



Alterungsbeständigkeit von Laserschutzfiltern

baua: Bericht

**Forschung
Projekt F 2442**

R. Bühring
H.-J. Krauß
W. Janßen

Alterungsbeständigkeit von Laserschutzfiltern

1. Auflage 2020
Dortmund/Berlin/Dresden

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt F 2442 „Alterungsbeständigkeit von Laserschutzfiltern“ im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Dipl.-Ing. Rico Bühring
Dr.-Ing. Hans-Joachim Krauß
Bayerisches Laserzentrum GmbH
Konrad-Zuse-Str. 2-6, 91052 Erlangen, Deutschland

Winfried Janßen
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Titelfoto: Winfried Janßen
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Umschlaggestaltung: Susanne Graul
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund
Postanschrift: Postfach 17 02 02, 44061 Dortmund
Telefon 0231 9071-2071
Telefax 0231 9071-2070
E-Mail info-zentrum@buaa.bund.de
Internet www.buaa.de

Berlin: Nöldnerstraße 40 – 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Telefax 030 51548-4170

Dresden: Fabricestraße 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Telefax 0351 5639-5210

Die Inhalte der Publikation wurden mit größter Sorgfalt erstellt und entsprechen dem aktuellen Stand der Wissenschaft. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte übernimmt die BAuA jedoch keine Gewähr.

Nachdruck und sonstige Wiedergabe sowie Veröffentlichung, auch auszugsweise, nur mit vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.



doi:10.21934/buaa:bericht20200225 (online)

www.buaa.de/dok/8834404

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzreferat	5
Abstract	6
1 Einleitung	7
2 Stand der Technik/Bisheriger Kenntnisstand	8
3 Verwendete Geräte und Versuchsaufbauten	11
3.1 Laserstrahlquellen	11
3.1.1 Dauerstrich Nd:YAG-Laser	11
3.1.2 Gepulster Nd:YAG-Laser	11
3.1.3 CO ₂ -Laser	12
3.2 Messgeräte	13
3.2.1 LM-200: thermoelektrischer Messkopf	13
3.2.2 PM300F-50: thermoelektrischer Messkopf	14
3.2.3 Anzeigeeinheit LabMax – TOP	14
3.3 Versuchsaufbauten zur Alterung mittels UV-Strahlung	15
3.3.1 Xenon Suntest (künstliche UV-Alterung)	15
3.3.2 Xenotest (künstliche Bewitterung)	17
3.4 Versuchsaufbauten zur Messung des Filterversagens	18
3.4.1 Versuchsaufbauten für die Wellenlänge 1064 nm	18
3.4.2 Versuchsaufbau für die Wellenlänge 10600 nm	19
3.5 Versuchsaufbauten zur Messung der optischen Kenngrößen	20
3.5.1 Spektrophotometer Cary 6000i	21
3.5.2 Laserdensitometer (Eigenbau)	22
3.5.3 Kleinwinkelstreulichtmessgerät (Eigenbau)	22
4 Untersuchungsmethodik zur Bestimmung der Alterungsbeständigkeit von Laserschutzfiltern	24
4.1 Untersuchungsmethodik für Filterversagen bei künstlicher Alterung	24
4.1.1 Versuchsplanung künstliche Alterung	24
4.1.2 Festlegung der Versuchskriterien für die Untersuchungen zur künstlichen Alterung	25
4.1.2.1 Durchschussdetektion	25
4.1.2.2 Laserleistung	25
4.1.2.3 Laserstrahldurchmesser	26
4.2 Untersuchungsmethodik zur Ermittlung der optischen Kennwerte bei künstlicher Alterung	28

4.3	Untersuchungsmethodik für Filterversagen bei natürlicher Alterung	28
4.3.1	Versuchsplanung natürliche Alterung	28
4.3.2	Festlegung der Versuchskriterien für die Untersuchungen zur natürlichen Alterung	29
4.3.2.1	Durchschussdetektion	29
4.3.2.2	Laserleistung	29
4.3.2.3	Laserstrahldurchmesser	30
4.4	Untersuchungsmethodik zur Ermittlung der optischen Kennwerte bei natürlicher Alterung	30
5	Untersuchungsergebnisse und Diskussion	31
5.1	Künstliche Alterung	31
5.1.1	Laserbelastungsprüfungen	31
5.1.1.1	Laserbelastungsprüfungen an PMMA-Filtern bei 1064 nm	31
5.1.1.2	Laserbelastungsprüfungen an PC-Filtern bei 1064 nm	35
5.1.1.3	Laserbelastungsprüfungen an PMMA-Filtern bei 10600 nm	38
5.1.1.4	Laserbelastungsprüfungen an PC-Filtern bei 10600 nm	40
5.1.2	Optische Kennwerte	40
5.1.2.1	Spektraler Transmissionsgrad	40
5.1.2.2	Lichttransmission	45
5.1.2.3	Streulicht	47
5.2	Natürliche Alterung	47
5.2.1	Laserbelastungsversuche	47
5.2.1.1	Vergleich Altfilter mit dazugehörigem Neufilter	47
5.2.1.2	Verifikation der zertifizierten Schutzstufen von Altfiltern	50
5.2.2	Optische Kennwerte	52
5.2.2.1	Spektraler Transmissionsgrad (optische Dichte)	52
5.2.2.2	Lichttransmission	52
5.2.2.3	Streulicht	54
6	Zusammenfassung	56
7	Ausblick	58
	Literaturverzeichnis	59
	Tabellenverzeichnis	60
	Abbildungsverzeichnis	61
	Danksagung	64

Alterungsbeständigkeit von Laserschutzfiltern

Kurzreferat

Zahlreiche Faktoren wie beispielsweise die Laserleistung oder der Strahldurchmesser haben einen Einfluss auf die Standzeit von Laserschutzfiltern gegen Laserstrahlung. Allerdings wurde die Bedeutung des Alters eines Laserschutzfilters für dessen Standzeit noch nicht hinreichend untersucht. Gegenstand der Untersuchungen im Projekt F 2442 ist daher die Auswirkung der Alterung auf die Filterstandzeit und auf die optischen Kenngrößen spektraler Transmissionsgrad, Lichttransmission und Streulicht. Für die Untersuchung dieser Abhängigkeiten wurden Versuchsaufbauten realisiert, um transmittierte Laserstrahlung hinter dem Schutzfilter zu detektieren. Die Experimente beinhalten eine Reihe von Laserbelastungsprüfungen mit cw (continuous wave) und gepulsten Nd:YAG-Lasern bei 1064 nm sowie einem CO₂-Laser bei 10600 nm im cw- und gepulsten Betrieb. Standardmaterialien für Laserschutzfilter wurden künstlich mittels UV-Strahlung gealtert, auf Laserbeständigkeit getestet und die Ergebnisse mit fabrikneuen (ungealterten) Materialien verglichen. Hier zeigte sich nur ein geringer Einfluss der Alterung auf die Filterstandzeiten. Die Auswirkung der Alterung durch UV-Strahlung auf die optischen Kenngrößen Lichttransmission und Streulicht ist teilweise deutlicher ausgeprägt. Neben dem Einfluss der künstlichen Alterung wurde auch die natürliche Alterung untersucht. Bei den hier getesteten Altfiltern war ebenfalls nur eine geringe Bedeutung des Alters auf die Standzeit der Filter und auf die optischen Kenngrößen zu beobachten.

Schlagwörter:

Laserschutzfilter, Nd:YAG-Laser, CO₂-Laser, UV-Alterung, Laserbeständigkeit, Filterstandzeit, spektraler Transmissionsgrad, Lichttransmission, Streulicht, EN 207

Aging resistance of laser protective filters

Abstract

Various factors like laser power and beam diameter have an influence on the laser resistance time of laser protective filters against laser radiation. But the effect of the age of the filters on their laser resistance time has not been studied, yet. The main objective of the project F 2442 is to investigate laser resistance time and optical properties spectral transmittance, luminous transmittance and diffusion of light versus the aging of laser protective filters. For these investigations experimental setups were realised to detect transmitting laser radiation behind the protective filters. The laser resistance tests were carried out with cw (continuous wave) and pulsed Nd:YAG laser sources at 1064 nm as well as a CO₂-laser at 10600 nm in cw- and pulsed mode. Standard materials for laser protective filters were artificially aged by UV-radiation and tested for their laser resistance. The results were compared to the results for new (unaged) materials. Only a little effect of the aging on the laser resistance time could be detected. The aging under UV-radiation has a more significant impact on the optical properties spectral transmittance and luminous transmittance. Besides the effects of artificial aging, natural ageing was examined, as well. For the naturally aged filters tested in the framework of this project, only a comparatively low significance on the laser resistance time and the optical properties was determined.

Key words:

laser protective filters, Nd:YAG-laser, CO₂-laser, UV-aging, laser resistance, laser resistance time, spectral transmittance, luminous transmittance, diffusion of light, EN 207

1 Einleitung

Das übergeordnete Ziel des Projektes F2442 ist es, die Abhängigkeit der Laserbeständigkeit und ausgewählter optischer Kenngrößen von der Alterung der Laserschutzfilter für verschiedene Schutzfiltermaterialien an diversen Laserstrahlquellen zu erfassen und zu bewerten.

Die Beständigkeit gegen Laserbestrahlung (im Folgenden Laserbeständigkeit) ist ein entscheidendes Kriterium, nach dem die Tauglichkeit von Laserschutzbrillen beurteilt wird. Da es sich hierbei um Persönliche Schutzausrüstung, sogenannte PSA-Produkte handelt, müssen diese vor ihrer Bereitstellung auf dem Markt ein Konformitätsbewertungsverfahren gemäß der EU-PSA-Verordnung 2016/425 [1] durchlaufen. Hersteller und Inverkehrbringer müssen nach dieser Verordnung ein Mindesthaltbarkeitsdatum für ihr Produkt angeben. Bei Produkten, die mit harmonisierten Normen übereinstimmen, wird die Konformität mit den grundlegenden Gesundheitsschutz- und Sicherheitsanforderungen vermutet. Maßgeblich für die Prüfung von Laserschutzbrillen ist in Europa die harmonisierte Norm EN 207 „Persönlicher Augenschutz - Filter und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung (Laserschutzbrillen)“ [2]. Ein Blick in das Prüfprogramm der Norm verrät, dass neben der Laserbeständigkeit beispielsweise der spektrale Transmissionsgrad (optische Dichte OD), also die Filterwirkung von Filtergläsern und Tragkörpern, sowie die Beständigkeit gegen UV-Strahlung und erhöhte Temperatur, die Entzündbarkeit und die mechanische Festigkeit geprüft werden müssen. Diese Prüfungen werden aber nur an fabrikneuen, nicht an gealterten Laserschutzbrillen vorgenommen, so dass keine Erfahrungswerte in Bezug auf mögliche Alterungseffekte existieren. Man weiß also nicht, ob Alterungseffekte die Schutzwirkung der Brillen negativ beeinflussen. In bisherigen Forschungsarbeiten wurde nur der Einfluss des Strahldurchmessers auf die Laserbeständigkeit von Laserschutzfiltern untersucht [3].

Da der Einfluss des Alters auf die Schutzeigenschaften von Laserschutzfiltern noch nicht ausreichend bekannt ist, ist eine genauere Untersuchung dieses Einflussfaktors notwendig und damit Gegenstand dieses Projektes.

2 Stand der Technik/Bisheriger Kenntnisstand

Die Norm EN 207 hat das Ziel, durch eine standardisierte Prüfung von Laserschutzbrillen einen Schutz der Augen vor Laserstrahlung zu gewährleisten. Zur besseren Vergleichbarkeit der Brillenprüfungen wurden entsprechende Prüfbedingungen in der Norm aufgestellt. Dazu wurde unter anderem in der aktuellen Version der Norm der Prüfstrahldurchmesser auf $d_{63} = 1 \text{ mm}$ (im Falle eines Gauß-Strahls entspricht d_{63} demjenigen Strahldurchmesser, bei dem die Bestrahlungsstärke auf $1/e$ des Maximalwertes abgefallen ist [4]) festgesetzt. Nach Norm EN 207:2017 gilt eine Laserschutzbrille als geeignet, wenn der Filter einem direkten Laserbeschuss beim Dauerstrichbetrieb (cw-Betrieb) des Lasers (Laserbetriebsart D) mindestens 5 s und bei gepulsten Lasern (Laserbetriebsarten I, R und M) mindestens 5 s und mindestens 50 Pulsen standhält. In Bezug auf die Impulsdauer des Laserstrahls sind folgende vier Laserbetriebsarten definiert, wie die Tab. 2.1 zeigt: Dauerstrichlaser (D), Impulslaser (I), Riesenimpulslaser (R) und modengekoppelte Laser (M).

Tab. 2.1 Laserbetriebsarten und Impulslängen gemäß EN 207:2017 [2]

Prüfbedingungen für Laserart	Typische Laserart	Impulsdauer s	Mindest-Impulsanzahl
D	Dauerstrichlaser	5	1
I	Impulslaser	$> 10^{-6}$ bis 0,25	50
R	Güteschalteter Impulslaser	$> 10^{-9}$ bis 10^{-6}	50
M	Modengekoppelter Impulslaser	$< 10^{-9}$	50

Zur Einordnung der Schutzbrillen hinsichtlich ihrer Laserbeständigkeit, werden in der Norm Schutzstufen in Abhängigkeit von der Laserwellenlänge und der Leistungs- bzw. Energiedichte von LB1 bis LB10 definiert (siehe Tab. 2.2).

Tab. 2.2 Schutzstufen für Laserschutzbrillen gemäß EN 207:2017 [2]

Schutzstufe	Maximaler spektraler Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ bei der Laserwellenlänge	Leistungs- (E) bzw. Energiedichte (H) zur Prüfung der Schutzwirkung und der Beständigkeit gegen Laserstrahlung im Wellenlängenbereich								
		180 nm bis 315 nm			> 315 nm bis 1400 nm			> 1400 nm bis 1000 μm		
		Für Prüfbedingung/Impulsdauer in s								
		D $\geq 3 \times 10^4$	I, R 10^{-9} bis 3×10^4	M $< 10^{-9}$	D $\geq 5 \times 10^{-4}$	I, R 10^{-9} bis 5×10^{-4}	M $< 10^{-9}$	D $> 0,1$	I, R 10^{-9} bis $0,1$	M $< 10^{-9}$
		E_D W/m^2	$H_{I,R}$ J/m^2	E_M W/m^2	E_D W/m^2	$H_{I,R}$ J/m^2	H_M J/m^2	E_D W/m^2	$H_{I,R}$ J/m^2	E_M W/m^2
LB1	10^{-1}	0,01	3×10^2	3×10^{11}	10^2	0,05	$1,5 \times 10^{-3}$	10^4	10^3	10^{12}
LB2	10^{-2}	0,1	3×10^3	3×10^{12}	10^3	0,5	$1,5 \times 10^{-2}$	10^5	10^4	10^{13}
LB3	10^{-3}	1	3×10^4	3×10^{13}	10^4	5	0,15	10^6	10^5	10^{14}
LB4	10^{-4}	10	3×10^5	3×10^{14}	10^5	50	1,5	10^7	10^6	10^{15}
LB5	10^{-5}	10^2	3×10^6	3×10^{15}	10^6	5×10^2	15	10^8	10^7	10^{16}
LB6	10^{-6}	10^3	3×10^7	3×10^{16}	10^7	5×10^3	$1,5 \times 10^2$	10^9	10^8	10^{17}
LB7	10^{-7}	10^4	3×10^8	3×10^{17}	10^8	5×10^4	$1,5 \times 10^3$	10^{10}	10^9	10^{18}
LB8	10^{-8}	10^5	3×10^9	3×10^{18}	10^9	5×10^5	$1,5 \times 10^4$	10^{11}	10^{10}	10^{19}
LB9	10^{-9}	10^6	3×10^{10}	3×10^{19}	10^{10}	5×10^6	$1,5 \times 10^5$	10^{12}	10^{11}	10^{20}
LB10	10^{-10}	10^7	3×10^{11}	3×10^{20}	10^{11}	5×10^7	$1,5 \times 10^6$	10^{13}	10^{12}	10^{21}

Zudem sind in der Norm weitere Anforderungen an die Laserschutzfilter festgelegt. Der maximale spektrale Transmissionsgrad darf bei der (den) Wellenlänge(n) oder in dem (den) Wellenlängenbereich(en) des Schutzes die in Tab. 2.2 (Schutzstufen) für die anwendbare Schutzstufe festgelegten Werte nicht überschreiten. Der Lichttransmissionsgrad (Abschnitt 3.5) der Filter muss, bezogen auf Normlichtart D65 [5], mindestens 20 % betragen. Dennoch darf ein Lichttransmissionsgrad unter 20 % unter der Voraussetzung akzeptiert werden, dass der Hersteller darauf hinweist, die Beleuchtungsstärke am jeweiligen Arbeitsplatz entsprechend zu erhöhen. Das Streulicht bzw. der reduzierte Leuchtdichtkoeffizient eines Filters darf nicht größer als $0,5 \text{ cd/m}^2/\text{lx}$ sein.

Eine weitere Anforderung ist die Beständigkeit von Laserschutzfiltern gegen UV-Strahlung. Um diese Beständigkeit zu testen, werden Laserschutzfilter nach EN 168, Absatz 6 [6], für 50 h unter einer UV-Lampe mit 450 W Leistung künstlich gealtert. Durch eine UV-Bestrahlung dürfen sich die Eigenschaften der Filter nicht derart verändern, dass sie die Anforderungen nicht mehr erfüllen können. So darf der spektrale Transmissionsgrad für die Laserwellenlängen in keinem Fall den maximalen spektralen Transmissionsgrad für die angegebene Schutzstufe überschreiten. Die relative Änderung des Lichttransmissionsgrades muss $\leq 10 \%$ betragen. Der reduzierte Leuchtdichtkoeffizient eines Filters darf nicht über $0,5 \text{ cd/m}^2/\text{lx}$ steigen. Allerdings schreibt die Norm nach der UV-Alterung keine erneute Prüfung der Laserschutzfilter auf Beständigkeit gegen Laserstrahlung vor. Somit kann nicht garantiert werden, dass Laserschutzbrillen nach längerer Benutzung noch den Anforderungen an die Norm bezüglich Beständigkeit gegen Laserstrahlung genügen.

Das vorrangige Ziel der EN 207 war die Harmonisierung nationaler Normen verschiedener Länder unter einer EU-weiten Norm. Seit der ersten Veröffentlichung der Norm

im Jahr 1993 gab es immer wieder Veränderungen hinsichtlich der Anforderungen an Laserschutzbrillen. So wurden 2002 eine Überhöhungsfunktion für den Strahldurchmesser des Lasers und 2009 Tests zur Alterungsbeständigkeit durch UV-Bestrahlung eingeführt. Mit Inkrafttreten der EN 207:2010 mussten neu zugelassene Laserschutzbrillen mit LB-Schutzstufen statt mit den alten L-Schutzstufen gekennzeichnet werden.

3 Verwendete Geräte und Versuchsaufbauten

3.1 Laserstrahlquellen

3.1.1 Dauerstrich Nd:YAG-Laser

Für die Versuche im Dauerstrichbetrieb (cw-Betrieb) wurde der Nd:YAG-Laser QY-1000D der Firma Haas Laser mit einer maximalen Leistung von ca. 650 W und einer Wellenlänge von $\lambda = 1064 \text{ nm}$ eingesetzt (Tab. 3.1, Abb. 3.1). Die Einstellung des Prüfstrahldurchmessers erfolgte über den Abstand der Fokussieroptik zur Probenoberfläche. Die erforderliche Laserleistung wurde für jede Prüfung unter Zuhilfenahme eines kalibrierten Leistungsmesskopfes eingestellt.

Tab. 3.1 Technische Daten der cw-Nd:YAG-Laserstrahlquelle

Bezeichnung, Hersteller	QY-1000D, Haas Laser
Wellenlänge	1064 nm
Betriebsart	cw
maximale Laserleistung	~650 W



Abb. 3.1 cw-Nd:YAG-Laserstrahlquelle QY-1000D der Firma Haas Laser

3.1.2 Gepulster Nd:YAG-Laser

Für die Untersuchungen im gepulsten Betrieb wurde der lampengepumpte Nd:YAG-Laser HL 204 P der Firma TRUMPF mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1064 \text{ nm}$ verwendet. Der Laser hat eine mittlere Leistung von ca. 200 W, eine maximale Pulsspitzenleistung von ca. 8 kW und eine maximale Pulsfrequenz von 600 Hz (Tab. 3.2, Abb. 3.2). Die Einstellung des Prüfstrahldurchmessers erfolgte über den Abstand der Fokussieroptik zur Probenoberfläche. Die erforderliche Laserleistung wurde für jede Prüfung unter Zuhilfenahme eines kalibrierten Leistungsmesskopfes eingestellt.

Tab. 3.2 Technische Daten der gepulsten Nd:YAG-Laserstrahlquelle

Bezeichnung, Hersteller	HL 204 P, TRUMPF
Wellenlänge	1064 nm
Betriebsart	gepulst
maximale mittlere Laserleistung	~200 W
maximale Pulsspitzenleistung	~8 kW
maximale Pulsfrequenz	600 Hz

**Abb. 3.2** Gepulste Nd:YAG-Laserstrahlquelle HL 204 P der Firma TRUMPF

3.1.3 CO₂-Laser

Für die Versuche im Dauerstrichbetrieb wurde der CO₂-Laser Microstorm der Firma FEHA LaserTec mit einer Wellenlänge von $\lambda = 10600$ nm eingesetzt. Der Laser hat eine maximale mittlere Leistung von ca. 350 W, eine maximale Pulsspitzenleistung von ca. 50 kW und eine maximale Pulsfrequenz von 150 kHz (Tab. 3.3, Abb. 3.3). Die Einstellung des Prüfstrahldurchmessers erfolgte über den Abstand der Fokussieroptik zur Probenoberfläche. Die erforderliche Laserleistung wurde für jede Prüfung unter Zuhilfenahme eines kalibrierten Leistungsmesskopfes eingestellt.

