversiblen Augenschäden zu rechnen. Vergrößert sich der Abstand zwischen Instrument und Betrachter nimmt die Bestrahlungsstärke und somit die erzeugte Temperaturerhöhung in der Netzhaut ab. Während bei 25 m noch mit kurzzeitigen Augenbeschwerden zu rechnen ist, ist das Risiko solcher Verletzungen bei 50 m sehr gering, da der Temperaturanstieg unterhalb von  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  liegt. Arbeiten diese Laser mit grünem Licht, wie z.B. bei den Laserscannern von Leica und Trimble, ist mit höheren Schäden zu rechnen.

## 5. Schlussfolgerungen

Es wurde nachgewiesen, dass die genannten Gerätehersteller mit ihren Totalstationen und integrierten Lasern für die Distanzmessung die gesetzlichen Auflagen einhalten. Damit besteht aus Sicht des Gesetzgebers für die Öffentlichkeit bei geodätischen Messungen im Regelfall keine Gefahr wegen Laserstrahlung. Dem Anwender werden in den genannten Vorschriften, in den Prospekten und Bedienungsanleitungen Handlungshinweise für die Nutzung von Lasereinrichtungen vorgegeben. Bei verantwortungsbewusstem Umgang mit geodätischen Distanzmessern ist die Wahrscheinlichkeit einer zufälligen Bestrahlung einer Person äußerst gering. Dass wie beim Laserpointer absichtlich auf die Augen anderer Personen gezielt wird, ist bei Vermessungstrupps normalerweise auszuschließen. Unabhängig davon sollte eine Überprüfung der Lidschlussreflex-Theorie seitens des Gesetzgebers erfolgen.

Wie die Testergebnisse zeigen, besteht bei den untersuchten Instrumenten keine Gefahr von dauerhaften Augenschäden, wenn ein Abstand von 50 m zwischen Instrument und Betrachter nicht unterschritten wird. Der Hersteller Leica empfiehlt aber für Instrumente mit einem Laser der Klasse 3R einen Sicherheitsabstand von 1000 m. Innerhalb dieses Abstandes kann laut Leica ein Blick in den Strahl gefährlich sein. Diese Empfehlung ist ein Indiz dafür, dass sich auch Leica der Problematik des Lidschlussreflexes bewusst ist und diesen nicht als alleiniges Schutzkriterium ansieht.



Abb. 4: Laserwarnschild

Grundsätzlich sollte bei allen Lasern der Blick in den Strahl vermieden werden, da insbesondere bei Lasern der Klassen 2 und 3R mit dauerhaften Augenschäden zu rechnen ist. Auch beim Arbeiten mit Rotationslasern sollte man vermeiden, die Augen längere Zeit in der Nähe der Strahlebene zu lassen. Befindet sich am Instrument ein Laserwarnschild (Abb. 4), muss sich der Nutzer den vom Laser ausgehenden Gefahren bewusst sein und die in den Vorschriften und Handbüchern beschriebenen Sicherheitsvorkehrungen beachten. Hier sind die Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ [11] und das Regelwerk 178 der gesetzlichen Unfallversicherung „Sicherheitsregeln Vermessungsarbeiten“ [4] zu empfehlen. Außerdem sind die Nutzer von Lasern der Klassen 2 bis 4 laut UVV „Laserstrahlung“ verpflichtet, mindestens einmal pro Jahr an einer Sicherheitsunterweisung teilzunehmen.

## Literatur

- [1] BGI 832 – Betrieb von Lasereinrichtungen, <http://www.bgfe.de/pages/gesetze.htm>
- [2] DIN EN 60825-1
- [3] Schäfer, G.: Nachrichten zur Arbeitssicherheit Nr. 54, März 2002, [www.nza-nachrichten.de](http://www.nza-nachrichten.de)
- [4] GUV-R178, [http://regelwerk.unfallkassen.de/daten/regeln/R\\_178.pdf](http://regelwerk.unfallkassen.de/daten/regeln/R_178.pdf)
- [5] Handbücher der Instrumentenhersteller
- [6] Hering, P. u. a.: *Sind Laserpointer fürs Auge gefährlich ?*,  
<http://www.ilm.uni-duesseldorf.de/hering/laserpointer/laserpointer.html>
- [7] Quasthoff, Bernd: *Untersuchung der Laserwirkung verschiedener Streckenmessinstrumente auf das menschliche Auge*, Diplomarbeit TU Dresden, 2004
- [8] Hipp, J.: *Eine neue Entfernungsmesserfamilie mit Puls-Laufzeit-Meßverfahren (FEN 2000)*,  
AVN 11-12/1983, S.461-464
- [9] Sutter, E. u. a.: *Handbuch Laserstrahlenschutz*, 1. Auflage, 1989, Springer Verlag, Heidelberg
- [10] Sutter, Ernst: *Schutz vor optischer Strahlung*, 2. Auflage, 2002, VDE Verlag, Berlin und Offenbach
- [11] Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“, <http://www.pr-o.info>
- [12] Mainster, M.A., u. a.: *Retinal-temperature increases produced by intense light sources*,  
Journal of the Optical Society of America, Ausgabe 60 Nr. 2, 1970
- [13] Birngruber, R., u. a. : *Theoretical investigations of laser thermal retinal injury*,  
Health Physics, Ausgabe 48 Nr. 6, Health Physics Society Pergamon Press Ltd., 1985

Anschriften der Verfasser : Bernd Quasthoff, Matthias Fuhrland, Michael Möser  
TU Dresden  
Geodätisches Institut  
01062 Dresden  
email : [Matthias.Fuhrland@mailbox.tu-dresden.de](mailto:Matthias.Fuhrland@mailbox.tu-dresden.de)  
[Michael.Moeser@mailbox.tu-dresden.de](mailto:Michael.Moeser@mailbox.tu-dresden.de)