

Abschlussbericht zum DGUV-Forschungsvorhaben

Gefährdung durch Bestrahlung aus Laserpointern – Untersuchungen zur Gefährdung von Piloten und Fahrzeugführern öffentlicher Verkehrsmittel beim Arbeitseinsatz

(FP 322 „Laserpointer“)

Berichtszeitraum: 01.09.2011 – 30.06.2014

Projekt-Verantwortlicher:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dickmann
Laserzentrum FH Münster (LFM)
48565 Steinfurt



Kurzfassung zum DGUV-Vorhaben (FP 322)

„Gefährdung durch Bestrahlung aus Laserpointern – Untersuchungen zur Gefährdung von Piloten und Fahrzeugführern öffentlicher Verkehrsmittel beim Arbeitseinsatz“

Forschungsinstitution: Laserzentrum FH Münster (LFM), Prof. Dr.-Ing. Klaus Dickmann

Aufgrund stetig steigender Zahlen von Laserpointerattacken wurden im Laserzentrum FH Münster (LFM) Forschungsarbeiten zur Ermittlung des Gefahrenpotentials und Bewertung möglicher Präventionsmaßnahmen durchgeführt. Dazu wurden die Strahleigenschaften von über 40 verschiedenen Pointern von Online-Anbietern aus Fernost im Wellenlängenbereich von 405 nm bis 655 nm („blau“, „grün“, „rot“) und Leistungen bis zu 1000 mW messtechnisch ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass die spezifizierte Laserleistung in fast allen Fällen überschritten wird; in Extremfällen sogar bis über den Faktor 20! Weitere Untersuchungen haben ergeben, dass Laserpointerstrahlung einen hohen Polarisationsgrad bis zu 99 % aufweist und bei blauer sowie roter Strahlung charakteristische „hot-spots“ im stark inhomogen ausgeprägten Intensitätsprofil auftreten.

Je nach Strahlleistung und Dauer der Bestrahlung eines menschlichen Auges kann es in Extremfällen zu einem Netzhautbrand und somit zur permanenten Augenschädigung oder zu verschiedenen Blendeffekten ohne bleibenden Schaden kommen (letzteres wird auch durch die Laserwellenlänge bestimmt). Grenzwerte für die jeweilige Gefährdung wurden europäischen und US-amerikanischen Normen entnommen (DIN EN 60825-1, ANSI Z136). Basierend auf diesen Grenzwerten wurden Sicherheitsabstände für die jeweilige Augengefährdung durch Berechnung und experimenteller Simulation bestimmt. In theoretischen Modellen wurden neben Strahlparametern auch weitere Umgebungseinflüsse wie Absorption durch Atmosphäre sowie Frontscheiben von Flugzeugen/Helikoptern und Fahrzeugen berücksichtigt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass mit verfügbaren Laserpointern noch nach mehreren 100 Metern permanente Augenschädigungen verursacht werden können. Auch Blendeffekte können noch nach mehreren 1000 Metern auftreten.

Repräsentativ für die Berufsgruppen dieses Vorhabens wurden Feldversuche mit Helikoptern der Bundespolizei-Fliegerstaffel durchgeführt. Hierbei wurde während Testflügen ermittelt, dass die Dauer von „Augentreffern“ (simuliert durch 7 mm-Blende/Sensor) typ. einige 10 ms bei einer Pointerdistanz von beispielsweise 500 m beträgt. Weiterhin wurden berechnete Sicherheitsabstände unter Praxisbedingungen verifiziert. Testflüge unter Verwendung von Schutzfolien an den unteren Bodenfenstern wurden anhand von subjektiver Pilotenbewertungen analysiert. Die Erfahrungen waren jedoch überwiegend negativ.

Auf dem Markt sind heute Schutzbrillen und -fenster für alle Laserpointerwellenlängen verfügbar. Da diese jedoch auch zu einer Veränderung des natürlichen Sehempfindens führen, eignet sich diese Art der Präventionsmaßnahme nur für wenige Anwendungen spezieller Berufsgruppen. Aktive Schutzbrillen könnten dieses Problem vermeiden, befinden sich jedoch zurzeit noch im Entwicklungsstadium. Vielversprechend sind neuartige „nanostrukturierte Schutzfolien“, die sich noch im Teststadium befinden und gleichzeitigen Schutz vor allen Pointerwellenlängen bei hoher Tageslichttransmission bieten sollen.

Abstract DGUV Project (FP 322)

„Laser pointer hazards – investigation of hazards for pilots and drivers of public transportation during work assignment“

Research institution: Laser Center (LFM), Münster University of Applied Sciences
Prof. Dr.-Ing. Klaus Dickmann

Due to increasing laser pointer attacks we carried out specific investigations concerning the hazard potential as well as evaluation of possible preventive measures. This was done by a selection of 40 laser pointers from suppliers from Far East, featured by wavelengths from 405 nm up to 655 nm (“blue”, “green”, “red”) and output power up to 1000 mW. It was shown that the specified output power was significantly exceeded up to a factor > 20 for most cases. Further investigations revealed that radiation from laser pointers shows a strong polarization up to 99 %. It also could be seen that in case of blue and red laser pointer radiation characteristic “hot spots” appear within the intensity profile.

Depending on power and duration of the illumination of the human eye either a retina injury or various glare effects may occur. MPE values (**M**aximum **P**ermissible **E**xposure) for eye injury and glare effects were taken from European and US standards (DIN EN 60825-1, ANSI Z136). Based on these MPE’s safety distances were calculated and simulated for the particular eye hazards.

Theoretical models were developed taken into account not only beam parameters but also atmospheric absorption and reduced transmission of wind screens from aircrafts/helicopter and vehicles. The results show that eye injury may happen up to several 100 m using commercial available laser pointers. Glare effects are still possible even at several 1000 m.

Field tests were carried out by using a helicopter from the German Federal Police. During test flights the typical time for eye illumination from a handheld laser pointer at a distance of 500 m was measured to a few 10 ms (inside the helicopter cockpit the human eye was simulated by a 7 mm aperture combined with a power sensor). Further test flights were performed by using filter foils which were applied at the bottom windows from the cockpit. As reported from pilots this measure failed.

Commercially laser safety goggles nowadays are available for all standard pointer wavelengths. However, a changed perception of the natural visual sensitivity is inherent. Thus applications may be only found for specific professional groups. Active safety goggles are promising in order to overcome these problems; however, these are still in the prototype stage. Also of interest are novel “nano structured films” using “meta materials” offering protection for all available pointer wavelengths at the same time but however, these films are still under investigation within testings.

Inhaltsverzeichnis

1. Titel und Laufzeit des Vorhabens	5
2. Problemstellung	5
3. Forschungszweck und -ziel	5
4. Methodik	6
5. Ergebnisse des Gesamtvorhabens.....	8
5.1 Auswahl von Laserpointern und geeigneter Messtechnik.....	8
5.2 Gefahren für das menschliche Auge	9
5.2.1 Augenschädigung	10
5.2.2 Blendung.....	10
5.2.3 Blendungsarten	10
5.2.4 Blendungsbewertung.....	12
5.2.4.1 Physiologische Blendungsbewertung	12
5.2.4.2 Psychologische Blendungsbewertung	13
5.2.4.3 Blendungsbewertung in der Luftfahrt.....	15
5.3 Ermittlung des Sicherheitsabstandes	18
5.3.1 Simulation großer Abstände mittels Linsenoptik.....	20
5.3.2 Berechnung des Sicherheitsabstandes nach der Gaußschen Strahltheorie	21
5.3.3 Fehlerbetrachtungen.....	22
5.3.4 Versuchsaufbau und Vorbereitung.....	23
5.3.5 Messergebnisse und Vergleich mit den theoretischen Werten	24
5.4 Einflussfaktoren verschiedener Frontscheiben	27
5.4.1 Auswahl der Scheiben	27
5.4.2 Transmission unterschiedlicher Frontscheiben	27
5.4.2.1 Bedeutung der Polarisierung für die Transmission der Scheiben.....	28
5.4.2.2 Messung der Polarisierung	28
5.4.2.3 Messergebnisse unter Berücksichtigung der Polarisierung.....	29
5.4.3 Streuung von Laserpointerstrahlung an Frontscheiben	30
5.5 Einflussfaktoren der Atmosphäre	31
5.5.1 Absorption in der Atmosphäre.....	31
5.5.2 Berechnung des Sicherheitsabstandes unter Berücksichtigung der Absorption durch Atmosphäre.....	32
5.5.3 Streuung durch Atmosphäreneinfluss	34
5.6 Einfluss der Wellenlänge.....	35
5.6.1 Berücksichtigung des $V(\lambda)$ -Faktors	36
5.6.2 Berücksichtigung der Beeinträchtigungsdauer	37

5.7	Zusammenfassung aller Einflussfaktoren auf den Sicherheitsabstand	39
5.8	Programm zur Berechnung des Sicherheitsabstandes	42
5.9	Präventionsmaßnahmen	44
5.9.1	Aktive Maßnahmen	44
5.9.2	Passive Maßnahmen	45
5.9.3	Organisatorische Maßnahmen	48
5.10	Feldversuch in Kooperation mit der Bundespolizei-Fliegerstaffel am Beispiel von Helikoptern	49
5.10.1	Voruntersuchungen zur Eignung von Filterfolien zum Schutz vor Laserpointerbestrahlung in Helikoptern	49
5.10.2	Voruntersuchungen zur Ermittlung von typischen Blenddauern	52
5.10.3	Messung von Strahlleistungen im Helikopter-Cockpit	53
5.10.4	Ermittlung von typischen Blenddauern während des Helikoptereinsatzes	56
5.10.4	Erprobung von (Schutz-)Filterfolien während des Helikoptereinsatzes	57
6	Ergebnisse und Veröffentlichungen externer Forschungsstellen	58
7	Bewertung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	59
8	Umsetzungs- und Verwertungsplan	61
9	Literaturverzeichnis	62

1. Titel und Laufzeit des Vorhabens

Das Vorhaben trägt den Titel „Gefährdung durch Bestrahlung aus Laserpointern – Untersuchungen zur Gefährdung von Piloten und Fahrzeugführern öffentlicher Verkehrsmittel beim Arbeitseinsatz“ (Kurztitel „Laserpointer“) und hat am 01.09.2011 begonnen. Die ursprünglich geplante Laufzeit betrug 30 Monate (bis 28.02.2014). Das Projektende wurde aufgrund von personellen Umstrukturierungen kostenneutral auf den 30.06.2014 verschoben.

2. Problemstellung

Laserpointer sind Miniatur-Laser im Kugelschreiber- bzw. Taschenlampenformat, die immer häufiger zur gezielten Bestrahlung von Piloten und Fahrzeugführern öffentlicher Verkehrsmittel missbräuchlich eingesetzt werden. Eine damit verbundene primäre Gefährdung für das Auge von Personen dieser Berufsgruppen ist offensichtlich. Hinzu kommen damit verbundene - unter Umständen gravierende - sekundäre Folgeschäden bei einem möglichen Verlust über die Kontrolle des (Luft-)Fahrzeugs. Glücklicherweise ist es bisher überwiegend „nur“ zu Beeinträchtigungen während des Arbeitseinsatzes, nicht aber zu schweren Arbeitsunfällen gekommen. Da sich jedoch derartige Fälle deutlich häufen und die verfügbare Ausgangsleistung von Laserpointern kontinuierlich steigt, ist es zwingend erforderlich, die Gefahren im Vorfeld unter Berücksichtigung aller Umgebungseinflüsse zu analysieren. Zudem müssen geeignete Gegenmaßnahmen ausgearbeitet werden.

3. Forschungszweck und -ziel

In der Vergangenheit wurden Piloten von Verkehrs- und Frachtflugzeugen, Helikoptern sowie Fahrzeugführer von öffentlichen Verkehrsmitteln (Bahn, Bus, Taxi) durch Bestrahlung aus Laserpointern mehrfach in kritische Situationen gebracht. Der missbräuchliche Einsatz von Laserpointern durch einen überwiegend jugendlichen Personenkreis findet seinen Reiz zunehmend darin, über große Entfernungen Blendwirkungen zu erzielen, ohne dass die Betroffenen auf den Ort der Strahlungsquelle zurückschließen können. Somit ist es bisher nur in wenigen Fällen gelungen, die Täter zu ermitteln. Hinzu kommt, dass mit weiter steigenden Ausgangsleistungen von „Billig-Laserpointern“ (überwiegend aus Fern-Ost über den Online-Handel) und weiter sinkenden Anschaffungskosten mit einer weiteren Steigerung von Missbrauchsfällen durch Nachahmer zu rechnen ist. Zukünftig muss daher von einer zunehmenden Gefährdung von Personen der oben genannten Berufsgruppen ausgegangen werden, was auch zu einer zusätzlich höheren Belastung für die Unfallversicherungsträger führen würde.

Das Ziel dieses Vorhabens besteht darin, das Gefahrenpotential unter Berücksichtigung verschiedener Umgebungseinflüsse für die Berufsgruppen

- (a) Piloten von Verkehrs- und Frachtflugzeugen und
- (b) Fahrzeugführer von U-Bahn, Straßenbahn, Bus und Taxi sowie Piloten von Helikoptern

zu untersuchen und anschließend

- (c) Maßnahmen zur Prävention auszuarbeiten.

Die Unterteilung in die Berufsgruppen **(a)** und **(b)** ist aus folgenden Gründen sinnvoll:

zu (a): Fahrzeugführer von Luftfahrzeugen (Piloten)

Diese Risikogruppe ist bei der Bestrahlung durch Laserpointer dadurch gekennzeichnet, dass im Allgemeinen eine hohe Geschwindigkeit relativ zum Laserstrahl besteht (typ. 200 km/h bis 800 km/h); daraus resultiert eine kurze Wechselwirkungszeit der Laserstrahlung mit den Augen des Piloten (theoretisch im ms-Bereich, je nach Strahldurchmesser; betroffene Piloten haben jedoch von Einwirkdauern deutlich größer als ms berichtet). Hinzu kommt eine hohe Distanz des Luftfahrzeugs zur Laserstrahlquelle von typischerweise mindestens einigen 100 m. (Damit verbunden ist aufgrund der Strahldivergenz ein großer Strahldurchmesser und somit geringe Bestrahlungsstärke am Ort des Luftfahrzeugs). Diese Effekte führen dazu, dass die physiologische Gefährdung zwar gering ist, diese Berufsgruppe aber andererseits äußerst sensibel auf die psychologische Blendung (z. B. im Landeanflug) reagiert. Da die Folgen einer Blendung bei Start oder Landung mit einem möglichen Absturz dramatisch für eine große Anzahl von Insassen sein können, werden in dieser Arbeit daher repräsentativ für alle Berufsgruppen vor allem Piloten betrachtet.

zu (b): Fahrzeugführer von öffentlichen Verkehrsmitteln (Bus, Bahn, Taxi) und Helikopterpiloten

Bei der Bestrahlung durch Laserpointer sind diese Berufsgruppen gekennzeichnet durch eine geringere Geschwindigkeit des Fahrzeugs relativ zum Laserstrahl von typ. 0 – 200 km/h (beispielhaft sei ein Polizeieinsatz erwähnt, bei dem der Helikopter über einer Demonstration „hovers“). Damit verbunden ist eine im Vergleich zu **(a)** längere Bestrahlungszeit für die betroffene Person. Hinzu kommt, dass aufgrund der geringen Entfernung (typ. einige 10 m) ein geringer Strahldurchmesser zu einer höheren Bestrahlungsstärke führt. Beides bedeutet eine hohe Gefährdung für das Auge des Fahrzeugführers (es sind sowohl permanente als auch temporäre Augenschäden möglich).

zu (c) Maßnahmen zur Prävention

Die Anforderungen an technische Maßnahmen zur Prävention vor Laserpointerattacken sind zum einen der Schutz vor der Laserstrahlung und zum anderen eine gleichzeitig möglichst geringe Beeinträchtigung beim Führen des (Luft-)Fahrzeuges. Daher ist es unter Umständen notwendig, für die unterschiedlichen Berufsgruppen verschiedene Präventionsmaßnahmen zu treffen. Die Eignung dieser Maßnahmen wird in diesem Projekt untersucht.

4. Methodik

Die Untersuchungen in diesem Vorhaben beziehen sich ausschließlich auf eine Beeinträchtigung des Auges. Bei den typischen technischen Spezifikationen von Laserpointern ist im Zusammenhang mit den hier vorliegenden Entfernungen eine Schädigung der menschlichen Haut praktisch ausgeschlossen.

Die Methodik des Vorhabens lässt sich grob in die folgenden Etappen einteilen:

- Wissenschaftliche Untersuchungen im Labor (Simulation der Realität⁽¹⁾, Messungen, Berechnungen)
- Bewertung der Resultate und Überprüfung der Übertragbarkeit auf reale Verhältnisse
- Verifikation in der Praxis, d. h. Feldversuche repräsentativ mit Luftfahrzeug(en)
- Konsequenzen zur Schadensreduzierung bzw. möglichst -vermeidung
- Maßnahmenkatalog

zu **(1)** Hinweis zur Simulation von Praxisbedingungen im Labor: In der Praxis ergibt sich die Gefährdung vor allem aus der Strahlleistung und der Entfernung des Laserpointers zur attackierten Person im (Luft-)Fahrzeug; daraus resultiert die Bestrahlungsstärke an dem Auge des betroffenen (Luft-)Fahrzeugführers. Unterschiedliche Bestrahlungsstärken und somit Simulation verschiedener - auch „sehr großer“ - Entfernungen lassen sich durch Verwendung von Optiken im Strahlengang im Labor bei deutlich verkürzten Distanzen realisieren.

Ein mit der beschriebenen Methodik verbundener Arbeitsablauf stellt sich im Detail wie folgt dar:

- Repräsentative Auswahl und Beschaffungen von Laserpointern unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungen
 - unterschiedlicher Leistungsklassen (1 mW – 1000 mW)
 - unterschiedlicher Wellenlängen (400 nm – 650 nm)
- Auswahl von geeigneten Bewertungskriterien für die Blendung (physiologisch und psychologisch), basierend auf dem Stand der Erkenntnisse
- Labora Aufbau mit photometrischen Strahlungssensoren zur Messung der Strahlleistung in Abhängigkeit von
 - unterschiedlichen Entfernungen Laser ↔ Sensor (Simulation der Realität)
 - Transmissionseigenschaften unterschiedlicher Cockpit- und Fahrzeugscheiben
 - unterschiedlichen Einfallswinkeln auf Cockpit- und Frontscheiben
- Theoretische Betrachtung der Atmosphärenabsorption/-streuung und Berücksichtigung der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges („V-Lambda-Kurve“)
- Auswertung der Resultate und Bewertung des Gefahrenpotentials „permanente Netzhautschädigung“ basierend auf DIN EN 60825-1 in Abhängigkeit der unter (c) und (d) gelisteten Einflussgrößen
- Auswertung der Resultate und Bewertung des Gefahrenpotentials „Blendung des Auges“ basierend auf den Erkenntnissen von (b) in Abhängigkeit der unter (c) und (d) gelisteten Einflussgrößen
- Analyse des Gefahrenpotentials in der Praxis („Feldversuche“), basierend auf den Erkenntnissen von (e) und (f) für die spezifischen Berufsgruppen dieses Vorhabens.
- Fazit des Gefahrenpotentials für Flugzeugpiloten und Fahrzeugführer öffentlicher Verkehrsmittel durch Blendung und evtl. permanente Netzhautschädigung.

- (i) Präventionsmaßnahmen
 - passive Maßnahmen
 - aktive Maßnahmen
 - organisatorische Maßnahmen

Hinweis: auch wenn der Pkt. (i) „Präventionsmaßnahmen“ in der Reihenfolge der Arbeitsschritte zum Schluss erscheint, so ziehen sich jedoch damit zusammenhängende Gesichtspunkte chronologisch durch das gesamte Vorhaben.

- (j) Öffentlichkeitsarbeit
- (k) Dokumentation, Abschlussbericht

5. Ergebnisse des Gesamtvorhabens

Im Folgenden werden nach Aufführung der verwendeten Laserpointer sowie der eingesetzten Messtechnik und der notwendigen Grundlagen die erreichten Ergebnisse des Vorhabens vorgestellt.

5.1 Auswahl von Laserpointern und geeigneter Messtechnik

Im Vorfeld der Studie wurden 41 verschiedene Laserpointer beschafft. Dabei wurden gezielt Laserpointer von verschiedenen Herstellern überwiegend aus Fern-Ost, in verschiedenen Wellenlängen und Leistungsklassen ausgewählt. Die Wellenlängen der Laserpointer sind entsprechend der Verbreitung auf dem Markt selektiert worden. Gewählt wurden die Wellenlängen 405 nm (blau), 447 nm (blau), 532 nm (grün), 655 nm (rot). Die spezifizierten Strahlleistungen stellen sich wie folgt dar: 1 mW, 5 mW, 10 mW, 100 mW, 500 mW, 1000 mW. Die tatsächlich gemessenen Leistungen weichen allerdings teilweise erheblich von den angegebenen Leistungen ab.

Für die weiteren Untersuchungen wurden von diesen 41 Laserpointern 11 repräsentativ selektiert. Dieses sind Laserpointer aus vier Leistungsklassen (10 mW, 100 mW, 500 mW, 1000 mW) und jeweils 3 „Farben“ (blau, grün, rot). Dabei wurde die gemessene Leistung und nicht die spezifizierte betrachtet. Grüne Laserpointer mit 1000 mW Leistung waren zum Zeitpunkt der Beschaffung nicht auf dem Markt verfügbar. Der vorhandene rote Laserpointer (1000 mW) verfügte über eine einstellbare Strahldivergenz mittels variabler Optik und wurde für die weiteren Untersuchungen in diesem Vorhaben nicht weiter verwendet. In Tab. 1 sind die gemessenen Strahleigenschaften der ausgewählten Laserpointer zusammengefasst. Wegen eines Defektes konnten mit dem grünen Laserpointer mit 500 mW Leistung nur wenige Messungen durchgeführt werden. Abb. 1 zeigt die zehn verbleibenden Laserpointer.

Neben den Laserpointern ist der Messaufbau von großer Bedeutung. Bei allen Messungen werden stabilisierte Spannungsquellen an Stelle von Batterien für die Laserpointer verwendet, um die Ausgangsleistung konstant zu halten. Außerdem werden die Messungen bei den leistungsstarken Laserpointern, die laut Hersteller nur bis zu ca. einer Minute kontinuierlich betrieben werden dürfen, innerhalb einer kurzen Zeitspanne von ca. 15 Sekunden durchgeführt. Damit sollten Leistungsveränderungen durch thermische Drift vermieden werden. Bei Laserpointern, die nicht diesen Einschränkungen unterliegen, wurden die Messungen erst nach Einstellung eines thermischen Gleichgewichts vorgenommen. Sämtliche Leistungsmessungen wurden mit einem kalibrierten Power-Meter Typ „FieldMaxII-TOP“ (Coherent)

und den Messköpfen OP-2 VIS und PS19 durchgeführt. Zusätzlich wird für die Leistungsmessung der grünen Laserpointer ein optischer Filter „BG 18“ verwendet, um infrarote Strahlung zu unterdrücken, die nicht zur Blendung beiträgt. Zur Ermittlung der Polarisationsgrade wurde ein linearer Polarisationsfilter in Kombination mit dem oben genannten Leistungsmessgerät eingesetzt. Die Divergenz der Laserpointer wird mit Hilfe des Strahlanalysesystems „LaserCam-HR“ (Coherent) vermessen. Der zeitliche Verlauf der Exposition wird mit einer Photodiode (Thorlabs) und einem Oszilloskop von PicoScope (3405A) detektiert.

ID Nr.	Wellenlänge [nm]	Angegebene Leistung [mW]	Gemessene Leistung [mW]	Divergenz x-Achse [mrad]	Divergenz y-Achse [mrad]	Polarisation [%]
2	405	1	10	0,57	0,95	84
16	655	1	8	0,60	2,30	97
29	532	1	24	0,51	0,86	64
33	405	1000	1780	0,62	1,53	81
34	447	1000	1100	1,08	0,50	96
36	532	500	754	0,33	0,79	86
37	532	100	120	0,56	0,64	99
38	655	500	571	3,08	1,30	97
39	655	100	107	0,59	0,33	99
40	447	500	682	0,33	0,53	97
41	447	100	280	0,23	0,57	99

Tab. 1: Zusammengefasste Strahleigenschaften der ausgewählten Laserpointer (ID: interne Nr.).

5.2 Gefahren für das menschliche Auge

Obwohl unter den verwendeten Laserpointern auch einige grundsätzlich das Potential zur Schädigung der Haut besitzen (bei sehr geringem Abstand), werden nur die Gefahren für das Auge betrachtet. Aufgrund der großen Entfernungen in der Praxis sind Hautschädigungen höchst unwahrscheinlich. Die Bestrahlung des Auges mit einem Laserstrahl im sichtbaren Frequenzbereich birgt im Wesentlichen zwei Gefahren: Zum einen kann die Netzhaut durch einen thermischen Einbrand permanent beschädigt werden und zum anderen kann die Sehleistung durch Blendung vorübergehend beeinträchtigt werden.



Abb. 1: Auswahl der in der Studie verwendeten repräsentativen Laserpointer.

5.2.1 Augenschädigung

Bei der kurzzeitigen Bestrahlung ($< 0,25$ s) durch Laserlicht im sichtbaren Spektralbereich kann es zu einer Augenschädigung kommen, wenn die Bestrahlungsstärke am Auge 25 W/m^2 erreicht [1]. Hierbei kann es zu einem irreversiblen thermischen Einbrand auf der Netzhaut kommen, welcher einen blinden Fleck im Sichtfeld zur Folge hat. Wird bei der Bestrahlung der Sehnerv getroffen, kann es sogar zur vollständigen Erblindung kommen. Der Aufbau des menschlichen Auges und die Lage des Sehnervens sind in Abb. 2 dargestellt.

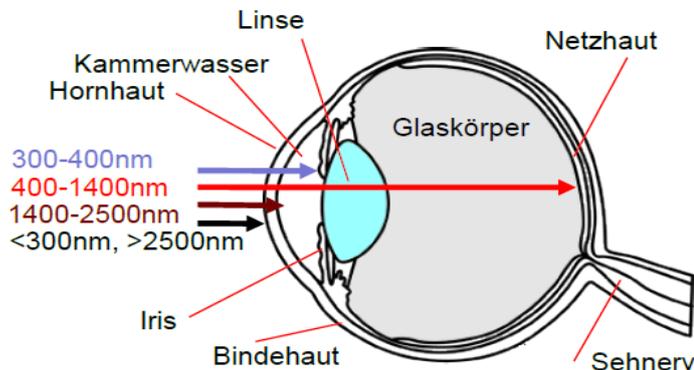


Abb. 2: Schematischer Aufbau des menschlichen Auges und die Transmission von Laserstrahlung.

In dieser Arbeit wird lediglich die Kurzzeitexposition betrachtet; dies ist zulässig, da es sich im Allgemeinen um relativ große Abstände zwischen Strahlquelle und Auge handelt, eine hohe Relativgeschwindigkeit von Laserstrahl/Auge aufgrund der (Luft-)Fahrzeugbewegung vorliegt und weiterhin das manuelle Führen des Laserpointers zu statistischen Schwankungen des Auftreffpunktes führt. Die Richtigkeit dieser Annahme wird im Laufe der Arbeit überprüft. Zudem schützt in einigen Fällen der Lidschlussreflex (bedingt!) das Auge nach ca. $0,25$ s und eine Abwendreaktion setzt in weniger als einer Sekunde ein. Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass bei der Bestrahlung durch eine kleine monochromatische Quelle nur etwa 20 % der Probanden mit einem Lidschlussreflex reagierten und dieser daher nicht weiter als sicherer Schutz betrachtet werden kann [2].