Tab. 3.3 Technische Daten der CO₂-Laserstrahlquelle

Bezeichnung, Hersteller	Microstorm, FEHA LaserTec
Wellenlänge	10600 nm
Betriebsart	cw und gepulst
maximale mittlere Laserleistung	~350 W
maximale Pulsspitzenleistung	~50 kW
maximale Pulsfrequenz	150 kHz



Abb. 3.3 CO₂-Laserstrahlquelle Microstorm der Firma FEHA LaserTec

3.2 Messgeräte

3.2.1 LM-200: thermoelektrischer Messkopf

Zum Messen der Laserleistungen bei den Versuchen mit 1064 nm wurde der Leistungsmesskopf LM-200 der Firma Coherent verwendet. Der Messkopf besitzt einen Messbereich zwischen 100 mW und 200 W (Tab. 3.4, Abb. 3.4). Die gemessenen Leistungen wurden auf dem Anzeigegerät LabMax-TO der Firma Coherent abgelesen.

Tab. 3.4 Spezifikation des Leistungsmesskopfs LM-200

Wirkungsweise	thermoelektrisch
minimal messbare Leistung	~100 mW
maximal messbare Leistung	~200 W
minimale Auflösung	10 mW
spektrale Empfindlichkeit	300 nm bis 10600 nm
Messgenauigkeit	± 5 %



Abb. 3.4 Leistungsmesskopf LM-200 der Firma Coherent

3.2.2 PM300F-50: thermoelektrischer Messkopf

Zum Messen der Laserleistungen bei den Versuchen mit 10600 nm wurde der Leistungsmesskopf PM300F-50 der Firma Coherent verwendet. Der Messkopf besitzt einen Messbereich bis 300 W (Tab. 3.5, Abb. 3.5). Die gemessenen Leistungen wurden auf dem Anzeigegerät LabMax-TO der Firma Coherent abgelesen.

Tab. 3.5 Spezifikation des Leistungsmesskopfs PM300F-50

Wirkungsweise	thermoelektrisch
minimal messbare Leistung	~1 W
maximal messbare Leistung	~300 W
minimale Auflösung	20 mW
spektrale Empfindlichkeit	190 nm bis 11000 nm
Messgenauigkeit	± 3 %

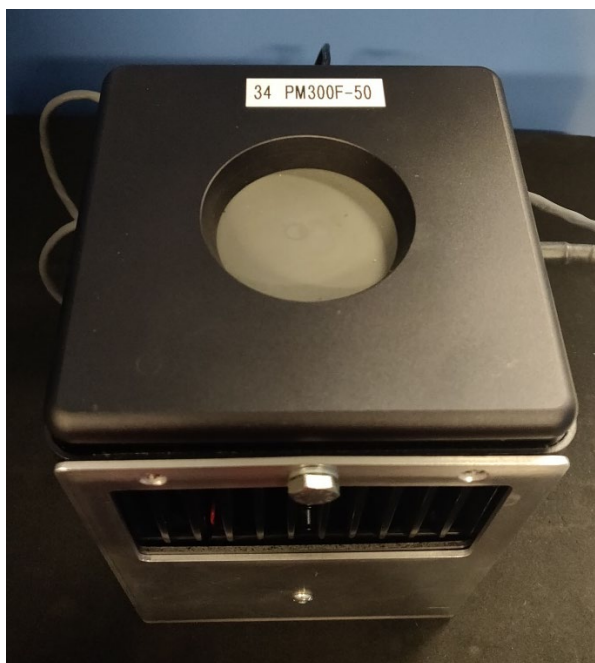


Abb. 3.5 Leistungsmesskopf PM300F-50 der Firma Coherent

3.2.3 Anzeigeeinheit LabMax – TOP

Der LabMax – TOP der Firma Coherent ist eine mikroprozessorgesteuerte Anzeigeeinheit. Es lassen sich verschiedene Messköpfe der Firma Coherent (z. B. LM-200, PM300F-50) an der Anzeigeeinheit anschließen. Die Anzeigeeinheit kann sich auf die verschiedenen angeschlossenen Messköpfe automatisch einstellen und entsprechend Leistungsmesswerte zur Anzeige bringen.

3.3 Versuchsaufbauten zur Alterung mittels UV-Strahlung

3.3.1 Xenon Suntest (künstliche UV-Alterung)

Die Prüfeinrichtung „Xenon Suntest“ von LEMA s.r.l. zur künstlichen UV-Alterung der zu prüfenden Filter besteht aus drei Hauptkomponenten und ist in Abb. 3.6 dargestellt. Die Bestrahlungskammer mit der Abzugsvorrichtung und dem Ventilator ist aufgesetzt und fest verbunden mit einem unterhalb angebrachten Bedien- und Anzeigetableau. Die Bestrahlungskammer wird mit einem aufklappbaren Gehäusedeckel verschlossen. Im Inneren der Bestrahlungskammer befindet sich ein Drehteller mit 15 radial-symmetrisch angeordneten und verstellbar montierten Probehalterungen. Die Xenon-Hochdrucklampe mit einer Leistung von 450 W (OSRAM XBO 450W/4, Abb. 3.7), welche zentral auf dem Drehteller angebracht ist, kann für ausgewiesene Prüfungen mit einem Quarzglaszylinder, bestehend aus drei Schalen, ummantelt werden. Die dritte Hauptkomponente ist das Netzgerät IREM EX-30 G/1 für die Xenonlampe.



Abb. 3.6 Prüfeinrichtung „Xenon Suntest“ von LEMA s.r.l. zur UV-Alterung der zu prüfenden Filter

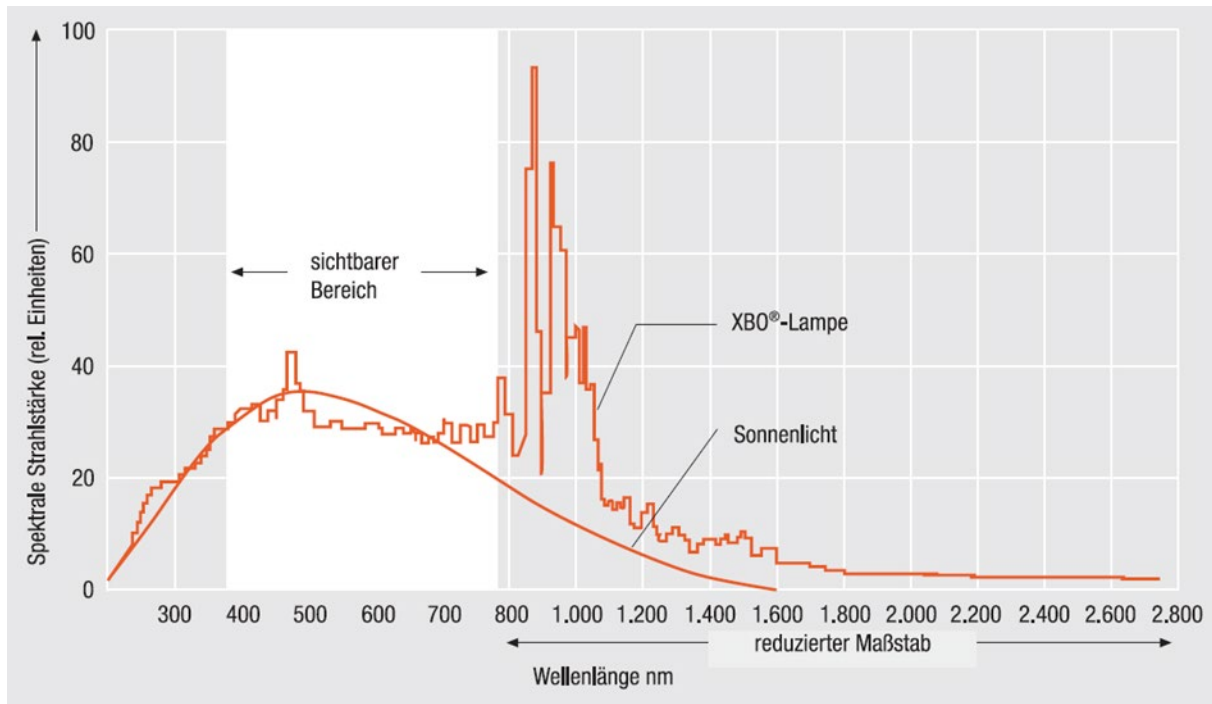


Abb. 3.7 Spektrale Strahlstärkeverteilung einer typischen XBO®-Lampe und des Schwarzen Strahlers von ca. 6.000 K (Quelle: Osram).

Die Prüflinge werden mit der Frontseite (Laserseite) der Filter zur Lampe in einem Abstand von 300 ± 10 mm in die Probenhalterungen eingespannt. Die Kammer wird geschlossen, die Bestrahlungsdauer von z. B. 50 h eingestellt und der Bestrahlungszyklus gestartet. Die Stromstärke für die Xenonlampe muss während der Bestrahlung $25 \pm 0,2$ A betragen. Nach der voreingestellten Betriebszeit schaltet sich das Gerät selbstständig aus.

3.3.2 Xenotest (künstliche Bewitterung)

Zusätzlich zur reinen UV-Alterung wurde eine künstliche Bewitterung mit Xenonlicht durchgeführt, um den Einfluss erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Standzeit der Laserschutzfilter zu testen.

Für die künstliche Bewitterung mit Xenonlicht wurde das Belichtungs- und Bewitterungsprüfgerät „Xenotest Beta+“ der Firma Atlas verwendet, welches in Abb. 3.8 dargestellt ist. Die aktuelle Bezugsnorm ist die EN 4892 Teil 1 und 2 [7, 8].



Abb. 3.8 Belichtungs- und Bewitterungsprüfgerät „Xenotest Beta+“ der Firma Atlas zur künstlichen Alterung der Filter mittels künstlicher Bewitterung mit Xenonlicht

Die Filter werden bei einer Probenkammertemperatur von 38°C, einer Schwarzstrahlertemperatur von 65°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 % mit drei luftgekühlten 2200 W Xenonlampen bestrahlt und parallel dazu alle 102 min für 18 min geregnet. Die Bestrahlungsenergie beträgt dabei 60 W/m² und die gesamte Bestrahlungsdauer 100 h. Es erfolgt eine lüftergesteuerte Kontrolle der Differenz zwischen der Probenkammer- und der Schwarzstrahlertemperatur und die Luftfeuchtigkeit wird mit einem Ultraschallbefeuchtungssystem geregelt.

3.4 Versuchsaufbauten zur Messung des Filterversagens

3.4.1 Versuchsaufbauten für die Wellenlänge 1064 nm

Die Messaufbauten an den beiden Nd:YAG-Lasern QY-1000D und HL 204 P sind nahezu identisch. In Abb. 3.9 und Abb. 3.10 ist der experimentelle Messaufbau zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern bei einer Wellenlänge von 1064 nm am cw-Nd:YAG-Laser QY-1000D dargestellt.

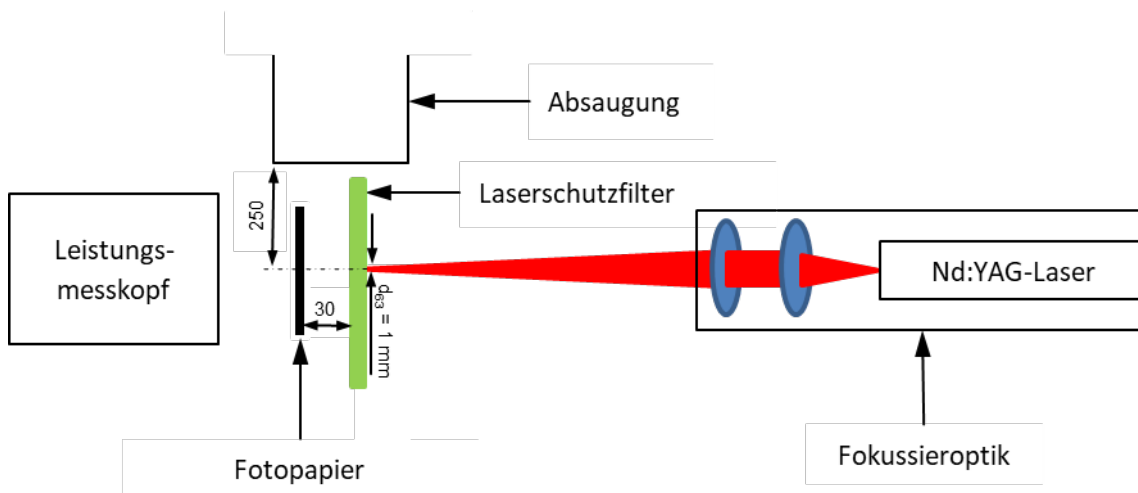


Abb. 3.9 Schematischer Versuchsaufbau am cw-Nd:YAG-Laser zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern

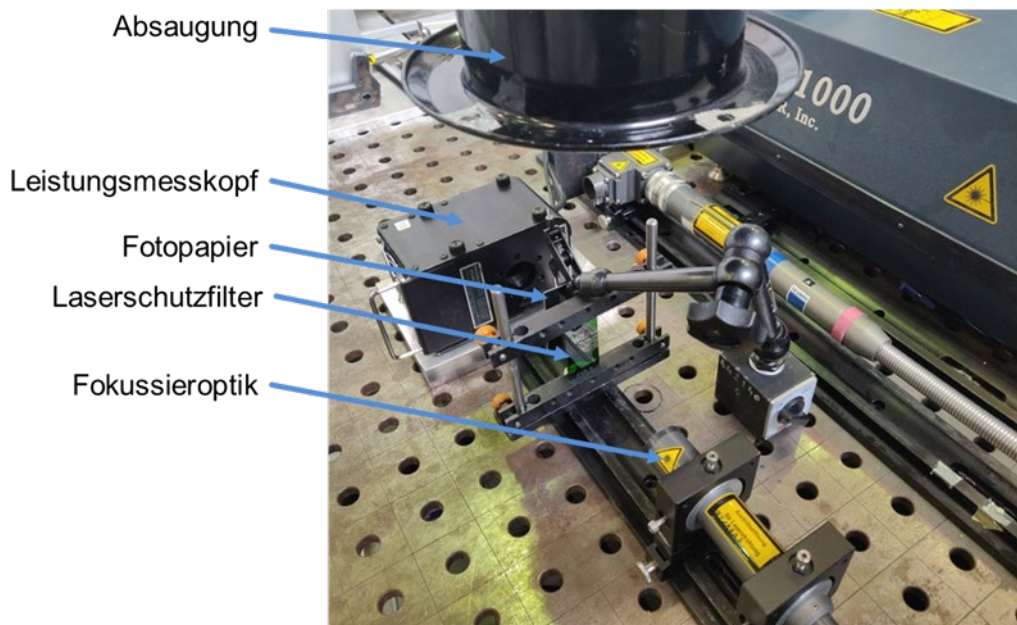


Abb. 3.10 Versuchsaufbau am Nd:YAG-Laser zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern

Die Fokussieroptik ist so angeordnet, dass der Laserstrahl horizontal austritt. Der zu prüfende Laserschutzfilter wird durch eine Halterung senkrecht zum Strahlengang fixiert. Der Abstand zwischen Fokussieroptik und Probenoberfläche ist so eingestellt, dass der Strahldurchmesser des Lasers auf der Oberfläche des Laserschutzfilters $d_{63} = 1,0 \text{ mm}$ beträgt. Beim cw-Nd:YAG-Laser QY-1000D beträgt dieser Abstand 99 mm und beim gepulsten Nd:YAG-Laser HL 204 P 101 mm. Zur Detektion einer Laserstrahltransmission ist ca. 30 mm hinter der Probe ein geschwärztes Fotopapier angebracht. Der Absaugtrichter, welcher den entstehenden Rauch und Ruß einfängt, ist ca. 250 mm über der Beschussstelle positioniert. Der Leistungsmesskopf, mit welchem die Laserleistung vor jedem Versuch eingestellt wurde, befindet sich im Strahlengang hinter dem Fotopapier und agiert falls notwendig als Strahlenfalle.

3.4.2 Versuchsaufbau für die Wellenlänge 10600 nm

Der experimentelle Messaufbau zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern bei einer Wellenlänge von 10600 nm am CO₂-Laser Microstorm gleicht dem Messaufbau an den Nd:YAG-Lasern und ist in Abb. 3.11 und Abb. 3.12 dargestellt.

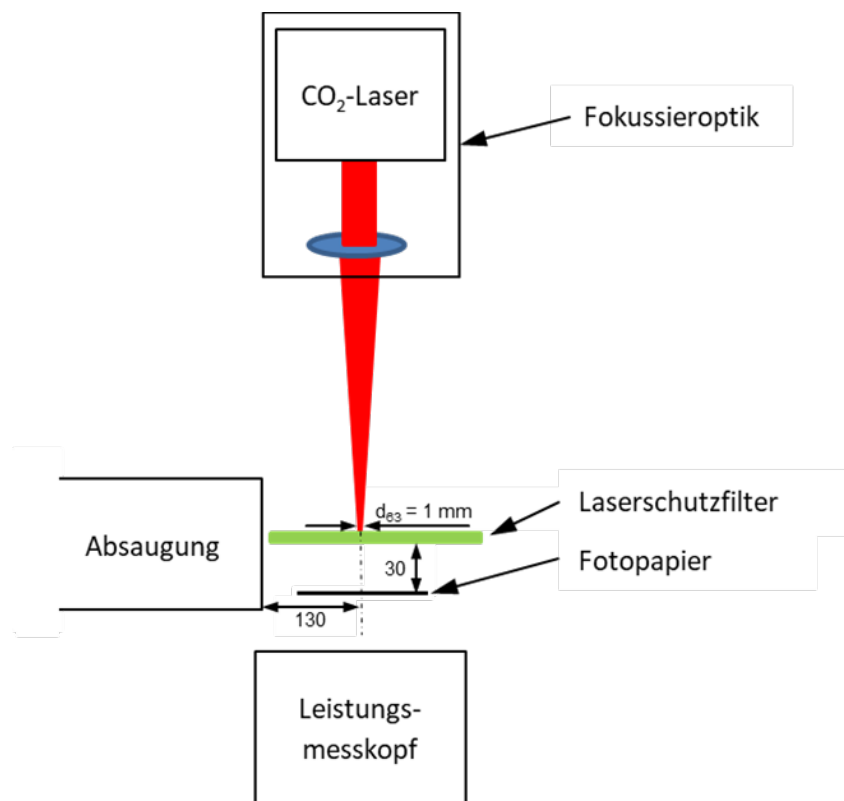


Abb. 3.11 Schematischer Versuchsaufbau am CO₂-Laser zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern

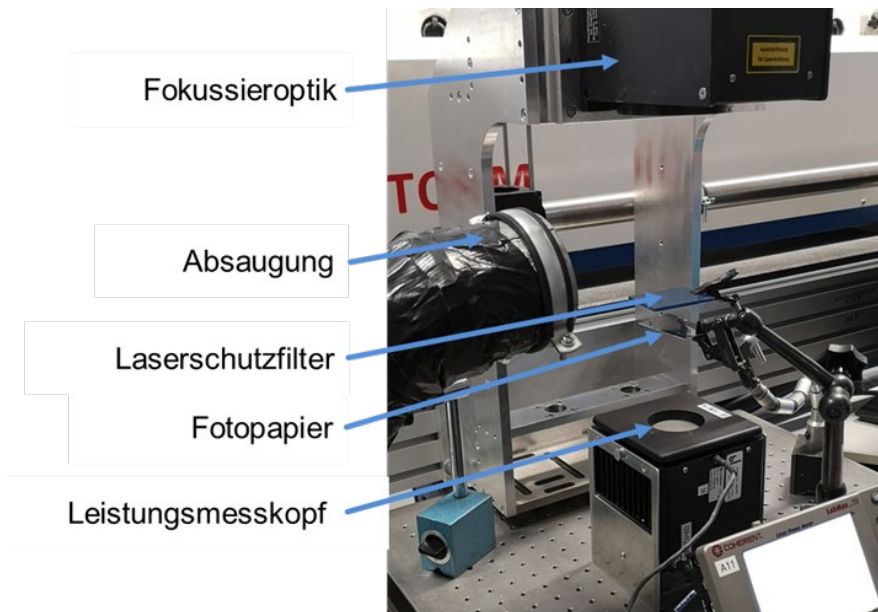


Abb. 3.12 Versuchsaufbau am CO₂-Laser zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern

Die Fokussieroptik ist so angeordnet, dass der Laserstrahl vertikal austritt. Der zu prüfende Laserschutzfilter wird durch eine Halterung senkrecht im Strahlengang fixiert. Der Abstand zwischen Fokussieroptik und Probenoberfläche ist mit 156 mm so eingestellt, dass der Strahldurchmesser des Lasers auf der Oberfläche des Laserschutzfilters $d_{63} = 1,0$ mm beträgt. Zur Detektion einer Laserstrahltransmission ist ca. 30 mm hinter der Probe ein geschwärztes Fotopapier angebracht. Der Absaugtrichter, welcher den entstehenden Rauch und Ruß einfängt, ist ca. 130 mm seitlich neben der Beschussstelle positioniert. Der Leistungsmesskopf, mit welchem die Laserleistung vor jedem Versuch eingestellt wurde, befindet sich im Strahlengang hinter dem Fotopapier und agiert notfalls als Strahlenfalle.

3.5 Versuchsaufbauten zur Messung der optischen Kenngrößen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die optischen Kenngrößen spektraler Transmissionsgrad (optische Dichte OD), Lichttransmission und Streulicht untersucht.

Der spektrale Transmissionsgrad (optische Dichte, OD oder $D(\lambda)$) definiert die Abschwächung von Licht, welches durch einen optischen Filter strahlt. Er bestimmt somit die Filterwirkung von Filtergläsern und Tragkörpern. Mit höherer optischer Dichte wird die Abschwächung der Strahlung durch den Filter größer. Zur Berechnung der OD wird der dekadische Logarithmus vom Verhältnis der transmittierten Leistung P_t zur einstrahlenden Leistung P_i gebildet:

$$D(\lambda) = \log_{10}\left(\frac{P_i(\lambda)}{P_t(\lambda)}\right) \quad (3.1)$$

Gemäß EN 207 darf der spektrale Transmissionsgrad nach der UV-Alterung in keinem Fall den maximalen spektralen Transmissionsgrad für die angegebene Schutzstufe überschreiten.

Die Lichttransmission τ_V , auch Tageslichttransmission oder Visible Light Transmission (VLT) genannt, definiert den Grad der Lichtabschwächung im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 780 nm, wobei $\tau_F(\lambda)$ den spektralen Transmissionsgrad des Filters und $S_{D65}(\lambda)$ die spektrale Strahlungsverteilung der CIE-Normlichtart D65 darstellen. Bestimmt wird die Lichttransmission in Bezug auf das Normlicht D65 und wird mit der spektralen Empfindlichkeit des Auges für Tagessehen $V(\lambda)$ gewichtet:

$$\tau_V = \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \tau_F(\lambda) * V(\lambda) * S_{D65}(\lambda) * d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} V(\lambda) * S_{D65}(\lambda) * d\lambda} \quad (3.2)$$

Gemäß EN 207 muss die relative Änderung des Lichttransmissionsgrades nach der UV-Alterung $\leq 10 \%$ betragen.

Streulicht entsteht immer dann, wenn Licht auf eine Oberfläche mit anderer optischer Dichte trifft. Im Fall der Laserschutzfilter trifft das Laserlicht auf das Filtermaterial, welches eine höhere optische Dichte besitzt als Luft. Gemäß EN 207 darf der reduzierte Leuchtdichtekoeffizient eines Filters nach der UV-Alterung nicht über $0,5 \text{ cd/m}^2/\text{lx}$ steigen.

3.5.1 Spektrophotometer Cary 6000i

Das UV-Vis-NIR Spektrophotometer Cary 6000i von Varian Inc., welches in der Abb. 3.13 gezeigt wird, wurde für die Messungen des spektralen Transmissionsgrades (optische Dichte OD) nach EN 167, Absatz 6 [9], verwendet. Der Lichttransmissionsgrad wurde mit Hilfe dieser Messwerte berechnet.



Abb. 3.13 UV-Vis-NIR Spektrophotometer Cary 6000i von Varian Inc.

In der Cary WinUV-Software wird der Messbereich von 180-1800 nm ausgewählt, die Abschwächer 2.0 in den Referenzstrahlengang eingesetzt und die Baseline (100 % und 0 % Messungen) bestimmt. Anschließend wird der Laserschutzfilter in die Probenhalterung unter 0° Winkelstellung eingespannt und die Messung gestartet. Nach der Messung werden die Messwerte in ein Excel-Format exportiert und ausgewertet. Das Cary 6000i kann bis etwa OD 8 messen, die Messgeschwindigkeit beträgt 600 nm/min und das Datenpunktintervall 1 nm.

3.5.2 Laserdensitometer (Eigenbau)

Das Laserdensitometer (Eigenbau), welches in Abb. 3.14 gezeigt wird, wurde für die Messung des spektralen Transmissionsgrads (optische Dichte OD) bei 1064 nm verwendet.

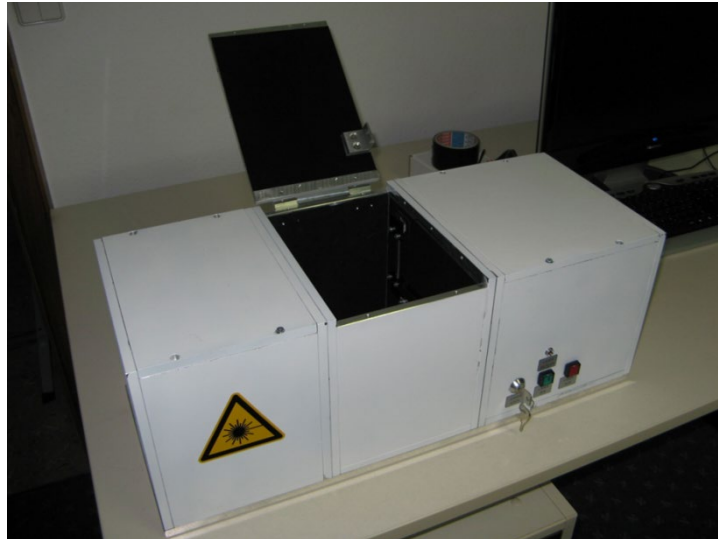


Abb. 3.14 Laserdensitometer (Eigenbau)

Das Messgerät ist auf die Wellenlänge 1064 nm beschränkt und kann die optische Dichte (OD) von Laserschutzfiltern bis OD 10 binnen weniger Sekunden Messzeit mit hinreichender Präzision bestimmen.

Die gesamte Messeinrichtung wird von einem Laptop über USB-Schnittstelle gesteuert. In das Messwerterfassungs- und Auswertesystem ist ein Software-Lockin integriert. Die Laserstrahlung wird mit Hilfe eines Choppers mechanisch moduliert. Die Signale werden mit einer USB-Messwerterfassungskarte digitalisiert und einem selbst programmierten Lockin-Algorithmus ausgewertet. Das Messgerät besteht aus Laserkammer, Sensorkammer und Probenkammer. Die Laserkammer beinhaltet eine justierbare Halterung für die Laserstrahlquelle sowie einen mechanischen Chopper. Die Sensorkammer beinhaltet im Wesentlichen den eigentlichen Photosensor (Photodiode) sowie den Vorverstärker. Die Probenkammer befindet sich zwischen Laser- und Sensorkammer. Hier wird das Probenmaterial untergebracht. Die Entwicklung des Messgeräts wurde über einen Innovationsgutschein des Landes Baden-Württemberg gefördert.

3.5.3 Kleinwinkelstreulichtmessgerät (Eigenbau)

Der Messaufbau zur Messung des Streulichts nach DIN 167, Absatz 4 [9], (reduzierter Leuchtdichtekoeffizient nach vereinfachten Verfahren – Kleinwinkelstreuung) ist in Abb. 3.15 dargestellt. Mit einem Laser der Wellenlänge 532 nm wird in der Einheit des Messaufbaus ein nahezu paralleles und aufgeweitetes Strahlenbündel mit einem Durchmesser von ca. 2,5 mm erzeugt. Das linear polarisierte Licht wird durch die nachfolgende $\lambda/4$ -Folie zu zirkular polarisiertem Licht umgewandelt. Der Laserstrahl trifft dann senkrecht auf den Prüfling und wird teilweise an ihm gestreut. Nach definiertem

Abstand folgt eine Haltevorrichtung mit einer Ringblende und einer Lochblende. Ring- und Lochblende sind in dieser Anordnung so dimensioniert, dass keine beweglichen Teile, wie z. B. Schrittmotoren, benötigt werden.

Bei der Messung werden zunächst die Messwerte ohne Prüfling ermittelt. Dazu wird im Programm die „Gerätestreulichtmessung“ durchgeführt. Hierzu werden die Werte der Ring- und Lochblende ohne Prüfling erfasst. Daraus lässt sich der reduzierte Leuchtdichtekoeffizient der Apparatur ermitteln. Dann wird der Prüfling in den Strahlengang gebracht und es werden erneut die Messwerte mit Loch- und Ringblende ermittelt. Diese Werte entsprechen dann dem gestreuten bzw. dem nicht gestreuten Licht der Apparatur und des Prüflings. Die Differenz zwischen dem ermittelten Streulicht mit Prüfling und dem der Apparatur ergibt den Wert des reduzierten Leuchtdichtekoeffizienten des Prüflings.

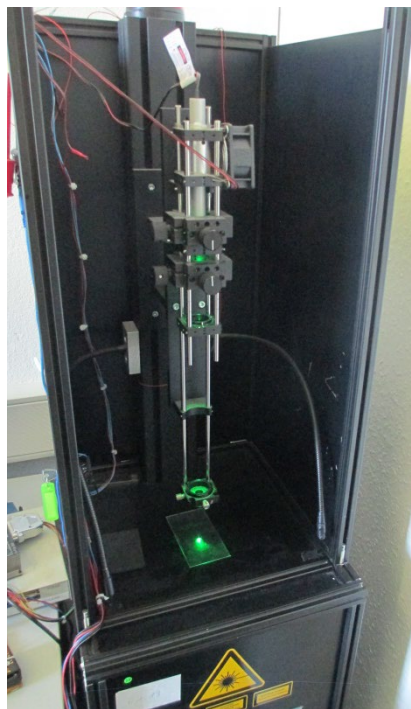


Abb. 3.15 Kleinwinkelstreulichtmessgerät (Eigenbau)

4 Untersuchungsmethodik zur Bestimmung der Alterungsbeständigkeit von Laserschutzfiltern

Für die Bestimmung der Alterungsbeständigkeit von Laserschutzfiltern wurden auf der einen Seite Untersuchungen an künstlich mittels UV-Strahlung gealterten Laserschutzfiltern durchgeführt. Auf der anderen Seite erfolgten Untersuchungen an natürlich gealterten Laserschutzfiltern.

4.1 Untersuchungsmethodik für Filterversagen bei künstlicher Alterung

4.1.1 Versuchsplanung künstliche Alterung

Um die Alterungsbeständigkeit von Laserschutzfiltern bei künstlicher Alterung zu untersuchen, wurde folgendes Vorgehen festgelegt. Für die Untersuchungen wurden die in Laserschutzbrillen am häufigsten eingesetzten Filtermaterialien Polycarbonat (PC) und Polymethylmethacrylat (PMMA) gewählt. Die Filter haben die Abmessungen $60 \times 60 \times 3 \text{ mm}^3$ bzw. $60 \times 30 \times 3 \text{ mm}^3$. Um eine systematische Untersuchung von Alterungseffekten zu ermöglichen, wurden die Schutzfilter durch Bestrahlung mit UV-Strahlung künstlich gealtert. Die Bestrahlungsdauer betrug für einen Teil der Filter 50 Stunden. Ein anderer Teil wurde für 200 Stunden bestrahlt, was erfahrungsgemäß einer permanenten Lagerung für mehrere Jahre unter direkter Sonneneinstrahlung entspricht. Somit sollten unterschiedliche Alterungszustände simuliert werden. Zusätzlich wurden im Verlaufe dieses Projektes noch einige PMMA-Filter für 600 h mittels UV-Strahlung gealtert sowie einige PMMA-Filter einer künstlichen Bewitterung mit Xenonlicht ausgesetzt. Als Bewertungskriterien wurden die Laserbeständigkeit bei 1064 nm und 10600 nm sowie die optische Dichte, der Lichttransmissionsgrad und das Streulicht der künstlich gealterten Laserschutzfilter im Vergleich zu neuen Filtern des jeweils selben Typs gemessen.

Die Laserbelastungsprüfungen erfolgten gemäß der Norm EN 207:2017. Der Laserstrahldurchmesser auf der Probenoberfläche betrug in jedem Fall $d_{63} = 1 \text{ mm}$. Zudem wurde der Abstand zwischen dem Absaugtrichter und der Beschussstelle festgelegt, da eine Variation des Abstandes die Sogwirkung und damit die Rauch- und Flammenbildung und letztendlich die Filterstandzeit beeinflussen würde. Anstatt der in der Norm festgelegten Prüfdauer von fünf Sekunden wurden die Filter bis zum Durchschuss geprüft. Mit einer Stoppuhr wurde die Zeitdauer bis zum Durchschuss eines jeden Filters gemessen, das heißt die Zeitspanne vom Bestrahlungsbeginn bis zur Detektion einer Laserstrahltransmission mittels eines hinter dem geprüften Filter angebrachten Fotopapiers. Diese Zeitdifferenz stellt die Standzeit des Laserschutzfilters dar und dient als Vergleichskriterium zwischen unterschiedlich gealterten Proben.

4.1.2 Festlegung der Versuchskriterien für die Untersuchungen zur künstlichen Alterung

4.1.2.1 Durchschussdetektion

Um vergleichbare Ergebnisse bei den Laserbelastungsprüfungen zu erhalten, musste ein Kriterium zur Detektion eines Durchschusses, das heißt einer Laserstrahltransmission hinter dem Laserschutzfilter, festgelegt werden. Dazu wurden zunächst Vorversuche mit dem Leistungsmesskopf LM-200, welcher hinter dem Filter angeordnet war, durchgeführt. Allerdings detektierte der Messkopf auch die Wärme, die von der bestrahlten Probe ausging. Somit wurde auf dem Anzeigegerät permanent eine geringe Leistung angezeigt, welche ständigen Schwankungen unterlag. Der eigentliche Durchschuss war daher nur sehr schwierig zeitlich exakt zu erfassen. Die andere getestete Variante war die Verwendung eines geschwärzten Fotopapiers. Dieses wurde hinter dem Filter angeordnet und konnte eine transmittierte Laserleistung mittels eines Einbrandes eindeutig und reproduzierbar aufzeigen. Somit wurde das Fotopapier als geeigneter Indikator für die Detektion eines Durchschusses gewählt.

4.1.2.2 Laserleistung

Um eine geeignete Laserleistung für die Laserbelastungsprüfungen an den künstlich mittels UV-Strahlung gealterten Filtern zu definieren, wurden Vorversuche an ungealterten PC- und PMMA-Filtern durchgeführt.

Die PMMA-Filter sind für D LB6 bei 1064 nm zertifiziert, was einer Laserleistung von 7,85 W für 5 s entspricht. Der angenommene Fehler beim Stoppen der Zeit von Hand mittels einer Stoppuhr wurde mit 1,5 s angesetzt. Um den Fehler durch das händische Stoppen auf maximal 5 % zu begrenzen, musste die Filterstandzeit mindestens 30 s betragen. Bei einer kürzeren Zeit, bei Verwendung einer höheren Laserleistung, wäre der Einfluss des Fehlers bei der Ermittlung der Standzeit zu groß geworden. Versuche mit deutlich weniger Leistung, also folglich mit einer längeren Standzeit, hätten die Reproduzierbarkeit der Versuche schwieriger gemacht, da hier beispielsweise die Verbrennung des Materials einen größeren Einfluss auf das Ergebnis gehabt hätte. Die Vorversuche ergaben eine Filterstandzeit von etwa 30 s bei einer eingestellten Laserleistung von 30 W. Damit lag die eingestellte Laserleistung um ca. Faktor 4 höher als die Schutzstufe D LB6, für die die Filter zertifiziert sind.

Die PC-Filter sind bei 1064 nm ebenfalls für D LB6 zertifiziert. Versuche mit bis zu 80 W mussten nach spätestens 25 s aufgrund zu starker Flammenbildung an der Laserseite der Filteroberfläche abgebrochen werden, ohne dass ein Durchschuss erreicht werden konnte. Alternativ wurden Versuche am gepulsten Nd:YAG-Laser HL 204 P durchgeführt. Die PC-Filter sind für I LB8 zertifiziert, was einer Laserleistung von 1,48 W entspricht. In den Vorversuchen war ein Durchschuss bei 14,8 W und 10 Hz, was I LB9 entspricht, nach etwa 9 s zu erzielen.

Für 10600 nm sind die PMMA-Filter zwar nicht zertifiziert, aber dennoch geeignet. Hier wurde im cw-Laserbetrieb bei 1,6 W ein Durchschuss nach etwa 30 s erreicht. Dies entspricht etwa dem zweifachen Wert der Schutzstufe D LB3. Bei den PC-Filtern war bei 10600 nm weder im cw- noch im gepulsten Laserbetrieb auch bei deutlich erhöhter Laserleistung ein Durchschuss zu erzielen.

4.1.2.3 Laserstrahldurchmesser

In Anlehnung an die Norm EN 207 wurden alle Versuche mit einem Laserstrahldurchmesser von $d_{63} = 1,0$ mm auf der Probenoberfläche durchgeführt. Dieser Wert wurde durch das Anpassen des Abstandes zwischen Probe und Fokussieroptik eingestellt.

Zur korrekten Einstellung des Laserstrahldurchmessers d_{63} am cw-Nd:YAG-Laser QY-1000D wurde die in Abb. 4.1 dargestellte Kaustik des Laserstrahls herangezogen. Sie wurde ebenso wie die Kaustik des gepulsten Lasers HL 204 P mit dem Strahlvermessungssystem FocusMonitor der Fa. Primes gemessen. Die Kaustik des CO₂-Lasers Microstorm wurde berechnet.

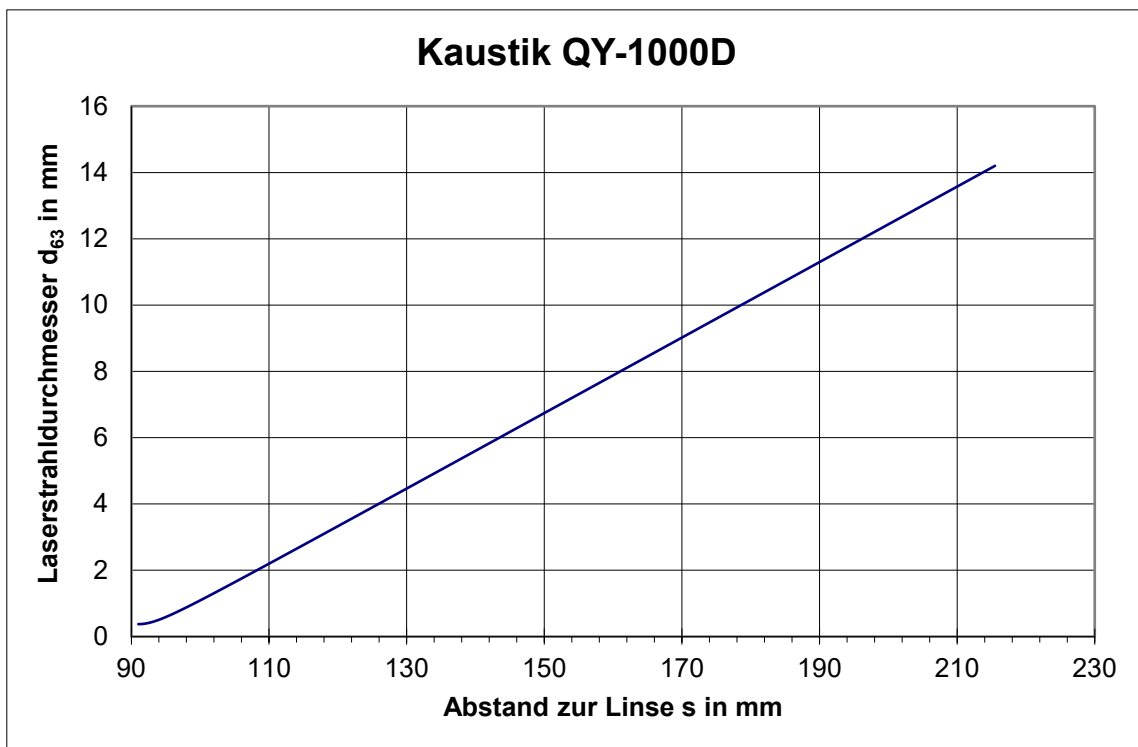


Abb. 4.1 Laserstrahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 100$ mm) des cw-Nd:YAG-Lasers QY-1000D, gemessen mit FocusMonitor (Fa. Primes)

Zur korrekten Einstellung des Laserstrahldurchmessers d_{63} am gepulsten Laser HL 204 P wurde die in Abb. 4.2 dargestellte Kaustik des Laserstrahls verwendet.

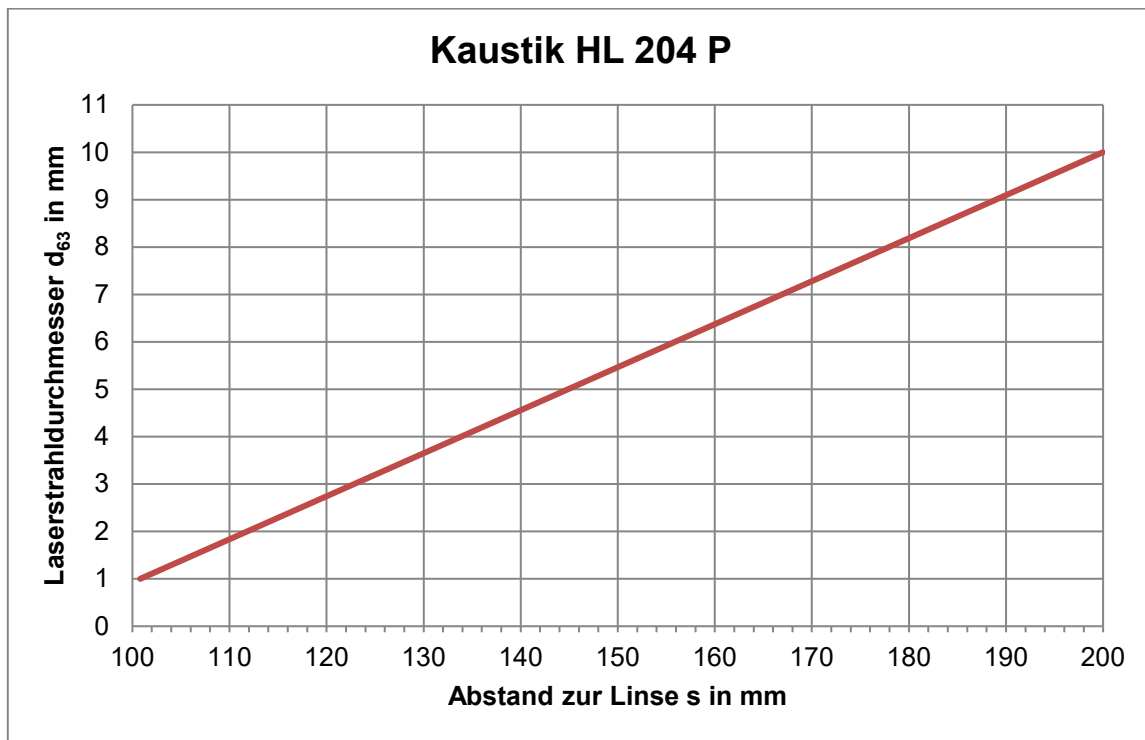


Abb. 4.2 Laserstrahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 100$ mm) des gepulsten Nd:YAG-Lasers HL 204 P, gemessen mit FocusMonitor (Fa. Primes)

Die in Abb. 4.3 dargestellte Kaustik wurde zur korrekten Einstellung des Laserstrahldurchmessers d_{63} am CO₂-Laser eingesetzt.