5.2.2 Blendung

Es wird zwischen verschiedenen Arten der Blendung unterschieden. Zum einen unterscheidet man zwischen psychologischer Blendung und physiologischer Blendung und zum anderen zwischen Adaptationsblendung, Relativblendung und Absolutblendung. Im Folgenden werden diese Begriffe erläutert und Verfahren zur Blendungsbewertung vorgestellt.

5.2.3 Blendungsarten

Unter physiologischer Blendung („disability glare“) versteht man eine Blendung, die eine messbare Beeinträchtigung der Sehleistung verursacht. Dabei wird nicht zwangsläufig Unwohlsein ausgelöst. „Die physiologische Blendung wird durch den Lichtstrom und den Winkel zur Lichtquelle beeinflusst, offenbar jedoch nicht durch die Quellgröße“ [3]. Also ist bei einer Streuung des Laserstrahls in der Frontscheibe eines (Luft-)Fahrzeugs keine größere physiologische Blendung zu erwarten. Es spielt dagegen eine große Rolle, ob in Richtung der Quelle geblickt wird - etwa um den Standort des Angreifers auszumachen - oder nicht.

Von der psychologischen Blendung („discomfort glare“) spricht man bei einem „*Lichtschein, der Unwohlsein erzeugt, ohne zwangsläufig die Sichtbarkeit von Objekten zu beeinflussen*“ [4]. Da es sich um eine rein subjektive Beeinträchtigung handelt, stellt die quantitative Blendungsbewertung ein Problem dar. Die psychologische Blendung ist von der Quellgröße abhängig. Dies bedeutet, dass eine „*Verstärkung des Unwohlseins*“ durch die Streuung in der Frontscheibe eines (Luft-)Fahrzeugs, die dadurch zu einer großen sekundären Blendquelle wird, durchaus zu erwarten ist. Physiologische und psychologische Blendung können getrennt oder auch gleichzeitig auftreten.

Unter Adaptationsblendung versteht man eine Blendung, die durch eine plötzliche Helligkeitsänderung hervorgerufen wird. Diese Helligkeitsänderung wird durch Adaptation allmählich ausgeglichen, führt bis zum Abschluss der Adaptation allerdings zu Blendungsercheinungen. Ein alltägliches Beispiel für Adaptationsblendung ist das Durchfahren eines vergleichsweise dunklen Tunnels an einem sonnigen Tag. Das kurze Aufleuchten eines Lasers in großer Entfernung bei Dunkelheit kann einen vergleichbaren Effekt erzielen.

Adaptation ist die Fähigkeit des Auges sich unterschiedlichen Helligkeiten anzupassen. Die Augen werden unter Alltagsbedingungen prinzipiell einer optischen Bestrahlungsstärke ausgesetzt, die sich über ca. 11 Zehnerpotenzen erstreckt. Allerdings können die Neuronen der Retina selbst nur in einem Bereich von zwei bis drei Zehnerpotenzen arbeiten [5].

Diese Abweichung der Bestrahlungsstärken wird mit Hilfe der Adaptation ausgeglichen. Man unterscheidet zwischen der Adaptation der Pupille und der Adaptation der Sehzellen. Die Pupillenadaptation ist laut Literatur „nach etwa 50 ms bis 100 ms abgeschlossen“ [3] und wird durch eine Variation des Pupillendiameter realisiert. Neuere Untersuchungen an der Fachhochschule Köln unter Leitung von Prof. Dr. H.-D. Reidenbach haben allerdings gezeigt, dass die Pupillenadaptation offensichtlich erst nach 160 ms beginnt und erst nach mehreren hundert Millisekunden abgeschlossen ist [6]. Eine beispielhafte Pupillenadaptation bei einer Bestrahlung mit einem Laser bei einer Wellenlänge von 532 nm und einer Leistung von 10 μ W ist in Abb. 3 zu sehen. Sie unterliegt dabei großen individuellen Schwankungen und ist neben vielen anderen Faktoren von der Helligkeit der Bestrahlung abhängig [7]. Der Radius der Pupille kann von ca. 7 mm (Nachtsehen) auf ca. 3 mm (Tagsehen) verringert werden [8].



Abb. 3: Beispiel der Zeitabhängigkeit einer Pupillenadaptation nach der Bestrahlung mit Laserlicht [6].

Die Adaptation der Sehzellen erfolgt zum einen durch eine Anpassung der Strukturierung der Netzhaut und zum anderen durch eine Anpassung der photochemischen Eigenschaften der Fotorezeptoren. Für die im Fall der Blendung relevante Helladaptation werden einige Minuten benötigt, bis das Auge vollständig an die Helligkeit angepasst ist. Daher kann die Adaptation des Auges nicht vor dem „typischen“ Blendungsszenario schützen.

Die Relativblendung zeichnet sich durch große Leuchtdichteunterschiede im Gesichtsfeld aus. Durch Lokaladaptation der Netzhaut wird der Relativblendung entgegengewirkt. „Bei der Relativblendung kann es außer zu einer Ablenkung der Aufmerksamkeit von eigentlichen Sehaufgaben zu einer Verzögerung bzw. Behinderung des Sehvermögens kommen“ [5]. Ein Beispiel für Relativblendung ist ein bei Dunkelheit entgegenkommendes Auto oder ein entfernter Laserpointer in einer dunklen Umgebung.

Ist die Leuchtdichte so hoch, dass keine Adaptation möglich ist, spricht man von der Absolutblendung. Da es bei so großen Leuchtdichten zu irreversiblen thermischen Schäden der Netzhaut kommen kann, reagiert das Auge durch Lidschlussreflex, Abwenden oder sogar Tränenfluss. Entgegen der weit verbreiteten Meinung funktionieren diese Reflexe nicht zuverlässig. Beispiel einer Absolutblendung ist etwa eine sonnenbeschienene Schneefläche oder ein starker Laser in wenigen Kilometern Entfernung.

5.2.4 Blendungsbewertung

Die Bewertung der Blendung wird für die physiologische Blendung und die psychologische Blendung getrennt durchgeführt.

5.2.4.1 Physiologische Blendungsbewertung

Die physiologische Blendung ist messbar, da sie direkt die Sehleistung eines Menschen beeinflusst. Als Maß für die Blendung dient der Blendungsgrad η_{Bl} , der als Quotient aus Kontrastempfindlichkeit mit Blendung (K_{Bl}) und ohne Blendung (K_0) berechnet wird [3].

$$\eta_{Bl} = \frac{K_{Bl}}{K_0} \quad (1)$$

Eine wichtige Rolle bei der Sehfähigkeit spielt auch die Schleierleuchtdichte. Sie entsteht durch Reflexionen und Streuungen an Teilen des Auges wie Hornhaut, Linse und Glaskörper, aber auch z. B. an Windschutzscheiben oder Brillen. Diese Streustrahlung scheint sich wie ein „Schleier“ über die Augen zu legen. Abb. 4 verdeutlicht die Entstehung der Schleierleuchtdichte im Auge.

Berechnet wird die Schleierleuchtdichte L_V durch [3]:

$$L_V = k \frac{E_B}{\theta^2} \quad (2)$$

- k : Dimensionslose Konstante ($k = 10$ für $\theta > 5^\circ$)
- E_B : Beleuchtungsstärke in der Hornhautebene [lx]
- θ : Winkel zwischen Blickrichtung und Blendlichtquelle [°]

Der Kontrast ohne Blendung K wird nach dem Weberschen Gesetz [4] berechnet.

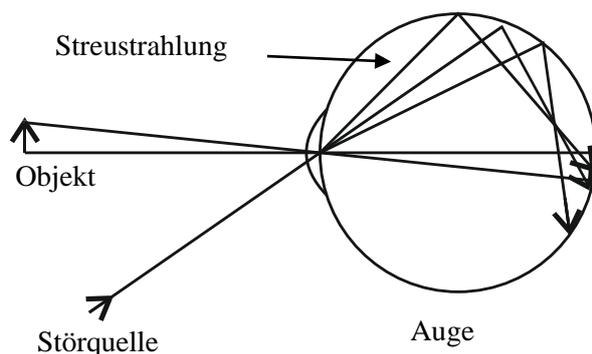
$$K = \frac{L_0 - L_U}{L_U} = \frac{\Delta L}{L_U} \quad (3)$$

- L_U : Hintergrundleuchtdichte [cd/m²]
- L_0 : Objekteleuchtdichte [cd/m²]

„Durch die Schleierleuchtdichte wird eine Reduzierung des retinalen Kontrasts bewirkt und dies führt zu einem messbaren Blendungseffekt“ [5]. Der Kontrast in Anwesenheit einer Blendlichtquelle lässt sich durch Addition der Schleierleuchtdichte sowohl zu der Hintergrundleuchtdichte als auch zu der Objektleuchtdichte berechnen [4].

$$K_n = \frac{(L_o + L_v) - (L_u + L_v)}{L_u + L_v} = \frac{L_o - L_u}{L_u + L_v} = K \frac{L_u}{L_u + L_v} \quad (4)$$

Somit nimmt der Kontrast ab, wenn die Schleierleuchtdichte ansteigt.



Diese Blendungsbewertung ist für das vorliegende Projekt nicht geeignet, da nur eine momentane Beeinträchtigung der Sehfähigkeit berücksichtigt wird. Durch die kurzen Expositionszeiten stellen diese Effekte keine Gefahr dar.

Abb. 4: Entstehung der Schleierleuchtdichte im Auge.

5.2.4.2 Psychologische Blendungsbewertung

Bei Messungen der psychologischen Blendung wurde der Bereich der Empfindung in Stufen zwischen „gerade erkennbar“ und „unerträglich“ unterteilt [9]. Diese Unterteilung beruht nicht auf quantitativ messbaren Größen, sondern auf dem subjektiven Empfinden der Testpersonen. Im Folgenden werden Verfahren vorgestellt, welche diese Unterteilung nutzen.

Die am meisten verbreiteten Verfahren zur psychologischen Blendungsbewertung sind die „De Boer-Skala“, das „UGR-Verfahren“ und der „Glare-Index (GI)“. Ein veraltetes Verfahren stellt das Grenzkurvenverfahren dar, welches nicht nach der genannten Aufteilung arbeitet. Die De Boer-Skala umfasst die Werte von 9 (gerade bemerkbar) bis 1 (unerträglich). Die Zwischenwerte 7 (zufriedenstellend), 5 (gerade akzeptabel) und 3 (störend) bilden den „Kern“ dieser Skala, da sie die größte Genauigkeit im Bereich zwischen 7 und 3 bietet. Die geraden Werte der Skala werden nicht betitelt, können aber als Zustand zwischen den umgebenden Werten angegeben werden.

Aus Untersuchungen, die Situationen im Straßenverkehr ähneln, haben Schmidt-Clausen und Bindels die folgende Gleichung zur Berechnung der Blendung W nach der De Boer-Skala abgeleitet [3, 10]:

$$W = 5 - 2 \cdot \log \frac{E_B}{0,02 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{L_U}{0,04}} \right) \cdot \theta^{0,46}} \quad (5)$$

- E_B : Beleuchtungsstärke der Blendlichtquelle [lx]
 L_U : Leuchtdichte des Adaptationsfeldes in [cd/m²]
 θ : Winkel zwischen Blendlichtquelle und der Blickrichtung [°]

Für die Berechnung der Blendung mit Laserpointern kann die De Boer-Skala in Verbindung mit Gleichung (5) nicht ohne weitere Studien verwendet werden. Diese Formel wurde mit Autoscheinwerfern ermittelt, die ein breites Strahlungsspektrum aufweisen. Bei den sich durch Monochromasie in verschiedenen Wellenlängen auszeichnenden Laserpointern ist eine veränderte Abhängigkeit zu erwarten. So schlugen beispielsweise Porter et al. eine Abwandlung der Gleichung vor, nachdem sie eine Studie mit verschiedenen Scheinwerfertypen durchgeführt hatten [11].

Ein weiteres Verfahren zu Ermittlung der psychologischen Blendungsbewertung ist die UGR-Methode („unified glare rating method“). Dieses Verfahren wurde entwickelt, um verschiedene Blendungsverfahren wie Grenzleuchtdichtekurven und den Glare-Index zu vereinheitlichen. Hierbei wurde die Blendung *„auch aufgrund von Grenzleuchtdichtekurven bestimmt. Dazu müssen insbesondere die Leuchtdichte der Blendquelle in Beobachterrichtung und die mittlere Beleuchtungsstärke in der Nutzebene bekannt sein“* [5]. Bei dem Grenzkurvenverfahren *„wird die Leuchtdichte der Leuchte unter verschiedenen Ausstrahlungswinkeln in ein Diagramm eingetragen, wobei die Leuchtdichtekurve die Grenzkurve der geforderten Blendungsbegrenzung nicht überschreiten darf“* [12].

Der Glare-Index GI wird wie folgt berechnet [4]:

$$GI = 10 \log \left[\frac{0,45}{L_b} \sum_s \frac{L_s^{1,6} \Omega_s^{0,8}}{p^{1,6}} \right] \quad (6)$$

- L_s : Leuchtdichte der Blendquelle [cd/m²]
 L_b : Umfeldleuchtdichte [cd/m²]
 p : GUTHscher Positionsindex
 Ω_s : Raumwinkel [sr]

Die Gleichung zur Berechnung des UGR-Wertes ist der des Glare Index sehr ähnlich und hat die gleichen Unzulänglichkeiten bei der Bewertung kleiner Quellen [4]:

$$UGR = 8 \log \left[\frac{0,25}{L_b} \sum_s \frac{L_s^2 \Omega_s}{p^2} \right] \quad (7)$$

Die typischen UGR-Werte liegen zwischen 10 und 30 und die Blendempfindung steigt proportional mit dem UGR-Wert. Ein Wert von 13 wird als gerade wahrnehmbar und 28 als unerträglich empfunden.

Die Blendungsbewertung nach der UGR-Methode ist für Laserpointer ungeeignet, da sie nicht für Quellen, „die unter einem Raumwinkel von weniger als 0,0003 sr beobachtet werden“ [5] anwendbar ist. Ein Raumwinkel von 0,0003 sr entspricht z. B. einer Quelle mit 2 cm Radius in einem Meter Abstand.

Die vorgestellten psychologischen Blendungsbetrachtungen beziehen sich ebenfalls auf das momentane Unbehagen und berücksichtigen nicht die Nachwirkungen, die die größte Gefahr beim Führen eines Verkehrsmittels darstellen. Daher sind diese Verfahren zur Blendungsbewertung in diesem Vorhaben ungeeignet. In Tab. 2 sind die Werte der De Boer Skala mit den GI-Werten und denen der UGR-Skala gegenübergestellt.

De Boer	Bezeichnung		GI-Wert	Bezeichnung	UGR	Bewertung
1 2	unerträglich	(unbearable)	600	just intolerable	> 28	unerträglich (unzumutbar)
3 4	störend	(distracting)	150	just uncomfortable		
5 6	gerade akzeptabel	(just acceptable)	35	just acceptable		
7 8	zufrieden- stellend	(satisfactory)				
9	gerade bemerkbar	(unnoticeable)	8	just perceptible	13	gerade wahrnehmbar

Tab. 2: Vergleich der Einteilungen von Blendungsbewertungen nach der De Boer-Skala, den GI-Werten und der UGR-Skala [5].

5.2.4.3 Blendungsbewertung in der Luftfahrt

In der US-amerikanischen Norm ANSI 136.6 [13] wurden im Jahre 2005 basierend auf einer Studie der FAA (Federal Aviation Administration) Grenzwerte der Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit der Auswirkungen auf das Auge festgelegt. Zu diesem Zweck wurden in einem Flugsimulator Testpersonen grüner Laserstrahlung (532 nm) ausgesetzt. Die resultierenden Grenzwerte für unterschiedliche Blendeffekte sind in Tab. 3 zusammengefasst. Bei den gewählten „internen Bezeichnungen“ (Tab. 3) für die Art des jeweiligen Blendeffektes handelt es sich um Abkürzungen aus dem englischen Vokabular. Diese werden im weiteren Verlauf dieser Studie häufig verwendet. Zusätzlich zu den drei Blendeffekten wird auch die Möglichkeit einer Netzhautschädigung bei 25 W/m² betrachtet.

Auswirkung	Grenzwert [W/m ²]	Interne Bezeichnung
Netzhautschädigung	25	„inj.“ (eye injury)
Blitzlichtblindheit	1	„flash.“ (flashblindness/afterimages)
Blendung	0,05	„glare“ (glare/disruption)
Ablenkung	0,0005	„distr.“ (distraction/startle)

Tab. 3: Grenzwerte unterschiedlicher Blendeffekte mit den jeweiligen Auswirkungen und Bezeichnungen; nach ANSI 136.6 [13]. Zusätzlich enthält die Tabelle auch den Grenzwert für die permanente Netzhautschädigung.

Die Gefahr der Netzhautschädigung besteht vor allem für Taxifahrer, Busfahrer, Zugführer und ggf. auch Helikopterpiloten, da die mögliche Entfernung, aus der eine Laserattacke erfolgt, im Bereich einiger 10 m liegen kann. Der aktuelle Fall eines Helikopterpiloten der Bundespolizei-Fliegerstaffel, bei dem nachweislich dessen Netzhaut durch den Angriff mit einem Laserpointer geschädigt wurde [14], verdeutlicht diese Gefahr. Zunehmende Ausgangsleistung von Laserpointern und die bessere Verfügbarkeit von Teleskopaufsätzen erhöhen die Abstände, innerhalb derer die Gefahr einer permanenten Netzhautschädigung droht. Die oben genannten Grenzwerte wurden zwar explizit für die Luftfahrt ermittelt, lassen sich jedoch ebenfalls auf alle Führer öffentlicher Verkehrsmittel übertragen.

In Zusammenarbeit mit Piloten wurden über die Untersuchung von Grenzwerten für verschiedene Auswirkungen auf die Sehfähigkeit hinaus auch Flugzonen eingeführt, in denen die einzelnen Blendungserscheinungen tolerierbar sind [15]. Ausgehend von dem „Airport Reference Point“ sind die räumlichen Abmessungen dieser, von der International Civil Aviation Organization (ICAO) erstellten Zonen, in Tab. 4 zusammengefasst und in den Abb. 5 und 6 schematisch dargestellt.

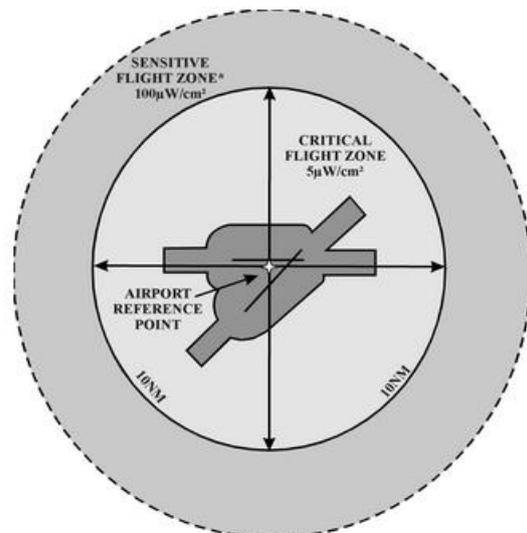


Abb. 5: Flughafen-Draufsicht mit definierten Flugzonen für unterschiedliche Gefährdungen aus Laserpointerbestrahlung [16].

Bezeichnung	Auswirkung	Abstand horizontal	Abstand vertikal
Laserfreie Zone	Ablenkung (distr.)	9,26 km	0,6 km
Kritische Zone	Blendung (glare)	18,52 km	3,0 km
Empfindliche Zone	Blitzlichtblindheit (flash)	> 18,52 km	> 3,0 km

Tab. 4: Definition von Sicherheits-Zonen in Zusammenhang mit Blendeffekten ausgehend von dem „Airport Reference Point“.

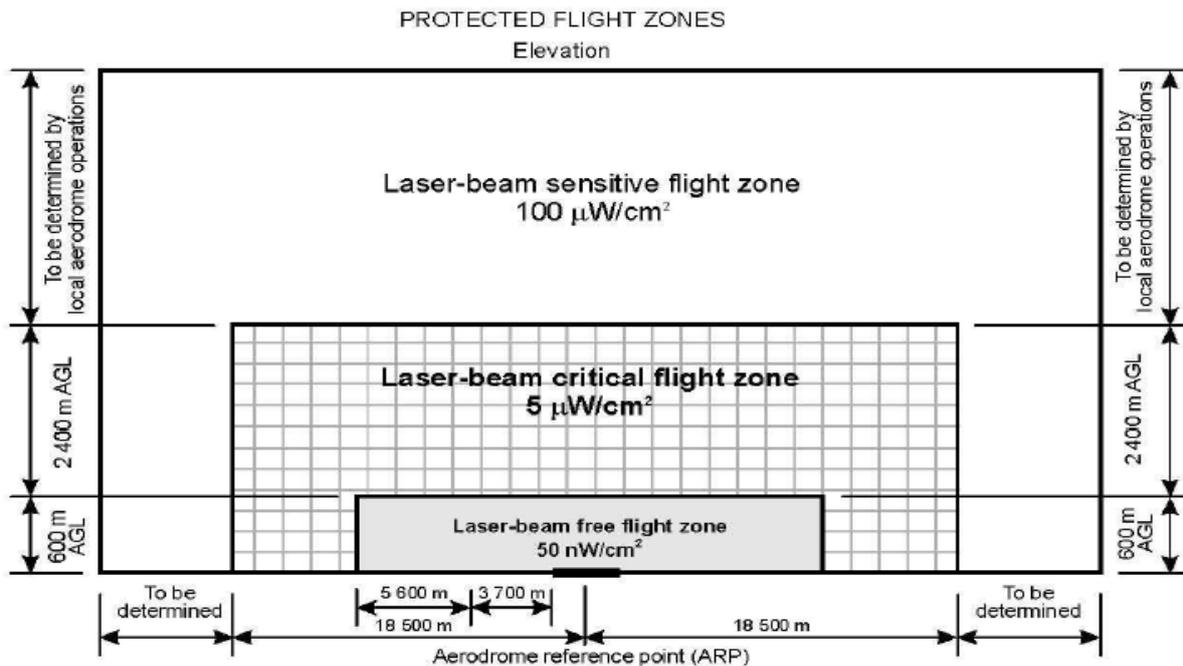


Abb. 6: Räumliche Ausdehnung von Sicherheitszonen über dem Flughafen ausgehend von dem Airport Reference Point [17].

Eine alternative Möglichkeit zur Beurteilung der Sehbeeinträchtigung durch Bestrahlung aus Laserpointern wurde von Reidenbach et. al. an der Fachhochschule Köln entwickelt [18]. Es wird bei dieser Methode die „Beeinträchtigungsdauer der Sehfähigkeit“ untersucht. Abhängig von den Anforderungen, die in verschiedenen Flugsituationen an Piloten bzw. Verkehrssituationen von Fahrzeugführern gestellt werden, können maximal tolerierbare Dauern, innerhalb derer Sehstörungen vorliegen dürfen, festgelegt werden. Diese Zeitdauer wird mit Hilfe von „Landoltringen“ (Abb. 7) und Probanden ermittelt.

Landoltringe sind schwarze, an einer Stelle unterbrochene Ringe, die in „8 Stellungen und in logarithmischer Progression betrachtet“ [5] werden. Aus der Fähigkeit, die Ausrichtung der Ringe in definiertem Abstand und Größe zu erkennen, kann auf das Sehvermögen geschlossen werden.

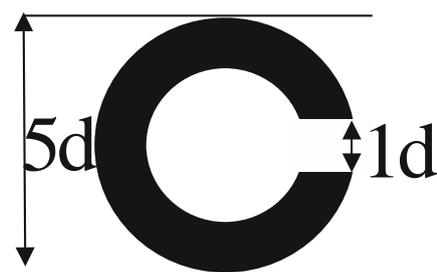


Abb. 7: Landoltring zur Bewertung der Sehschärfe.

Zusätzlich werden im Flugsimulator von Testpersonen Flugmanöver mit und ohne Blendung durchgeführt und die Zeit gemessen, die für diese Manöver benötigt wird.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen mit Probanden kann eine wellenlängenabhängige Potenzfunktion abgeleitet werden. Diese beschreibt die Beeinträchtigungsdauer $t_{\text{haz},\lambda}$ in Abhängigkeit der auf die Augenpupille einfallenden Strahlleistung. Nach Umformungen folgt ein analytischer Zusammenhang zur Berechnung der Beeinträchtigungsdauer [18]:

$$t_{\text{haz},\lambda} = a \cdot \left[\frac{d_P^2}{\theta^2 z^2} P_L \right]^b = a \cdot P_P^b \quad (8)$$

- a, b : Experimentell ermittelte Koeffizienten, die von der Wellenlänge abhängen
- d_P : Durchmesser der Pupille [m]
- θ : Divergenz der Laserstrahlung [mrad]
- z : Abstand zwischen Laserpointer und Auge [m]
- P_L : Laserausgangsleistung [mW]
- P_P : Strahlleistung, die in die Augenpupille eintritt

5.3 Ermittlung des Sicherheitsabstandes

Als Sicherheitsabstand SD wird die Entfernung bezeichnet, innerhalb derer Blendeffekte auftreten. Die Art der Effekte wird durch den Index „haz“ beschrieben, der die Grenzwerte der verschiedenen Blendungsarten angibt. Gleichung (9) basiert auf rein geometrischen Betrachtungen der Strahlpropagation und wurde 2004 von Nakagawara et. al. zur Berechnung des Sicherheitsabstandes verwendet [17]:

$$SD_{\text{haz}} = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot \theta^2} \frac{P_0}{MZB_{\text{haz}}} - 4 \cdot \omega_0^2} \quad (9)$$

- SD_{haz} : Sicherheitsabstand [m] für die jeweilige Gefährdungsart „haz“
- MZB_{haz} : Maximal zulässige Bestrahlung; der Index „haz“ weist auf die Gefährdungsart hin (d. h. Augenschaden und verschiedene Blendeffekte)
- θ : Strahldivergenz (Vollwinkel) [mrad]
- P_0 : Laser-Ausgangsleistung [mW]
- ω_0 : Strahlradius unmittelbar am Laserpointer [m]

Der Faktor 4 vor dem Strahlradius (ω_0) wird bei Berechnungen häufig vernachlässigt; dies ist zulässig, da aufgrund des kleinen Strahlradius von $\ll 10$ mm bei kleinen Divergenzen in der Größenordnung von 1 mrad die Näherung $4 \cdot \omega_0^2 \approx 0$ gilt. Da in Pointern Laserdioden als Strahlquelle benutzt werden, weichen die Divergenzen in x- und y-Richtung in den meisten Fällen voneinander ab. Diesem Umstand wird durch die Verwendung beider Divergenzen wie folgt Rechnung getragen:

$$SD_{\text{haz}} = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot \theta_x \cdot \theta_y} \frac{P_0}{MZB_{\text{haz}}}} \quad (10)$$

- θ_y, θ_x : Strahldivergenz in x- und y-Richtung (jeweils Vollwinkel) [mrad]

Von Bedeutung ist hierbei, dass die Divergenzwinkel θ als Vollwinkel verwendet werden. Zudem müssen die Divergenzen mit dem Standard D_{63} gemessen werden. Dieser Standard legt den Durchmesser als Bereich fest, in dem 63 % der Leistung enthalten sind [1]. Dies ist für Berechnungen zur Lasersicherheit üblich, wird bei der Spezifikation von Lasern in

anderen Anwendungsfeldern allerdings nur selten verwendet. Die Messung mit dem Durchmesser D_{63} stellt sicher, dass die Bestrahlungsstärke im Maximum eines idealen Gaußstrahls identisch ist mit der eines vereinfachten Rechteck-Strahlprofils dieses Durchmessers. Dies ist für Betrachtungen auf dem Gebiet der Lasersicherheit entscheidend, da immer vom „worst-case“ auszugehen ist. Im worst-case wird das Auge direkt vom Strahlzentrum getroffen. Die in anderen Bereichen häufig verwendete übliche Konvention, den Durchmesser D_{86} an der Stelle zu messen, an der die Bestrahlungsstärke um 86,5 % abgefallen ist, kann zu einer Unterschätzung der Gefahr führen. Die Bestrahlungsstärke ist in dem Fall nur halb so groß wie die maximale Intensität I des idealen Gauß-Strahls. Abb. 8 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Der aus der beschriebenen fehlerhaften Messung der Divergenz resultierende Fehler des berechneten Sicherheitsabstandes beträgt 30 %.