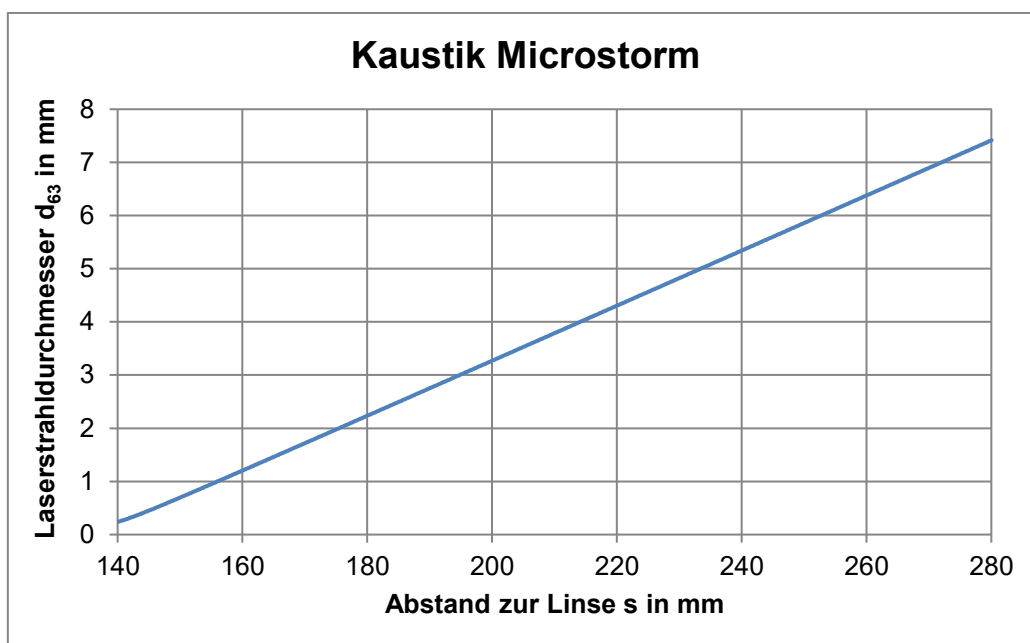


Abb. 4.3 Berechnete Laserstrahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 100$ mm) des CO₂-Lasers Microstorm

4.2 Untersuchungsmethodik zur Ermittlung der optischen Kennwerte bei künstlicher Alterung

Der spektrale Transmissionsgrad, die Lichttransmission und das Streulicht wurden an jeweils sechs PMMA- und PC-Filtern vor der 50 h UV-Alterung und anschließend zwecks besserer Vergleichbarkeit an jeweils denselben sechs Filtern nach der 50 h UV-Alterung mit den in Abschnitt 3.5 beschriebenen Messgeräten ermittelt. Nach gleichem Vorgehen wurden jeweils sechs weitere PMMA- und PC-Filter für die Ermittlung der optischen Kennwerte vor und nach einer 200-stündigen UV-Alterung verwendet.

Zusätzlich erfolgten bei 1064 nm an den ungealterten, 50 h und 200 h UV-gealterten PMMA- und PC-Filtern mittels eines Laserdensitometers Messungen des spektralen Transmissionsgrads.

Der spektrale Transmissionsgrad wurde weiterhin an je einem PMMA- und PC-Filter nach 200 h UV-Alterung an einem Dünnschliff gemessen, weil die gemessenen OD-Werte aufgrund der geringeren Materialstärke nicht außerhalb der Messbereichsgrenze des verwendeten Spektrometers Cary 6000i liegen. Dieser Dünnschliff hat eine Materialstärke von 1 mm und wurde von der UV-bestrahlten Seite des Filters angefertigt. Die Dünnschliffe wurden jeweils mit dem Cary 6000i und mit dem Laserdensitometer vermessen.

4.3 Untersuchungsmethodik für Filterversagen bei natürlicher Alterung

4.3.1 Versuchsplanung natürliche Alterung

Die künstlich mittels UV-Strahlung gealterten Laserschutzfilter bilden die Realität nicht naturgetreu ab, sondern dienen vielmehr der Bestimmung der Alterungsbeständigkeit unter definierten und damit vergleichbaren Bedingungen. Daher ist die Betrachtung der Schutzigenschaften real „im Feld“ gealterter Laserschutzbrillen besonders interessant. Damit sind die Brillen gemeint, welche bereits jahrelang im Einsatz sind. Manch Anwender wird sich bei Betrachtung einer über zehn Jahre alten Brille schon gefragt haben, ob deren Schutzwirkung noch gegeben ist. Um diesen Überlegungen nachzugehen, wurden in einer aufwendigen Aktion gebrauchte Laserschutzbrillen aus der betrieblichen Praxis zurückgewonnen. Sofern zu diesen noch unveränderte Neuprodukte auf dem Markt existierten, wurden die Laserbeständigkeiten der Altbrillen sowie ihrer fabrikneuen Pendanten nach der aktuellen Norm EN 207:2017 geprüft und miteinander verglichen.

Diese Filter wurden möglichst bis zum Durchschuss getestet. Hierfür wurden Laserschutzbrillen ausgesucht, die mindestens zehn Jahre alt sind und eine Schutzstufe bei 1064 nm für cw-Betrieb aufweisen. Weitere Brillen, welche eine D-Schutzstufe bei 10600 nm aufweisen, wurden entsprechend bei dieser Wellenlänge getestet. Der Großteil der zurückgewonnenen Altfilter besteht aus Glas. Nur wenige Altfilter sind aus Kunststoff und jünger als 10 Jahre. Es wurden jeweils ein oder mehrere baugleiche Altfilter im Vergleich zu ein bis zwei baugleichen Neufiltern geprüft.

Weitere Altbrillen, welche mindestens 10 Jahre alt, aber nicht mehr als Neuprodukte verfügbar sind, wurden auf Beständigkeit der zertifizierten D-Schutzstufe bei 1064 nm bzw. 10600 nm geprüft.

Wie bereits die Versuche mit den künstlich gealterten Filtern erfolgten die Laserbelastungsprüfungen an den natürlich gealterten Filtern ebenfalls gemäß der Norm EN 207:2017. Der Laserstrahldurchmesser auf der Probenoberfläche ist auf $d_{63} = 1$ mm festgelegt. Die Versuchsaufbauten entsprachen den in Abschnitt 3.4 beschriebenen Aufbauten zur Messung des Filterversagens. Anstatt der in der Norm festgelegten Prüfdauer von 5 s wurden die Proben jedoch mindestens 10 s, da dies in der Norm EN 207 in Fassungen vor 2010 gefordert war, bzw. bis zum Durchschuss getestet. Mit einer Stoppuhr wurde die Zeitdauer bis zum Durchschuss eines jeden Filters gemessen, das heißt die Zeitspanne vom Bestrahlungsbeginn bis zur Detektion einer Laserstrahltransmission auf einem Fotopapier hinter dem geprüften Filter. Diese Zeitdifferenz stellt die Standzeit des Laserschutzfilters dar und diente als Vergleichskriterium zwischen Alt- und Neufiltern.

Alle geprüften Altfilter wiesen keine größeren Kratzspuren auf der Filteroberfläche auf. Kleine Kratzspuren haben allgemein keine negativen Auswirkungen auf die Laserbeständigkeit unbeschichteter Filter, da die Schutzwirkung dieser Filter durch das gesamte Volumen und nicht nur durch eine spezielle Oberfläche der Filter erreicht wird.

Es wurden keine beschichteten Filter geprüft, da diese sofort auszusortieren sind, sobald Kratzer auf der Brille zu erkennen sind. Dieser Hinweis ist in den Bedienungsanleitungen der beschichteten Filter aufgeführt.

4.3.2 Festlegung der Versuchskriterien für die Untersuchungen zur natürlichen Alterung

4.3.2.1 Durchschussdetektion

Wie bei den Versuchen zur künstlichen Alterung wurde der Durchschuss, d. h. das Erkennen einer Lasertransmission hinter dem Filter, mit einem Fotopapier detektiert. Die Prüfdauer für Filter, die wegen nicht mehr erhältlicher baugleicher Neufilter nicht bis zum Durchschuss, sondern auf Bestehen der zertifizierten L-Schutzstufe geprüft wurden, betrug 10 s, entsprechend der alten Fassung der Norm EN 207.

4.3.2.2 Laserleistung

Für Altfilter, für die noch baugleiche Neuprodukte auf dem Markt erhältlich sind, wurden die Laserbelastungsprüfungen mit teils deutlich höheren Laserleistungen geprüft als die zertifizierten Schutzstufen vorgeben, um möglichst innerhalb einer vertretbaren Zeitspanne einen Durchschuss erzielen zu können. Die jeweils eingestellten Laserleistungen sind Tab. 5.1 und im Abschnitt 5.2.1.1 zu entnehmen. Filter, für die keine baugleichen Neufilter verfügbar sind, wurden auf das Bestehen der zertifizierten Schutzstufe geprüft. Dabei orientierten sich die Laserleistungen an den Schutzstufen der Brillen. Die jeweiligen Laserleistungen sind in Tab. 5.3 und Tab. 5.4 im Abschnitt 5.2.1.2 aufgeführt.

4.3.2.3 Laserstrahldurchmesser

Gemäß EN 207 wurden alle Versuche mit einem Laserstrahldurchmesser von $d_{63} = 1,0$ mm auf der Probenoberfläche durchgeführt. Dieser Wert wurde durch das Anpassen des Abstandes zwischen Probe und Fokussieroptik wie beschrieben eingestellt.

Zur korrekten Einstellung des Laserstrahldurchmessers d_{63} am cw-Nd:YAG-Laser QY-1000D wurde die in Abb. 4.1 (Abschnitt 4.1.2) dargestellte Strahlkaustik, welche mit dem Strahlvermessungssystem FocusMonitor der Firma Primes gemessen wurde, herangezogen. Beim CO₂-Laser wurde die in Abb. 4.3 gezeigte berechnete Kaustik verwendet.

4.4 Untersuchungsmethodik zur Ermittlung der optischen Kennwerte bei natürlicher Alterung

Der spektrale Transmissionsgrad, die Lichttransmission und das Streulicht wurden an allen Altfiltern, zu denen noch baugleiche Neufilter erhältlich sind, gemessen. Dabei wurde die Lichttransmission jeweils von zwei verschiedenen Institutionen gemessen, um systematische Fehlerquellen ausschließen zu können. Das Streulicht wurde an jedem Altfilter zweimal gemessen. Soweit noch baugleiche Neufilter am Markt erhältlich waren, wurden diese optischen Kennwerte ebenfalls an diesen gemessen bzw. es wurden in Einzelfällen die Herstellerangaben herangezogen und mit den Messwerten der Altfilter verglichen.

5 Untersuchungsergebnisse und Diskussion

5.1 Künstliche Alterung

5.1.1 Laserbelastungsprüfungen

5.1.1.1 Laserbelastungsprüfungen an PMMA-Filtern bei 1064 nm

Die Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen an künstlich mittels UV-Strahlung gealterten PMMA-Filtern bei einer Wellenlänge von 1064 nm sind in Abb. 5.1 dargestellt. Je Alterungsstatus (ungealtert, 50 h UV-gealtert und 200 h UV-gealtert) wurden sechs Filter beschossen. Es ist eine geringfügige Abnahme der Standzeiten mit zunehmender UV-Alterung zu erkennen. Die gemessenen Werte der 200 h mittels UV-Strahlung gealterten PMMA-Filter liegen etwa 10 % unter denen der ungealterten Filter. Trotzdem liegen die ermittelten Werte weit oberhalb der nach aktueller Norm EN 207 geforderten Standzeit. Die mit D LB6 zertifizierten PMMA-Filter müssen demnach einer Laserleistung von 7,85 W für eine Zeitdauer von 5 s standhalten. Alle geprüften PMMA-Filter erzielten selbst bei einer etwa viermal so großen Laserleistung von 30 W Standzeiten von über 25 s.

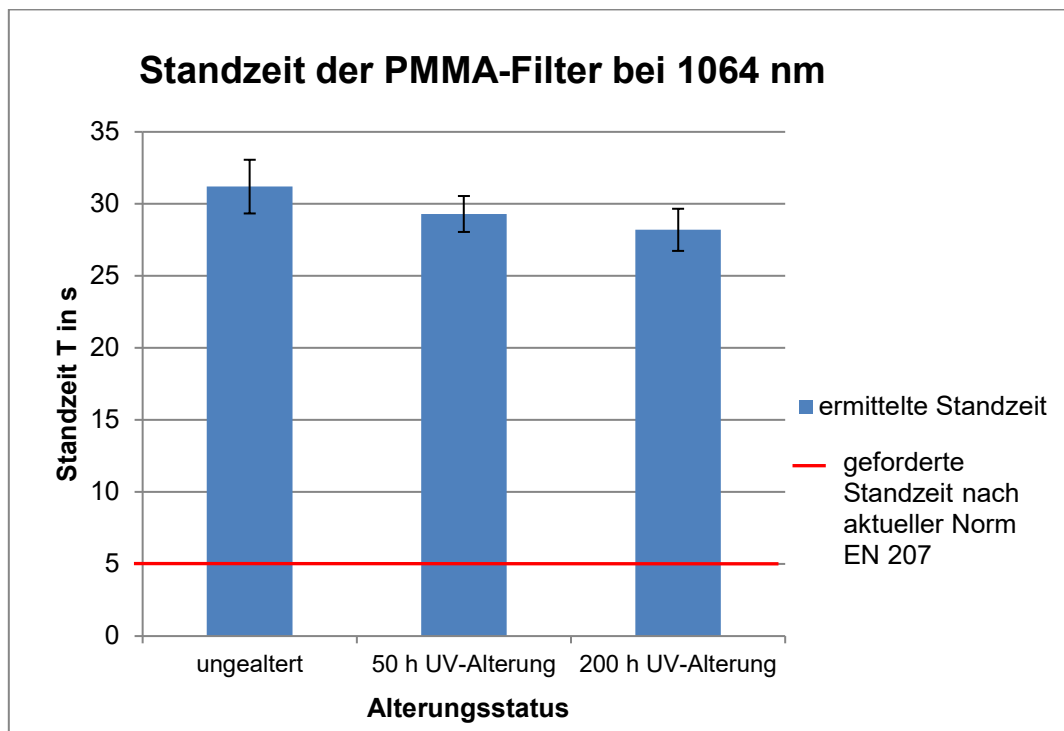


Abb. 5.1 Filterstandzeit T der PMMA-Filter in Abhängigkeit des Alterungsstatus bei Laserbelastung mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W; angegeben sind Mittelwerte (n = 6)

Während der Laserbelastungsprüfungen zeigten die Beschussstellen ein sehr gleichmäßiges Verhalten hinsichtlich der visuell erkennbaren Reaktionen. Der Laserstrahl koppelte sofort nach Anschalten des Lasers in das Material ein. Im Laufe des Versuchs zeigte sich eine zunehmende Aufschäumung des PMMA-Materials. Stellvertretend für die Beschussversuche aller PMMA-Filter bei 1064 nm ist in Abb. 5.2 die Beschussituation am Beispiel eines ungealterten PMMA-Filters dargestellt.

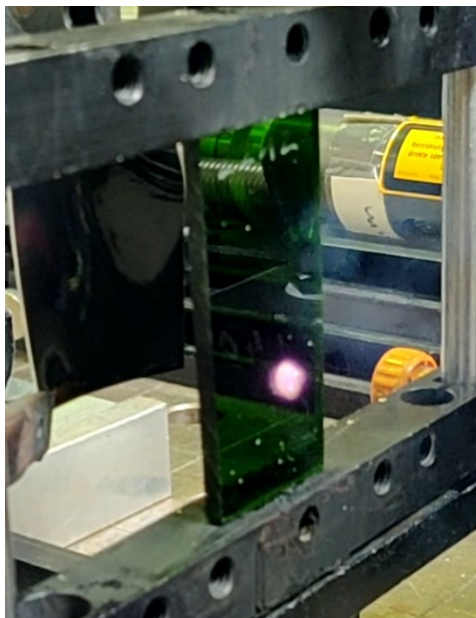


Abb. 5.2 Laserbelastungsprüfung eines ungealterten PMMA-Filters am cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W

In Abb. 5.3 sind die Beschussstellen unterschiedlich gealterter PMMA-Filter nach den Laserbelastungsprüfungen bei 1064 nm vergleichend gegenübergestellt. Da die Filter bis zum Durchschuss, das heißt bis eine Laserstrahltransmission auf dem Fotopapier hinter dem Filter detektiert wurde, getestet wurden, sind in den Filtern Löcher zu erkennen. An diesen Stellen ist das Material aufgeschmolzen und verdampft. Zudem ist die Aufschäumung des Materials im Bereich der Wärmeeinflusszone gut erkennbar. Diese thermischen Effekte beruhen auf der Absorption der Laserstrahlung im Filtermaterial, hervorgerufen durch die in der Polymermatrix integrierten Additive. Die Polymermatrix an sich ist für die Laserwellenlänge 1064 nm nahezu transparent. Wegen der Erhitzung der Additive durch die Laserstrahlung zersetzen sich diese und verändern ihre Absorptionseigenschaften. Damit dringt der Laserstrahl tiefer in den Laserschutzfilter ein. Je tiefer der Strahl in die Probe eindringt, desto mehr erhitzt sich das Innere des Filtermaterials. Dadurch beginnt die Polymermatrix zu schmelzen. Während dieser Aufschmelzung entstehen Gase, die aufsteigen und das Aufschäumen des Filtermaterials um die Beschussstelle herum bewirken.

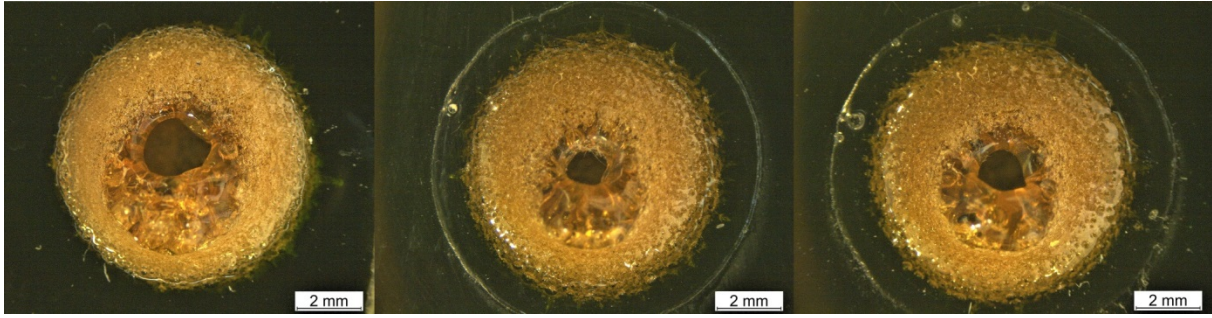


Abb. 5.3 Schadensbilder der Laserbelastungsprüfungen an PMMA-Filtern mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W; links ungealtert, Mitte 50 h UV-gealtert, rechts 200 h UV-gealtert

Wie Abb. 5.3 zeigt, sind in Abhängigkeit des Alterungsstatus keine deutlichen Unterschiede bezüglich des optischen Erscheinungsbildes der Beschussstellen zu erkennen. Lediglich die Wärmeeinflusszone um die Beschussstelle herum erscheint bei den UV-gealterten Filtern im Gegensatz zum ungealterten Filter vergrößert. Ein deutlich ausgeprägter Schmelzring ist erkennbar, was aber offenbar keinen relevanten Einfluss auf die Standzeit hat. Die größere Wärmeeinflusszone bei den UV-gealterten Filtern resultiert vermutlich aus der durch die UV-Bestrahlung gesunkenen Schmelz- und Glasktemperatur. Auch das optische Erscheinungsbild der Filter insgesamt nach dem Laserbeschuss, dargestellt in Abb. 5.4, zeigt keine offensichtlichen Unterschiede bezüglich der Beschussstellen und der sichtbaren Transparenz in Abhängigkeit des Alterungsstatus.



Abb. 5.4 PMMA-Filter nach Laserbelastungsprüfungen mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W; links ungealtert, Mitte 50 h UV-gealtert, rechts 200 h UV-gealtert

Zusätzlich wurden drei Filter für 600 h unter UV-Strahlung gealtert und geprüft. Drei weitere Filter wurden einer künstlichen Bewitterung mit Xenonlicht ausgesetzt. Die 600 h unter UV-Strahlung gealterten Filter erreichten Standzeiten von etwa 37,7 s, was über den Werten der ungealterten und der bei 50 h sowie 200 h gealterten Filtern liegt. Ein Grund für die Zunahme der Filterstandzeit könnte die stärkere Streuung der Laserstrahlung an diesen Filtern sein, wie die Abb. 5.5 und Abb. 5.6 zeigen. Hier ist deutlich

die raue Oberfläche des Filters zu erkennen, welche durch die lange UV-Alterung verursacht wurde. Die Beschussstelle selbst ähnelt der der ungealterten bzw. 50 h oder 200 h an UV-Strahlung gealterten Filter. Zudem ist dieser Filter so trüb und die Transparenz so gering geworden, dass eine solche Brille wohl niemand mehr verwenden würde. Mittels 600 h UV-Alterung wurde eine unrealistisch lange Alterung simuliert. Es zeigt sich, dass die Laserbeständigkeit zwar immer noch deutlich über den Normvorgaben liegt. Benutzer einer Laserschutzbrille würden diese aufgrund der kaum noch vorhandenen Transparenz jedoch aussortieren. Die Lasersicherheit ist nach wie vor gegeben.

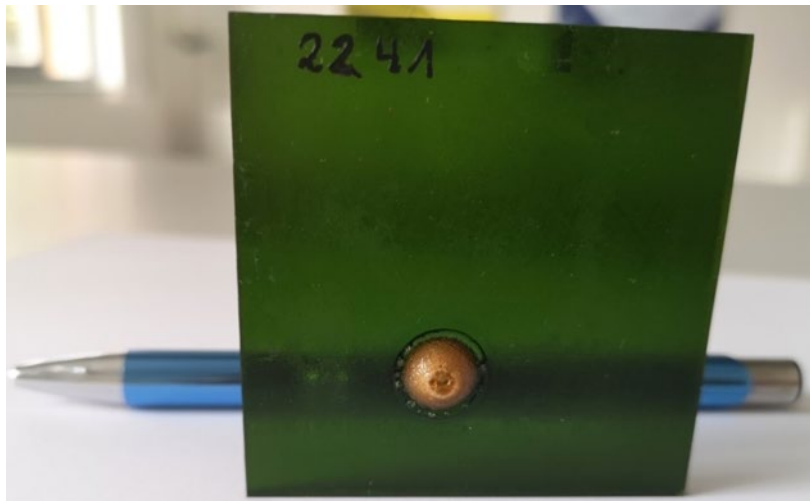


Abb. 5.5 600 h UV-gealterter PMMA-Filter nach Laserbelastungsprüfung mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W



Abb. 5.6 Schadensbild an 600 h UV-gealtertem PMMA-Filter nach Laserbelastungsprüfung mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W; gut erkennbar ist die durch die lange UV-Bestrahlung deutlich aufgeraute Oberfläche des Filters

Auch die Ergebnisse der Standzeituntersuchungen der mittels künstlicher Bewitterung gealterten Filter (siehe Abschnitt 3.3.2) lagen mit einer mittleren Standzeit von etwa 35,7 s über den Werten für ungealterte bzw. mit UV-Strahlung für 50 h und 200 h gealterte PMMA-Filter. Sie erzielten damit ebenfalls Laserbeständigkeiten deutlich oberhalb der Vorgaben der EN 207. Anhand der Beschussstellen, dargestellt in Abb. 5.7,

lassen sich keine offensichtlichen Unterschiede im Schadensbild zu den für 50 h unter UV-Strahlung gealterten Filtern erkennen.

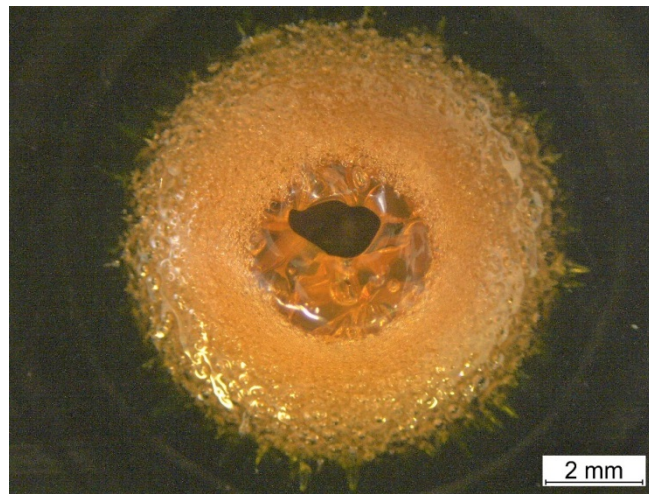


Abb. 5.7 Schadensbild an mittels künstlicher Bewitterung mit Xenonlicht gealtertem PMMA-Filter nach Laserbelastungsprüfung mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die UV-Alterung keinen signifikanten Einfluss auf die Standzeiten der untersuchten PMMA-Filter bei Laserbelastungsprüfungen bei 1064 nm zu haben scheint. Die ermittelten Standzeiten liegen in allen untersuchten Fällen weit oberhalb der von der aktuellen Norm EN 207 geforderten 5 s, womit diese Laserschutzfilter auch nach langer Verwendung ihre Schutzfunktion beibehalten sollten.

5.1.1.2 Laserbelastungsprüfungen an PC-Filtern bei 1064 nm

Im Gegensatz zu den PMMA-Filtern stellte sich heraus, dass systematische Untersuchungen der Laserbeständigkeit an PC-Filtern nicht möglich waren, da diese unabhängig vom Alterungsstatus nur sporadisch bis zum Durchschuss geprüft werden konnten. Oft kam es während der Versuche neben starker Rauch- und Flammenbildung zur weitreichenden Karbonisierung des Filtermaterials im Wechselwirkungsbereich mit dem Laserstrahl. So transmittierte innerhalb einer vertretbaren Zeitspanne meist keine Laserstrahlung durch den Filter und der Versuch musste abgebrochen werden.

Auch bei Versuchen im cw-Betrieb bei 1064 nm war kein Durchschuss an den PC-Filtern zu erzielen. Die für D LB6 zertifizierten Filter müssen laut gültiger Norm während einer Zeit von 5 s einer Laserleistung von 7,85 W standhalten. Alle hier getesteten Filter hielten sogar einer Laserleistung von 80 W für mindestens 20 s stand, wobei die Versuche wegen zu starker Rauch- und Flammenbildung an dieser Stelle abgebrochen werden mussten. In Abb. 5.8 ist ein ungealterter PC-Filter während der Laserbelastungsprüfung im cw-Betrieb bei einer Laserleistung von 80 W zu sehen. Gut ist die erhebliche Rauch- und Flammenbildung zu erkennen.

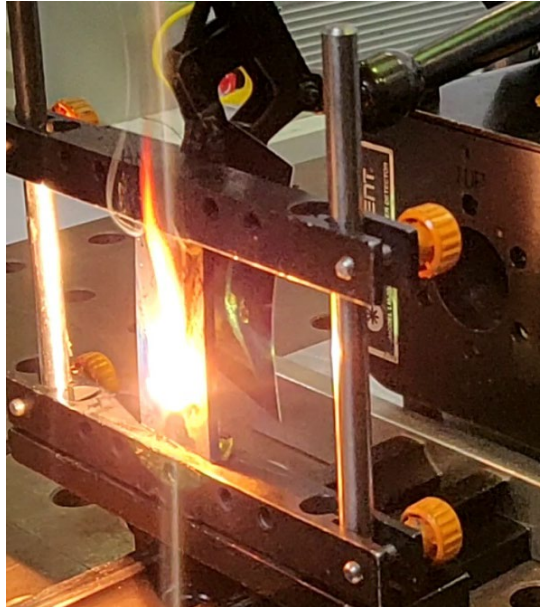


Abb. 5.8 Starke Rauch- und Flammenbildung bei der Laserbelastungsprüfung eines PC-Filters am cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 80 W

Im gepulsten Laserbetrieb waren nur bei wenigen Versuchen Durchschüsse zu erzielen. Bei einer Laserleistung von 14,8 W lagen die Standzeiten dabei zwischen 8 s und 20 s. Die meisten Versuche mussten aber nach 30 s wegen zu starker Rauch- und Flammenbildung, wie bereits die Versuche bei 1064 nm im cw-Betrieb, ohne erreichten Durchschuss abgebrochen werden. Bezüglich ihrer zertifizierten Schutzstufe von I LB8 müssen die PC-Filter lediglich einer Leistung von 1,48 W für 5 s standhalten. Somit übertrafen alle untersuchten PC-Filter deutlich die Normenvorgabe. Beispielhaft für das optische Erscheinungsbild der Beschussstelle bei allen Alterungsstufen ist in Abb. 5.9 ein mit 14,8 W beschossener 200 h unter UV-Strahlung gealterter PC-Filter gezeigt. Neben dem Einschusskrater sind die Aufschäumung des Materials – ähnlich den PMMA-Filtern – und eine starke Karbonisierung und Ablagerung von Schmutz deutlich zu erkennen.



Abb. 5.9 Schadensbild an 200 h UV-gealtertem PC-Filter nach Laserbelastungsprüfung mit dem gepulsten Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 14,8 W

In Abb. 5.10 sind die Rückseiten zweier PC-Filter vergleichend dargestellt. Beide Filter sind ungealtert und wurden mit 14,8 W im gepulsten Betrieb bestrahlt. Bei einem Filter konnte nach 9 s ein Durchschuss erzielt werden. Dementsprechend können hier die Materialveränderung durch die Einwirkung des Laserstrahls und die Laserstrahlaustrittsstelle erkannt werden. Beim anderen Filter, bei dem der Laserbeschuss nach 30 s aufgrund zu starker Rauch- und Flammenbildung abgebrochen wurde, ist nur der Einfluss der Wärme erkennbar. Die starke Karbonisierung auf der Laserseite des Filters hat die Laserstrahlung am Transmittieren gehindert. Diese Unterschiede im Ergebnis der Laserbelastung belegen das eher chaotische, von starker Flammen- und Rauchbildung begleitete Beschussverhalten der PC-Filter.

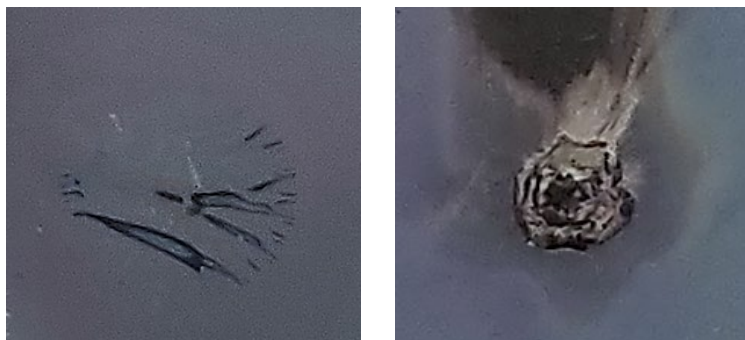


Abb. 5.10 Rückseiten ungealterter PC-Filter nach Laserbelastungsprüfung mit dem gepulsten Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 14,8 W; links nach 30 s ohne Durchschuss, rechts Durchschuss nach 9 s

Obwohl die Alterungseinflüsse auf das Verhalten von PC-Filtern nur bedingt untersucht werden konnten, ist festzustellen, dass PC-Filter im Rahmen der künstlich vorgenommenen Alterung mittels UV-Bestrahlung keine erkennbaren Alterungseffekte mit negativer Auswirkung auf die Laserbeständigkeit zeigen. Alle künstlich gealterten PC-Filter haben die geforderten Schutzstufen eingehalten bzw. sogar deutlich übertroffen.

5.1.1.3 Laserbelastungsprüfungen an PMMA-Filtern bei 10600 nm

Die Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen an künstlich mittels UV-Strahlung gealterten PMMA-Filtern bei einer Wellenlänge von 10600 nm im cw-Betrieb des CO₂-Lasers mit 1,6 W sind in Abb. 5.11 dargestellt. Je Alterungsstatus (ungealtert, 50 h UV-gealtert und 200 h UV-gealtert) wurden sechs Filter beschossen. Ähnlich den Laserbelastungsprüfungen an den PMMA-Filtern bei 1064 nm nehmen die Filterstandzeiten durch die künstliche Alterung leicht ab. Die gemessenen Werte der 200 h mittels UV-Strahlung gealterten PMMA-Filter liegen etwa 13 % unter denen der ungealterten Filter.

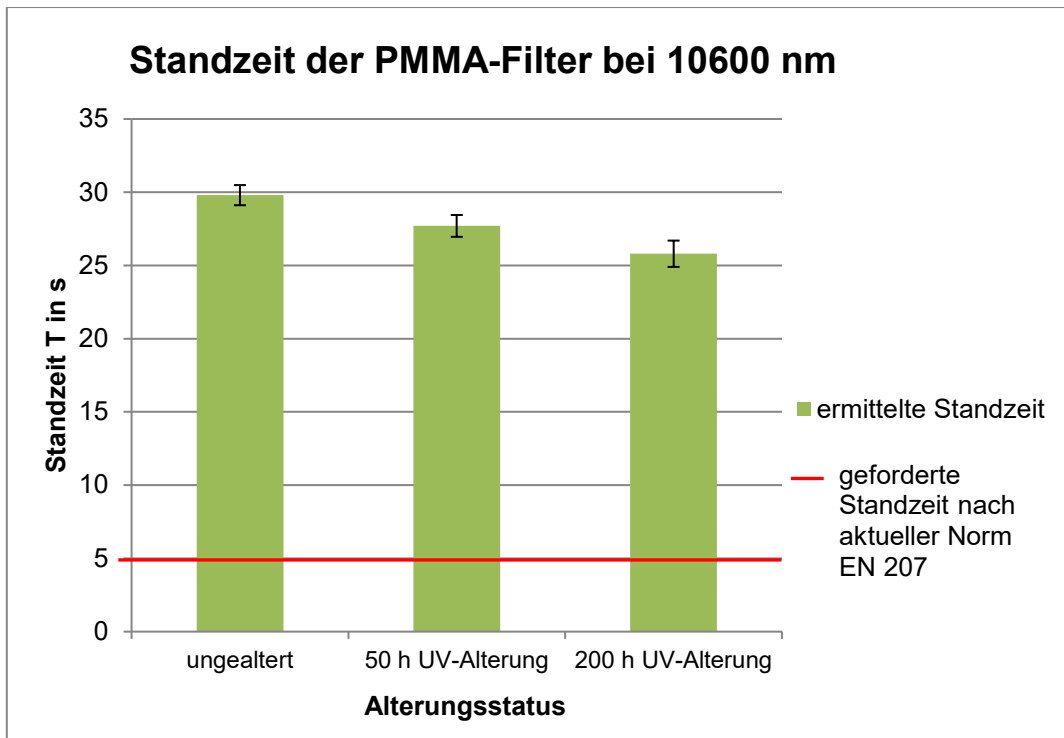


Abb. 5.11 Filterstandzeit T der PMMA-Filter in Abhängigkeit des Alterungsstatus bei Laserbelastung mit dem CO₂-Laser bei 10600 nm im cw-Betrieb mit 1,6 W; angegeben sind Mittelwerte (n = 6)

In Abb. 5.12 sind die Schadensbilder der PMMA-Filter nach den Laserbelastungsprüfungen vergleichend dargestellt. Aufgrund des Prüfens bis zum Durchschuss sind jeweils Bohrungen durch die Filter zu erkennen. Die Wärmeeinflusszonen sind im Vergleich zur Prüfung bei 1064 nm schwach ausgeprägt. Ein Aufschäumeffekt ist nicht erkennbar. Wie bereits bei den Prüfungen bei 1064 nm lassen sich auch bei 10600 nm keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der Beschussstelle in Abhängigkeit der Alterung erkennen. Lediglich die Wärmeeinflusszone ist bei den UV-gealterten Filtern deutlicher ausgeprägt (Schmelzring), was aber wiederum keinen relevanten Einfluss auf die Standzeit zu haben scheint.

Deutliche Unterschiede zu den Laserbelastungsprüfungen am Nd:YAG-Laser bei 1064 nm zeigen sich in der Art der Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und PMMA-Filtermaterial. Bei 10600 nm absorbiert die Polymermatrix selbst und nicht die Additive die Laserstrahlung. Das führt zur Erhitzung, Schmelzung und Verdampfung

der Oberfläche. So bohrt sich der Laser durch den Laserfilter, ohne dass es durch eine Wärmeverteilung über die Additive zu einer merklichen Beeinflussung des umliegenden Materials und der Ausbildung einer deutlichen Wärmeeinflusszone kommt.

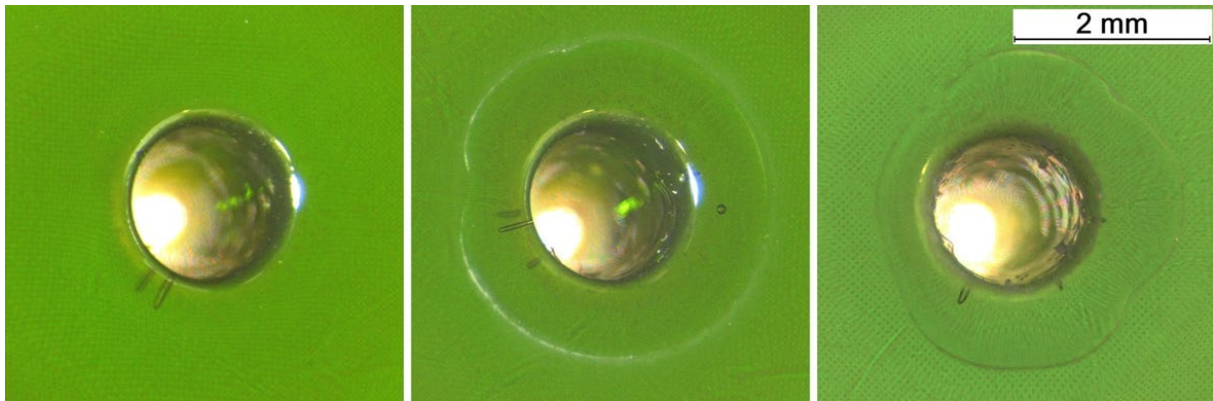


Abb. 5.12 Schadensbilder der Laserbelastungsprüfungen an PMMA-Filtern mit dem CO₂-Laser bei 10600 nm im cw-Betrieb mit 1,6 W; links ungealtert, Mitte 50 h UV-gealtert, rechts 200 h UV-gealtert

Die zusätzlich für 600 h unter UV-Strahlung gealterten Proben erreichten Standzeiten von etwa 25,3 s, was auf dem Niveau der 200 h unter UV-Strahlung gealterten Filtern liegt. Die Beschussstelle in Abb. 5.13 zeigt keine merklichen Unterschiede im Vergleich zu den für 200 h unter UV-Strahlung gealterten Filtern. Somit kommt es auch nach sehr langer UV-Alterung, welche einem Alterungszustand entspricht, der in der Realität nur schwer zu erreichen sein dürfte, zu keiner weiteren Abnahme der Laserbeständigkeit. Zudem würde ein Anwender, wie bereits im Zuge der Versuche bei 1064 nm an diesen Filtern im Kapitel 5.1.1.1 beschrieben, eine solche Laserschutzbrille aufgrund der veränderten Oberfläche und der kaum noch vorhandenen Transmission bereits nicht mehr verwenden.

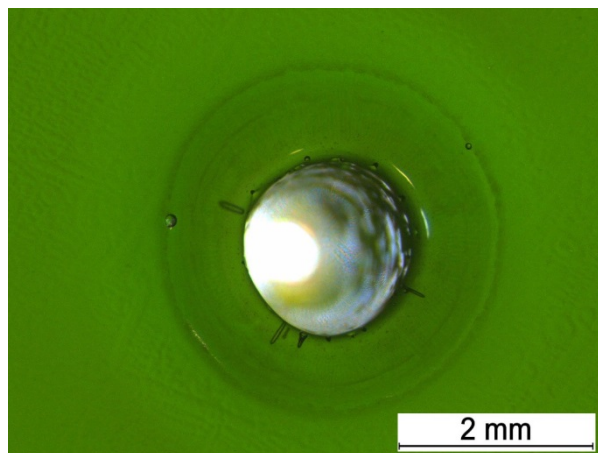


Abb. 5.13 Schadensbild an 600 h UV-gealtertem PMMA-Filter nach Laserbelastungsprüfung mit dem CO₂-Laser bei 10600 nm im cw-Betrieb mit 1,6 W

5.1.1.4 Laserbelastungsprüfungen an PC-Filtern bei 10600 nm

Wie bei den Laserbelastungsprüfungen bei 1064 nm, konnten auch bei 10600 nm keine Durchschüsse an den mittels UV-Bestrahlung künstlich gealterten PC-Filtern erzielt werden. Die für DI LB4 und R LB3Y zertifizierten Filter wurden sowohl im cw- als auch im gepulsten Betrieb getestet. Im cw-Betrieb wurden die Versuche mit bis zu 17 W nach 100 s aufgrund zu starker Rauchentwicklung abgebrochen, ohne dass ein Durchschuss erzielt werden konnte. Da die PC-Filter im cw-Betrieb laut Norm nur einer Leistung von 7,85 W für 5 s standhalten müssen, liegen die hier ermittelten Werte deutlich über der Normvorgabe. Ein ähnliches Verhalten zeigte sich im gepulsten Laserbetrieb. Statt der geforderten 3 W bei 10 Hz für 5 s bei der I-Schutzstufe wurden die PC-Filter mit bis zu 37 W getestet. Auch hier wurden die Versuche nach 100 s wegen zu starker Rauchentwicklung ohne Durchschuss abgebrochen. Gleiches gilt für die R-Schutzstufe, bei welcher 1,66 W bei 100 Hz für 5 s gefordert sind und die Versuche mit bis zu 15 W nach 100 s ohne erzielten Durchschuss abgebrochen wurden.

Somit kann festgestellt werden, dass die künstlich durch UV-Bestrahlung gealterten PC-Filter der CO₂-Laserstrahlung in jedem Fall weitaus besser standhalten als nach der gültigen Norm gefordert wird.