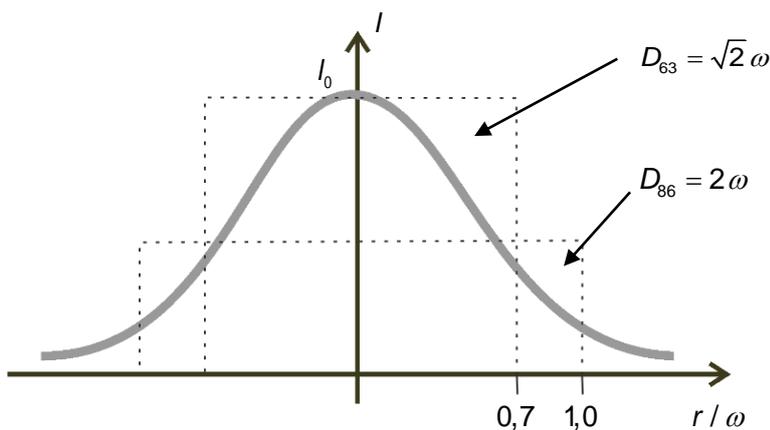


Abb. 8: Gaußsche Intensitätsverteilung mit den Durchmessern nach D_{86} und D_{63} im Vergleich. Mit dem Radius $r = D/2$ und dem (Gauß-)Strahlradius $\omega = \lambda/\pi\theta$.

In Tab. 5 sind die mittels Gleichung (9) berechneten Sicherheitsabstände SD eines exemplarisch gewählten Laserpointers (100 mW / 0,5 mrad) für unterschiedliche Arten der Augengefährdung dargestellt.

Strahlleistung [mW]	Sicherheitsabstand [m]			
	Augenschädigung	Nachbilder	Blendung	Ablenkung
100	142	713	3.191	31.915

Tab. 5: Mittels geometrischer Optik berechnete Sicherheitsabstände eines Laserpointers mit 100 mW Leistung und einer Divergenz von 0,5 mrad.

Aufgrund der teilweise großen Sicherheitsabstände (s. Tab. 5: 32 km für „Ablenkung“), die zu erwarten sind, ist die experimentelle Überprüfung der Werte in der Praxis nicht unproblematisch. Die von Laserpointern ausgehende Gefahr würde spezielle Sicherheitsmaßnahmen über die gesamte Messstrecke erfordern. Zudem erschwert die zeitliche Beschränkung der Einschaltdauer von typ. max. 60 s, der viele Laserpointer ab 100 mW nach Herstellerangaben unterliegen, die experimentelle Durchführung. Aus diesen Gründen wird eine Methode entwickelt, die eine Simulation „großer Sicherheitsabstände“ im Labor ermöglicht.

5.3.1 Simulation großer Abstände mittels Linsenoptik

Der zu erwartende Sicherheitsabstand SD von bis zu mehreren Kilometern wird mit Hilfe einer Linsenoptik ($f=20\text{ mm}$) am Ausgang des Laserpointers im Labor verringert. Die Linsenoptik bewirkt, wie in Abb. 9 zu sehen, eine Vergrößerung der Divergenz. Der „simulierte Sicherheitsabstand“ L verringert sich dadurch auf nur wenige Meter und die Messungen lassen sich somit problemlos auch in begrenzten Räumlichkeiten durchführen.

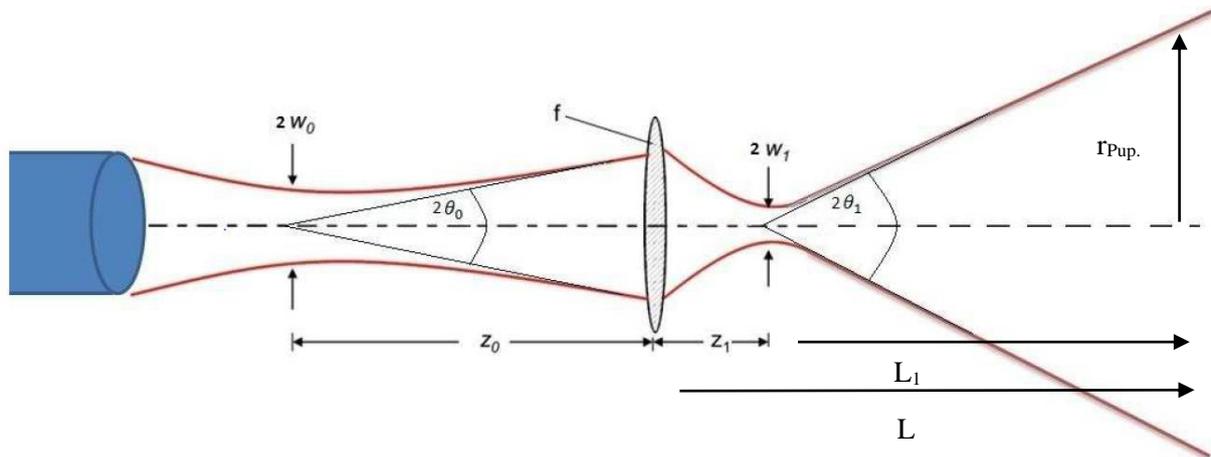


Abb. 9: Verwendung einer Linsenoptik zur Verringerung der zu messenden Sicherheitsabstände. Neben den üblichen Bezeichnungen gilt hier: $r_{Pup.}$: Pupillenradius; L : Abstand zwischen Linse und Pupille und L_1 : Abstand zwischen Strahlende und Pupille.

Das Einfügen einer Linse in den Strahlengang hat zu keiner nennenswerten Veränderung des Intensitätsprofils in dem simulierten Laserstrahl geführt, wie Abb. 10 zeigt. Der Helligkeitsunterschied in Abb. 10 links/rechts ist durch unterschiedliche verwendete Absorptionsfilter im Strahlengang zu erklären, die zum Schutz der Kamera verwendet wurden. Es wurden Divergenzen mit und ohne Linse vermessen und mit den theoretisch zu erwartenden Werten verglichen sowie Strahlprofile aufgenommen; die Abweichungen der Divergenzen liegen innerhalb der Fehlergrenzen.

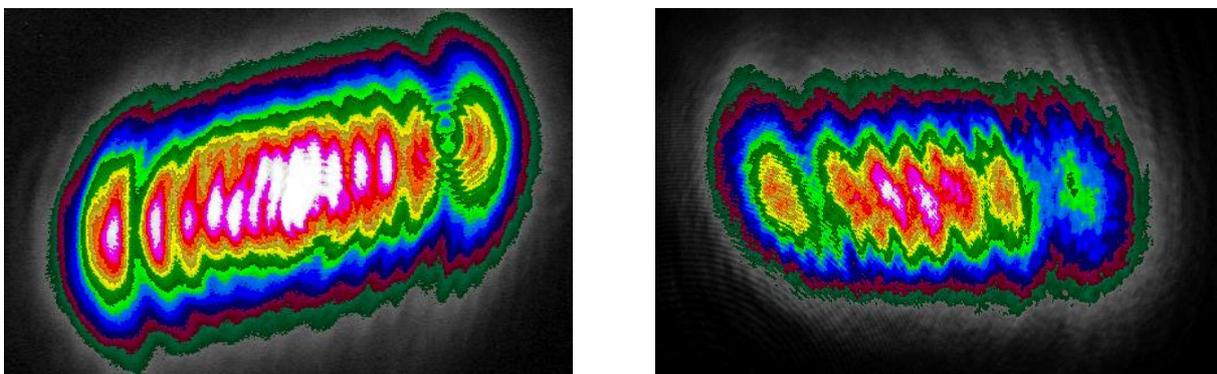


Abb. 10: Strahlprofil eines 8 mW Laserpointers mit den Divergenzen $\theta_x=0,6\text{ mrad}$ und $\theta_y=2,3\text{ mrad}$. Links ohne und rechts hinter einer Linsenoptik im Strahlengang.

Die Leistungseinbußen, die in Folge der Fresnelreflexion an den Linsenflächen entstehen und die Simulation verfälschen würden, wurden gemessen und bei der Berechnung durch eine Anpassung der maximal zulässigen Bestrahlung berücksichtigt. Die Streuung und Absorption in der Atmosphäre kann aufgrund der kurzen Weglänge vernachlässigt werden. Da diese bei der bisherigen Betrachtung ebenfalls nicht berücksichtigt wird, lassen sich die gemessenen Ergebnisse direkt vergleichen.

5.3.2 Berechnung des Sicherheitsabstandes nach der Gaußschen Strahltheorie

Die Berechnung des Sicherheitsabstandes wird nach zwei verschiedenen Verfahren durchgeführt. Die im Folgenden vorgestellte Herleitung bezieht sich auf das Wellenmodell von Gauß. Die dazugehörige umfangreiche Herleitung nach dem geometrischen Strahlmodell zur Überprüfung der Ergebnisse wird hier nicht präsentiert. Bei den Divergenzen Θ_1 und Θ_0 handelt es sich in diesem Modell um die Halbwinkel!

Zunächst werden die beiden Ausdrücke für den Strahlradius $r_{Pup.}$ am Ort der Leistungsmessung mit und ohne Linse gleichgesetzt. Diese Gleichsetzung ist möglich, da das Ziel der Simulation das Erreichen gleicher Bestrahlungsstärken bei verringerten Abständen ist.

$$\text{mit Linse} \quad r_{Pup.} = \frac{\lambda}{\pi\theta_1} \sqrt{1 + \frac{L_1^2 \pi^2 \theta_1^4}{\lambda^2}} \quad \text{mit } L_1 = L - z_1 \quad (11)$$

$$\text{ohne Linse} \quad r_{Pup.} = \frac{\lambda}{\pi\theta_0} \sqrt{1 + \frac{SD^2 \pi^2 \theta_0^4}{\lambda^2}} \quad (12)$$

Nach Gleichsetzen der Gleichungen (11) und (12) folgt:

$$\Rightarrow \frac{\lambda}{\pi\theta_1} \sqrt{1 + \frac{L_1^2 \pi^2 \theta_1^4}{\lambda^2}} = \frac{\lambda}{\pi\theta_0} \sqrt{1 + \frac{SD^2 \pi^2 \theta_0^4}{\lambda^2}}$$

Anschließend wird die Gleichung in wenigen Schritten algebraischer Umformung nach dem Sicherheitsabstand SD aufgelöst und man erhält:

$$\Leftrightarrow \frac{\theta_0^2}{\theta_1^2} + \frac{L_1^2 \pi^2}{\lambda^2} \theta_1^2 \theta_0^2 = 1 + \frac{SD^2 \pi^2 \theta_0^4}{\lambda^2}$$

$$\Leftrightarrow SD = \sqrt{\frac{\theta_0^2}{\theta_1^2} \frac{\lambda^2}{\pi^2 \theta_0^4} + \frac{L_1^2 \theta_1^2}{\theta_0^2} - \frac{\lambda^2}{\pi^2 \theta_0^4}}$$

$$\Leftrightarrow SD = \sqrt{\left(\frac{\theta_0^2}{\theta_1^2} - 1\right) \frac{\lambda^2}{\theta_0^4 \pi^2} + \frac{L_1^2 \theta_1^2}{\theta_0^2}}$$

Die unbekannte Divergenz θ_1 nach der Linse kann wie folgt bestimmt werden [1]:

$$\theta_1 = \frac{\theta_0}{f} \sqrt{(z_0 - f)^2 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2} \quad (13)$$

Ausgehend hiervon können für Sonderfälle kleiner Linsenbrennweiten Näherungen abgeleitet werden. Diese werden getrennt durchgeführt für die Fälle: $f < 0,1 \text{ m}$ und $f < 1 \text{ m}$ (s. Gleichungen 14, 15). Die Brennweite der in dem Messaufbau verwendeten Linse erfüllt mit $f = 20 \text{ mm}$ die Voraussetzung für die Näherungen.

$$\left(\frac{f^2}{(z_0 - f)^2 + \left(\frac{\lambda}{\pi \theta_0^2}\right)^2} \right) \frac{\lambda^2}{\pi^2 \theta_0^4} \cong 0 \quad \text{für } f < 0,1 \text{ m} \quad (14)$$

$$z_1 = \frac{(z_0 - f)f^2}{(z_0 - f)^2 + \left(\frac{\lambda}{\pi} \theta_0^2\right)^2} + f \cong f \quad \text{für } f < 1 \text{ m} \quad (15)$$

Mit den Vereinfachungen (14) und (15) folgt schließlich für den simulierten Sicherheitsabstand:

$$SD^* \approx \sqrt{\frac{(L-f)^2}{f^2} \left((z_0 - f)^2 + \frac{\lambda^2}{\pi^2 \theta_0^4} \right) - \frac{\lambda^2}{\pi^2 \theta_0^4}} \quad (16)$$

Gleichung (16) wird im Folgenden zur Umrechnung des tatsächlichen Sicherheitsabstandes aus den im Labor gemessenen Werten verwendet.

5.3.3 Fehlerbetrachtungen

Um den Messaufwand im Hinblick auf Mehrfachmessungen für eine Fehleranalyse zu reduzieren, erfolgte eine statistische Absicherung der Messresultate mathematisch mittels Fehlerfortpflanzung. Die Fehlerfortpflanzung für eine Gleichung y und den Eingangsgrößen x_1 und x_2 wird wie folgt berechnet:

$$\Delta y = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \cdot \Delta x_1 + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \cdot \Delta x_2 + \dots \quad (17)$$

Aufgrund der verschiedenen Strahlprofile der einzelnen Laserpointer müssen die Fehlergrenzen des gemessenen Abstandes für jeden Laserpointer getrennt betrachtet werden. Dabei werden die Laserpointer zunächst - abhängig von ihrem charakteristischen Strahlprofil - in Fehlerkategorien eingeteilt. Abb. 11 (a) bis (d) zeigt jeweils ein Beispiel zu den gewählten Fehlerkategorien. Der Fehler, der zu erwarten ist, wird mit Hilfe von Erfahrungswerten für die jeweilige Gruppe festgelegt und ist in Tab. 6 zusammengefasst.

Fehlerkategorie	Fehler [%]
a	10
b	15
c	15
d	20

Tab. 6: Strahlprofilabhängige Fehlerkategorien der verwendeten Laserpointer mit typ. Intensitätsprofilen.

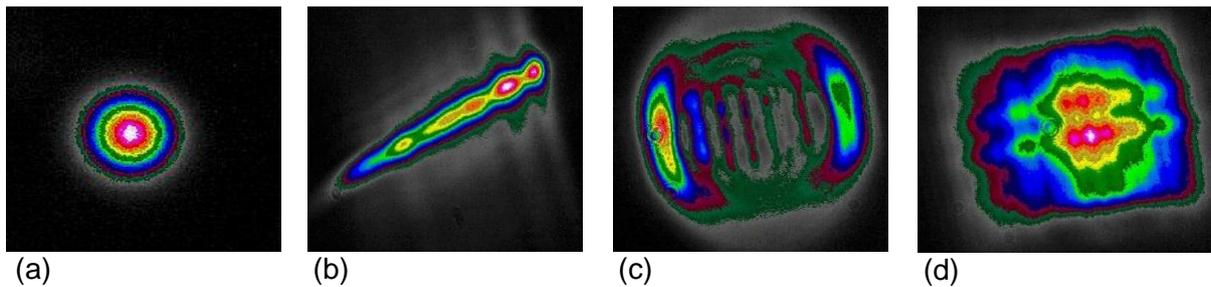


Abb. 11: Fehlerkategorien verdeutlicht an beispielhaften Strahlprofilen von Laserpointern; a: Gaußprofil b: Länglich c: Quadratisch d: „Chaotisch“

5.3.4 Versuchsaufbau und Vorbereitung

In Abb. 12 ist der verwendete Versuchsaufbau dargestellt. Der Laserpointer ist in einer variablen Halterung (1) fixiert, die an die verschiedenen Abmessungen der Laserpointer angepasst werden kann. Der Kaskaden-Strahlabschwächer (2) wird zur Messung entfernt. Die Linse (3) bildet den aufgeweiteten Laserstrahl auf einer Lasersicherheitswand ab. Diese Wand dient neben der Sicherheit auch zur Abbildung des Strahlprofils für weiterführende Messungen (s. unten).

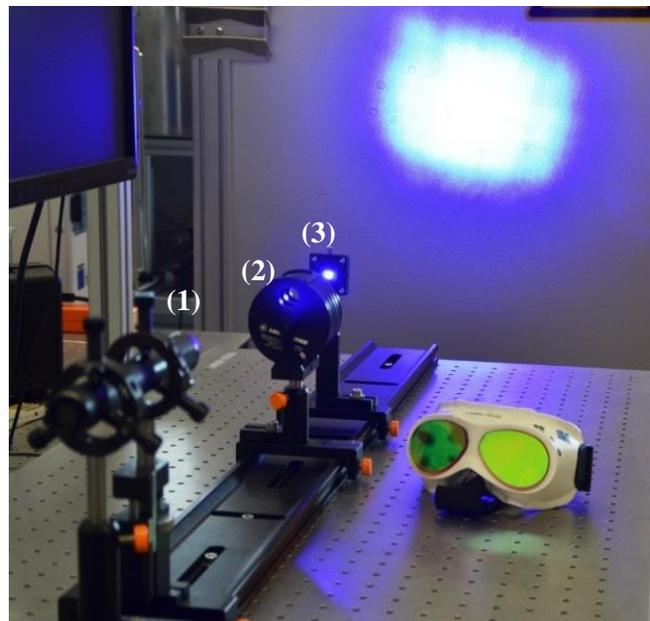


Abb. 12: Versuchsaufbau zur Vermessung des Sicherheitsabstandes mit einem Strahlabschwächer zur besseren Sichtbarkeit des Laserstrahls. (1) fixierter Laserpointer (2) Kaskaden-Strahlabschwächer (3) Linse ($f = 20 \text{ mm}$).

Zur Messung des Sicherheitsabstandes wird der verwendete Messkopf „Typ OP-2 VIS COHERENT“ zur Leistungsmessung mäanderförmig senkrecht zur optischen Achse bewegt, um alle Leistungsspitzen im Strahlprofil in die Messungen einzubeziehen; der max.

Leistungswert wird dokumentiert. Die mäanderförmige Bewegung des Messkopfes über den gesamten Strahlquerschnitt wird in verschiedenen Abständen von der Linse durchgeführt bis

die maximale gemessene Leistung gleich der zulässigen Leistung für die jeweilige Blendungsart ist. Dem Messkopf ist dabei eine Blende mit 7 mm Durchmesser vorgeschaltet. Die Blende simuliert die Pupille, die bei Dunkelheit eine Größe von ca. 7 mm hat. Untersuchungen von Loewenfeld zur Pupillengröße haben gezeigt, dass es große individuelle Abweichungen in der Pupillengröße gibt [19]. Bei den Versuchspersonen über 30 Jahren weist der größte Teil der Probanden eine Pupillengröße von weniger als 7 mm auf. Dennoch wird für die folgenden Messungen die 7 mm-Pupille repräsentativ als Maßstab für die Blende gewählt. Der durch den Grenzwert der jeweiligen Blendungsart definierte Sollwert der Leistung P_{exp} , bestimmt sich aus dem Blendendurchmesser und den MZB_{haz} - Grenzwerten:

$$P_{exp} = MZB_{haz} \cdot \pi (3,5mm)^2 \quad (18)$$

5.3.5 Messergebnisse und Vergleich mit den theoretischen Werten

Mit dem beschriebenen Versuchsaufbau werden die ausgewählten Laserpointer bezüglich ihrer erforderlichen Sicherheitsabstände vermessen. Der Laserpointer mit der internen ID 36 (532 nm, 500 mW) fällt nach den ersten Messungen wegen eines Defektes aus und ist daher nicht weiter in den folgenden Abbildungen aufgeführt. Die im Labor gemessenen Abstände werden mit Hilfe der Gleichung (16) zu realen Sicherheitsabständen SD^* umgerechnet. Die theoretischen Werte basierend auf der rein geometrischen Strahlpropagation werden mittels Gleichung (10) sowie den Fehlern nach Gleichung (17) berechnet. Die Abbildungen 13 bis 15 zeigen eine Gegenüberstellung der theoretischen und der gemessenen Sicherheitsabstände. Die zu messenden Grenzwerte für die Blendungsart „Ablenkung“ betragen hinter einer Blende mit 7 mm Durchmesser < 20 nW. Mit den gegebenen Möglichkeiten ist es nicht umsetzbar, diese kleinen Leistungen mit akzeptablen Messungenauigkeiten zu ermitteln. Abb. 16 zeigt daher für diese Blendungsart ausschließlich die theoretischen Werte.

Deutlich zu erkennen ist, dass die Ergebnisse der Messungen in einigen Fällen stark von den rein theoretischen Werten abweichen. Beispielhaft sei die große Abweichung des „roten“ Laserpointers ID 16 erwähnt. Der gemessene Sicherheitsabstand für die drei vermessenen Grenzwerte entspricht etwa dem dreifachen des mittels Gleichung (10) berechneten Abstandes. Andere Abstände stimmen im Rahmen der Fehlertoleranz mit den berechneten Werten weitestgehend überein oder weisen einen kleineren gemessenen als theoretischen Wert auf. Hauptgrund für diese großen Abweichungen zwischen Theorie und Praxis ist die Voraussetzung eines Gauß-Strahls in Gleichung (10). Einen nahezu idealen Gaußstrahl weisen jedoch nur Laserpointer mit grüner Strahlungsemission auf.

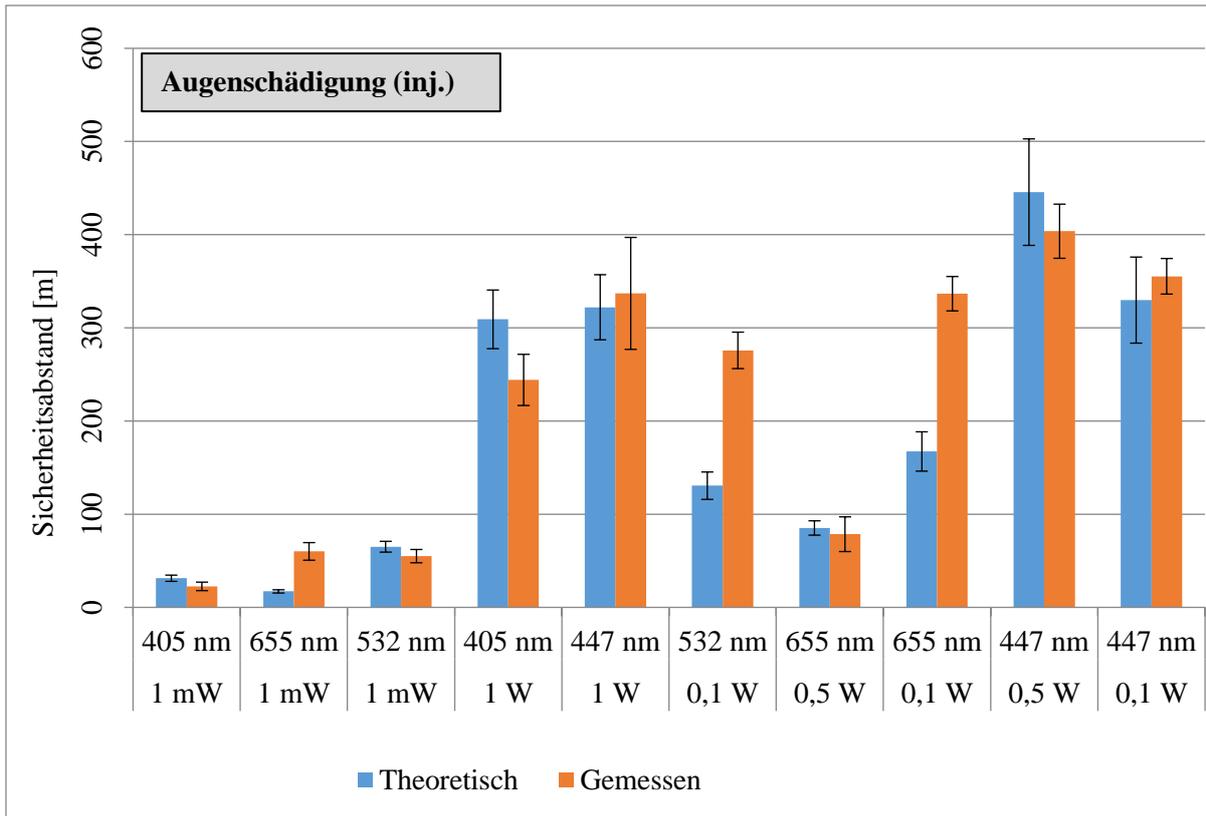


Abb. 13: Vergleich der theoretischen und gemessenen Sicherheitsabstände für den Grenzwert der „Augenschädigung“.

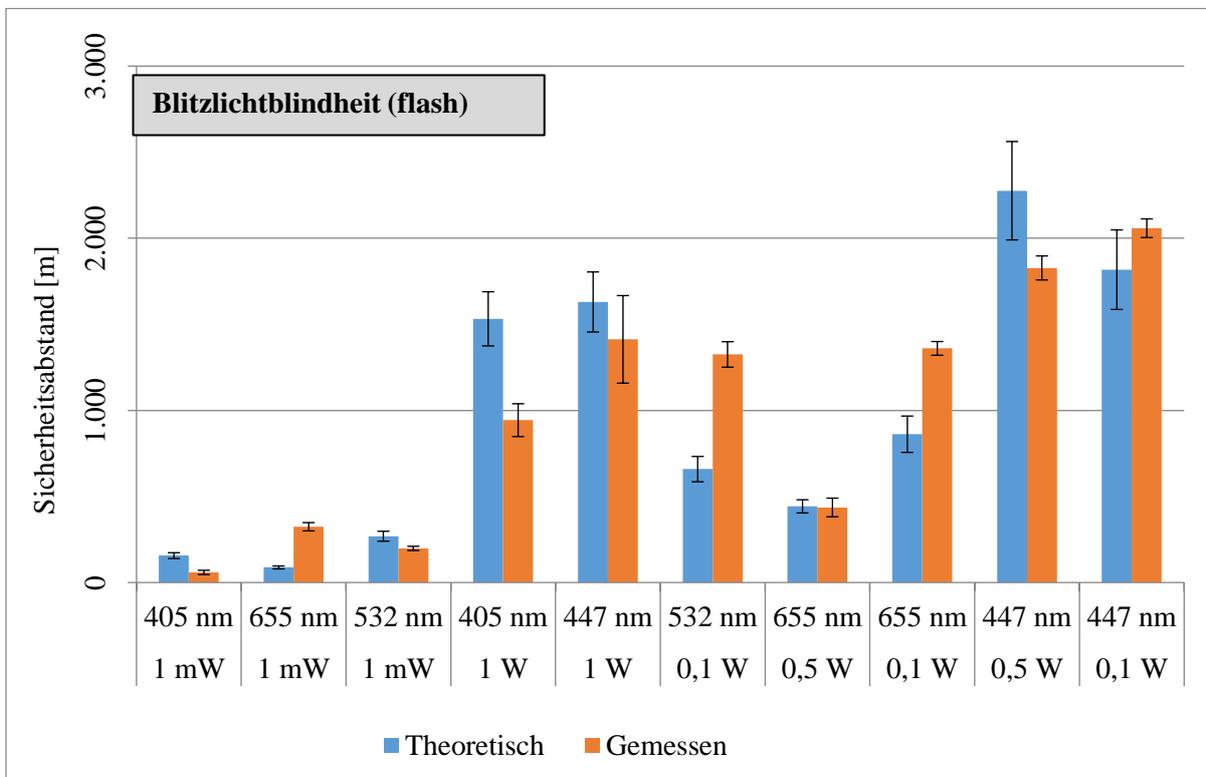


Abb. 14: Vergleich der theoretischen und gemessenen Sicherheitsabstände für den Grenzwert der „Blitzlichtblindheit“.