5.1.2 **Optische Kennwerte**

5.1.2.1 Spektraler Transmissionsgrad

In Abb. 5.14 und Abb. 5.15 sind die Werte der optischen Dichte im Wellenlängenbereich von 200 nm bis 1400 nm für PMMA- und PC-Filter für unterschiedliche Alterungszustände dargestellt. Da die Messbereichsgrenze des Spektrophotometers Cary 6000i bei OD 8 liegt, befinden sich die OD-Werte für die PMMA-Filter bei Wellenlängen größer etwa 820 nm und für die PC-Filter bei Wellenlängen größer etwa 900 nm oberhalb dieser Messbereichsgrenze. Sie können somit für die Auswertung nicht herangezogen werden. Daher wurde zur Einzelbetrachtung der spektrale Transmissionsgrad bei einer Wellenlänge von 808 nm verwendet. Diese Wellenlänge hat einen realen Einsatzbereich in Form von häufig eingesetzten Diodenlasern und die ermittelten OD-Werte liegen hier noch im Messbereich des Spektrometers. In Abb. 5.16 sind die OD-Werte der unterschiedlich gealterten PMMA-Filter und in Abb. 5.17 die OD-Werte der PC-Filter bei einer Wellenlänge von 808 nm dargestellt.

Zusätzlich sind in den beiden Diagrammen in Abb. 5.14 und Abb. 5.15 die bei 1064 nm mittels Laserdensitometer gemessenen OD-Werte eingezeichnet. Dabei ist zu beachten, dass die Grenze des Messbereichs bei diesem Versuchsaufbau bei OD 10 liegt. Bei den PMMA-Filtern kann auch hier keine Aussage über das Verhalten der OD-Werte in Abhängigkeit des Alterungszustandes getroffen werden, da die gemessenen Werte sowohl bei den ungealterten, als auch bei den 50 h und 200 h UV-gealterten Filtern oberhalb der Messbereichsgrenze von OD 10 liegen und damit nicht ausgewertet werden können. Bei den PC-Filtern hingegen liegen die ermittelten Werte bei 1064 nm noch im Messbereich des Messgerätes und sind zur besseren Darstellung zusätzlich im Diagramm in Abb. 5.18 gezeigt.

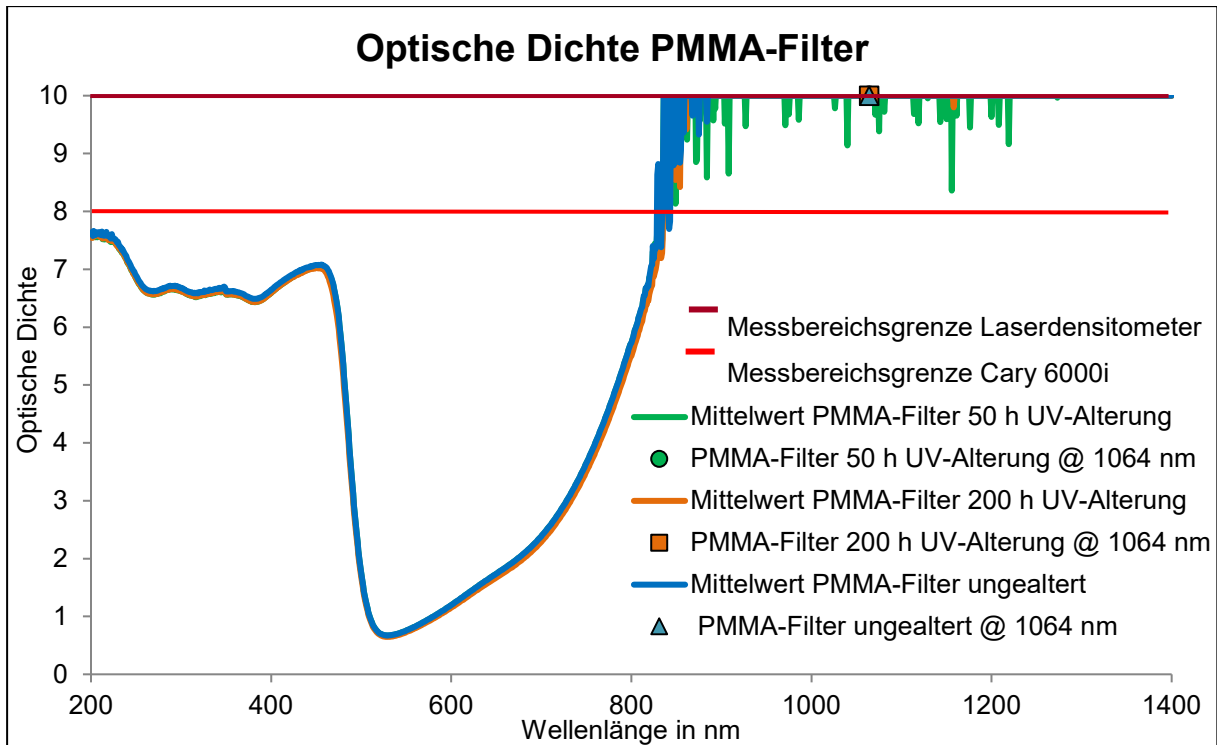


Abb. 5.14 Verlauf der optischen Dichte der PMMA-Filter (gemessen mit Cary 6000i) und optische Dichte der PMMA-Filter bei 1064 nm (gemessen mit Laserdensitometer) in Abhängigkeit des Alterungsstatus der Filter

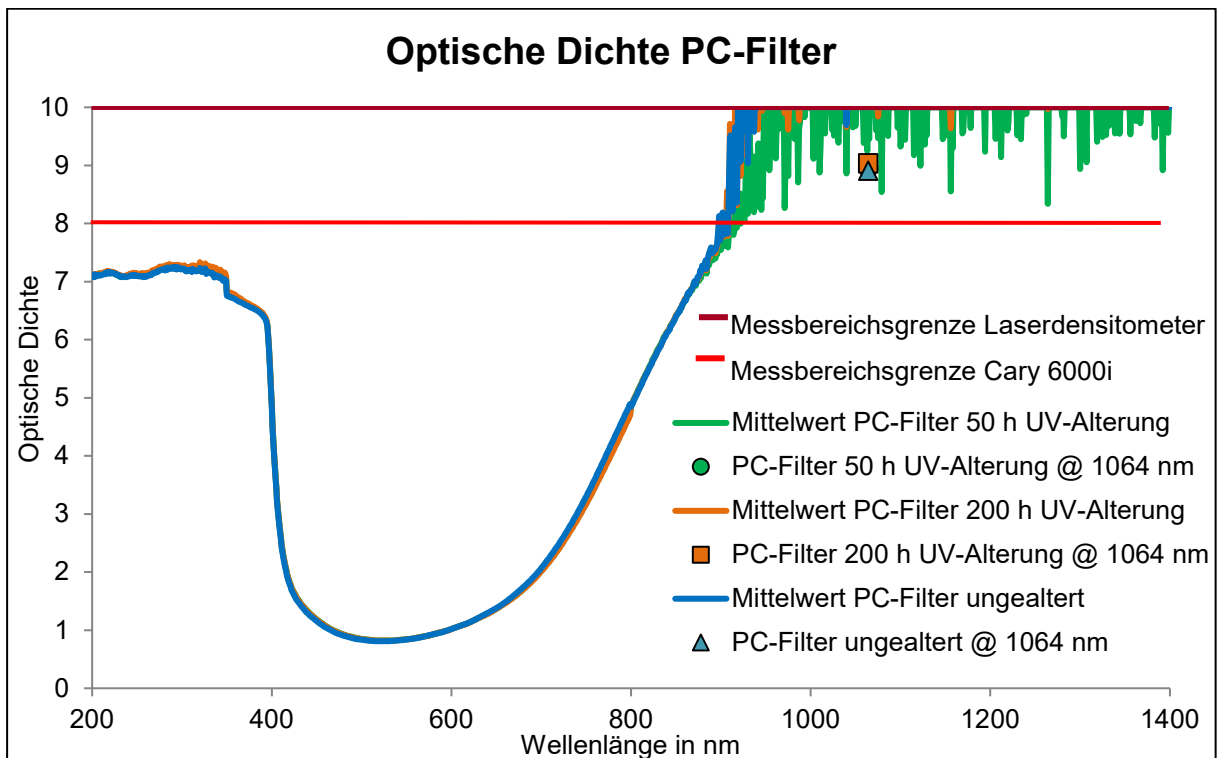


Abb. 5.15 Verlauf der optischen Dichte der PC-Filter (gemessen mit Cary 6000i) und optische Dichte der PC-Filter bei 1064 nm (gemessen mit Laserdensitometer) in Abhängigkeit des Alterungsstatus der Filter

Betrachtet man die Verläufe der optischen Dichte über den gesamten Wellenlängenbereich, so ist sowohl bei den PMMA- als auch bei den PC-Filtern kein merklicher Einfluss des Alterungsstatus auf die gemessene optische Dichte erkennbar. Legt man der Auswertung die Messwerte der optischen Dichte bei 808 nm zu Grunde, so zeigen sich bei beiden Filtermaterialien selbst nach 200-stündiger UV-Alterung keine signifikanten Veränderungen der OD-Werte im Vergleich zu den Werten der ungealterten Filter. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei den OD-Werten der PC-Filtern bei 1064 nm, welche mittels Laserdensitometer gemessen wurden. Auch hier wird deutlich, dass die UV-Alterung keinen entscheidenden Einfluss auf die optische Dichte hat.

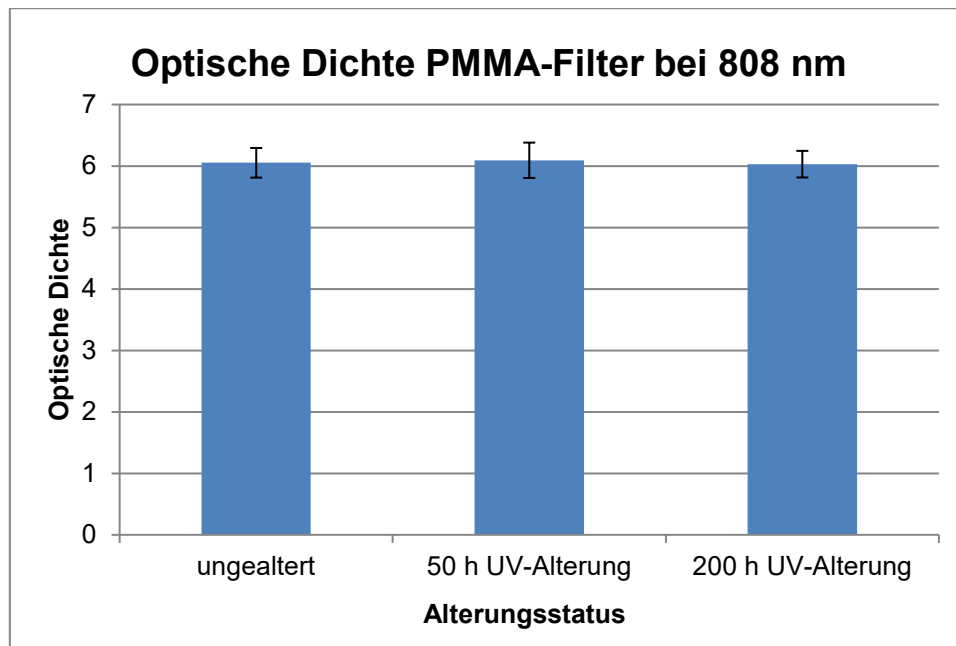


Abb. 5.16 Optische Dichte der PMMA-Filter bei 808 nm in Abhängigkeit des Alterungsstatus; angegeben sind Mittelwerte ($n = 6$)

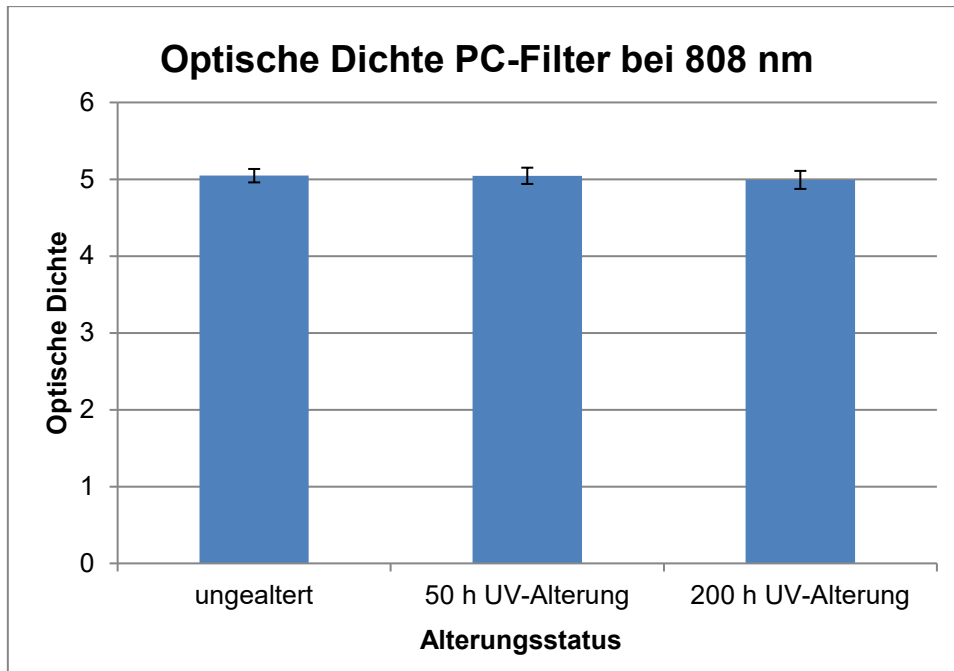


Abb. 5.17 Optische Dichte der PC-Filter bei 808 nm in Abhängigkeit des Alterungsstatus; angegeben sind Mittelwerte (n = 6)

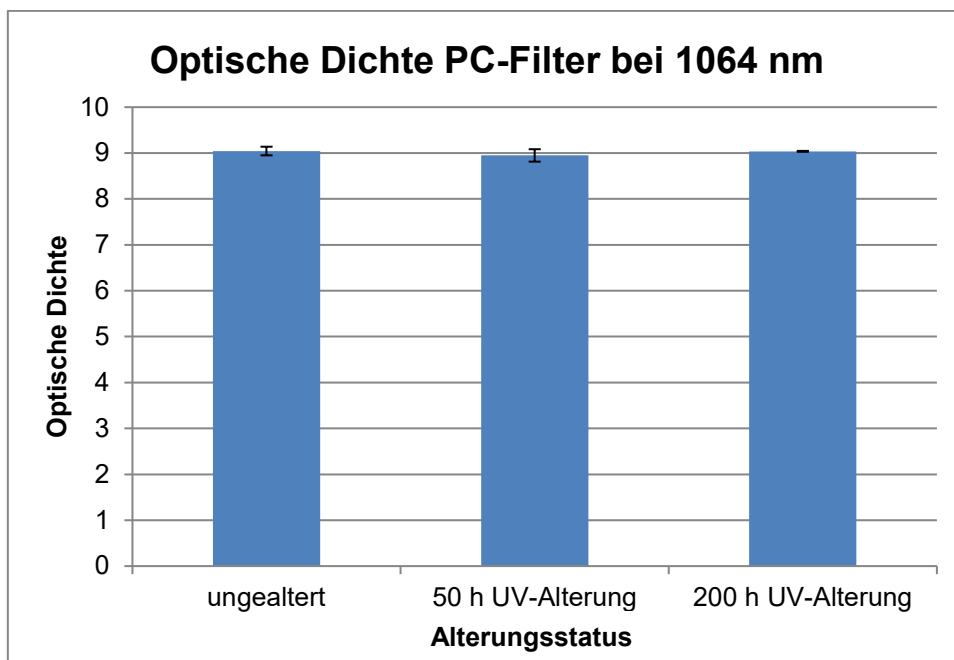


Abb. 5.18 Optische Dichte der PC-Filter bei 1064 nm in Abhängigkeit des Alterungsstatus; angegeben sind Mittelwerte (n = 6)

Zusätzlich zur Messung der OD-Werte an den Filtern über die gesamte Plattendicke wurden an je einem PMMA- und PC-Filter nach 200 h UV-Alterung Messungen an Dünnschliffen vorgenommen. Die Dünnschliffe wurden von der UV-bestrahlten Seite der Filter her angefertigt und sind 1 mm dick. Somit liegen die gemessenen OD-Werte aufgrund der geringeren Materialstärke nicht außerhalb der Messbereichsgrenze des verwendeten Spektrometers Cary 6000i. In Abb. 5.19 sind die ermittelten OD-Werte

für den PMMA-Filter im Dünnschliff dargestellt. Analog dazu sind die gemessenen OD-Werte am PC-Filter im Dünnschliff in Abb. 5.20 gezeigt. Neben dem Verlauf der OD-Werte am Dünnschliff über den gesamten Wellenlängenbereich, welche mit dem Cary 6000i gemessen wurden, ist die Hochrechnung dieser Messwerte auf die reale Materialstärke des jeweiligen Filters dargestellt. Vergleichend dazu sind die Mittelwerte der an den ungealterten Filtern gemessenen OD-Werte gezeigt. Dabei sind die Werte, die oberhalb der Messbereichsgrenze ($>OD\ 8$) liegen, als OD 10 dargestellt. Zusätzlich ist jeweils der mit dem Laserdensitometer bei 1064 nm ermittelte OD-Wert als Punkt dargestellt. Sowohl beim PMMA- als auch beim PC-Filter liegen die aus den Dünnschliffen auf die reale Filterdicke hochgerechneten OD-Werte wiederum im Bereich der an den Filtern direkt gemessenen Werte, womit eine merkliche Abnahme der OD mit der UV-Alterung nicht erkennbar ist.

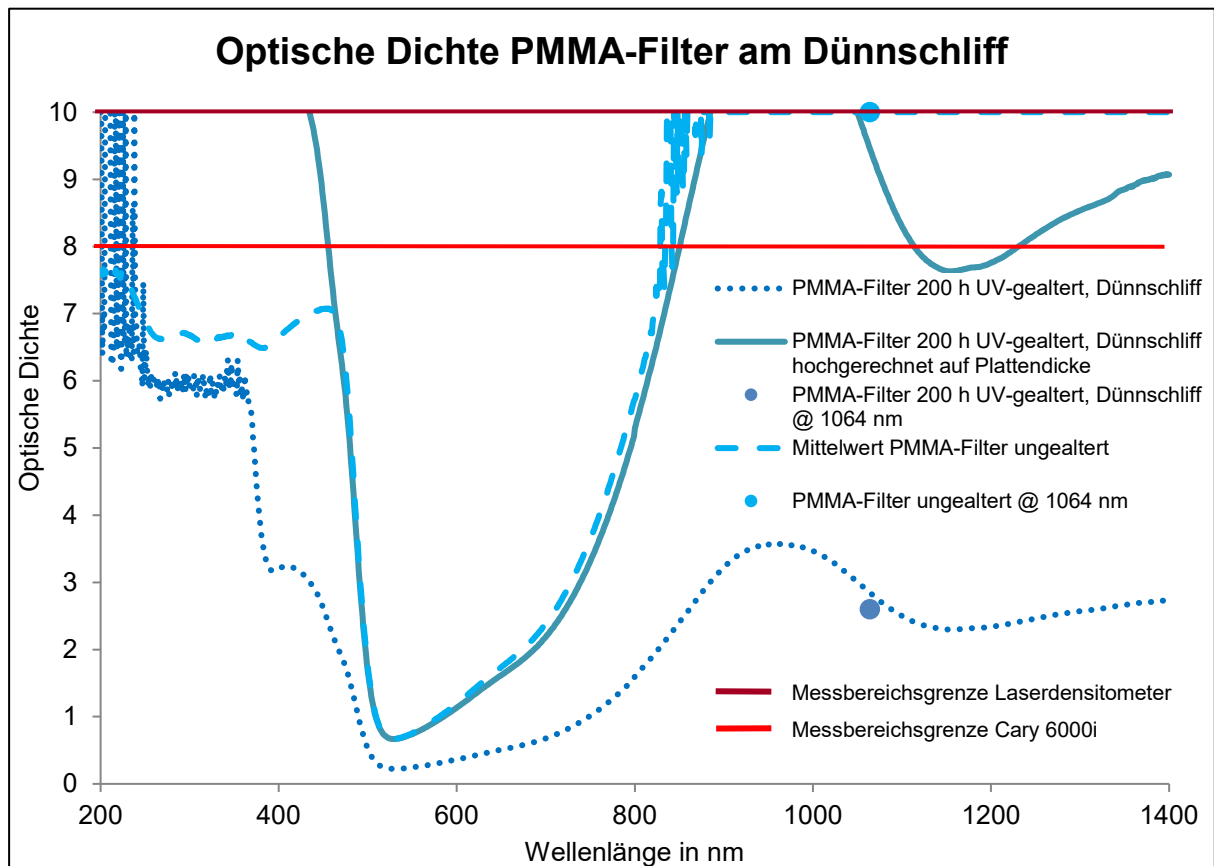


Abb. 5.19 Verlauf der optischen Dichte des PMMA-Filters nach 200 h UV-Alterung am Dünnschliff (gemessen mit Cary 6000i) und optische Dichte des gealterten Filters am Dünnschliff bei 1064 nm (gemessen mit Laserdensitometer)