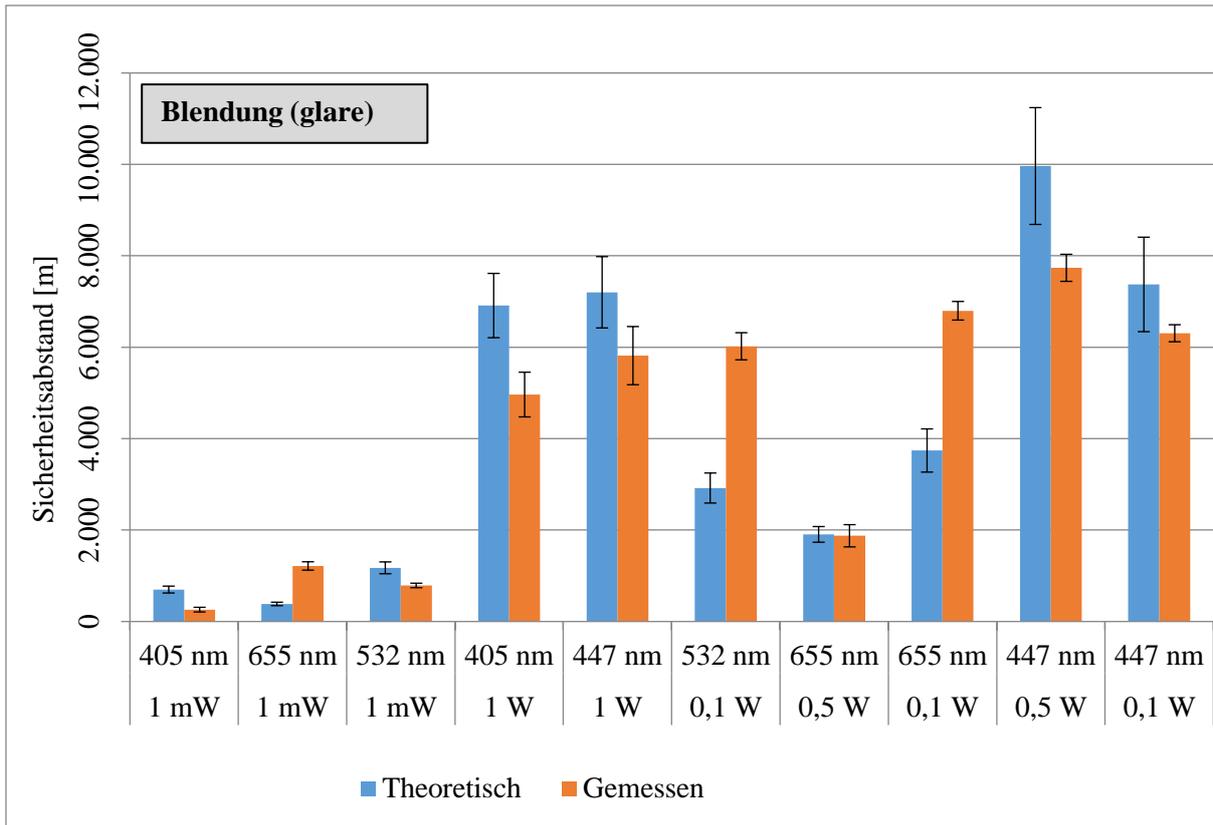


Abb. 15: Vergleich der theoretischen und gemessenen Sicherheitsabstände für den Grenzwert der „Blendung“.

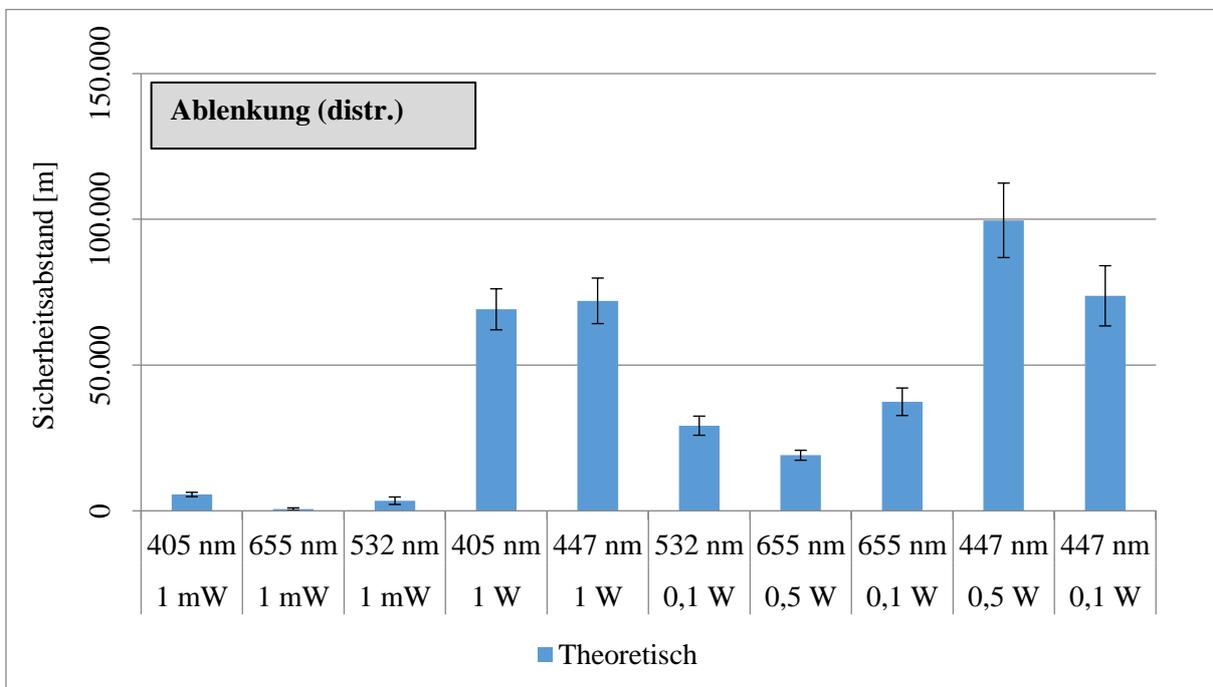


Abb. 16: Theoretischer Sicherheitsabstand für den Grenzwert der „Ablenkung“.

5.4 Einflussfaktoren verschiedener Frontscheiben

Da sämtliche Personen der in dieser Studie betrachteten Berufsgruppen durch eine Windschutzscheibe geschützt sind, ist es notwendig, die Einflussfaktoren der verschiedenen Scheiben zu untersuchen. Wichtige Faktoren sind dabei die Transmission und Streuung der Scheiben.

5.4.1 Auswahl der Scheiben

Bei der Auswahl der Scheiben wurden Frontscheiben aus allen betroffenen Berufsgruppen beschafft und auf die jeweiligen optischen Eigenschaften untersucht. Die verwendeten Scheiben sind Frontscheiben aus einem Verkehrsflugzeug (Herculite-Glas A-320), einem Helikopter (Plexiglas EC 135) und einem PKW (Verbundglas). Verbundglasscheiben, die im Aufbau der verwendeten ähnlich sind, werden auch in Bussen und Zügen verwendet. Damit lassen sich mit den verwendeten Scheiben die Expositionsszenarien aller betroffenen Berufsgruppen zufriedenstellend nachbilden.

5.4.2 Transmission unterschiedlicher Frontscheiben

Die Abschwächung des Laserstrahls bei der Transmission durch Frontscheiben hat eine direkte Auswirkung auf den Sicherheitsabstand. So lässt sich dieser Leistungsverlust durch die Scheibe anschaulich mit einer Reduzierung des Sicherheitsabstandes SD gleichsetzen. Die Gleichung für den Sicherheitsabstand wird daher wie folgt angepasst:

$$SD_{\text{haz.}} = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{V \cdot P_0}{MZB_{\text{haz.}}}} \quad (19)$$

V: Verlustfaktor der Scheibe

Tab. 7 zeigt die gemessenen Transmissionen bei senkrechtem Einfall für verschiedene Scheiben in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Auffällig sind die schwachen Transmissionswerte bei 405 nm für das Herculite- sowie Verbundglas, welche vermutlich in der Verwendung von UV-absorbierenden Kunststoffen begründet sind. Die einzelnen Messfehler wurden mit Hilfe der Standardabweichung aus jeweils fünf Messwerten bestimmt.

Scheibenmaterialien	Transmissionsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge [%]			
	405 nm	447 nm	532 nm	655 nm
Plexiglas	85,3 ± 2,1	90,5 ± 1,85	91,2 ± 1,9	90,3 ± 2,3
Herculite-Glas	49,7 ± 1,6	67,6 ± 1,4	77,5 ± 1,7	75,8 ± 2,2
Verbundglas	31,1 ± 1,8	76,6 ± 2,5	82,7 ± 1,94	68,8 ± 1,95

Tab. 7: Transmissionsgrad verschiedener repräsentativ ausgewählter Frontscheiben in Abhängigkeit von den Wellenlängen der verwendeten Laserpointer bei senkrechtem Einfall.

5.4.2.1 Bedeutung der Polarisation für die Transmission der Scheiben

Die Transmission von Laserstrahlung durch Dielektrika (hier: Scheibe) wird grundsätzlich auch durch die Polarisation der Strahlung bestimmt. Nur für senkrechten Einfall spielt die Polarisation keine Rolle und die Fresnelreflexion beträgt beispielsweise für Standard-Glas mit einem Brechungsindex von 1,49 ca. 7 % (Außen- und Innenseite der Scheibe). Dieser Wert reduziert sich theoretisch bis auf 0 %, wenn zu 100 % polarisiertes Licht unter geeigneter Polarisationsrichtung unter dem Brewsterwinkel einfällt.

Eine Schutzwirkung für das menschliche Auge vor Laserstrahlung, die auch von der Scheibe ausgeht, reduziert sich in diesem Fall. Aus diesem Grund wird die Polarisation der verwendeten Laserpointer und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Transmission in diesem Kapitel untersucht.

5.4.2.2 Messung der Polarisation

Der Polarisationsgrad wurde mittels linearem Polarisationsfilter im Strahlengang durch Drehung senkrecht zur optischen Achse bestimmt. Anschließend wurden die maximale transmittierte Intensität I_{max} und minimale transmittierte Intensität I_{min} bei unterschiedlichen Drehwinkeln gemessen. Aus den gemessenen Werten wurde der Polarisationsgrad P mittels Gleichungen (20) berechnet (Tab. 8).

ID	Wellenlänge [nm]	Polarisationsgrad [%]
2	405	96,3 ± 0,53
16	655	97,8 ± 0,15
29	532	64,9 ± 0,39 98,8 ± 0,10
33	405	91,3 ± 0,34
34	447	96,3 ± 0,45
36	532	86,4 ± 0,60
37	532	99,1 ± 0,30
38	655	97,8 ± 0,45
39	655	99,1 ± 0,20
40	447	97,0 ± 0,24
41	447	99,6 ± 0,19

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (20)$$

Tab. 8: Polarisationsgrad der in der Studie verwendeten Laserpointer. Pointer Typ ID 29 wird ohne und mit Infrarotfilter vermessen.

Die Polarisationsgrade der Laserpointer sind, wie in Tab. 8 zu sehen, durchweg höher als erwartet. Bei Polarisationsgraden nahe 100 % muss mit einer Steigerung der Transmission aufgrund des oben genannten Brewstereffektes von bis zu 7 % gerechnet werden. Die Polarisation des grünen Laserpointers 29 ist mit 64,9 % vergleichsweise gering. Grund hierfür ist die infrarote Reststrahlung, die bei „low-cost-Laserpointern“ aus Kostengründen nicht gefiltert wird. Die Reststrahlung setzt sich aus Pumpstrahlung (808 nm) und Nd:YAG

(1064 nm) zusammen und hat keine Auswirkungen auf die Blendung. Unter dem Gesichtspunkt der Augenschädigung müsste jedoch das gesamte Spektrum der Strahlung inklusive IR-Anteil betrachtet werden. Der Fokus des Projektes liegt allerdings auf der Blendung. Daher wird der Infrarot-Anteil in sämtlichen Messungen mit einem Filter Typ BG 18 vor den Messungen herausgefiltert. Bei der erneuten Polarisationsmessung mit dem Filter BG 18 beträgt der Polarisationsgrad 98,8 % (s. Tab. 8). Die angegebenen Fehler werden über die Standardabweichung von fünf gemessenen Werten berechnet.

5.4.2.3 Messergebnisse unter Berücksichtigung der Polarisation

Die Polarisationsabhängigkeit der Transmission wird anhand eines ausgewählten Laserpointers (ID 2, 405 nm, 7,5 mW) und einer Helikopterfrontscheibe (EC 135, Plexiglas) in Abb. 17 dargestellt. Zahlreiche weitere Graphen mit umfangreichen Messresultaten für weitere Scheibenmaterialien (Herculite-Glas, Verbundglas) sowie für andere Pointerwellenlängen (447 nm, 532 nm, 655 nm) würden den Umfang sprengen und sind daher hier nicht dokumentiert. Dafür sind die bedeutenden Maximalwerte für die Bestrahlung unter dem Brewsterwinkel für alle Scheiben und Pointerwellenlängen in Tab. 9 zusammenfassend dokumentiert.

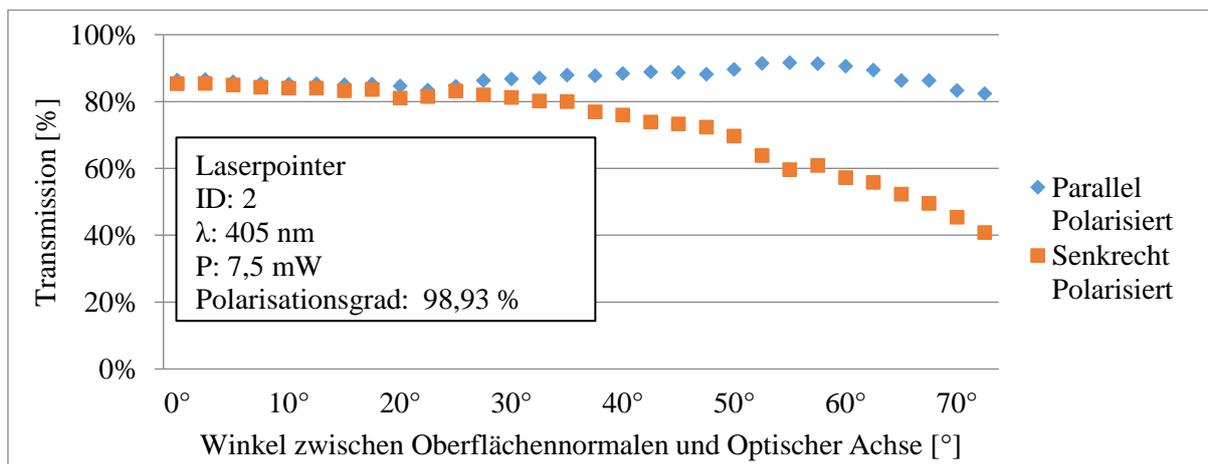


Abb. 17: Abhängigkeit der Transmission vom Einfallswinkel und der Polarisationsrichtung; gemessen an einer Helikopterfrontscheibe (EC 135) bei 405 nm.

Scheiben	Maximale Transmission unter Brewsterwinkel [%]			
	405 nm	447 nm	532 nm	655 nm
Plexiglas	91,4 ± 2,3	98,46 ± 1,02	97,6 ± 1,64	97,4 ± 1,34
Herculite-Glas	54 ± 1,87	69,02 ± 2,55	80 ± 1,43	81 ± 2,12
Verbundglas	32,1 ± 1,58	78,34 ± 1,89	87,7 ± 2,06	72,8 ± 1,95

Tab. 9: Maximale Transmission der Scheiben in Abhängigkeit von der Wellenlänge und unter Berücksichtigung der Polarisation.

Abb. 17 wie auch der Vergleich von Tab. 9 mit Tab. 7 veranschaulichen eine starke Abhängigkeit der Transmission von dem Einfallswinkel und der Polarisation. Die größte Diskrepanz ist bei der Frontscheibe des EC 135–Helikopters zu beobachten. Bei senkrechtem Einfall werden 90 % transmittiert. Bei einem Einfallswinkel von 50° und paralleler Polarisation steigt die Transmission auf 98,46 %. Die erwartete maximale Zunahme der Transmission liegt für die Frontscheibe des EC 135 mit dem Brechungsindex von 1,49 bei 7,8 %. Die Überschreitung dieses Maximalwertes um 0,66 % ist durch Messungenauigkeiten und Schwankungen in der Laserleistung zu erklären. Die Schwankungen in der Laserleistung wurden durch vergleichende Leistungsmessungen unmittelbar vor und nach der Transmissionsmessung minimiert. Die Auswirkungen der Schwankungen auf die Messergebnisse können trotz dieser Maßnahmen nicht vollständig vermieden werden. Die angegebenen Fehler werden über die Standardabweichung von fünf gemessenen Werten berechnet.

Die maximale Transmission tritt bei einem Einfallswinkel auf, der dem Brewsterwinkel entspricht. Der Brewsterwinkel Θ_B wird berechnet durch:

$$\Theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (21)$$

n_1 : Brechungsindex der Luft

n_2 : Brechungsindex der Scheibe

Ausgehend von einem Brechungsindex von 1,49 für Plexiglas liegt der Brewsterwinkel theoretisch bei 56,16°. Diese Abweichung zum gemessenen Maximum der Transmission mit 50°, ist neben den genannten Messungenauigkeiten auch auf die größere optische Weglänge in der Scheibe bei nichtsenkrechtem Einfallswinkel zurückzuführen.

5.4.3 Streuung von Laserpointerstrahlung an Frontscheiben

Vor allem stark verschlissene und nasse Scheiben weisen eine deutlich erkennbare Streuung der auftreffenden Strahlung auf. Durch diese Streuung kann es auch in den Fällen zur Blendung kommen, in denen das Auge nicht direkt getroffen wird. Aufgrund der vergleichsweise geringen Strahlleistungen, die bei dieser indirekten Art der Blendung auftreten, sind jedoch weder Augenschäden noch Blitzlichtblindheit zu erwarten. Die Gefahr liegt bei einer solchen Adaptationsblendung eher in einer „Ablenkung/Erschrecken“ des Piloten bzw. Fahrzeugführers. Bei einem direkten Treffer des Auges und großflächiger Beleuchtung der Scheibe durch den Laserstrahl wird die Leistung im Auge durch die Streustrahlung auf einer größeren Netzhautfläche verteilt. Diese Verteilung hat zur Folge, dass die psychologische Blendung im Moment der Exposition zunimmt [20]. Die Blendung wird als unangenehmer empfunden und die betroffene Person ist in ihrer Handlungsfähigkeit stärker eingeschränkt. Die Blendung führt in dem Fall eher zu kurzfristigen Fehlhandlungen, wie „Verreißen“ des Steuers, als es ohne Streuung der Scheibe der Fall wäre. Informationen über die Auswirkung auf die anhaltenden Beeinträchtigungen der Sehfähigkeit liegen nicht vor. Für den Fall der Streuung an Scheiben besteht daher noch weiterer Forschungsbedarf.

5.5 Einflussfaktoren der Atmosphäre

Blendeffekte durch Laserstrahlung können je nach Strahlleistung eines Laserpointers noch nach mehreren Kilometern verursacht werden. Daher ist es notwendig, die Einflussfaktoren der Atmosphäre in die Untersuchungen mit einzubeziehen. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Absorption und Streuung. Im Folgenden werden beide Faktoren näher betrachtet.

5.5.1 Absorption in der Atmosphäre

Die Absorption von optischer Strahlung in der Atmosphäre hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum einen von der Wellenlänge und zum anderen von den lokalen, momentanen Eigenschaften der Atmosphäre. Geringe Absorption tritt auch bereits in „klarer Luft“ auf. Größeren Einfluss auf die Absorption haben beispielsweise auch Smog, Wolken, Luftfeuchtigkeit, Regen, Nebel und Schnee. Hierfür liegen jedoch keine Daten vor, so dass im Folgenden zur Abschätzung dieses Effektes von „klarer Luft“ ausgegangen wird. Es ist offensichtlich, dass Absorptionseffekte in der Atmosphäre eher bei Laserpointerattacken auf Luftfahrzeugen mit großer Distanz berücksichtigt werden müssen als bei landgebundenen Fahrzeugen.

Die Absorption der Luft ist in größeren Höhen geringer, da die Dichte der Atmosphäre und die Sättigung mit Aerosolen abnehmen. Auf eine Berücksichtigung dieses Effektes wird hier verzichtet, weil dahingehend keine Forschungsergebnisse vorliegen. Zudem ist der Einfluss bei den „üblichen“ Expositionsszenarien mit Laserpointerattacken auf Flugzeuge aufgrund des flachen Einfallswinkels auf die Cockpitscheiben gering. Für sichtbare Strahlung wird häufig ein mittlerer Absorptionskoeffizient μ von 0,05 [1/Km] angenommen. Abb. 18 zeigt jedoch, dass geringere Absorptionskoeffizienten auf Höhe des Meeresspiegels möglich sind (vgl. [21]). Die von Knestrick et. al. ermittelten, minimalen Absorptionskoeffizienten sind in Tab. 10 zusammengefasst.

Wellenlänge [nm]	Absorptionskoeffizient [1/Km]
405	0,08
447	0,06
532	0,04
655	0,04

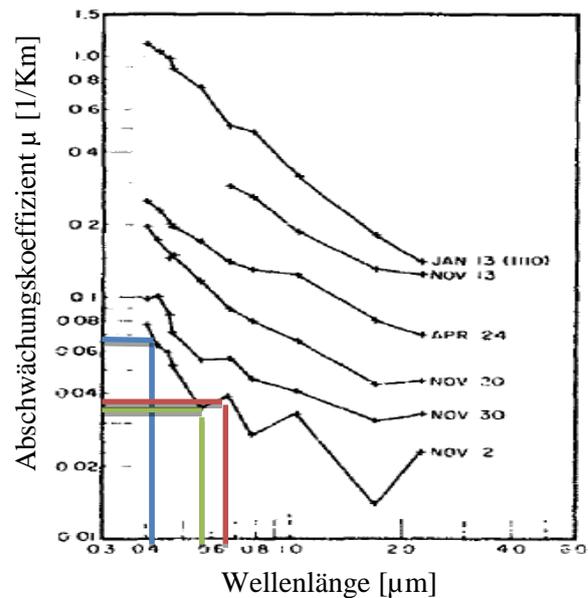


Abb. 18: Abschwächungskoeffizient μ der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Wellenlänge einschließlich Rayleighstreuung (gemessen zu verschiedenen Zeiten), Vgl. [26].

Tab. 10: Wellenlängenabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten μ für die Atmosphäre [21].

5.5.2 Berechnung des Sicherheitsabstandes unter Berücksichtigung der Absorption durch Atmosphäre

Die Strahlleistung schwächt sich während der Propagation mit zunehmender Distanz („Sicherheitsabstand“) von der Laserquelle nach folgender Gesetzmäßigkeit ab: $P = P_0 e^{-\mu \cdot SD}$. Als Ansatz für die Berechnung des Sicherheitsabstandes unter Berücksichtigung der Absorption wird in der bisherigen Gleichung (9) für den Sicherheitsabstand SD_{haz} die Laserleistung P durch $P_0 e^{-\mu \cdot SD}$ ersetzt:

$$SD_{\text{haz.}} = \frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{4 P_0 e^{-\mu \cdot SD_{\text{haz}}}}{\pi MZB_{\text{haz}}}} \quad (22)$$

Die Auflösung von Gleichung 22 ist nicht trivial, da der gesuchte Sicherheitsabstand SD auch im Exponenten der Wurzelfunktion enthalten ist. Die Gleichung kann jedoch mit Hilfe der „Lambertschen W -Funktion“ nach dem Sicherheitsabstand SD_{haz} aufgelöst werden. Die Lambertschen W -Funktion ist definiert als Umkehrfunktion von $f(x) = x e^x$. Es gilt:

$$x = W(x) \cdot e^{W(x)} \quad (23)$$

Zunächst wird Gleichung (22) in die Form der Gleichung (23) gebracht.

$$\Leftrightarrow SD_{\text{haz}}^2 \cdot e^{\mu \cdot SD_{\text{haz}}} = \frac{4}{\pi \cdot \theta^2} \frac{P_0}{MZB_{\text{haz}}}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\mu}{2} SD_{\text{haz}} \cdot e^{\frac{\mu}{2} SD_{\text{haz}}} = \frac{\mu}{2} \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot \theta^2} \frac{P_0}{MZB_{\text{haz}}}}$$

Nach Anwendung der W -Funktion ergibt sich:

$$\Leftrightarrow \frac{\mu}{2} SD_{\text{haz}} = W\left(\frac{\mu}{2} \sqrt{\frac{4}{\pi \theta^2} \frac{P_0}{MZB_{\text{haz}}}}\right)$$

Damit folgt für den Sicherheitsabstand:

$$\Leftrightarrow SD_{\text{haz}} = \frac{2}{\mu} W\left(\frac{\mu}{\theta} \sqrt{\frac{1}{\pi} \frac{P_0}{MZB_{\text{haz}}}}\right) \quad (24)$$

Die Lösung kann mit Hilfe des Newton-Verfahrens iterativ genähert werden. Für die abstrakte Form des Newton-Verfahrens nach Thomas Simpson [22, 23] gilt:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (25)$$

Daraus folgt für die Näherung der W-Funktion:

$$W_{j+1} = W_j - \frac{W_j e^{W_j} - x}{e^{W_j} + e^{W_j} W_j} \quad (26)$$

Zur Berechnung der Entfernungen werden ca. 20 Iterationsschritte verwendet, die in den gegebenen Größenordnungen ausreichend sind. Bei größeren Entfernungen oder größerer Absorption müssen ggf. mehr Schritte durchgeführt werden.

Nakagawara et. al. und Montgomery machen den Vorschlag, den Sicherheitsabstand unter Berücksichtigung der Absorption durch $r_\mu = 0,5r_c(1 + e^{-\mu r_c})$ und dem Absorptionskoeffizient μ von $5 \cdot 10^{-7}$ [1/cm] zu berechnen [17]. Diese Vorgehensweise ist zur einfachen Berechnung geeignet, wenn der wellenlängenabhängige Absorptionskoeffizient verwendet wird. Im Bereich bis 10 km (berechnet ohne Absorption) ist der Fehler zu der genaueren iterativen Berechnung kleiner als 2 %. Bei einem Abstand von 100 km beträgt die Abweichung zur genauen Berechnung mittels W-Funktion jedoch 30 %. Diese Beispiele zeigen, dass diese verwendete Näherung nur für „kleine Entfernungen“ geeignet ist, bei denen die Absorption keine große Rolle spielt. Daher wird in dieser Arbeit der Abstand mit Hilfe der genaueren iterativen Gleichung (24) bestimmt.

Abb. 19 verdeutlicht die Beziehung zwischen der Berechnung des Sicherheitsabstandes der Laserpointer ohne Absorption, berechneter Absorption mittels W-Funktion nach Lambert sowie genäherter Absorption nach Nakagawara et. al. Abb. 19 demonstriert den Atmosphäreinfluss für den Fall der Blendungsart „Ablenkung“. In der Abbildung sind sowohl die gute Übereinstimmung bei kleinen Abständen als auch die starke Abweichung bei großen Abständen zu sehen. Da diese Graphen nur der Verdeutlichung dienen, werden die Fehler nicht angegeben. Weitere dokumentierte Graphen zur Auswirkung der Absorption auf die Sicherheitsabstände der übrigen Blendeffekte werden in diesem Bericht nicht gezeigt.

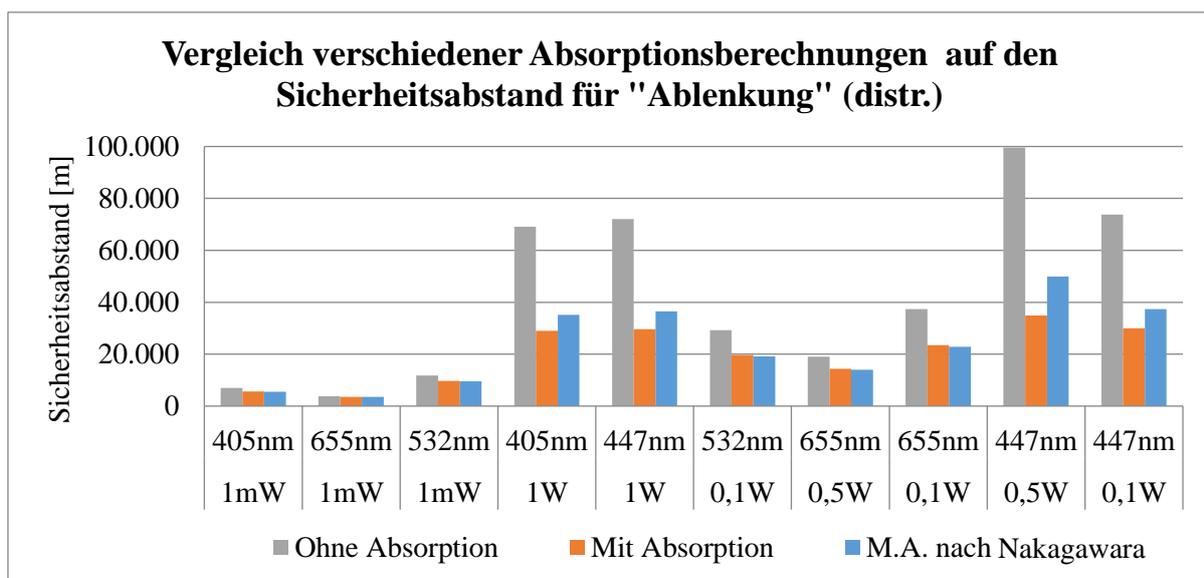


Abb. 19: Einfluss der Absorption in der Atmosphäre auf die Berechnung des Sicherheitsabstandes mit dem Grenzwert der Blendungsart „Ablenkung“.

5.5.3 Streuung durch Atmosphäreneinfluss

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Blendung bei einer Bestrahlung von $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ im Labor „als unproblematisch“ bewertet wird, während die Bestrahlung von $1,5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ im Freien als „sehr hell“ empfunden werden (vgl. [5, 24]). Der Grund für diese Steigerung der Blendungsempfindung ist die Streuung des Strahls durch die Atmosphäre. Durch eine Vorwärtsstreuung wirkt die Quelle des Laserstrahls für den Betrachter größer. Aus der Literatur ist bekannt, dass eine zunehmende „Größe der leuchtenden Fläche auf den Nachbildverlauf wie (eine) Zunahme der Belichtungsintensität“ [20] wirkt. Die Frage nach der Gültigkeit der von der FAA im Simulator (für grüne Laserpointerstrahlung) ermittelten Flugzonen ist daher erneut zu stellen.

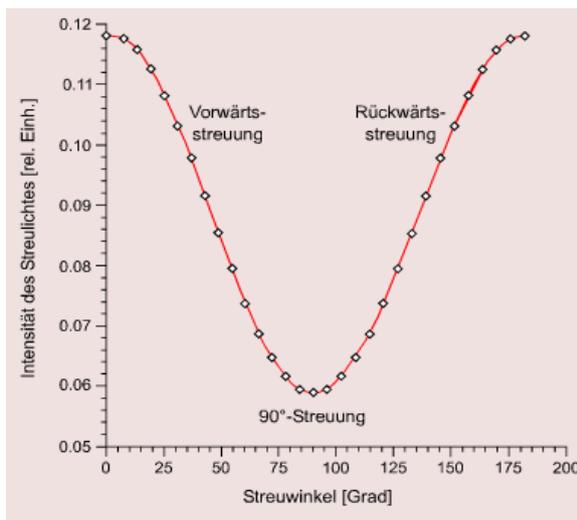


Abb. 20: Phasenfunktion der Rayleigh-Streuung [30].

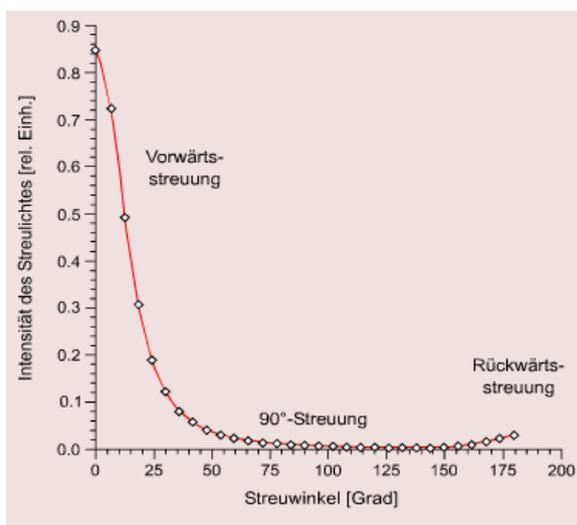


Abb. 21: Phasenfunktion der Mie-Streuung [30].

großen Raumwinkel einhergehen, ist die Rayleigh-Streuung nur im geringen Maße für Größenänderung verantwortlich.

Es wird dabei zwischen drei Arten der Streuung unterschieden: Die **normale** Streuung tritt an Objekten auf, die im Vergleich zur Wellenlänge groß sind. In der Atmosphäre trifft diese Einschränkung im Wesentlichen auf Regen, Schnee und Hagel zu. Aufgrund der erheblichen Abschwächung der Strahlleistung durch die genannten Wetterphänomene kann die normale Streuung vernachlässigt werden. Zudem ereigneten sich nahezu alle gemeldeten Laserblendungen bei guten Wetterbedingungen [14].

Von **Rayleigh-Streuung** spricht man, wenn die Partikel, an denen das Licht gestreut wird, klein im Vergleich zur Wellenlänge sind. In der Atmosphäre verursachen überwiegend Gasmoleküle die Rayleigh-Streuung [25]. Die Intensität der Streuung ist umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge. Daher wird die Strahlung der blauen Laserpointer wesentlich stärker gestreut als die Strahlung der grünen und roten Laserpointer. Erkennbar ist dieser Umstand deutlich an der Sichtbarkeit des Strahls. In Abb. 20 ist die Phasenfunktion zu sehen. Die Strahlung wird über einen großen Raumwinkel mit Schwankungen um den Faktor zwei gestreut. Angesichts der großen Verluste, die mit der Streuung über diesen

Mie-Streuung tritt bei einer Teilchengröße auf, die in der Größenordnung der Wellenlänge liegt. Aerosole und Nebel mit Teilchengrößen von ca. 1 μm bis 10 μm verursachen die Mie-Streuung in der Atmosphäre. Nebel wird nicht genauer betrachtet, da er den Strahl stark abschwächt und es bei Nebel selten zu Laserblendungen kommt [14]. Aufgrund der größeren Aerosoldichte kommt die Mie-Streuung überwiegend in den unteren Luftschichten vor. Licht wird, wie in Abb. 21 zu sehen, bei Mie-Streuung vor allem in Ausbreitungsrichtung gestreut. Diese Besonderheit hat zur Folge, dass die Mie-Streuung der entscheidende Faktor bei der scheinbaren Änderung der Quellgröße ist.

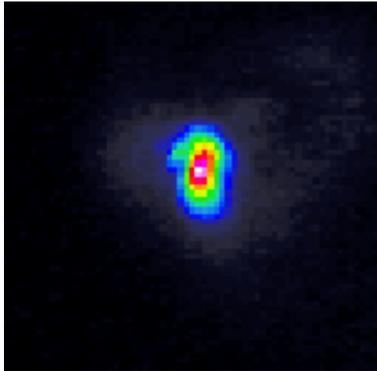


Abb. 22: Auf einen CCD-Chip abgebildeter Laserpointerstrahl ohne Streuung.

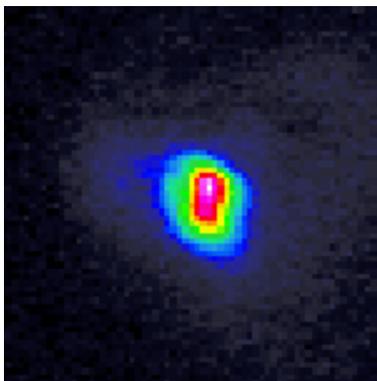


Abb. 23: Auf einen CCD-Chip abgebildeter Laserpointerstrahl mit simulierter Atmosphären-Streuung durch Eisspray.

Qualitative Untersuchungen, simuliert mit einem Eis-Spray zur Erzeugung der Mie-Streuung, bestätigen die vorausgehenden Vermutungen der scheinbaren Quellenvergrößerung. Dazu wird mit Hilfe einer 80 mm-Linse und dem Strahlanalysesystems LaserCam-HR (Coherent) im Fokuspunkt der Linse ein menschliches Auge simuliert. Dieses „nachgebildete Auge“ wird der Strahlung eines grünen Laserpointers ausgesetzt. Die Abb. 22 und 23 zeigen den auf dem CCD-Chip der Kamera abgebildeten Strahl unmittelbar vor und während des Einsatzes von Eis-Spray in dem Strahlverlauf. Mittels einer speziellen Auswertesoftware wurde der Strahldurchmesser direkt bestimmt. Dieser beträgt ohne Streuung 0,39 mm und mit Streuung 0,55 mm. Das entspricht einer Vergrößerung von 41 %. Durch Absorption und Streuung ist zudem ein Abfall in der maximalen Bestrahlungsstärke von 0,91 W/m^2 auf 0,38 W/m^2 zu beobachten. Grund für den starken Abfall der maximalen Leistungsdichte ist neben der Streuung die Absorption des Eis-Sprays.

Das Experiment bekräftigt die Zweifel an den von der FAA ermittelten Grenzwerten für definierte Flugzonen (insbesondere für große Entfernungen), die in einem Flugsimulator ermittelt wurden. Es sind dahingehend weitere Studien erforderlich, die sowohl die Spotgröße auf der Netzhaut berücksichtigen als auch die Rolle der Mie-Streuung bei der scheinbaren Vergrößerung der Quelle quantitativ untersuchen.

5.6. Einfluss der Wellenlänge

Nahezu sämtliche bekannte Untersuchungen zum Thema „Sicherheitsabstand bei Bestrahlung aus Laserpointern“ beziehen sich auf Laserattacken auf Piloten, da diese offensichtlich die sensibelste Berufsgruppe repräsentieren. Dabei wird die Auswirkung unterschiedlicher Wellenlängen im Allgemeinen nicht berücksichtigt. Es sind nur wenige Untersuchungen bekannt, die auch den $V(\lambda)$ -Faktor in ihre Bewertung integriert haben; z. B. [23, 26]. Die Wellenlänge der Laserstrahlung ist allerdings von entscheidender Bedeutung,

da das Auge große Unterschiede in der Empfindlichkeit bei verschiedenen Wellenlängen aufweist. Diese Unterschiede werden durch den $V(\lambda)$ -Faktor beschrieben.

5.6.1 Berücksichtigung des $V(\lambda)$ -Faktors

Der $V(\lambda)$ -Faktor drückt die Empfindlichkeit des Auges in Bezug auf das Maximum aus, das bei photopischem Sehen („Tagsehen“) bei 555 nm und bei skotopischem Sehen („Nachtsehen“) bei 507 nm liegt. Dass die Empfindlichkeitsunterschiede - und somit Blendwirkungen - zwischen den verwendeten Laserpointer-Wellenlängen beträchtlich sind, wird anhand Abb. 24 und Tab. 11 deutlich. Im Folgenden werden die Werte der angepassten $V(\lambda)$ -Kurve aus dem Jahre 1978 [27] genutzt.

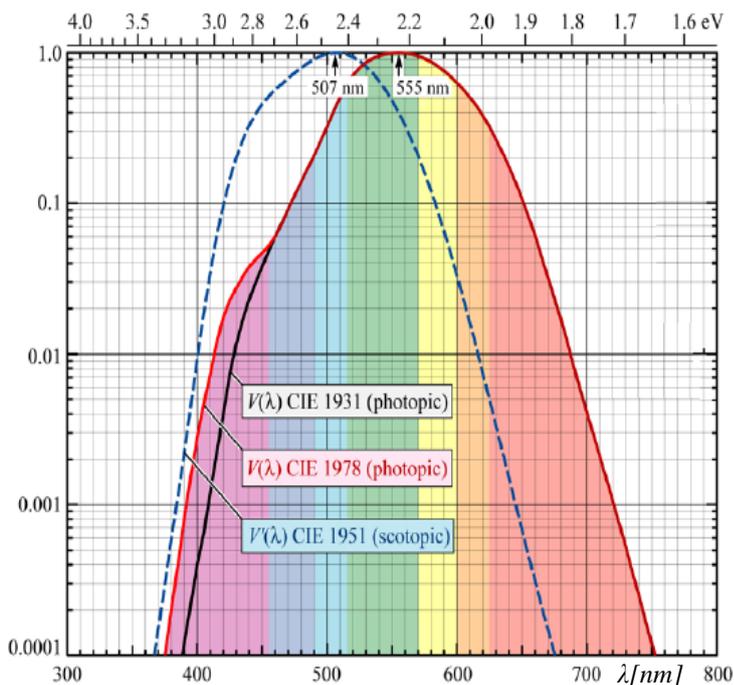


Abb. 24: Logarithmische und normierte $V(\lambda)$ -Kurve.

Wellenlänge [nm]	$V(\lambda)$ -Faktor
405	0,005
447	0,054
532	1,000
655	0,094

Tab. 11: $V(\lambda)$ -Faktor für die Wellenlängen der gewählten Laser normiert auf 532 nm.

Diese korrigiert die $V(\lambda)$ -Kurve aus dem Jahre 1931 im Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 460 nm. Aufgrund der hohen Bestrahlungsstärken, die in dieser Studie betrachtet werden, wird ausschließlich die $V(\lambda)$ -Kurve für das photopische Sehen verwendet. Tab. 11 zeigt den $V(\lambda)$ -Faktor normiert auf 532 nm. Diese Normierung ist nötig, da die bekannten Untersuchungen der FAA mit einem Laser der Wellenlänge 532 nm durchgeführt wurden. Der nicht normierte $V(\lambda)$ -Faktor bei 532 nm liegt bei 0,862. Im Folgenden wird diese Normierung ohne spezielle Kennzeichnung verwendet. Für den Fall der Augenschädigung wird der $V(\lambda)$ -Faktor nicht berücksichtigt, weil die Schäden im hier betrachteten Spektrum nur eine vernachlässigbare Wellenlängenabhängigkeit besitzen.

Die Auswirkungen der $V(\lambda)$ -Kurve werden zunächst in dem bisherigen Formalismus zur Berechnung des Sicherheitsabstandes für unterschiedliche Blendeffekte wie folgt berücksichtigt:

$$SD_{haz.} = \frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{4 P_0 \cdot V(\lambda)}{\pi MZB_{haz.}}} \quad (27)$$

In Fachkreisen ist die Vorgehensweise nicht unumstritten, da die $V(\lambda)$ -Kurve für Lichtquellen mit geringer Bestrahlungsstärke ermittelt wurde und bei den hohen Intensitäten, die auch bei Blendung auftreten können, bisher nicht bestätigt ist. Dies verdeutlicht folgendes Zitat:

„Zweifel an der Gültigkeit der V-Lambda-Kurve bei größeren Leuchtdichtewerten werden bereits dadurch genährt, dass z. B. Licht einer bestimmten Wellenlänge bei Zunahme bzw. Abnahme der Intensität in unterschiedlichen Farben erscheint, was im so genannten Bezold-Brücke-Effekt begründet ist und dass besonders ‚helle Farben‘, wie sie heute mit LEDs erzeugt werden können, primär ‚fast weiß‘ erscheinen, wobei kurzwellige Strahlung als ‚weiß mit einem Blaustich‘ und langwellige als ‚weiß mit einem Gelbstich‘ empfunden wird.“ [5].

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse wird deutlich, dass der Sicherheitsabstand nach Gleichung (27) der Realität offensichtlich näher kommt als ohne Berücksichtigung der $V(\lambda)$ -Kurve - die Ergebnisse allerdings einen nicht zu unerheblichen Fehler beinhalten.

5.6.2 Berücksichtigung der Beeinträchtigungsdauer

Aufgrund der erläuterten Unsicherheiten in der Berechnung des Sicherheitsabstandes unter Verwendung des $V(\lambda)$ -Faktors wurde an der Fachhochschule Köln die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei großen Leistungsdichten erforscht [18, 26]. Ziel dieser Untersuchungen ist die Bestimmung der Beeinträchtigungsdauer in Abhängigkeit der Strahlleistung und Wellenlänge. Die Ergebnisse der Untersuchungen bieten die Möglichkeit, die Beeinträchtigungsdauer für fünf verschiedene typische Laserpointerwellenlängen zu berechnen. Der aus den Untersuchungen abgeleitete analytische Zusammenhang [18, 26] für die wellenlängenabhängigen Leistungsgrenzwerte $P_{P,haz.,\lambda}$ in Abhängigkeit der Beeinträchtigungsdauer $t_{haz.,\lambda}$ (Gleichung 8) wird dazu wie folgt umgestellt:

$$t_{haz.,\lambda} = a \cdot P_{P,haz.,\lambda}^b \quad (28)$$

Die in Tab. 12 zusammengefassten Faktoren a und b wurden experimentell ermittelt [18, 26].

Wellenlänge	405 nm	447 nm	532 nm	635 nm	670 nm
Faktor a	3,4	8,3	31,5	13,5	6,5
Faktor b	0,3	0,42	0,44	0,38	0,38

Tab. 12: Übersicht der Faktoren a und b zur Berechnung der Beeinträchtigungsdauer für die fünf von Reidenbach et. al. [18, 26] untersuchten Wellenlängen.

Zum Vergleich der Berechnungsmethoden basierend auf FAA/ANSI-Werten mit dem „FH-Köln-Modell“ wird zunächst die Beeinträchtigungsdauer für „grüne“ Laserstrahlung der jeweiligen Blendungsart ausgehend von Gleichung (28) mit den FAA/ANSI-Grenzwerten ermittelt. Daraus erhält man: $t_{flash, 532 \text{ nm}} = 7,5 \text{ s}$; $t_{glare, 532 \text{ nm}} = 2,0 \text{ s}$, $t_{distr., 532 \text{ nm}} = 0,27 \text{ s}$. Bei

diesen Zeiten für Beeinträchtigungsdauern handelt es sich um Werte, die theoretisch zu den FAA/ANSI-Grenzwerten für „grüne“ Pointerstrahlung „gehören würden“. Diese berechneten Beeinträchtigungsdauern werden im Folgenden auch auf andere Pointerwellenlängen übertragen und ermöglichen mittels Gleichung (29) die Berechnung von wellenlängen-abhängigen Leistungsgrenzwerten $P_{haz.,\lambda}$ für alle Blendeffekte:

$$P_{haz.,\lambda} = \left(\frac{t_{haz.,\lambda}}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (29)$$

Die anschließende Umrechnung auf Bestrahlungsgrenzwerte bezieht sich auf eine 7 mm-Messblende (Augenpupille). Das Ergebnis ist in Tab. 13 dargestellt. Aus den in Tab. 13 aufgeführten Grenzwerten lassen sich mit Gleichung (9) direkt die resultierenden Sicherheitsabstände berechnen. Die Augenschädigung („inj.“) wird dabei nicht betrachtet, da es hier ausschließlich um Blendeffekte geht.

Blendungsart	Grenzwerte „ $MZB_{VIS,\lambda}$ “ umgerechnet mit FH-Köln-Modell				
	[W/m ²]				
	405 nm	447 nm	532 nm	635 nm	670 nm
flash ($t_{flash,532\text{ nm}} = 7,5\text{ s}$)	363	20	1	5,5	37,9
glare ($t_{glare,532\text{ nm}} = 2,0\text{ s}$)	4,4	0,88	0,05	0,17	1,17
distr. ($t_{distr.,532\text{ nm}} = 0,27\text{ s}$)	0,0056	0,0074	0,0005	0,0009	0,008

Tab. 13: Bestrahlungsgrenzwerte in Abhängigkeit der Wellenlänge und der charakteristischen Blendungsart. Umgerechnet basierend auf Erkenntnissen aus dem „FH-Köln-Modell“ [18, 26].

Zum Vergleich der Resultate aus Tab. 13 mit umgerechneten Grenzwerten ausgehend von FAA/ANSI-Daten durch direkte Anwendung des $V(\lambda)$ -Faktors (s. Kap. 5.6.1) stellt Tab. 14 die entsprechenden Grenzwerte dar.

Blendungsart	Grenzwert umgerechnet mit $V(\lambda)$ -Faktor [W/m ²]				
	405 nm	447 nm	532 nm	635 nm	670 nm
flash	185	18,4	1	3,97	26,94
glare	9,25	0,92	0,05	0,19	1,35
distr.	0,09	0,0092	0,0005	0,0019	0,013

Tab. 14: Bestrahlungsgrenzwerte in Abhängigkeit der Wellenlänge und der Blendungsauswirkung, direkt umgerechnet mit dem $V(\lambda)$ -Faktor.

Der Vergleich der Tab. 13 und Tab. 14 zeigt, dass die Werte in Teilbereichen der Tabellen gut übereinstimmen. Große Abweichungen treten vor allem bei „blauer“ Laserstrahlung (405 nm) für sämtliche Blendeffekte auf („flash“, „glare“, „distr.“). Aufgrund von Beobachtungen [5, 18], die die Gültigkeit der $V(\lambda)$ -Kurve vor allem bei kurzweiliger Strahlung und großen Bestrahlungsstärken in Frage stellen, sind diese Abweichungen nachvollziehbar.

(Es sei deutlich darauf hingewiesen, dass es sich hier ausschließlich um Grenzwerte der Blendung handelt. Bei einigen dieser Werte würde bereits deutlich darunter ein permanenter Augenschaden durch Netzhautentzündung auftreten!). Zweifellos bietet diese geschilderte Vorgehensweise ausreichend Diskussionsstoff für zukünftige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet.

5.7 Zusammenfassung aller Einflussfaktoren auf den Sicherheitsabstand

Nachdem die verschiedenen Einflüsse (s. Kap. 5.4/ 5.5/ 5.6) bei der Berechnung des Sicherheitsabstandes getrennt betrachtet wurden, werden im Folgenden alle einzelnen Faktoren in einem analytischen Ausdruck berücksichtigt. Dabei wird von Gleichung 24 ausgegangen, die bereits die Atmosphärenabsorption beinhaltet. In dieser wird anschließend wie in den vorherigen Kapiteln der MZB-Wert mit Hilfe der Faktoren für die Wellenlängenabhängigkeit und der Scheibentransmission angepasst (Gleichung 30, s. unten). Hierin ist die in Kap. 5.6.2 diskutierte Unsicherheit aufgrund der Berücksichtigung des $V(\lambda)$ -Faktors enthalten! Der unbekannte Einfluss der Vorwärtsstreuung durch Partikel in der Atmosphäre wird nicht berücksichtigt. Zu beachten ist auch bei der Berechnung des Sicherheitsabstandes nach den Gleichungen (30, 31, 32 s. unten), dass der Grenzwert der Augenschädigung („eye inj.“) unabhängig von den hier betrachteten Wellenlängen ist. Ausgehend von Gleichung (24) erhält man mit dem Verlustfaktor der Scheibe V_{Scheibe} sowie dem $V(\lambda)$ -Faktor:

$$SD_{\text{haz},V(\lambda)} = \frac{2}{\mu} W \left(\mu \sqrt{\frac{1}{\theta^2 \cdot \pi} \frac{P_0 \cdot V_{\text{Scheibe}} \cdot V(\lambda)}{MZB_{\text{haz}} \cdot V(\lambda = 532 \text{ nm})}} \right) \quad (30)$$

In dieser Gleichung lassen sich auch die aus der Simulation experimentell gewonnenen Werte des Sicherheitsabstandes $SD_{\text{haz},\text{exp}}^*$ gem. Gleichung (16) berücksichtigen und man erhält:

$$SD_{\text{haz},\text{exp}} = \frac{2}{\mu} W \left(\frac{\mu}{2} \sqrt{\frac{V_{\text{Scheibe}} V(\lambda)}{V(\lambda = 532 \text{ nm})}} SD_{\text{haz},\text{exp}}^* \right) \quad (31)$$

Durch die Berücksichtigung von gemessenen Entfernungen $SD_{\text{haz},\text{exp}}^*$ werden in Gleichung (31) Fehler vermieden, die durch eine mögliche Varianz des Strahlprofils entstehen.

Im Folgenden werden zur Berechnung des Sicherheitsabstandes die aus dem „FH-Köln-Modell“ gewonnenen Erkenntnisse zur Wellenlängenabhängigkeit berücksichtigt. Dazu werden die Grenzwerte aus Tab. 13 für die wellenlängen- und blendungsabhängigen Bestrahlungsgrenzwerte $MZB_{\text{VIS},\lambda}$ verwendet:

$$SD_{\text{haz},\lambda} = \frac{2}{\mu} W \left(\mu \sqrt{\frac{P_0 \cdot V_{\text{Scheibe}}}{\theta^2 \cdot MZB_{\text{VIS},\lambda}}} \right) \quad (32)$$

In den folgenden Abb. 25 bis 28 werden die nach unterschiedlichen Methoden (Gleichungen 30, 31, 32) berechneten Sicherheitsabstände den Werten aus der einfachen geometrischen Berechnung nach Gleichung (9) ohne Berücksichtigung jeglicher Umgebungs- sowie Wellenlängeneinflüsse gegenübergestellt.

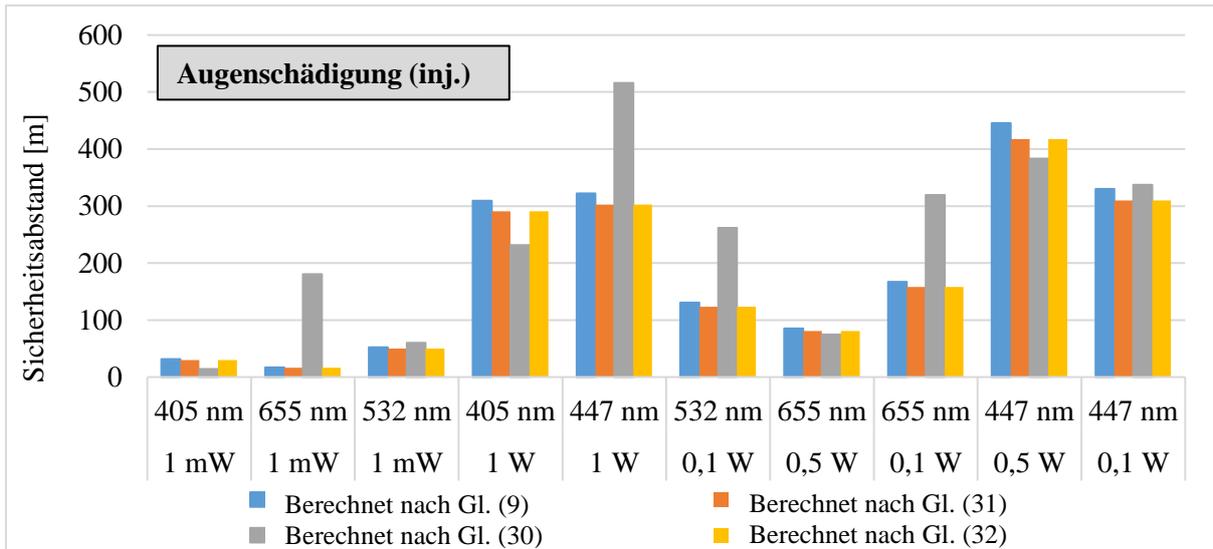


Abb. 25: Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsmodelle anhand des Sicherheitsabstandes für die **Augenschädigung** bei einer Scheibentransmission von 90 %. Neben der einfachen geometrischen Berechnung (Gleichung 9) werden die Sicherheitsabstände zum Vergleich auch mittels verschiedener Verfahren zur Berücksichtigung aller betrachteten Umgebungsfaktoren berechnet (Die spektrale Empfindlichkeit spielt bei der Augenschädigung keine Rolle).