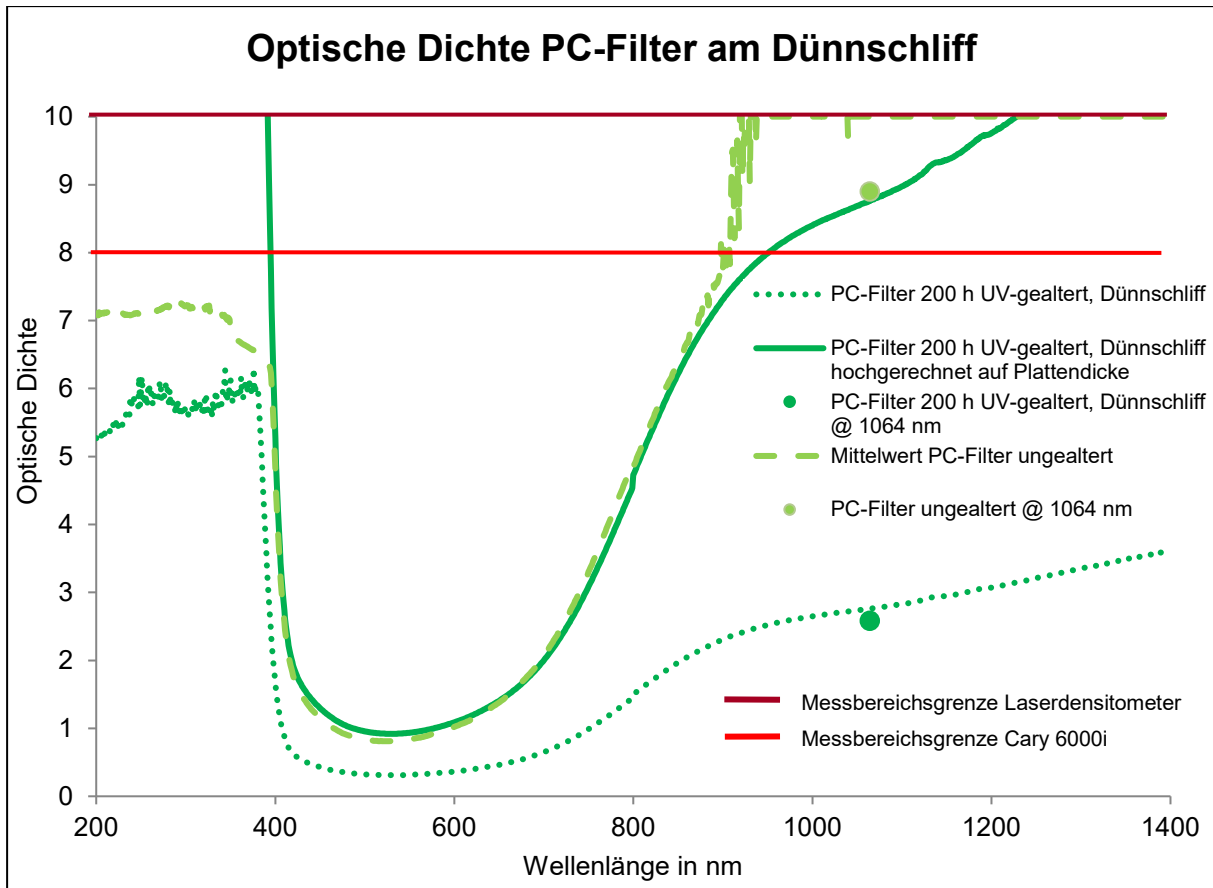


Abb. 5.20 Verlauf der optischen Dichte des PC-Filters nach 200 h UV-Alterung am Dünnschliff (gemessen mit Cary 6000i) und optische Dichte des gealterten Filters am Dünnschliff bei 1064 nm (gemessen mit Laserdensitometer)

Unabhängig vom Filtermaterial kann bei 1064 nm keine Abnahme der optischen Dichte durch die künstliche Alterung festgestellt werden, da die gemessenen Werte oberhalb der Messbereichsgrenzen der verwendeten Messgeräte liegen. Nur im Falle der PC-Filter konnten mittels des Laserdensitometers OD-Werte bei 1064 nm ermittelt werden. Diese und die Auswertung der OD-Werte für beide Filtertypen bei 808 nm zeigen jedoch, dass die optische Dichte kein relevantes Kriterium für die Betrachtung der Alterungsbeständigkeit von PMMA- und PC-Schutzfiltern zu sein scheint.

5.1.2.2 Lichttransmission

Die Ergebnisse der Lichttransmissionsmessung an den künstlich gealterten PMMA-Filtern sind in Abb. 5.21, die der gealterten PC-Filter in Abb. 5.22 dargestellt. Bei der Lichttransmission darf laut Norm der Wert nach der Alterung gegenüber dem Ausgangswert um maximal 10 % abnehmen. Bei den PMMA-Filtern wurde diese Vorgabe nach 50-stündiger Alterung noch eingehalten, nach 200 Stunden Alterung aber minimal überschritten. Insgesamt scheint die Abnahme bei den PMMA-Filtern in eine Sättigung zu laufen, da kaum eine weitere Abnahme von den für 50 h zu den für 200 h UV-gealterten Filtern erkennbar ist. Die PC-Filter zeigten hingegen keine messbare Abnahme der Lichttransmission mit der Alterung. Die deutlichere Abnahme der Lichttransmission bei PMMA-Filtern nach 200-stündiger UV-Alterung kann bei diesen Filtern zur Folge haben, dass der Arbeitsplatz ggf. heller beleuchtet werden muss, um

die abnehmende Lichttransmission auszugleichen. Einen Eindruck von der Änderung der Lichttransmission bekommt man bei Betrachtung der Abb. 5.4 in Abschnitt 5.1.1.1. Hier lässt sich mit bloßem Auge keine nennenswerte Veränderung der Transmission bei zunehmender UV-Alterung feststellen. Erst nach 600 h UV-Alterung (Abb. 5.5 in Abschnitt 5.1.1.1), was nur sporadisch getestet wurde, nimmt die Transmission merklich ab. Dies hat auf die Beständigkeit gegen Laserstrahlung jedoch keinen negativen Einfluss.

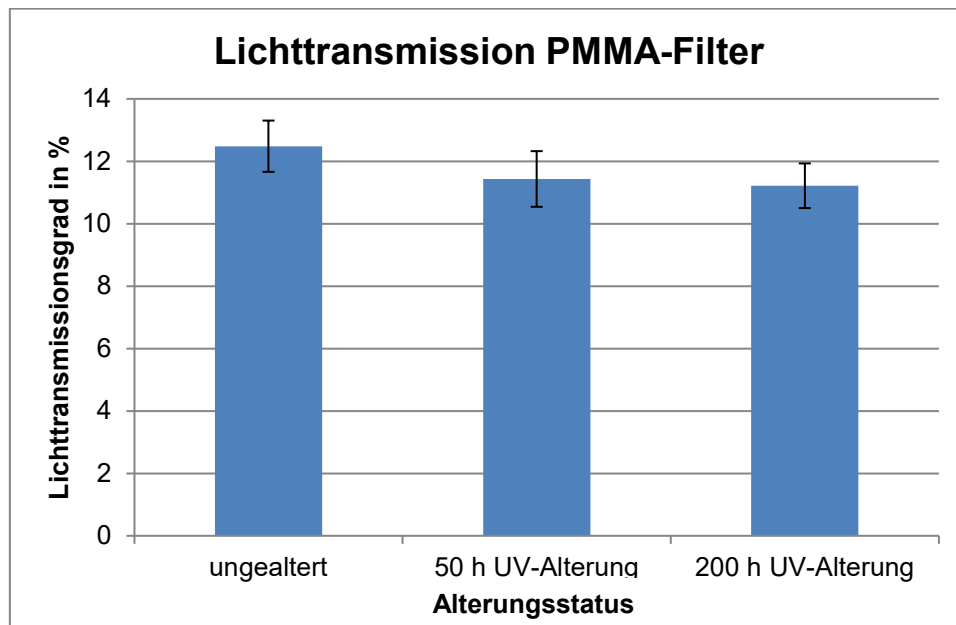


Abb. 5.21 Lichttransmission der PMMA-Filter in Abhängigkeit des Alterungsstatus; angegeben sind Mittelwerte (n = 6)

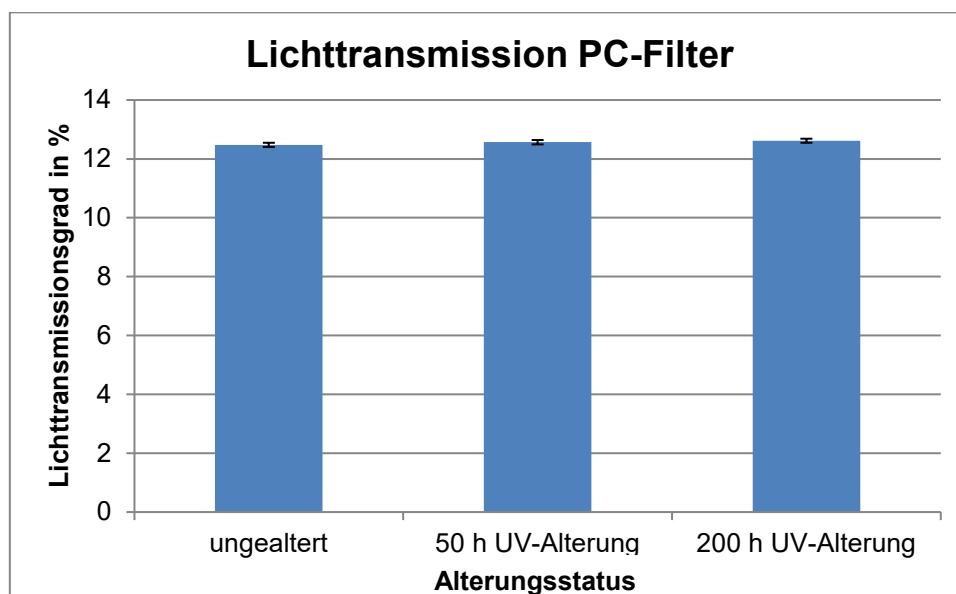


Abb. 5.22 Lichttransmission der PC-Filter in Abhängigkeit des Alterungsstatus; angegeben sind Mittelwerte (n = 6)

5.1.2.3 Streulicht

Laut gültiger Norm EN 207 darf der reduzierte Leuchtdichtekoeffizient keinen Wert größer $0,50 \text{ cd/m}^2/\text{lx}$ annehmen. Bei der Streulichtmessung an den PMMA-Filtern wurden die Grenzwerte der Norm bei 50 Stunden UV-Alterung trotz leichter Erhöhung der Werte noch eingehalten, aber bei den 200 Stunden gealterten Filtern teils überschritten. Dies kann zur Folge haben, dass die Sicht durch eine solche Brille aufgrund einer zu starken Lichtstreuung eingeschränkt ist. Die Normenvorgaben werden nicht mehr eingehalten. Die Filter müssen in diesem Fall ersetzt werden. Anders stellte es sich hinsichtlich der PC-Filter dar. Hier wurden nach 50 h UV-Alterung kaum schlechtere Werte als im Ausgangszustand gemessen. Selbst bei 200-stündiger Alterung lagen die Messwerte hinsichtlich Lichtstreuung nur leicht über den Vergleichswerten im ungealterten Zustand und damit immer noch innerhalb der Normvorgaben.

Ein Grund für die Zunahme der Streulichtwerte mit zunehmender UV-Alterung ist vermutlich die Oberflächenveränderung der Filter (Aufrauhung) infolge der UV-Bestrahlung. Auf die Sicherheit der Filter bei Laserbestrahlung hat dies aber keine negative Auswirkung.

5.2 **Natürliche Alterung**

5.2.1 **Laserbelastungsversuche**

5.2.1.1 Vergleich Altfilter mit dazugehörigem Neufilter

In Tab. 5.1 sind die Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen an den zurückgewonnenen Altfiltern und den dazugehörigen baugleichen Neufiltern bei einer Wellenlänge von 1064 nm dargestellt. Die Prüfungen erfolgten nach der aktuellen Norm EN 207. Beim Vergleich der Standzeiten der Altfilter mit den jeweils dazugehörigen Neufiltern lässt sich nur im Fall des Altfilters Nummer 81 im Vergleich mit dem Neufilter Nummer 5 eine leichte Abnahme der Standzeit feststellen. Bei allen anderen Filtern liegen die Standzeiten der Alt- und Neufilter jeweils auf vergleichbarem Niveau. Dabei übertreffen die gemessenen Standzeiten meist deutlich die Normenvorgabe.

Tab. 5.1 Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen an Altfiltern und der dazugehörigen Neufilter am cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm; die gemessenen Schutzstufen beziehen sich ausschließlich auf die Laserbelastungsprüfungen

Proben-Nr.	dazugehöriger baugleicher Neufilter	Filtermaterial	Produktionsjahr	zertifizierte Schutzstufe bei 1064 nm	gemessene Schutzstufe bei 1064 nm	Laserleistung [W]	Standzeit [s]	Vorgabe EN 207 erfüllt
1013	Neufilter_1	Glas	2002	D L6	D LB7	80	18	ja
1014	Neufilter_1	Glas	2004	D L6	D LB7	80	22	ja
1025	Neufilter_1	Glas	2002	D L6	D LB7	80	18	ja
90	Neufilter_1	Glas	2002	D L6	D LB7	80	22	ja
1024	Neufilter_1	Glas	2002	D L6	D LB7	80	18	ja
Neufilter_1_a		Glas	NEU	D LB7	D LB7	80	21	ja
Neufilter_1_b		Glas	NEU	D LB7	D LB7	80	15	ja
3	Neufilter_2	Glas	2002	D L7	D LB7	80	>60	ja
Neufilter_2		Glas	NEU	D LB7	D LB7	80	>60	ja
83	Neufilter_3	Glas	2000	D L6	D LB7	80	34	ja
20	Neufilter_3	Glas	2001	D L4	2,5 x D LB6	20	>60	ja
103	Neufilter_3	Glas	2003	D L6	D LB7	80	15	ja
104	Neufilter_3	Glas	2003	D LB6	D LB7	80	11	ja
Neufilter_3_a		Glas	NEU	D LB6	D LB7	80	31	ja
Neufilter_3_b		Glas	NEU	D LB6	D LB7	80	11	ja
1026	Neufilter_4	Glas	2000	D L5	2,5 x D LB6	20	32	ja
41	Neufilter_4	Glas	2000	D L5	2,5 x D LB6	20	31	ja
42	Neufilter_4	Glas	2000	D L5	2,5 x D LB6	20	35	ja
43	Neufilter_4	Glas	2000	D L5	2,5 x D LB6	20	30	ja
44	Neufilter_4	Glas	2000	D L5	2,5 x D LB6	20	>60	ja
45	Neufilter_4	Glas	2000	D L5	2,5 x D LB6	20	36	ja
Neufilter_4		Glas	NEU	D LB6	2,5 x D LB6	20	60	ja
81	Neufilter_5	Glas	2000	D L5	D LB7	80	28	ja
Neufilter_5		Glas	NEU	D LB7	D LB7	80	42	ja
39	Neufilter_6	Kunststoff	2013	D LB6	2,5 x D LB6	20	28	ja
Neufilter_6		Kunststoff	NEU	D LB6	2,5 x D LB6	20	25	ja
77	Neufilter_7	Kunststoff	2009	D L6	D LB7	80	8	ja
Neufilter_7		Kunststoff	NEU	D LB6	D LB7	80	9	ja
102	Neufilter_8	Glas	2005	D L7	D LB7	80	24	ja
Neufilter_8		Glas	NEU	D LB7	D LB7	80	25	ja

In Abb. 5.23 wird das, im Rahmen der hier getesteten Filter, typische Verhalten eines Laserschutzfilters aus Glas während der Laserbelastungsprüfung bei 1064 nm im cw-Betrieb des Lasers gezeigt. Dabei ist sehr deutlich die heftige Reaktion des Filters während der Wechselwirkung mit dem Laserstrahl bei einer Leistung von 80 W zu sehen. Neben dem Funkenflug und der Flammenbildung war ein deutliches Knacken des Glases zu hören und es kam zum Absplittern des Materials. Nach der Laserbelastungsprüfung sind zahlreiche Risse im Filter (Abb. 5.24) zu erkennen.

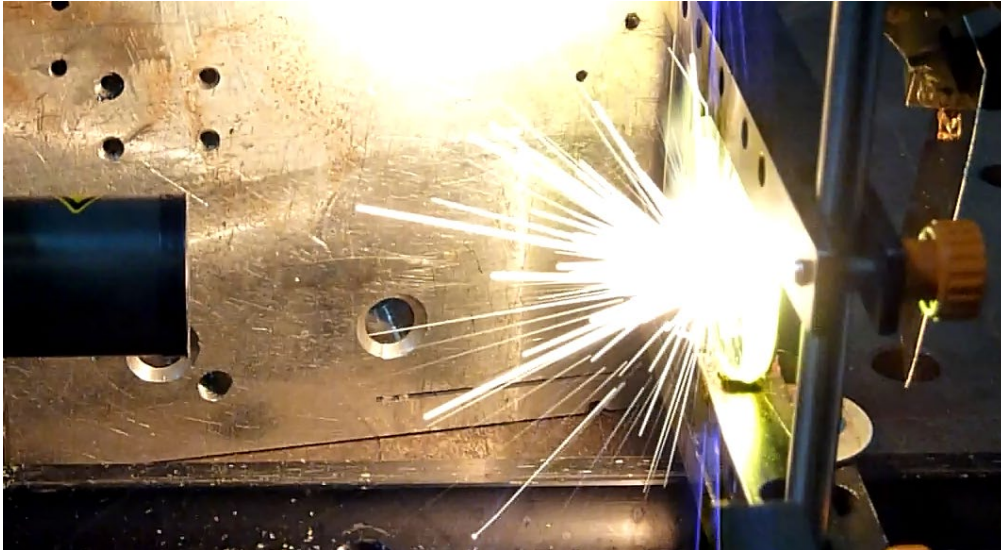


Abb. 5.23 Altfilter Nr. 3 während der Laserbelastungsprüfung am cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 80 W

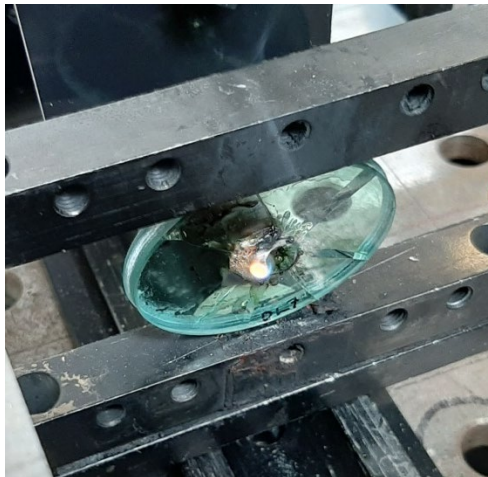


Abb. 5.24 Altfilter Nr. 3 nach der Laserbelastungsprüfung am cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 80 W

Im Gegensatz zum eher chaotischen Verhalten der Glasfilter verliefen die Laserbelastungsprüfungen der Kunststofffilter sehr viel gleichmäßiger. Während der Prüfungen der hier getesteten Kunststofffilter kam es neben dem Aufschmelzen des Materials lediglich zur Rauch- und Flammenbildung ohne Materialabsplitterung und Funkenflug.

In sind die Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen bei einer Wellenlänge von 10600 nm an einem Altfilters und dem dazugehörigen baugleichen Neufilters dargestellt. Die Prüfungen erfolgten nach der aktuellen Norm EN 207. Beide Filter wurden mit der für die Schutzstufe entsprechenden Leistung geprüft. Beide Versuche wurden nach jeweils 60 s aufgrund zu starker Wärmeentwicklung und Flammenbildung abgebrochen. Es konnten keine Unterschiede im Verhalten der beiden Filter festgestellt werden. Beide Filter haben die Vorgabe der Norm deutlich übertroffen.

Tab. 5.2 Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen an Altfiltern und dem dazugehörigen Neufilter am CO₂-Laser bei 10600 nm im cw-Betrieb; die gemessenen Schutzstufen beziehen sich ausschließlich auf die Laserbelastungsprüfungen

Proben-Nr.	dazugehöriger baugleicher Neufilter	Filtermaterial	Produktionsjahr	zertifizierte Schutzstufe bei 10600 nm	gemessene Schutzstufe bei 10600 nm	Laserleistung [W]	Standzeit [s]	Vorgabe EN 207 erfüllt
5	Neufilter_9	Glas	2004	D L5	D LB5	79	>60	ja
Neufilter_9		Glas	Neu	D LB5	D LB5	79	>60	ja

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass unter den zurückgewonnenen Altfiltern mit einem Alter von meist zehn bis 20 Jahren keine kritische Abnahme der Filterstandzeiten und damit der Lasersicherheit feststellbar ist.

5.2.1.2 Verifikation der zertifizierten Schutzstufen von Altfiltern

Die Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen an Altfiltern, für die am Markt keine baugleichen Neufilter mehr erhältlich sind, sind den Tab. 5.3 und Tab. 5.4 zu entnehmen. Bei diesen Untersuchungen stellte sich heraus, dass alle getesteten Altfilter, selbst bei einem Alter von über 20 Jahren, die deklarierten D-Schutzstufen bei 1064 nm bzw. 10600 nm nicht nur erfüllten, sondern oft sogar deutlich übertrafen. Da die geprüften Altfilter noch keine LB-Schutzstufen, sondern L-Schutzstufen nach der alten Fassung der Norm EN 207 besitzen, wurden die Filter für mindestens 10 s geprüft.

Bis auf die Filter 51 und 97, welche als Schichtfilter (Absorptionsfilter mit Beschichtung) aufgebaut sind, handelt es sich bei allen Filtern um reine Absorptionsfilter ohne Beschichtung.