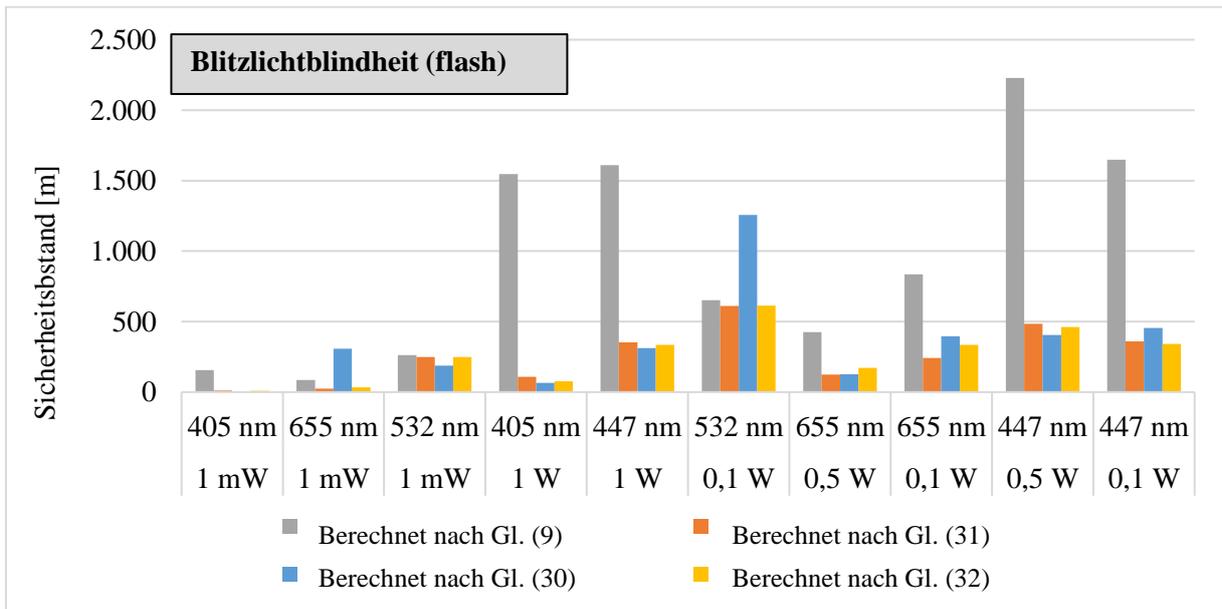


Abb. 26: Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsmodelle anhand des Sicherheitsabstandes für die **Blitzlichtblindheit** bei einer Scheibentransmission von 90 %. Neben der einfachen geometrischen Berechnung (Gleichung 9) werden die Sicherheitsabstände zum Vergleich auch mittels verschiedener Verfahren zur Berücksichtigung aller betrachteten Umgebungsfaktoren inkl. der Wellenabhängigkeit berechnet.

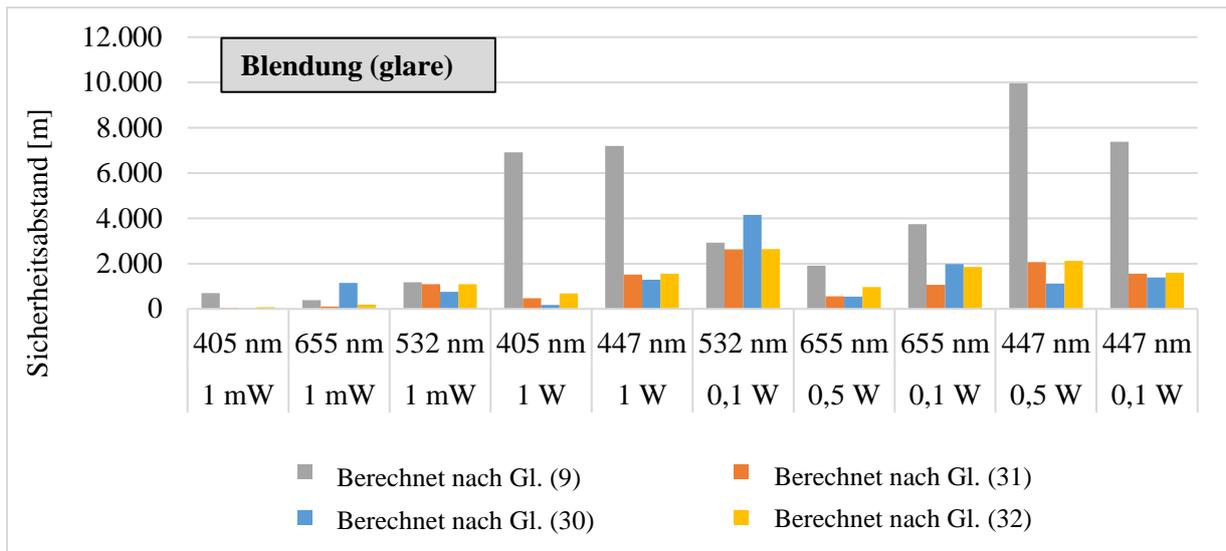


Abb. 27: Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsmodelle anhand des Sicherheitsabstandes für die **Blendung** bei einer Scheibentransmission von 90 %. Neben der einfachen geometrischen Berechnung (Gleichung 9) werden die Sicherheitsabstände zum Vergleich auch mittels verschiedener Verfahren zur Berücksichtigung aller betrachteten Umgebungsfaktoren inkl. der Wellenabhängigkeit berechnet.

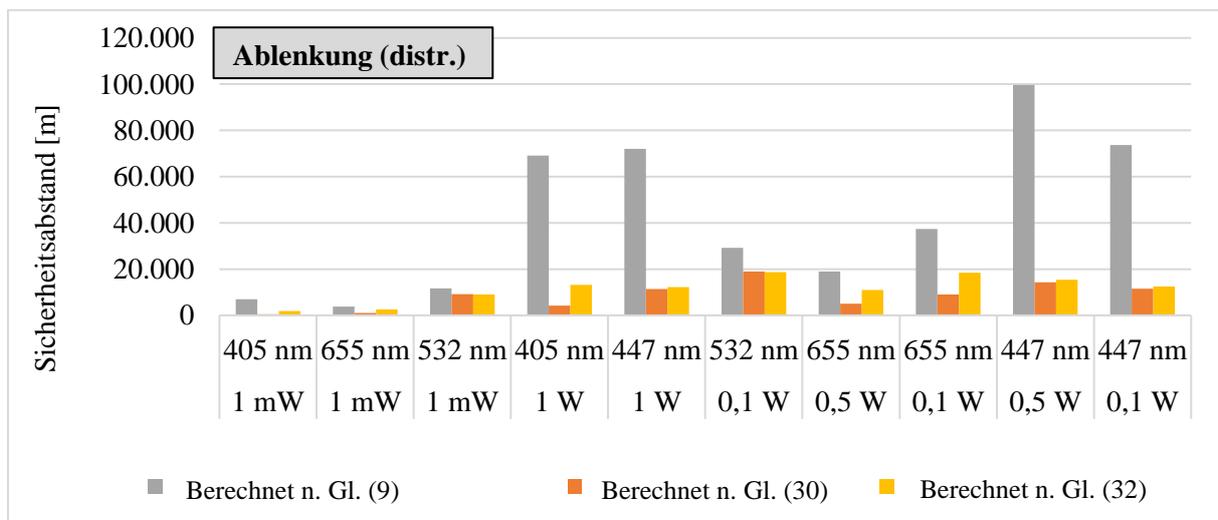


Abb. 28: Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsmodelle anhand des Sicherheitsabstandes für die **Ablenkung** bei einer Scheibentransmission von 90 %. Neben der einfachen geometrischen Berechnung (Gleichung 9) werden die Sicherheitsabstände zum Vergleich auch mittels verschiedener Verfahren zur Berücksichtigung aller betrachteten Umgebungsfaktoren inkl. der Wellenabhängigkeit berechnet. Eine Berechnung nach Gleichung (31) ist aufgrund fehlender Messwerte, wie in Kap. 5.3.5 erläutert, nicht möglich.

In den Abb. 26 - 28 werden die teilweise erheblichen Unterschiede der Sicherheitsabstände deutlich. Die Abweichungen für den Grenzwert der Augenschädigung in Abb. 25 sind dagegen vergleichsweise gering. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Einfluss der $V(\lambda)$ -Kurve nicht berücksichtigt werden musste. Zudem spielt die Absorption der Luft aufgrund der geringen Entfernungen nur eine untergeordnete Rolle. Die Unterschiede zwischen den

verwendeten Berechnungsmodellen innerhalb der Abb. 26 - 28 betragen bis zu 93,9 % (z. B. ID 33 405 nm, 1780 mW, distr.). Den größten Anteil an diesen Abweichungen liefert die Berücksichtigung des $V(\lambda)$ -Faktors. Dieser Faktor liegt beispielsweise für eine Wellenlänge von 405 nm bei 0,0054 und ist selbst bei geringen Bestrahlungsstärken, bei denen es lediglich zur Ablenkung kommt, nicht ausreichend zuverlässig. Der nach Gleichung (32) berechnete Sicherheitsabstand weicht um 81 % (ID 33 405 nm, 1780 mW, distr.) von dem berechneten Wert nach Gleichung (9) ab. Abgesehen von der Wellenlänge 405 nm bei allen betrachteten Grenzwerten und der Wellenlänge 655 nm, zeigen jedoch die mit verschiedenen Verfahren berechneten Sicherheitsabstände überwiegend eine „gute Übereinstimmung“ mit Abweichungen $< 8 \%$.

5.8 Programm zur Berechnung des Sicherheitsabstandes

Ziel des Programms ist die Berechnung des Sicherheitsabstands für Laserpointer mit unterschiedlichen Strahldaten unter Berücksichtigung aller in dieser Studie betrachteten Einflussfaktoren. Als Plattform für das Programm wird Excel gewählt. Die Benutzeroberfläche ist in vier Bereiche unterteilt. Abb. 29 und 30 zeigen den Bereich, der durch den Benutzer verändert werden kann. Er dient

Eingabe	Leistung [mW]	100
	Divergenz x [mrad]	1
	Divergenz y [mrad]	1
	Blendungsart	Blendung
	Wellenlänge	447 nm
	Scheibe	Herculite Glas

Abb. 29: Eingabefenster für die Daten des Laserpointers, der Blendungsart und der Cockpit- bzw. Frontscheibenart in das Programm zur Sicherheitsabstandsberechnung.

Beeinträchtigungsdauer [s]	13,3
Alternativer $V(\lambda)$ -Faktor	0,5
Alternative Atmosphärenabsorption	0,00004
Alternativer Scheibentransmissionsfaktor	1

Abb. 30: Eingabefenster für die Beeinträchtigungsdauer und alternativer Werte für den $V(\lambda)$ -Faktor, die Atmosphärenabsorption und die Scheibentransmission in das Programm zur Sicherheitsabstandsberechnung.

Zudem kann durch die Wahl „Beeinträchtigungsdauer“ in dem Punkt „Blendungsart“ eine selbst bestimmte Beeinträchtigungsdauer gewählt werden, zu welcher der Sicherheitsabstand berechnet werden soll.

Der zweite Bereich (Abb. 31) listet die aus den Eingaben folgenden Faktoren auf. Diese Faktoren sind der aus der Blendungsart jeweils folgende MZB-Wert und die aus der Wellenlänge folgende Scheibentransmission, Atmosphärenabsorption sowie $V(\lambda)$ -Faktor.

Faktoren	Maximal zulässige Bestrahlung der Zone [W/m ²]	0,05
	Transmissionsfaktor der Scheibe	0,6902
	Absorptionskoeffizient der Luft [1/m]	0,00006
	V(λ)-Faktor	0,054292343

Wird eine nicht in der vorliegenden Studie untersuchte Wellenlänge gewählt, übernimmt das Programm jeweils die alternativen Werte, die vom Anwender eingegeben werden müssen.

Abb. 31: Aus den Eingaben resultierende Faktoren des Programms zur Berechnung des Sicherheitsabstandes.

Die berechneten Sicherheitsabstände werden im dritten Bereich angezeigt (Abb. 32). Nach der einfachen Berechnung des Sicherheitsabstands gemäß Gleichung (9), sind drei weitere Sicherheitsabstände unter Berücksichtigung der Absorption der Scheibe, der Atmosphäre und dem V(λ)-Faktor aufgeführt. Anschließend ist der Sicherheitsabstand unter Berücksichtigung aller Faktoren und der daraus berechneten Beeinträchtigungsdauer angegeben. Für alle Ausgaben wird eine begründete Fehlermeldung ausgegeben, wenn keine Daten zur korrekten Berechnung vorhanden sind.

Mit einem Button zur Speicherung aktueller Sicherheitsabstände ist es möglich das Gefährdungspotential zweier Laserpointer miteinander zu vergleichen, bzw. die Auswirkungen einzelner Parameter zu beobachten. Der Vergleich zwischen zwei Laserpointern, die sich nur in der Wellenlänge unterscheiden, wird für den Fall „Blendung“ in Abb. 33 dargestellt. Der Vergleich der verschiedenen

Sicherheitsabstände	Sicherheitsabstand nach Nakagawara [m]	1.595,77
	Sicherheitsabstand mit Transmission der Scheibe [m]	1.325,74
	Sicherheitsabstand mit Absorption der Luft [m]	1.524,43
	Sicherheitsabstand mit V(λ)-Faktor [m]	371,83
	Sicherheitsabstand unter Berücksichtigung aller Faktoren [m]	306,08
	Vergleichswert SD [m]	1.388,22
	Beeinträchtigungsdauer t_{VIS,λ} [s]	0,6044
	Vergleichswert t _{VIS,λ} [s]	2,0

Sicherheitsabstände nach dieser Veränderung der Lasereigenschaften zeigt das erwartete Verhalten. Die Sicherheitsabstände bei einer Wellenlänge von 447 nm (blaue Balken) sind, abgesehen vom berechneten Sicherheitsabstand nach Gleichung (9), alle geringer als die bei einer Wellenlänge von 532 nm (orangefarbener Balken). Während die Auswirkungen der Transmission der Scheibe (7 %) und der Absorption durch die Atmosphäre (1,5 %) gering ausfallen, sind die Auswirkungen des V(λ)-Faktors mit einem Abfall von 78 % deutlich gravierender.

Abb. 32: Aus den Eingaben und Faktoren berechnete Sicherheitsabstände und Beeinträchtigungsdauern des Programms zur Sicherheitsabstandberechnung.

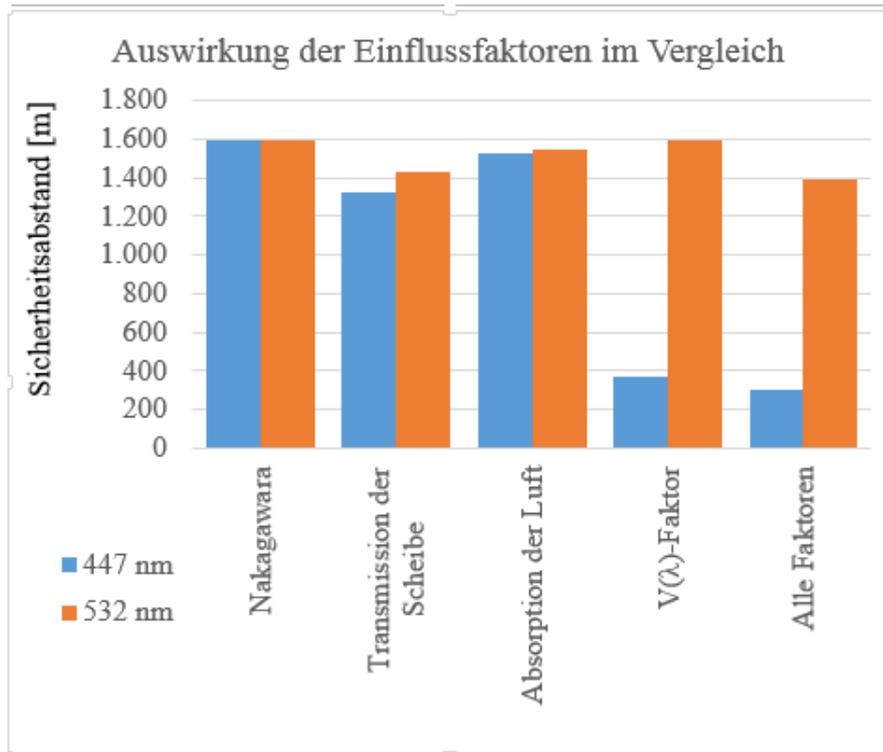


Abb. 33: Vergleich der verschiedenen berechneten Sicherheitsabstände eines hypothetischen Laserpointers (100 mW, 1 mrad, $\lambda_{\text{blau}} = 447 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{grün}} = 532 \text{ nm}$) mittels EXCEL-Programm.

5.9 Präventionsmaßnahmen

Im folgenden Abschnitt werden mögliche Präventionsmaßnahmen vorgestellt und deren Vor- und Nachteile betrachtet. Die Maßnahmen lassen sich in drei Kategorien einteilen.

5.9.1 Aktive Maßnahmen

Unter den aktiven Maßnahmen versteht man Systeme, die erst beim Auftreffen des Laserstrahls reagieren und den Strahlverlauf blockieren (Prinzip s. Abb. 34).

Aktive Laserbrillen reagieren mit Sensoren auf das Laserlicht und können die Strahlpropagation innerhalb von wenigen ms blockieren. Der Schutz wird durch LCD-Farb-Panels realisiert, die die Transmission von Laserlicht bei definierten Wellenlängen verhindern. Dabei passiert der Rest des optischen Spektrums die Brille ungehindert [28]. Ein wesentlicher Nachteil des Laserschutzes durch diese Art von Spezialbrillen ist darin begründet, dass diese Brillen permanent während des Arbeitseinsatzes zu tragen sind, um sich vor

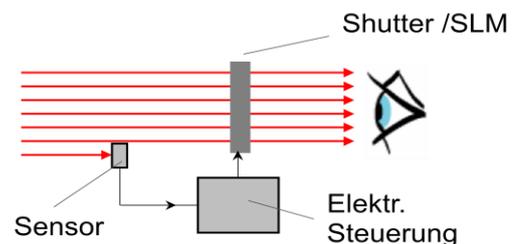


Abb. 34: Vereinfachtes Prinzip einer aktiven Laser-Schutzeinrichtung.

selten stattfindenden Laserattacken zu schützen. Hinzu kommt, dass das Tragen derartiger Schutzbrillen trotz Transmission des gesamten Restspektrums zu einem gestörten Sehempfinden führt (z. B. Einschränkung des Sichtfeldes, veränderte Farbwiedergabe etc.). Bei vielen Berufsgruppen würde das Tragen der Brille zu Beeinträchtigungen der auszuführenden Tätigkeit führen. Die Hinnahme dieser und anderer Beeinträchtigungen steht während der Ausübung der beruflichen Tätigkeit offensichtlich nicht im Verhältnis zum möglichen Nutzen, den die Brillen bei einer eventuellen Attacke hätten. Daher wird diese aktive Form einer Schutzmaßnahme nur in wenigen Ausnahmefällen zum Einsatz kommen.

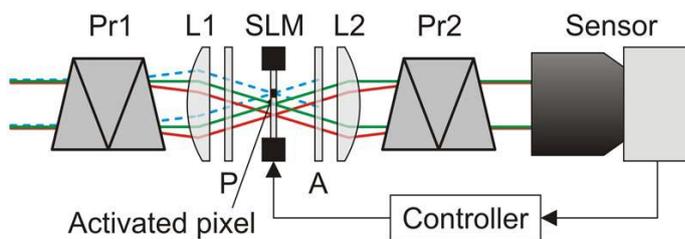


Abb. 35: Räumlicher und spektraler Filter zur Unterdrückung einer Überexposition durch eine räumlich begrenzte Quelle [29].

Ein ähnlicher Ansatz wird auf anderem Wege mit einem so genannten räumlichen Licht-Modulator („Spatial Light Modulator SLM“) verfolgt [29]. Der einfallende Strahl wird mit einem Prisma auf einem SLM abgebildet. Dort kann die Wellenlänge des Laserstrahls auf einer begrenzten Fläche des Sichtfeldes durch Änderungen der Polarisation abgeblockt werden.

Dadurch gehen bei der Blendung prinzipiell keine Informationen im Bild verloren. Das Funktionsprinzip ist in Abb. 35 skizziert. Diese Methode ist wegen des komplexen Aufbaus und den räumlichen Rahmenbedingungen bis heute nur für den Einsatz in optischen Abbildungssystemen geeignet. Ein großflächiger Einsatz, beispielsweise an Cockpit-Frontscheiben, ist bis heute nicht möglich.



Abb. 36: Electronic LASER Eye Protector [30].

Zum Ende der Laufzeit dieses DGUV-Vorhabens wurde unter der Bezeichnung „Electronic LASER Eye Protector“ [30, 31] die Neuentwicklung einer aktiven Laserschutzbrille präsentiert (Abb. 36). Hierbei handelt es sich um einen Prototypen, zu dem keine näheren technischen Daten und keine Angaben zum Funktionsprinzip vorliegen.

5.9.2 Passive Maßnahmen

Passive Schutzsysteme ändern ihre Eigenschaften nicht erst durch das Auftreffen eines Laserstrahls. Sie blockieren bzw. dämpfen permanent die Strahlpropagation mit bestimmten Eigenschaften. Konventionelle Laser-Schutzbrillen (Abb. 37) sind heute für alle Laserwellenlängen erhältlich, sind jedoch für die hier vorliegende konkrete Problemstellung nur bedingt einsetzbar.

Dielektrische Filter können so gefertigt werden, dass kleine Wellenlängenbereiche von wenigen 10 nm reflektiert und nur das restliche sichtbare Spektrum transmittiert wird. Dies wird durch konstruktive und destruktive Interferenzeffekte erreicht. Durch Aufbringen mehrerer dielektrischer Schichten auf einem Substrat (z. B. Glas) lässt sich auch mehr als nur ein Wellenlängenbereich reflektieren. Nachteil dieser Technik sind zum einen die hohen Kosten für die Beschichtung und zum anderen die Winkelabhängigkeit der Reflexion. Die Winkelabhängigkeit führt dazu, dass ein zuverlässiger Schutz vor Laserstrahlung nur unter einem festgelegten Winkel bzw. Winkelbereich gegeben ist. Zur Verringerung der Winkelabhängigkeit ist es jedoch möglich, die reflektierenden Wellenlängenbereiche zu vergrößern, was wiederum zu einer verringerten Tageslichttransmission und einem verschlechterten Farbeindruck führt.



Abb. 37: konventionelle Laserschutzbrillen für universellen Einsatz in der Lasertechnik.

Während der Projektlaufzeit wurde vom Schweizer Unternehmen *RUAG AG* eine Laserschutzbrille auf dem Prinzip des dielektrischen Filters entwickelt (Abb. 38) und erstmals im Herbst 2013 vorgestellt [32]. Diese Brille mit der Bezeichnung „*MultiLaser Protector*“ ist heute als Serienprodukt auf dem Markt verfügbar und bietet gleichzeitigen Schutz vor 7 typischen Laserpointer-Wellenlängen (Abb. 39). Dieses Produkt ist gemäß DIN EN 207 geprüft und verfügt über eine „vergleichsweise gute“ Tageslichttransmission von ca. 36 % [33]. Erste Erfahrungsberichte aus Praxiseinsätzen, beispielsweise bei der Polizei, sind sehr vielversprechend.



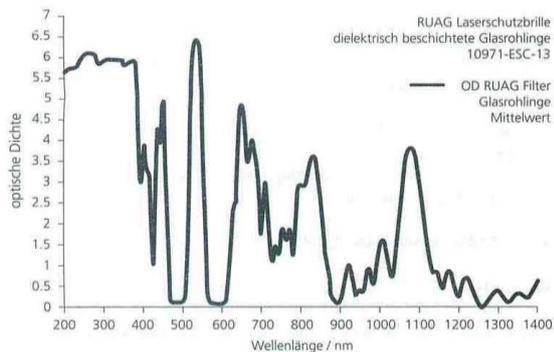
Abb. 38: Neuartige spezielle Laserpointer-Schutzbrille Typ „*MultiLaser Protector*“ beim Helikopter-Einsatz [32].

Bei **Absorptionsfiltern** sind die absorbierenden Wellenlängenbereiche wesentlich größer. Grund für die Absorption sind Eigenfrequenzen der Polarisation im Material, die im sichtbaren Spektrum liegen. Die Absorption der Laserstrahlen sorgt für eine Erwärmung des Materials. Die Erwärmung im Leistungsbereich bis 25 W/m^2 („inj.“) ist allerdings zu vernachlässigen, da die Expositionsdauern klein sind, und laut Hersteller typische Temperaturen bis

ca. 180°C zugelassen sind. Durch das breite Absorptionsspektrum ist ein großflächiger Schutz mit Absorptionsfiltern allerdings nicht sinnvoll, da der gesamte Farbeindruck empfindlich gestört wird. Dies kann im Flug- bzw. Fahrzeugverkehr zu einem erheblichen Sicherheitsrisiko führen.

- Die RUAG MultiLaser Protector Schutzbrille ist mit der erforderlichen Kennzeichnung ausgestattet. Erläuterung der Kennzeichnung:
405 DIR LB3 & 445 DIR LB3 & 532 DIR LB6 & 635 DIR LB2 & 650 DIR LB3 & 808 LB2 & 1064 LB3 RUAG S CE
- D: Betriebsart – D=Dauer / I=Impuls / R=Riesenimpuls / M=Modengekoppelter Impuls
- 405: Wellenlänge der geschützten Strahlung in Nanometer (nm)
- LB: Schutzstufe gemäss DIN EN 207 (LB1, LB2, ... L1B0)
- S: erhöhte mechanische Festigkeit nach DIN EN 166

Filter – Durchlässigkeit



Lichttransmissionsgrad D65₀: 36%

Lichttransmissionsgrad D65₀: 36%

Schutzstufen

Wellenlänge [nm]	Schutzstufe (LB) nach EN 207	
405	DIR LB3	geprüft
445	DIR LB3	geprüft
532	DIR LB6	geprüft
635	DIR LB2	geprüft
650	DIR LB3	geprüft
808	DIR LB2	geprüft
1064	DIR LB3	geprüft

Abb. 39: „MultiLaser Protector“ schützt gleichzeitig vor sieben verschiedenen Laserpointerwellenlängen; Auszug aus [33].

Zwei typische Transmissionsspektren der beiden oben genannten optischen Filterarten sind zur Veranschaulichung der Beschreibung in den Abb. 40 und 41 gegenübergestellt.

Transmission dielektrischer Filter

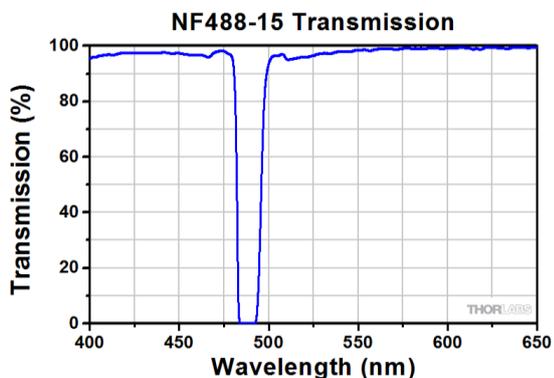


Abb. 40: Transmissionskurve des sichtbaren Spektrums eines dielektrischen Filters [34].

Transmission Absorptionsfilter

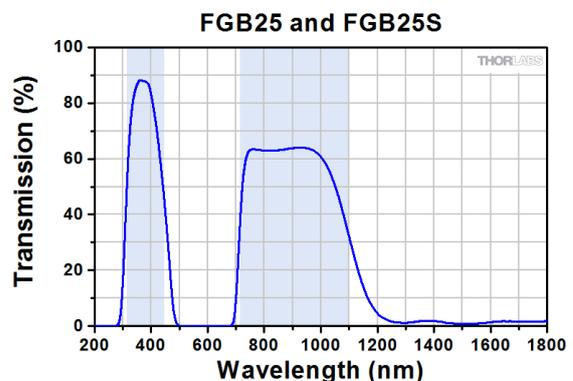


Abb. 41: Transmissionskurve des sichtbaren Spektrums eines Absorptionsfilters [35].

Je nach Anwendungsbereich gibt es **Laserschutzbrillen**, die auf dem Prinzip des dielektrischen Filters oder des Absorptionsfilters basieren. Derartige Brillen sind für die Anwendung im Straßen- und Luftverkehr aufgrund der oben genannten Ausführungen nur bedingt geeignet. Ein dauerhaftes Tragen weist ähnliche Nachteile auf wie großflächige



Abb. 42: „Blendschutzflip“ schützt vor „grüner“ Laserpointerstrahlung [36].

Absorptionsfilter. Das Aufsetzen der Brille im Falle einer Laserpointerattacke ist in vielen Fällen unwirksam, weil die Blendung bereits vor dem Aufsetzen erfolgt sein kann. Ausnahmen bestehen in Sonderfällen, in denen bereits vor Beginn der Tätigkeit bekannt ist, dass mit Laserpointerattacken zu rechnen ist. Beispielhaft seien Helikoptereinsätze der Polizei in geringer Höhe über Demonstrationen oder der Einsatz von Bodenpersonal bei Demonstrationen erwähnt.

Als Beispiele für handelsübliche Laserschutzbrillen speziell für Laserpointer seien Produkte der Hersteller Laservision GmbH & Co. KG, Gentex Corporation/USA und RUAG AG/CH erwähnt. Sowohl Laservision (Abb. 42) als auch Gentex (Abb. 43) nutzen bei ihren Modellen (soweit bekannt) Absorptionsfiltertechnik. Die optischen Wahrnehmungen sind beim Tragen der Brillen im Hinblick auf die Tageslichttransmission und Farbwahrnehmung inhärent beeinflusst.

Ein Nachteil sämtlicher oben genannter Arten von Laserschutzbrillen besteht darin, dass das Tragen der Brille bei vielen der hier betrachteten Berufsgruppen zu einer Beeinträchtigung der auszuführenden Tätigkeit führt. Es muss auch erwähnt werden, dass das Ablesen von farbigen Instrumenten, Displays oder Monitore eingeschränkt ist, wenn die Farbe der Laserpointerwellenlänge als optische Information darin enthalten ist (z. B. LEDs).



Abb. 43: Laserschutz-Helmvisiere von Gentex Corporation USA [37].

5.9.3 Organisatorische Maßnahmen

Organisatorische Maßnahmen sind losgelöst von technischen Maßnahmen zur Absorption oder vollständigen Blockierung des Laserstrahls. Sie umfassen die Aufklärung von Personen betroffener Berufsgruppen sowie die Sensibilisierung der Bevölkerung für mögliche Folgen von Laserpointerattacken. Die Aufklärung von potentiell gefährdeten Personen stellt eine

vergleichsweise kostengünstige und effektive Präventionsmaßnahme dar. Personen, die aus einer hellen Lichtquelle bestrahlt, aber nicht direkt geblendet werden, neigen dazu die Quelle orten zu wollen. Trifft der Laserstrahl bei dieser Suche nach der Quelle das menschliche Auge, kann es zu unterschiedlichen Blendeffekten kommen (im „worst-case“ sogar zur Augenschädigung). Je nach Berufsgruppe werden in der Aus- und Weiterbildung unterschiedliche Verhaltensregeln vermittelt. Beispielsweise werden im Fall von Piloten entsprechende Szenarien bereits im Flugsimulator durchgeführt und einfache Abwehrmaßnahmen trainiert (z. B. Abwenden, Verdecken der Blendungsrichtung mit der Hand).

Die Aufklärung der Bevölkerung ist ein wichtiger Schritt bei der organisatorischen Prävention. Eine Vielzahl von überwiegend jugendlichen Tätern gibt nach Laserpointerattacken an, sich nicht über die Gefahren im Klaren gewesen zu sein. Daher muss sowohl über die Gefahren und damit verbundenen unter Umständen katastrophalen Folgen als auch über die strafrechtlichen Konsequenzen verstärkt aufgeklärt werden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass durch die Aufklärungsarbeit nicht zusätzlich ein unerwünschter „Nachahmereffekt“ entsteht. Flächendeckende Aufklärungskampagnen gab es in der Vergangenheit sowohl in Australien als auch in Skandinavien. Obwohl die Kampagnen sehr ähnlich sind, führten sie in Skandinavien zu einem Rückgang der Attacken auf nahezu null Prozent, während sich die Angriffe in Australien fast verdoppelten [38].

Die Ergreifung der Täter mit Hilfe spezieller Kamertechnik zur Ortung der Angreifer und Identifikation des Laserpointers dient zusätzlich auch der Abschreckung. Eine mögliche Methode ist die Verwendung von so genannten „Laser Event Recorder“ (LER) der Firma Optra [39]. Der LER speichert die spektralen Eigenschaften des Laserpointers; zusätzlich wird mit Hilfe von GPS der Standort des Angreifers ermittelt. Aus Kostengründen ist diese Technik jedoch ausschließlich für die Luftfahrt interessant.

5.10 Feldversuch in Kooperation mit der Bundespolizei-Fliegerstaffel am Beispiel von Helikoptern

Aufgrund der besonderen Gefährdung von Helikopterpiloten durch Laserpointerattacken wurden Feldversuche mit dieser repräsentativen Berufsgruppe durchgeführt. Dazu erfolgte in Zusammenarbeit mit der Bundespolizei-Fliegerstaffel vor Ort in Fuhlendorf eine Kampagne mit unterschiedlichen Tests unter realen Bedingungen. Die Ergebnisse sind grundsätzlicher Natur und lassen sich auf weitere spezifische Berufsgruppen dieses Vorhabens übertragen. Für die Feldversuche wurden in einer Vorbereitungsphase am Standort des Antragstellers verschiedene Arbeiten durchgeführt.

5.10.1 Voruntersuchungen zur Eignung von Filterfolien zum Schutz vor Laserpointerbestrahlung in Helikoptern

Die Berufsgruppe „Helikopter-Piloten“ ist bezüglich Laserpointerattacken besonders gefährdet. Dies resultiert zum einen aus großflächigen Bodenfenstern im Cockpit, durch die Laserstrahlung ungehindert in das Innere der Kabine gelangen kann (s. Abb. 44). Zum anderen sind Helikopter-Piloten besonders dadurch gefährdet, dass häufig bei Einsätzen mit Flugmanövern in geringer Höhe und geringer Geschwindigkeit (beispielsweise bei Demonstrationen)

die vom Boden gerichtete Laserstrahlung im Cockpit noch eine hohe (unter Umständen „gefährliche“) Bestrahlungsstärke aufweisen kann. Es wurde daher untersucht, inwieweit möglicherweise handelsübliche Filterfolien aus der Beleuchtungstechnik einen ausreichenden Schutz bei akzeptabler Tagessichttransmission bieten können. Es ist offensichtlich, dass diese einfache Form einer passiven Schutzvariante nur eine bedingte vorübergehende Problemlösung darstellen kann bis technische Weiterentwicklungen zukünftig zu einem umfassenderen Schutz führen können. Es gibt zurzeit unterschiedliche Entwicklungen (beispielsweise Folien aus „Meta-Materialien“ [40]), die sich (noch) im Forschungsstadium befinden, aber bereits vielversprechende Ergebnisse zeigen.



Abb. 44: EC 135 Polizei-Helikopter bei der Bundespolizei-Fliegerstaffel in Fuhlendorf. Links: durch Bodenfenster (rote Pfeile) kann Laserpointerstrahlung ungehindert in das Cockpit gelangen; rechts: Versuchsaufbau mit verschiedenen Laserpointern vor dem Cockpit.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde aus einer Auswahl von mehreren hundert Filterfolien (Typ „Lee-Filter“, s. Abb. 45) zwei bezüglich der „grünen“ Laserpointerwellenlänge geeignete Folientypen ausgewählt und optisch vermessen. Zusätzlich wurde zum Vergleich von Ergebnissen ein handelsübliches spezielles Laserschutzfenster mit hoher Strahlungsabsorption bei 532 nm („grün“) in die Studie mit einbezogen.



Abb. 45: Filterfolien (Typ „Lee-Filter“) für verschiedene Anwendungen in der Beleuchtungstechnik.

Die ausgewählten Filterfolien mit den Bezeichnungen „Lee Filter 779“ sowie „Lee Filter 158“ zeichnen sich sowohl durch hohe Tageslichttransmission (Filter 779: 38,8 %; 158: 29,9 %) als auch durch das Absorptionsmaximum bei der Wellenlänge 532 nm aus. Der handelsübliche Laserschutzfilter Typ „P5N01“ (Laservision GmbH & Co. KG) aus 3 mm-Kunststoff weist bei 532 nm eine hohe Absorption auf und verfügt gleichzeitig über eine Tageslichttransmission von 38 %. In Abb. 46 ist das Transmissionsspektrum der untersuchten Filterfolien sowie Schutzfilter (zum Vergleich) dargestellt. In Tab. 15 sind die

Transmissionseigenschaften der Folien sowie Schutzfilter für die bekannten Laserpointerwellenlängen zusammengefasst.

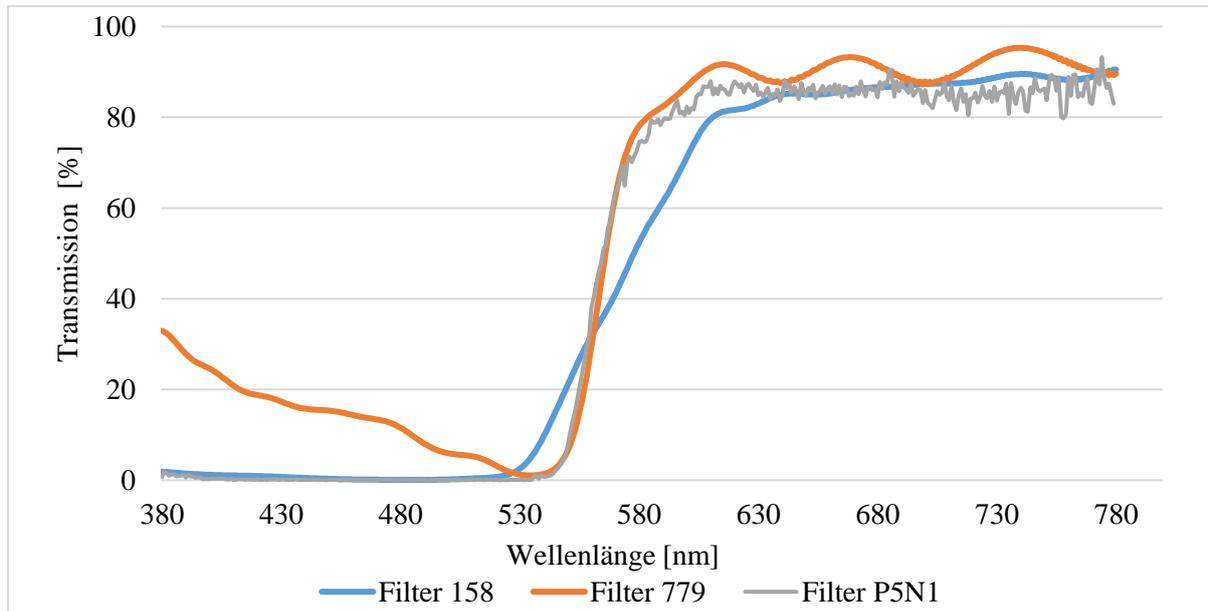


Abb. 46: Transmissionsspektrum der Filter 779, 158 [41] und P5N01.

	405 nm	447 nm	532 nm	655 nm
Filter 779	22,6 ± 0,44 %	15,8 ± 0,39 %	0,99 ± 0,024 %	90,4 ± 0,72 %
Filter 158	1,1 ± 0,07 %	0,45 ± 0,45 %	3,00 ± 0,22 %	83,0 ± 0,57 %
P5N01	OD 4	OD 4	OD 6	88,9 ± 1,6 %

Tab. 15: Transmission der Filter 779 (Lee-Filter), 158 (Lee-Filter) und P5N01 (Laservision) bei verschiedenen Wellenlängen. Die geringe Transmission des Schutzfilters P5N01 bei < 550nm konnte mit der verfügbaren Messtechnik nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit gemessen werden. Daher werden die Herstellerangaben verwendet.

Die Ergebnisse in Tab. 15 und Abb. 46 legen nahe, dass die Folien (Typ 779 und 158) zum Schutz vor der Blendung von verschiedenen Laserpointern grundsätzlich geeignet sind. Von besonderer Bedeutung ist der Schutz vor der am häufigsten genutzten grünen Laserwellenlänge, von der auf Grund der großen spektralen Augen-Empfindlichkeit die größte Blendefahr ausgeht. Ausgehend von Normen und Vorschriften ist die Verwendung von Filterfolien als Schutz vor Augenschädigung durch Laserstrahlung nicht zulässig; dies gilt jedoch nicht für den Schutz vor Blendung. Wenn auch Augenschädigungen bei Helikopterpiloten nicht ausgeschlossen werden können, so geht jedoch die größte Gefahr von der Blendung und dessen Nachwirkung aus. Der Filter P5N01 eignet sich sowohl zum Schutz vor Blendung als auch zum Schutz vor Verletzungen des Auges (gilt für aktuell verfügbare Strahlleistungen von Laserpointern bei Laserpointerwellenlängen < 550 nm). Aufgr und der großen optischen Dichte des Filters P5N01 (für $\lambda < 550$ nm) erfordert die

Transmissionsmessung für Werte $\ll 10^{-2}$ (d. h. OD 2) eine empfindliche hochauflösende Messtechnik, die nicht zur Verfügung stand. Aus diesem Grund handelt es sich in Tab. 15 für den Filter P5N01 um Herstellerangaben. (Hinweis: Die optische Dichte „OD“ ist definiert als der logarithmische Wert der Leistungsabschwächung).

Die Auswirkungen der untersuchten Filter auf die Sicherheitsabstände eines repräsentativen Laserpointers mit 100 mW und 0,5 mrad bei verschiedenen Wellenlängen sind in Tab. 16 zu sehen. Betrachtet wird beispielhaft der Grenzwert der Blendung („glare“). Diese Ergebnisse zeigen, dass die Folien zwar einen verbesserten, aber nicht ausreichenden Schutz vor Blendeinwirkungen bieten.

	405 nm	447 nm	532 nm	655 nm
Ohne Filter	232 m	728 m	3005 m	964 m
Filter 779	111 m	293 m	316 m	917 m
Filter 158	25 m	50 m	547 m	879 m
P5N01	(2,35 m)	(7,43 m)	(3,19 m)	909 m

Tab. 16: Berechnete Sicherheitsabstände für die Blendwirkung „glare“ in Abhängigkeit verschiedener Wellenlängen und Filter (Laserpointer: 100 mW, 0,5 mrad).

Das Laserschutzfenster P5N01 bietet einen ausreichenden Schutz vor der Strahlung, ist jedoch im Bodenbereich eines Helikopters nur mit Aufwand an die 3D-geformte Verglasung anzupassen (eine feste Installation wäre nur nach Genehmigung durch eine Aufsichtsbehörde möglich). Die Filter sind nur in Situationen geeignet, in denen vermehrt mit Laserpointerattacken zu rechnen ist, da die Einschränkung des Sehempfindens nicht zu vernachlässigen ist. Die Eignung der Filter im Flugbetrieb wird in dem nachfolgend beschriebenen Feldversuch (Kap. 5.10.2) untersucht. Den eingeklammerten Werten in Tab. 16 liegen die Herstellerangaben für die Transmission zugrunde.

5.10.2 Voruntersuchungen zur Ermittlung von typischen Blenddauern

Die im Labor durchgeführten Untersuchungen zu Blendwirkungen von Laserpointern konnten die reale Situation nur bedingt berücksichtigen. So konnte dort nur der „statische Fall“ simuliert werden, bei dem die Position des Pointers und des Detektors im Raum fixiert waren. In der Praxis werden Laserpointer jedoch handgeführt, wodurch es zu einem zeitlich veränderten Auftreffpunkt kommt. Dieser „dynamische Effekt“ mit der Folge eines zeitlich veränderten Verlaufs der Laserbestrahlung am Auge wurde bisher nicht berücksichtigt.

Im Außenbereich des Laserzentrums FH Münster wurde eine Messstrecke über mehrere 10 m aufgebaut, in der die Augenpupille durch eine ortsfeste 7 mm-Blende mit einem dahinter angeordneten Leistungsdetektor simuliert wurde. Die Bestrahlung erfolgte mittels handgeführtem Laserpointer „ID 29“ (532 nm/21,8 mW) aus unterschiedlichen Entfernungen durch verschiedene Testpersonen. Das zeitabhängige Leistungssignal wurde mittels digitalem Oszilloskop Typ „PicoScope 3405A“ gespeichert.

Die Auswertung dieser Voruntersuchungen in Abhängigkeit unterschiedlicher Distanzen „Laserpointer/Blende“ zur Vorbereitung des Feldversuches ist in Abb. 47 dargestellt. Darin ist in Abhängigkeit der Entfernung sowohl die Bestrahlungsdauer der Blende als auch die Anzahl von Treffern je 10 Sek. dargestellt. Es zeigt sich, dass in allen Fällen die Bestrahlungsdauer deutlich < 250 ms beträgt und es fast ausnahmslos zu < 12 Treffern pro Sek. kommt. Nach einer Entfernung von 200 m reduziert sich die Bestrahlungsdauer auf < 10 ms bei < 2 Treffern pro Sek. Es sei deutlich erwähnt, dass sich diese Resultate auf den verwendeten Test-Laserpointer mit den oben genannten Strahldaten beziehen und nicht beliebig auf andere Laserpointer übertragen werden können. Jedoch gibt dieses Resultat nützliche Hinweise für die Übertragung auf den geplanten Feldversuch (in diesem kommen zusätzliche dynamische Effekte hinzu, da dort auch die Pupillenblende nicht mehr ortsfest installiert, sondern am bewegten Helikopter fixiert ist).

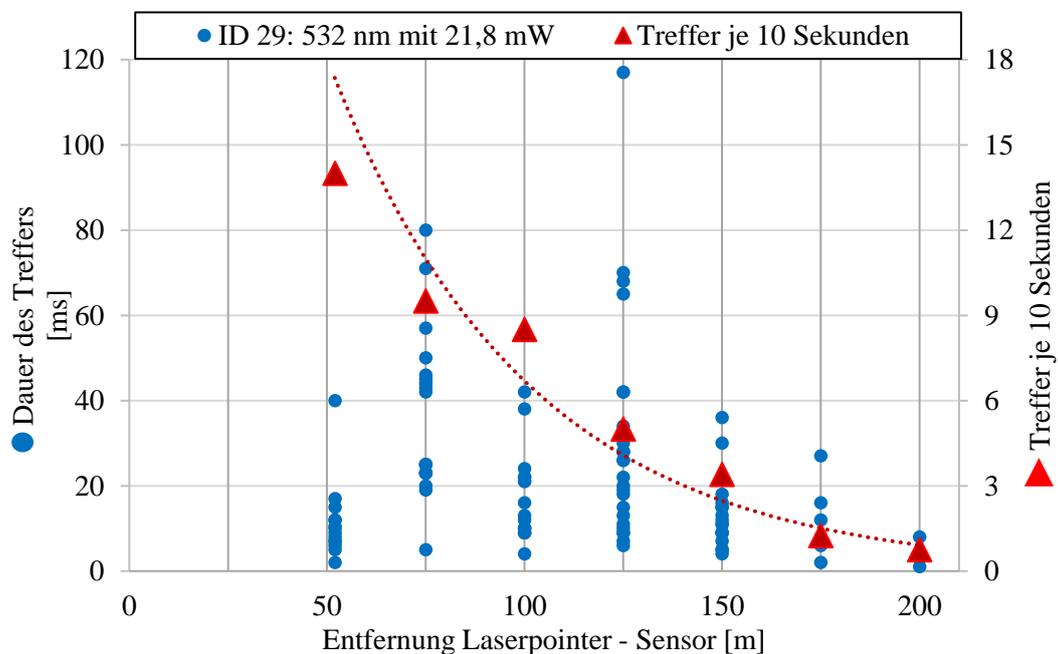


Abb. 47: Bestrahlungsdauer und Anzahl von Treffern auf eine ortsfeste 7 mm-Blende durch einen handgeführten Laserpointer aus unterschiedlichen Distanzen.

5.10.3 Messung von Strahlleistungen im Helikopter-Cockpit

Leistungsmessungen im Cockpit eines EC 135-Helikopters wurden mit sechs verschiedenen Laserpointern durchgeführt. Ausgewählt wurden drei Laserpointer mit Leistungen im Bereich weniger Milliwatt und drei Laserpointer im Bereich weniger hundert Milliwatt. Aus Gründen der Lasersicherheit vor Ort wurde auf die Untersuchung mit Laserpointern > 1 W verzichtet. In diesen beiden repräsentativ gewählten Leistungsklassen sind jeweils die Pointerfarben Rot (655 nm), Grün (532 nm) und Blau (405 nm, 447 nm) vertreten. Die Messungen wurden am Boden hinter der Frontscheibe innerhalb des Cockpits durchgeführt. Dafür wurde ein

Leistungsmesskopf mit einer 7 mm-Blende (Augenpupille) versehen. Einen Eindruck von dem Feldversuch vor Ort bei der Bundespolizei-Fliegerstaffel vor Ort in Fuhlendorf vermittelt Abb. 48.

Die Bestrahlungsversuche mit Laserpointern der beiden Leistungsklassen wurden nacheinander in verschiedenen Entfernungen durchgeführt. Zur Erzielung reproduzierbarer Ergebnisse wurden die Pointer auf einer speziellen Stativhalterung fixiert, die auch bei größeren Distanzen ein Anvisieren der Blende vereinfacht (Abb. 49). In einer Distanz bis zu 50 m erfolgten die Messungen in 10 m-Schritten; für größere Entfernungen wurden diese Distanzschritte deutlich erhöht.



Abb. 48: Leistungsmessungen im Cockpit eines EC 135-Helikopters während Feldversuchen bei der Bundespolizei-Fliegerstaffel in Fuhlendorf.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abb. 50 zusammenfassend dargestellt. Um die Auswirkungen von typischen betriebsbedingten Leistungsschwankungen zu eliminieren, wurde nach jeder Leistungsmessung im Helikopter die zugehörige Leistung direkt am Laserpointer gemessen und ggf. auftretende Schwankungen in der Auswertung berücksichtigt. Die schwarz dargestellte Gerade in Abb. 50 stellt den Grenzwert für eine Augenschädigung dar. Somit lässt sich aus dem Schnittpunkt der jeweiligen Messkurve mit dieser Geraden der Sicherheitsabstand SD ableiten.



Abb. 49: Laserpointerhalterung auf Stativ zur Durchführung der Leistungsmessungen

Zur vergleichenden Bewertung der Messresultate wurden die Sicherheitsabstände für die Augenschädigung bei Verwendung der in Abb. 50 aufgeführten Laserpointer auch berechnet (dazu wurden Divergenz und Strahlleistung nicht aus Tab. 1 verwendet, sondern erneut gemessen; dies war erforderlich, da bekanntermaßen „low-cost-Laserpointer“ über eine längere Betriebsdauer während der gesamten Projektlaufzeit ihre Strahleigenschaften deutlich verändern können). Die daraus resultierenden berechneten Sicherheitsabstände SD für den Grenzwert der Augenschädigung („inj.“) sind in Tab. 17 aufgelistet.

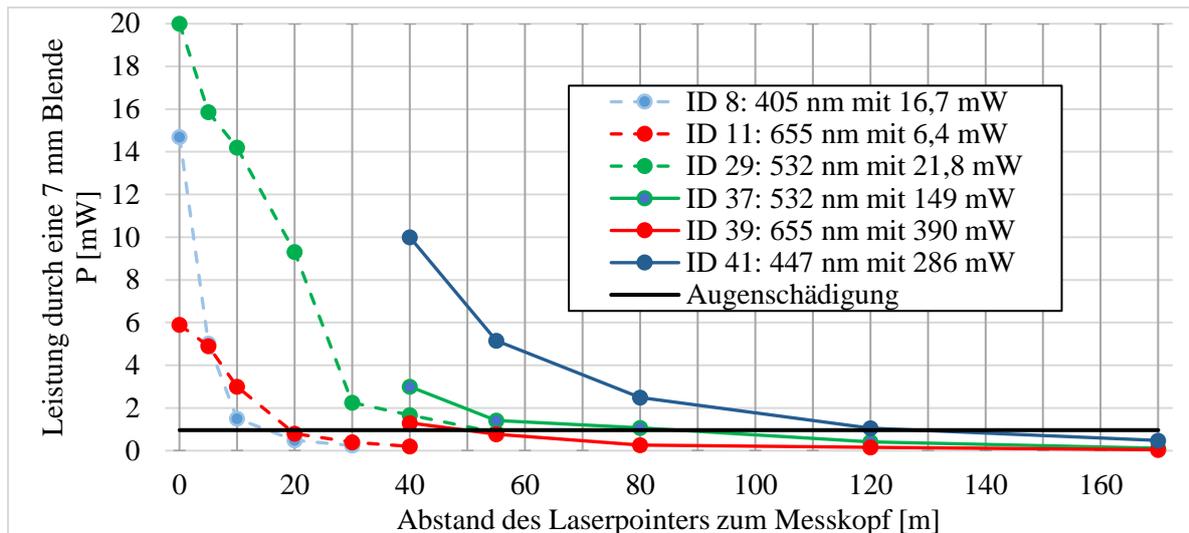


Abb. 50: Leistungsmessungen im Helikoptercockpit hinter einer 7 mm-Blende für verschiedene Laserpointer in unterschiedlichen Entfernungen zwischen Laserpointer und Cockpit.

ID	8	11	29	37	39	41
$SD_{inj.}$ [m]	18,3	23	57,8	75,5	58,7	136

Tab. 17: Berechnete Sicherheitsabstände mittels Gleichung (30) für den Fall „Augenschädigung“ („inj.“) unter Verwendung von Strahlparametern während des Feldversuches.

Ein Vergleich der berechneten Werte für den Sicherheitsabstand SD aus Tab. 17 mit den entsprechenden gemessenen Werten aus Abb. 50 (Schnittpunkte mit der schwarz dargestellten Geraden) zeigen eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

Um nicht nur einen Vergleich zwischen Theorie und Praxis bezüglich des Sicherheitsabstandes für die Augenschädigung zu ermöglichen, wurde der in Abb. 50 dargestellte gemessene funktionale Zusammenhang zwischen Leistung und Distanz auch für sämtliche Laserpointer berechnet (Abb. 51). Ein Vergleich zwischen den gemessenen Werten (Abb. 50) und den berechneten Werten (Abb. 51) ist offensichtlich nur für kleinere Sicherheitsabstände sinnvoll. Bei größeren Distanzen nimmt die Messunsicherheit aufgrund der geringen Bestrahlungsstärke sowie Ausrichten des Pointers auf die 7 mm-Blende deutlich zu.

Bei geringen Distanzen stellt sich der Vergleich wie folgt dar: Unterschiede sind vor allem in den verschiedenen Strahlprofilen der Laserpointer begründet. So weisen Laserpointer mit vergleichsweise homogenem, „gut sichtbarem Strahl“ (ID 29, ID 37, ID 41) nur geringe Unterschiede zwischen gemessener und berechneter Leistung durch die 7 mm-Blende bei verschiedenen Entfernungen auf. Hingegen führen Laserpointer mit „chaotischem“ Strahlprofil (Abb. 10) sowie schlechter Sichtbarkeit (ID 8, ID 11, ID 39) zu einer wesentlich größeren Abweichung zwischen Theorie und Praxis.

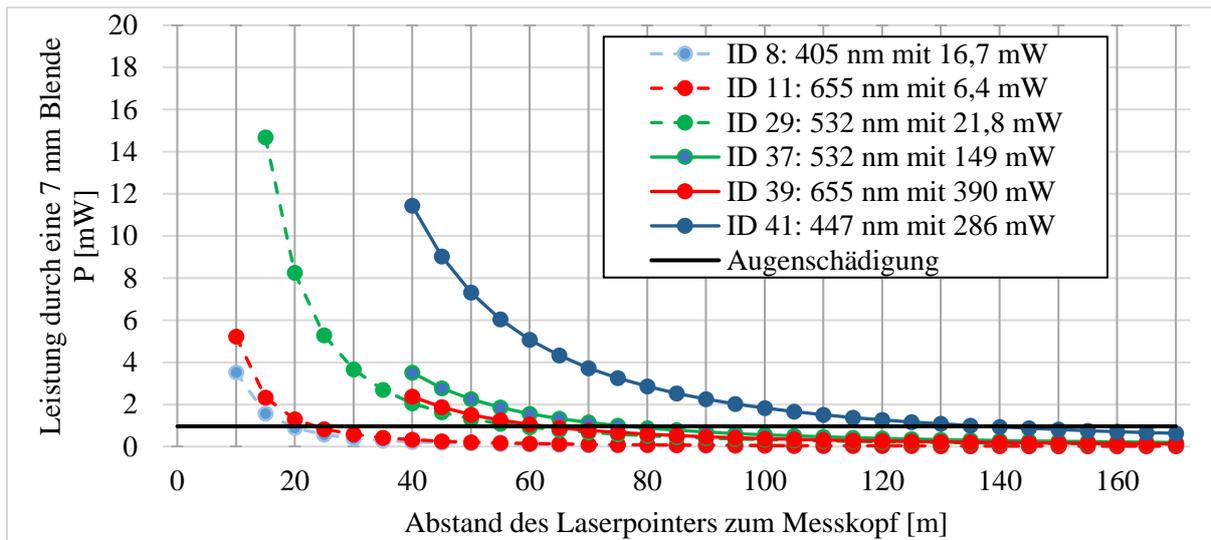


Abb. 51: Leistungsberechnungen nach Gleichungen (30) in Abhängigkeit der Entfernung zur Überprüfung der gemessenen Leistungswerte im Feldversuch (Helikoptercockpit mit 7 mm-Messblende). Der $V(\lambda)$ -Faktor wird nicht berücksichtigt.

5.10.4 Ermittlung von typischen Blenddauern während des Helikoptereinsatzes

Zur Untersuchung des zeitlichen Verlaufs von Blendattacken unter realen Bedingungen (Abb. 53) wurde in einem EC 135-Helikopter ein Sensor zur Leistungsmessung (inkl. 7 mm-Blende) hinter der Cockpitscheibe installiert. Die gezielte Bestrahlung erfolgte mittels „grünem“ Laserpointer (Typ ID 29, 532 nm mit 21,8 mW), der aus der Hand von Testpersonen geführt wurde. Bei dieser nachgestellten Laserpointerattacke wurde der Helikopter im Schwebeflug aus ca. 500 m Entfernung bestrahlt. Das mittels Oszilloskop während des Helikoptereinsatzes aufgenommene und gespeicherte Signal zeigt Abb. 52.

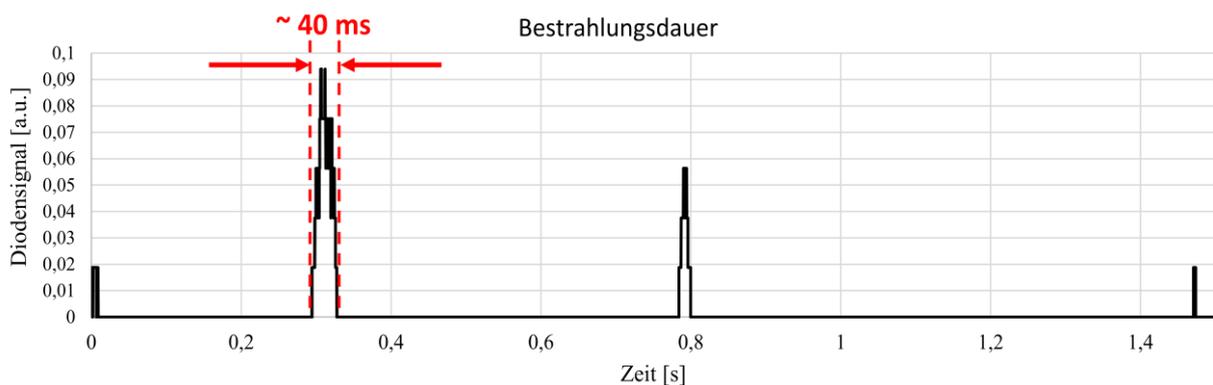


Abb. 52: Messresultate zur Bestrahlungsdauer eines EC 135-Helikopters bei handgeführtem Laserpointer. Die Messung erfolgte innerhalb des Cockpits während des Schwebefluges (Laserpointer: 532 nm mit 21,8 mW).

Diese Untersuchung wurde während der Dunkelheit bei hoher Luftfeuchtigkeit durchgeführt (Abb. 53). Die beteiligten Testpersonen haben berichtet, dass es für sie unerwartet schwierig war, den Helikopter in der oben genannten Distanz mit Laserstrahlung zu treffen. Dies galt

umso mehr bei ausgeschalteter Helikopterbeleuchtung. Abb. 52 zeigt, dass die wenigen elektronisch registrierten Treffer eine Bestrahlungsdauer von wenigen 10 ms aufwiesen.



Abb. 53: Feldversuche mit gezielter Laserpointerbestrahlung unter realen Bedingungen (links: am Boden, rechts: während des Fluges).

Die Durchführung der Arbeiten während des Feldversuches wurden auch in einem Video dokumentiert, der über YouTube zugänglich ist (Stichworteingabe im Suchfeld bei YouTube: „Hubschrauber Laserpointer FH Münster“; oder direkter Zugriff [42]).

5.10.5 Erprobung von (Schutz-)Filterfolien während des Helikoptereinsatzes

Zur Einschätzung möglicher Verfälschungen des natürlichen Sehempfindens während des Fluges durch die in Kap. 5.10.1 vorgestellten Filter-Folien, wurden die Bodenfenster des EC 135-Helikopters mit diesen Folien präpariert (Abb. 54).

Nach Testflügen (auch über einen längeren Zeitraum nach diesem Feldversuch an anderen Standorten der Bundespolizei-Fliegerstaffel) haben Piloten berichtet, dass vor allem veränderte Farbwahrnehmung und der Kontrastverlust in den ersten Minuten das Einschätzen von Entfernungen zum Boden sowie Hindernissen erschwerte. So hat beispielsweise die veränderte Farbwahrnehmung während des Fluges das Erkennen der roten Markierungen von Rotorblättern an Windrädern beeinträchtigt. Nach einer Gewöhnungsphase von mehreren Minuten an die neue Situation reduziert sich zwar das Problem, dennoch verbleibt ein „ungewohntes verändertes Sehempfinden“.



Abb. 54: Cockpit eines EC 135 mit eingesetzten Filterfolien Typ 158 (links) und Typ 779 (rechts).

Neben der veränderten Farbwahrnehmung stellt die verminderte Tageslichttransmission eine zusätzliche Einschränkung dar. Die Folien transmittieren 38,8 % bzw. 29 % des Tageslichtes. Bei Dämmerung erschwert diese Einschränkung die Sicht empfindlich. Jedoch hat sich gezeigt, dass dieses Problem vernachlässigbar ist, wenn die Piloten beispielsweise bei Nachteinsätzen eine Bildverstärkerbrille tragen. Die Bildverstärkerbrille verstärkt ausschließlich infrarotes Licht, das die Schutzfolie nahezu ungehindert passiert. Dies hat zur Folge, dass weder die Strahlung der Laserpointer noch die Filterfolie sichtbar ist.

Die Folien werden derzeit von der Bundespolizei-Fliegerstaffel sowohl in Fuhlendorf als auch in Berlin auf ihre Flugtauglichkeit und die Akzeptanz der Piloten hin getestet.

6. Ergebnisse und Veröffentlichungen externer Forschungsstellen

Im Rahmen eines Workshops „Blendung durch Laserstrahlung“ (DASA/Dortmund, 16.09.2013) wurden neben grundlegenden Erkenntnissen zu diesem Thema auch aktuelle Resultate eines Forschungsvorhabens zum Thema „Blendung durch künstliche optische Strahlung unter Dämmerungsbedingungen“ [26] veröffentlicht (BAuA-Projekt F 2310). Bei diesem Projekt wurden auch die Beeinträchtigungsdauern der Sehfähigkeit nach Blendungseinwirkungen unter Berücksichtigung der spektralen Lichtempfindlichkeit untersucht.

Die Firma *RUAG AG/CH* hat im November 2013 eine spezielle Brille („MultiLaser Protector“) mit dielektrischer Beschichtung vorgestellt [32], die vor sieben der häufigsten Laserpointerwellenlängen bei Einfallswinkeln bis zu 40° schützt. Diese Brille weist eine vergleichsweise gute Tageslichttransmission von 36 % auf. Da die Farbwahrnehmung unvermeidbar verändert wird, müssen die Auswirkungen dieser Änderungen in dem jeweiligen Einsatzfall untersucht werden.

Eine umfassende Studie „Laserangriffe auf Hubschrauber in Deutschland 2009 - 2012“ wurde von der Projektgruppe SMV der Bundespolizei veröffentlicht (09/2012, M. Mahle, M. Carstensen).

Die Schülerin Antonia Scheer hat für eine entwickelte „Laserpointer-Schutzscheibe“ einen Preis bei „Jugend forscht 2013“ erhalten.

In verschiedenen Fachbeiträgen anlässlich der „Internationalen Laser Safety-Conference“ ILSC (Orlando/USA, 18. - 21. März 2013) wurde auch das Thema „Laserpointerattacken“ behandelt. Anlässlich dieser Konferenz wurden auch Zwischenergebnisse dieses Projektes vorgestellt [43].

McLin et. al. untersuchten in dem Projekt „Scaling laser disability glare functions with K-factors to predict dazzle“ in den Air Force Research Laboratories USA die Fähigkeit, Objekte unter der Blendung durch Laserpointer zu unterscheiden. Der aus den Untersuchungen resultierende K-Faktor bietet die Möglichkeit, Blendungsauswirkungen genauer vorherzusagen.

Im Schlussbericht zum BAuA-Forschungsprojekt „Blendung durch künstliche optische Strahlung unter Dämmerungsbedingungen“ haben H.-D. Reidenbach et. al. auf 400 Seiten umfassende Forschungsergebnisse präsentiert.

7. Bewertung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In dieser Studie wurden insgesamt 41 unterschiedliche Laserpointer mit handelsüblichen Wellenlängen („blau“, „grün“, „rot“) von 405 nm, 447 nm, 532 nm und 655 nm im Leistungsbereich 1 mW bis 1000 mW beschafft und bezüglich ihrer Strahleigenschaften untersucht. Es hat sich in allen Fällen gezeigt, dass die tatsächlich emittierte Strahlleistung deutlich oberhalb der spezifizierten Leistung lag. Größte Abweichungen wurden mit einem Faktor 24 (!) ermittelt. Erstmals wurde - soweit bekannt - auch der Polarisationsgrad von Laserpointerstrahlung ermittelt, der überwiegend > 90 % beträgt. Dies führt zu bisher nicht berücksichtigten Konsequenzen, beispielsweise bei der Transmission der Strahlung durch Cockpitscheiben von Luftfahrzeugen sowie Frontscheiben von landgebundenen Fahrzeugen. Für weitere Untersuchungen in dieser Studie wurden 11 repräsentative Laserpointer ausgewählt.

Im Hauptteil dieses Vorhabens wurden Sicherheitsabstände „SD“ theoretisch und experimentell für die (permanente) Augenschädigung (d. h. Netzhautentzündung) sowie unterschiedliche Blendeffekte ermittelt. Dazu zählen die Effekte „Blitzlichtblindheit“, „Blendung“ und „Ablenkung“. Die Sicherheitsabstände wurden für unterschiedliche Strahlparameter der verwendeten Laserpointer (Wellenlänge, Leistung, Divergenz, Strahlprofil) sowie verschiedene äußere Einflüsse (beispielsweise Absorption durch Cockpit- und Fahrzeugscheiben, Schwächung durch Atmosphäre) bestimmt.

Bei der Berechnung von Sicherheitsabständen wurde zunächst von einem einfachen Modell basierend auf der geometrischen Optik – wie es auch von Nakagawara et. al. [17] verwendet wurde – ausgegangen. Die Berechnung wurde in den folgenden Arbeitsschritten dieses Vorhabens ständig erweitert. Diese kontinuierliche Erweiterung berücksichtigt zusätzliche oben genannte Umgebungseinflüsse.

Ein Vergleich der Ergebnisse von experimentell im Labor durchgeführten Untersuchungen mit theoretischen Arbeiten hat sich gezeigt, dass z. T. große Abweichungen auftreten. So wurden beispielsweise Sicherheitsabstände ermittelt, die im gemessenen Fall bis zum Faktor 4 größer sind als theoretische Werte. Dies trat vor allem dann auf, wenn das einfache oben genannte Modell der geometrischen Optik verwendet wurde, das zahlreiche zusätzliche Umgebungseinflüsse nicht berücksichtigt:

- Vernachlässigung der $V(\lambda)$ -Kurve

Die Vernachlässigung der $V(\lambda)$ -Kurve („spektrale Empfindlichkeit des Auges“) verursacht beim Vergleich mit der direkten Verwendung des $V(\lambda)$ -Faktors eine Abweichung des Sicherheitsabstandes von bis zu 92,5 % für eine Wellenlänge von 405 nm. Der Vergleich mit der vorgestellten Berechnungsmethode unter

Berücksichtigung von Erkenntnissen aus dem „FH-Köln-Modells“ ergibt in Maximalfällen eine Abweichung von 83,5 %.

- Vernachlässigung der Scheibenabsorption
Die Cockpitscheiben eines A-320 absorbieren bis zu 51 % der auftreffenden Strahlung bei 405 nm. Daraus folgt für den Sicherheitsabstand ein Fehler von 29,6 %. Bei Fahrzeugscheiben sind die Abweichungen mit 43,4 % sogar noch deutlicher.
- Vereinfachte Berechnung der Absorption
Der Fehler der Näherung zur Berechnung des Atmosphäreinflusses, die in der Arbeit von Nakagawara et. al. [17] vorgeschlagen wurde, wirkt sich bei größerem Abstand zunehmend stärker aus. Für einen Sicherheitsabstand, der beispielsweise ohne Berücksichtigung der Absorption 10 km beträgt, liegt ein Fehler von bis zu 7,6 % vor, wenn der von Nakagawara et. al. vorgeschlagene Absorptionskoeffizient verwendet wird. Bei größeren Abständen wächst dieser Fehler deutlich.
- Vernachlässigung der Atmosphärenstreuung
Die Fehler der Atmosphärenstreuung können nicht abgeschätzt werden, da keine entsprechenden Untersuchungen unternommen wurden.
- Vereinfachung der tatsächlichen Strahlgeometrie zum Gaußstrahl
Messungen haben gezeigt, dass bei einem direkten Vergleich zwischen dem berechneten und gemessenen Sicherheitsabstand (ohne äußere Einflüsse) Fehler bis zu 73 % auftreten können, wenn das Strahlprofil große Abweichungen zum idealen Gaußprofil aufweist. Dies tritt typisch bei Laserpointern mit Wellenlängen von 407 nm, 447 nm und 655 nm auf.

Das in diesem Vorhaben aufgestellte Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung zahlreicher Umgebungseinflüsse hat zu einer deutlichen Reduzierung des Fehlers geführt. Dies bezieht sich vor allem auf Strahlung aus Laserpointern mit einem „guten“ gaußähnlichen Strahlprofil. Bei „chaotischen“ Strahlprofilen (s. Abb. 11b,c,d) treten Fehler auf, die mit vertretbarem Aufwand in Rechenmodellen nicht kompensiert werden können. Nur eingeschränkt zufriedenstellend ist auch die Berücksichtigung verschiedener Laserpointerwellenlängen in Form des $V(\lambda)$ -Faktors bei der Ermittlung von Sicherheitsabständen für Blendeffekte (für den Fall „permanente Augenschädigung“/Netzhauteinbrand) ist die Wellenlänge nicht von Bedeutung). Der Fehler wird umso größer, je weiter die Wellenlänge von der „grünen“ Pointerwellenlänge mit 532 nm entfernt ist und je höher die Bestrahlungsstärke ist. Hierzu wurden in einem vor Kurzem abgeschlossenen Forschungsvorhaben [26] neue Erkenntnisse vorgestellt, deren Übertragbarkeit auf die vorliegende Studie jedoch in Fachkreisen umstritten ist.

Im Zuge der oben genannten Verbesserungen zur Berechnung der Sicherheitsabstände wurde ein Excel-Programm entwickelt, mit dem diese Abstände ermittelt werden können. Es

ermöglicht sowohl das schnelle Anpassen einzelner Faktoren als auch das Ablesen von Sicherheitsabständen, die nach verschiedenen in der Arbeit vorgestellten und entwickelten Methoden berechnet werden. Es bietet ebenfalls die Möglichkeit zum Vergleich verschiedener Laserpointer. Dieses Programm kann verwendet werden, um eine je nach Strahldaten des Laserpointers mehr oder weniger starke fehlerbehaftete Aussage über den Sicherheitsabstand für unterschiedliche Blendeffekte zu erhalten. In vielen Fällen der Praxis wird es jedoch unumgänglich sein, dieses Ergebnis experimentell zu verifizieren bzw. zu korrigieren.

Zur Prävention lassen sich technische Schutzmaßnahmen in passive und aktive unterteilen. Passive Schutzmaßnahmen in Form von Brillen und eingeschränkt auch Folien sind für sämtliche Laserpointerwellenlängen auf dem Markt verfügbar. Während der Laufzeit dieses Vorhabens hat es hierzu spezielle Entwicklungen mit guten Resultaten gegeben. Trotz dieser Erfolge stoßen diese Schutzmaßnahmen jedoch in vielen Fällen bei Anwendern in der Praxis häufig auf mangelnde Akzeptanz. Dies hat sich vor allem bei Feldversuchen mit Polizeihelikoptern der Bundespolizei-Fliegerstaffel gezeigt: Piloten von Helikoptern reagieren besonders sensibel auf ein „verändertes Sichtempfinden“, das für diese Art von passiven Schutzmaßnahmen inhärent ist. Abhilfe könnten aktive Schutzmaßnahmen schaffen, bei denen die Laserstrahlung nur für den (kurzen) Zeitraum des Auftreffens vollständig geblockt oder ausreichend absorbiert wird. Eine dazu erforderliche elektrooptische Technik ist bereits in (Prototypen-)Brillen implementiert. Eine Übertragung dieser Technik auf ausgedehnte Cockpit- oder Fahrzeugscheiben ist heute (noch) nicht möglich und beschränkt sich bisher nur auf Flächen optischer Abbildungssysteme.

8. Umsetzungs- und Verwertungsplan

Teilergebnisse des Vorhabens wurden bereits während der gesamten Projektlaufzeit publiziert und vor unterschiedlichen Interessensgruppen präsentiert (beispielsweise Arbeitskreis für Nichtionisierende Strahlung „AKNIR“, Institut für den Medizinischen Arbeits- und Umweltschutz der Bundeswehr, Ländertagung der Staffelleiter für Polizeiflugdienste, Internationale Laser Safety Conference „ILSC“, Orlando). Resultate sind auch bereits vor Projektabschluss in die Praxis diffundiert. Beispielhaft sei die Bundespolizei-Fliegerstaffel (Projektgruppe SMV, M. Mahle) erwähnt, die zur Aufklärung und Sensibilisierung ihrer Helikopterpiloten aus den Ergebnissen bereits Verhaltensregeln abgeleitet hat und in die Aus- und Fortbildung übernommen hat. Weiterhin erfolgten Fachdiskussionen mit Herstellern von speziellen Laserpointer-Schutzbrillen. Auch haben sich Kontakte zu anderen Forschergruppen ergeben (beispielsweise Fraunhofer-Institut für Optronik IOSB, Ettlingen). Die Kooperation zur Bundespolizei-Fliegerstaffel wurde auch bereits nach Projektabschluss fortgesetzt (beispielsweise Vermessung der Schutzeigenschaften spezieller Helikopterverglasungen, Helmvisiere etc.). Bestehende Kontakte sollen auch zukünftig beibehalten werden, neue werden zweifellos hinzukommen. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens aufgebauten Messeinrichtungen zur Untersuchung des Gefahrenpotentials von Laserpointern bleiben bestehen und stehen externen Interessenten zur Verfügung. Das entwickelte Rechenprogramm wird auch zukünftig genutzt, um bei konkreten Anfragen Sicherheitsabstände theoretisch abschätzen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 60825-1: 2008-03. Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen
- [2] Reidenbach, H.-D., Dollinger, K. und Hoffmann, J. Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag NW, 2003
- [3] Wittlich, M. Blendung - Theoretischer Hintergrund. Sankt Augustin : Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 2010.
- [4] (CIE), Commission Internationale de l'Eclairage. international Lighting Vocabulary. Publication CIE 17.4-1987 und IEC 60050-845
- [5] Reidenbach, H.-D, et al. Blendung durch optische Strahlungsquellen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2008
- [6] Beckmann, D. und Reidenbach, H. D. Untersuchungsergebnisse zum Pupillenreflex. Köln : BAuA, 2013
- [7] Reidenbach, H. D. und Beckmann, D. Pupillenreflex und funktionale Abhängigkeit der Blendung. Dortmund, 2013
- [8] Atchison, D. Optics of the Human Eye. Brisbane : Queensland University of Technology, 2011
- [9] DIN 5340 :1998-04. Begriffe der physiologischen Optik
- [10] Schmidt-Clausen, H. J. und Bildels, J. T. H. Assesment of discomfort glare in motor vehicle lighting. 1974, Bd. Lighting research and technology, 6
- [11] Porter, R. J., et al. Evaluation of discomfort glare during nighttime driving in clear weather. Blacksburg : Virginia Tech Transportation Institute, 2005
- [12] Theiss, E. Gebäudetechnik 1. Beleuchtungstechnik. München : Oldenbourg, 2000.
- [13] ANSI Z136.6. American National Standard for the Safe Use of Lasers in Outdoor Environment. Orlando, 2005
- [14] Mahle, M. und Carstensen, M. Laserangriffe auf Hubschrauber in Deutschland 2009-2012. Lagebild und Gefährdungsanalyse. Projektgruppe SMV, Sept. 2012, Bundespolizei
- [15] International Civil Aviation Organization (ICAO). Convention on International Civil Aviation, Annex 14, Aerodromes. Chicago, 2004
- [16] Murphy, P. Lasers and Aviation Safety: International Laser Display Association, 2009
- [17] Nakagawara et. al., van B. und W., Montgomery R. The Effects of Laser illumination on Operational and Visual Performance of Pilots During Final Approach. Oklahoma City : Federal Aviation Administration, 2004.
- [18] Reidenbach, H. D. Funktionale Abhängigkeit der Blendung. Köln, 2013

- [19] Loewenfeld, I. E. Pupillengröße. Topics in Neuro-Ophthalmology. Baltimore, 1979
- [20] Fröhlich, F. W., Untersuchung über periodische Nachbilder, 1921, Bd. Zeitschrift für Sinnespsychologie 52, S. 60-88
- [21] Knestrick, G. L., Cosden, T. H. und Curcio, J. A. atmospheric attenuation coefficients in the visible an infrared regions. 1961
- [22] Simpson, T. Treatise of Fluxions. London, 1737
- [23] Deufhard, P. Newton Methods for Nonlinear Problems: Affine Invariance and Adaptive Algorithms : Springer, 2011
- [24] Lighting Systems Design, Inc. Factors in the evaluation of laser beam effects upon pilot performance. 1998
- [25] Mauser, W. Einführung in die Klimatologie. [Online] Uni-Muenchen. [Zitat vom: 15. 11 2013.]
[http://www.geographie.unimuenchen.de/internetvorlesung/klimatologie/Nebenseiten/Ab
sorption_Streuung.htm](http://www.geographie.unimuenchen.de/internetvorlesung/klimatologie/Nebenseiten/Absorption_Streuung.htm)
- [26] Reidenbach, H. D., Blendung durch künstliche optische Strahlung unter Dämmerungsbedingungen, BAuA-Forschungsbericht F2310, 2014
- [27] Vos, J. J. Colometric and photometric properties of a 2-deg fundamentag observer. Color Research and Application, 1978. 125-128
- [28] Harvie, M. R. Active Laser Protection System. US 7,202,8520 B2 USA, 10. 04 200
- [29] Ritt, G. und Eberle, B. Electro-optical sensor with spatial and spectral filtering capability. Ettlingen: Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation, 2011
- [30] Rieker, H., Informationsschrift, horst.rieker@dlr.de
- [31] Rieker, H., Aero: Überlinger präsentiert Weltneuheit, Südkurier 09.04.2014
- [32] N.N., RUAG, MultiLaser Protector – Der professionelle Augenschutz, Informationschrift RUAG Defence, Thun/CH
- [33] N.N., Gebrauchsanleitung für RUAG MultiLaser Protector, RUAG Schweiz AG, Bern/CH
- [34] ThorLabs. Notch Filters. [Online] ThorLabs. [Zitat vom: 06. 11 2013.]
http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3880
- [35] Thorlabs. Unmounted Bandpass Colored Glass Filters.
http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3695#2472
- [36] N.N., Laservision GmbH & Co. KG, Fürth
- [37] N.N., Gentex corporation/USA, Laser Visor
<http://www.gentexcorp.com/default.aspx?pageid=2910>
- [38] N.N., Workshop „Blendung durch Laserstrahlung“, DASA Dortmund, 16.09.2013

- [39] Schwarze, C. R., et al. Ground and Air Test Performance of the Laser Event Recorder. Boston : Optra Inc., 2005
- [40] N.N., metaVISORS™, Lambda Guard/USA
- [41] Schmitz, B. ECS GmbH - European Certification Service. Aalen : s.n., 2013
- [42] YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=_fv1L_EKM5k
- [43] Dickmann, K., Laser Pointer Hazards for Pilots and Drivers of Public Transportation International Laser Safety Conference (ILSC), 18. – 21. März 2013, Orlando, Florida/USA, Conference Proceedings ILSC 2013, Paper #1202, S. 289 - 298