Tab. 5.3 Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen an Altfiltern, für die am Markt keine baugleichen Neufilter mehr erhältlich sind, am cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm; die gemessenen Schutzstufen beziehen sich ausschließlich auf die Laserbelastungsprüfungen

Proben-Nr.	Filter-material	Produktions-jahr	zertifizierte Schutzstufe bei 1064 nm	gemessene Schutzstufe bei 1064 nm	Laser-leistung [W]	Transmission nach 10 s	Vorgabe EN 207 erfüllt
51	Glas	2000	D L7	D LB7	80	keine	ja
97	Glas	2000	D L7	D LB7	80	keine	ja
23	Glas	2005	D L7	D LB7	80	keine	ja
50 r	Glas	2009	D L7	D LB7	80	keine	ja
88 r	Glas	2007	D L7	D LB7	80	keine	ja
91	Glas	1999	D L7	D LB7	80	keine	ja
92	Glas	1999	D L7	D LB7	80	keine	ja
93	Glas	1998	D L7	D LB7	80	keine	ja
1005	Glas	---	D L5	D LB6	8	keine	ja
1006	Glas	---	D L5	D LB6	8	keine	ja
1007	Glas	---	D L5	D LB6	8	keine	ja
1008	Glas	---	D L5	D LB6	8	keine	ja
1009	Glas	---	D L5	D LB6	8	keine	ja
1018	Glas	1998	D L6	D LB6	8	keine	ja
1	Glas	2005	D L5	D LB6	8	keine	ja
25 r	Glas	2005	D L5	D LB6	8	keine	ja
21 r	Glas	2001	D L6	D LB6	8	keine	ja
98	Glas	2009	D L5	D LB6	8	keine	ja
73	Kunststoff	2008	D L5	D LB6	8	keine	ja
78	Kunststoff	---	D L5	D LB6	8	keine	ja
80	Kunststoff	2005	D L5	D LB6	8	keine	ja

Tab. 5.4 Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen an Altfiltern, für die am Markt keine baugleichen Neufilter mehr erhältlich sind, am CO₂-Laser bei 10600 nm im cw-Betrieb; die gemessenen Schutzstufen beziehen sich ausschließlich auf die Laserbelastungsprüfungen

Proben-Nr.	Filter-material	Produktions-jahr	zertifizierte Schutzstufe bei 10600 nm	gemessene Schutzstufe bei 10600 nm	Laser-leistung [W]	Transmission nach 10 s	Vorgabe EN 207 erfüllt
47	Glas	1997	D L5	D LB5	79	keine	ja
48	Glas	1997	D L5	D LB5	79	keine	ja

5.2.2 Optische Kennwerte

5.2.2.1 Spektraler Transmissionsgrad (optische Dichte)

Bei keinem der vermessenen natürlich gealterten Filter konnte eine kritische Veränderung der optischen Dichte festgestellt werden. Zumeist liegen die OD-Werte dieser Filter außerhalb der Messbereichsgrenze des verwendeten Messgeräts.

5.2.2.2 Lichttransmission

Bei der Lichttransmission darf laut Norm der Wert nach der Alterung gegenüber dem Ausgangswert um maximal 10 % abnehmen.

Die Werte der Lichttransmission, gemessen an den natürlich gealterten Filtern und den dazugehörigen baugleichen Neufiltern, sind in Tab. 5.5 dargestellt. Die an den Altfiltern gemessenen Lichttransmissionswerte zeigen keine merkliche Verschlechterung der Werte gegenüber den entsprechenden Neufiltern. Nur in Ausnahmefällen werden die Werte der Neufilter bei den Altfiltern um mehr als 10 % unterschritten, wobei die absoluten Werte nach wie vor auf einem ausreichend hohen Niveau liegen und die Sicherheit bei Benutzung einer solchen Brille nicht gefährden.

Tab. 5.5 Lichttransmissionswerte der Altfilter und der dazugehörigen Neufilter

Neufilter	Altfilter	Lichttransmission [%]		
		neu	alt_Messung_1	alt_Messung_2
Neufilter_1_a		36,5		
Neufilter_1_b		36,5		
	1013		35,8	35,9
	1014		30,4	30,1
	1024		36,3	36,2
	1025		35,9	36,0
	90		34,4	35,3
Neufilter_2		64,8		
	3		64,7	65,1
Neufilter_3_a		71		
Neufilter_3_b		71		
	20		66,6	69,2
	83		67,1	69,1
	84		68,7	69,5
	103		68,9	68,2
	104		69,1	68,8
Neufilter_10		22		
	85		26,6	27,2
Neufilter_4		45*		
	1026		45,0	45,2
	41		43,8	45,6
	42		45,0	45,5
	43		45,3	45,5
	44		44,7	45,7
	45		45,7	45,9
Neufilter_5		31,5		
	81		29,4	29,7
Neufilter_6		16*		
	39		14,6	14,1
Neufilter_7		30*		
	77		21,3	21,2
Neufilter_8		69		
	102		68,3	68,6
Neufilter_11		66		
	62		74,6	73,8
	1002		72,7	75,0
	1003		70,3	71,6
	1004		69,5	70,8
Neufilter_9		91,5		
	5		90,0	90,2
	47		86,7	87,6
	48		85,9	87,4

* Herstellerangabe

Zusätzlich zu den hier verwendeten Altfiltern und den dazugehörigen Neufiltern wurden Lichttransmissionswerte, welche von Filtern aus Prüfvorgängen zur Verfügung standen, ausgewertet. Dabei konnten die Werte der Lichttransmission im Ausgangszustand und nach 50 h UV-Alterung verwendet werden. Danach haben sich bei insgesamt 7 von 69 vermessenen Filtern die Werte der Lichttransmission nach der UV-Bestrahlung um mehr als 10 % verringert. Gemäß einer Vorgabe aus der EN 166:2001 Absatz 7.1.5 [10] für Schweißerschutzfilter und einem Vorschlag aus dem aktuell diskutierten Normentwurf ISO/WD 19818:2019 [11] für Laserschutzfilter folgend, wurden diese sieben Filter ein zweites Mal der UV-Strahlung für 50 h ausgesetzt und der Lichttransmissionswert erneut gemessen. Da sich bei allen erneut UV-bestrahlten Filtern der Wert der Lichttransmission nach der zweiten Bestrahlung im Vergleich zur ersten Bestrahlung um weniger als 10 % verringert hat und man somit von einer Sättigung ausgehen kann, konnten alle Filter zugelassen werden. Die Sicherheit der Filter ist somit in allen betrachteten Fällen gewährleistet.

5.2.2.3 Streulicht

Laut gültiger Norm EN 207 darf der reduzierte Leuchtdichtekoeffizient keinen Wert größer als $0,50 \text{ cd/m}^2/\text{lx}$ annehmen.

Die an den Altfiltern und baugleichen Neufiltern gemessenen Streulichtwerte sind in der Tab. 5.6 dargestellt. Bei den im Rahmen dieses Projektes vermessenen natürlich gealterten Filtern wurde bei keinem Filter der Grenzwert von $0,50 \text{ cd/m}^2/\text{lx}$ überschritten. Somit stellt das Streulicht bei den hier betrachteten Altfiltern keinen kritischen Kennwert in Hinblick auf die Alterung dar.

Tab. 5.6 Streulichtwerte der Altfilter und der dazugehörigen Neufilter

Neufilter	Altfilter	Streulicht [cd/m ² /lx]	
		neu	alt
Neufilter_1_a		0,208	
Neufilter_1_b		0,039	
	1013		0,13
	1014		0,06
	1024		0,21
	1025		0,09
	90		0,19
Neufilter_2		0,025	
	3		0,10
Neufilter_3_a		0,023	
Neufilter_3_b		0,030	
	20		0,14
	83		0,13
	84		0,14
	103		0,07
	104		0,06
Neufilter_10		0,018	
	85		0,05
Neufilter_4		keine Messung*	
	1026		0,07
	41		0,09
	42		0,05
	43		0,11
	44		0,06
	45		0,10
Neufilter_5		keine Messung*	
	81		0,09
Neufilter_6		0,149	
	39		0,47
Neufilter_7		0,079	
	77		0,16
Neufilter_8		0,026	
	102		0,06
Neufilter_11		keine Messung*	
	62		0,14
	1002		0,16
	1003		0,05
	1004		0,11
Neufilter_9		0,091	
	5		0,03
	47		0,06
	48		0,03

* Die Messdaten der Filter 4 sowie 5 sind nicht verwertbar aufgrund zu hoher OD-Werte für den Prüflaser; Messungen am Filter 11 sind aufgrund der Größe des Filters am Kleinwinkelstreulichtmessgerät nicht möglich

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der Alterung auf die Laserbeständigkeit und ausgewählte optische Kenngrößen, wie spektraler Transmissionsgrad, Lichttransmission und Streulicht, der Laserschutzfilter erfasst und bewertet. Dafür wurden entsprechende Untersuchungen sowohl an mittels UV-Bestrahlung künstlich gealterten Laserschutzfiltern aus den Standardmaterialien Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polycarbonat (PC) als auch an Laserschutzbrillen vorgenommen, welche jahrelang in Benutzung waren und auf natürlichem Wege gealtert sind.

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass die UV-Alterung kein limitierendes Kriterium in Bezug auf die Laserbeständigkeit von PMMA- und PC-Laserschutzfiltern bei den untersuchten Laserwellenlängen 1064 nm und 10600 nm darstellt. Selbst nach 200-stündiger UV-Bestrahlung, was einer jahrelangen Lagerung der Filter in direktem Sonnenlicht entspräche, kommt es nur zu einer geringen Abnahme der Laserbeständigkeiten, wobei die gemessenen Filterstandzeiten immer noch weit oberhalb der Normenvorgabe liegen. Lediglich im Falle künstlich gealterter PMMA-Filter sind die Werte der Lichttransmission an die in der Prüfnorm EN 207 definierten Grenzen gestoßen und beim Streulicht wurden die Werte bei PMMA-Filtern teilweise überschritten.

Ein ähnlich positives Bild zeigt sich bei der Untersuchung der in der betrieblichen Praxis real gealterten Filter. Beim Vergleich der hier untersuchten Altfilter mit baugleichen Neufiltern hinsichtlich der Laserbeständigkeiten konnte keine kritische Abnahme dieser Schutzfunktion ermittelt werden. Die ermittelten Werte liegen selbst bei etwa 20 Jahre alten Brillen deutlich oberhalb der Vorgabe der EN 207. Alle weiteren geprüften Altfilter, für die am Markt keine unveränderten Neufilter mehr erhältlich sind, haben ihre zertifizierten D-Schutzstufen bezüglich der Laserbelastung bei 1064 nm bzw. 10600 nm nicht nur erfüllt, sondern meist sogar deutlich übertroffen. Auch die optischen Kenngrößen der Altfilter zeigen nur eine vernachlässigbare Verschlechterung der Werte gegenüber den entsprechenden Neufiltern und stellen somit keine kritischen Punkte im Hinblick auf die Alterung dar.

Aus der Perspektive der Produktsicherheit kann Herstellern, Inverkehrbringern und Prüfinstitutionen der Hinweis gegeben werden, dass die Produkte auch nach jahrelanger Benutzung noch laserbeständig sind. Ein Sicherheitsaufschlag auf die Prüfparameter der Schutzstufen für Laserschutzbrillen ist wegen der im Rahmen der Untersuchungen festgestellten geringfügigen Abnahme der Laserbeständigkeit nicht erforderlich, da bei einer Laserbelastungsprüfung nach EN 207 bereits normenseitig ein ausreichender Sicherheitsaufschlag berücksichtigt ist. Somit besteht keine Notwendigkeit für eine Anpassung der Prüfnorm hinsichtlich der Laserbeständigkeitsprüfung.

Zudem kann der Hinweis gegeben werden, dass das neue Procedere zur Bestimmung der Lichttransmission (ggfs. zweifache UV-Bestrahlung für 50 h und wiederholte Lichttransmissionsmessung, um zu prüfen, ob die Lichttransmission in eine Sättigung läuft), wie es in der neuen Prüfnorm ISO 19818 vorgesehen ist und vereinzelt von Testhäusern bereits praktiziert wird, als sinnvoll erachtet wird.

Hersteller und Testhäuser seien weiterhin darauf hingewiesen, dass bestimmte Alterungseffekte gegeben sind, die bei der Auslegung und Weiterentwicklung der Produkte berücksichtigt werden sollten. Insbesondere ist es ratsam, eine mögliche Abnahme der Lichttransmission und Zunahme der Lichtstreuung zu berücksichtigen, wobei diese Kenngrößen wohl nicht sicherheitsrelevant und Hinweise dazu bereits in der EN 207 enthalten sind.

Anwendern kann aus Sicht des Arbeitsschutzes der Hinweis gegeben werden, dass mit keiner Gefährdung für Beschäftigte durch eine verringerte Laserbeständigkeit bei der Benutzung älterer Glas-, PMMA- und PC-Laserschutzfilter für Wellenlängen von 1064 nm und 10600 nm zu rechnen ist. Weiterhin muss eventuell bei Benutzung sehr alter Brillen, bei denen die Lichttransmission im Zuge der Alterung abgenommen hat, die Arbeitsplatzbeleuchtung angepasst werden. Außerdem sollten Anwender bei der Verwendung einer Laserschutzbrille vielmehr auf deren ersichtlichen Gesamtzustand sowie mögliche mechanische Beschädigungen als nur auf das bloße Alter achten.

7 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass das Alter der in diesem Projekt betrachteten Laserschutzfilter die Laserbeständigkeit und die optischen Kennwerte der Schutzfilter in gewissem Umfang, jedoch nicht sicherheitsrelevant, beeinflussen kann. Daher sind weiterführende Untersuchungen in anderen, bislang nicht betrachteten Wellenlängenbereichen zu empfehlen. Neben sichtbarer Laserstrahlung, beispielsweise im grünen (515 nm) Wellenlängenbereich, welche aktuell in der Lasermaterialbearbeitung enorm an Bedeutung gewinnt, sind Untersuchungen mittels UV-Laserstrahlung aufgrund der dabei auftretenden andersartigen Wechselwirkungsmechanismen von besonderem Interesse. Außerdem empfiehlt sich eine Ausweitung der bisherigen Untersuchungen auf kurz- und ultrakurzgepulste Laserstrahlung (R- und M-Prüfbedingung), da es mit abnehmender Pulsdauer zu einer Verschiebung von rein thermischen hin zu nichtlinearen Effekten mit einer Veränderung der Zerstörmechanismen kommt. Schließlich könnten die Untersuchungen der auf natürlichem Weg gealterten Brillen, welche sich hier vorrangig auf Glasfilter konzentrierten, auf über zehn Jahre alte Kunststofffilter ausgedehnt und zudem die Kunststofftragkörper hinsichtlich ihrer Versprödung mit in die Betrachtung einbezogen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] VERORDNUNG (EU) 2016/425 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 9. März 2016 über persönliche Schutzausrüstungen und zur Aufhebung der Richtlinie 89/686/EWG des Rates.
- [2] EN 207:2017-05: Persönlicher Augenschutz – Filter und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung (Laserschutzbrillen). Beuth Verlag, Berlin, 2017.
- [3] U. Urmoneit, H.-J. Krauß, G. Ott: Sicherheit von Laserschutzfiltern in Abhängigkeit des Strahldurchmessers. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund, 2016, Projektnummer F 2335.
- [4] DIN EN ISO 11146-1:2005: Laser und Laseranlagen - Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen - Teil 1: Stigmatische und einfach astigmatische Strahlen. Beuth Verlag, Berlin, 2005.
- [5] ISO 11664-2:2007: Farbmessung - Teil 2: CIE Normlichtarten. Beuth Verlag, Berlin, 2005.
- [6] DIN EN 168:2002-04: Persönlicher Augenschutz - Nichtoptische Prüfverfahren. Beuth Verlag, Berlin, 2002.
- [7] DIN EN ISO 4892-1:2016: Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 1: Allgemeine Anleitung. Beuth Verlag, Berlin, 2016.
- [8] DIN EN ISO 4892-2:2013: Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 2: Xenonbogenlampen. Beuth Verlag, Berlin, 2013.
- [9] DIN EN 167:2001: Persönlicher Augenschutz - Optische Prüfverfahren. Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [10] DIN EN 166:2001: Persönlicher Augenschutz - Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [11] ISO/WD 19818:2019(E): Eye and face protection – Protection against laser radiation – Requirements and test methods.

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Laserbetriebsarten und Impulslängen gemäß EN 207:2017 [2]	8
Tab. 2.2	Schutzstufen für Laserschutzbrillen gemäß EN 207:2017 [2]	9
Tab. 3.1	Technische Daten der cw-Nd:YAG-Laserstrahlquelle	11
Tab. 3.2	Technische Daten der gepulsten Nd:YAG-Laserstrahlquelle	12
Tab. 3.3	Technische Daten der CO ₂ -Laserstrahlquelle	12
Tab. 3.4	Spezifikation des Leistungsmesskopfs LM-200	13
Tab. 3.5	Spezifikation des Leistungsmesskopfs PM300F-50	14
Tab. 5.1	Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen an Altfiltern und der dazugehörigen Neufilter am cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm; die gemessenen Schutzstufen beziehen sich ausschließlich auf die Laserbelastungsprüfungen	48
Tab. 5.2	Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen an Altfiltern und dem dazugehörigen Neufilter am CO ₂ -Laser bei 10600 nm im cw-Betrieb; die gemessenen Schutzstufen beziehen sich ausschließlich auf die Laserbelastungsprüfungen	50
Tab. 5.3	Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen an Altfiltern, für die am Markt keine baugleichen Neufilter mehr erhältlich sind, am cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm; die gemessenen Schutzstufen beziehen sich ausschließlich auf die Laserbelastungsprüfungen	51
Tab. 5.4	Ergebnisse der Laserbelastungsprüfungen an Altfiltern, für die am Markt keine baugleichen Neufilter mehr erhältlich sind, am CO ₂ -Laser bei 10600 nm im cw-Betrieb; die gemessenen Schutzstufen beziehen sich ausschließlich auf die Laserbelastungsprüfungen	51
Tab. 5.5	Lichttransmissionswerte der Altfilter und der dazugehörigen Neufilter	53
Tab. 5.6	Streulichtwerte der Altfilter und der dazugehörigen Neufilter	55

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	cw-Nd:YAG-Laserstrahlquelle QY-1000D der Firma Haas Laser	11
Abb. 3.2	Gepulste Nd:YAG-Laserstrahlquelle HL 204 P der Firma TRUMPF	12
Abb. 3.3	CO ₂ -Laserstrahlquelle Microstorm der Firma FEHA LaserTec	13
Abb. 3.4	Leistungsmesskopf LM-200 der Firma Coherent	13
Abb. 3.5	Leistungsmesskopf PM300F-50 der Firma Coherent	14
Abb. 3.6	Prüfeinrichtung „Xenon Suntest“ von LEMA s.r.l. zur UV-Alterung der zu prüfenden Filter	15
Abb. 3.7	Spektrale Strahlstärkeverteilung einer typischen XBO [®] -Lampe und des Schwarzen Strahlers von ca. 6.000 K (Quelle: Osram).	16
Abb. 3.8	Belichtungs- und Bewitterungsprüfgerät „Xenotest Beta+“ der Firma Atlas zur künstlichen Alterung der Filter mittels künstlicher Bewitterung mit Xenonlicht	17
Abb. 3.9	Schematischer Versuchsaufbau am cw-Nd:YAG-Laser zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern	18
Abb. 3.10	Versuchsaufbau am Nd:YAG-Laser zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern	18
Abb. 3.11	Schematischer Versuchsaufbau am CO ₂ -Laser zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern	19
Abb. 3.12	Versuchsaufbau am CO ₂ -Laser zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern	20
Abb. 3.13	UV-Vis-NIR Spektrophotometer Cary 6000i von Varian Inc.	21
Abb. 3.14	Laserdensitometer (Eigenbau)	22
Abb. 3.15	Kleinwinkelstreulichtmessgerät (Eigenbau)	23
Abb. 4.1	Laserstrahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 100$ mm) des cw-Nd:YAG-Lasers QY-1000D, gemessen mit FocusMonitor (Fa. Primes)	26
Abb. 4.2	Laserstrahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 100$ mm) des gepulsten Nd:YAG-Lasers HL 204 P, gemessen mit FocusMonitor (Fa. Primes)	27
Abb. 4.3	Berechnete Laserstrahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 100$ mm) des CO ₂ -Lasers Microstorm	27
Abb. 5.1	Filterstandzeit T der PMMA-Filter in Abhängigkeit des Alterungsstatus bei Laserbelastung mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W; angegeben sind Mittelwerte ($n = 6$)	31
Abb. 5.2	Laserbelastungsprüfung eines ungealterten PMMA-Filters am cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W	32
Abb. 5.3	Schadensbilder der Laserbelastungsprüfungen an PMMA-Filtern mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W; links ungealtert, Mitte 50 h UV-gealtert, rechts 200 h UV-gealtert	33

Abb. 5.4	PMMA-Filter nach Laserbelastungsprüfungen mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W; links ungealtert, Mitte 50 h UV-gealtert, rechts 200 h UV-gealtert	33
Abb. 5.5	600 h UV-gealterter PMMA-Filter nach Laserbelastungsprüfung mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W	34
Abb. 5.6	Schadensbild an 600 h UV-gealtertem PMMA-Filter nach Laserbelastungsprüfung mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W; gut erkennbar ist die durch die lange UV-Bestrahlung deutlich aufgeraute Oberfläche des Filters	34
Abb. 5.7	Schadensbild an mittels künstlicher Bewitterung mit Xenonlicht gealtertem PMMA-Filter nach Laserbelastungsprüfung mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 30 W	35
Abb. 5.8	Starke Rauch- und Flammenbildung bei der Laserbelastungsprüfung eines PC-Filters am cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 80 W	36
Abb. 5.9	Schadensbild an 200 h UV-gealtertem PC-Filter nach Laserbelastungsprüfung mit dem gepulsten Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 14,8 W	37
Abb. 5.10	Rückseiten ungealterter PC-Filter nach Laserbelastungsprüfung mit dem gepulsten Nd:YAG-Laser bei 1064 nm mit 14,8 W; links nach 30 s ohne Durchschuss, rechts Durchschuss nach 9 s	37
Abb. 5.11	Filterstandzeit T der PMMA-Filter in Abhängigkeit des Alterungsstatus bei Laserbelastung mit dem CO ₂ -Laser bei 10600 nm im cw-Betrieb mit 1,6 W; angegeben sind Mittelwerte (n = 6)	38
Abb. 5.12	Schadensbilder der Laserbelastungsprüfungen an PMMA-Filtern mit dem CO ₂ -Laser bei 10600 nm im cw-Betrieb mit 1,6 W; links ungealtert, Mitte 50 h UV-gealtert, rechts 200 h UV-gealtert	39
Abb. 5.13	Schadensbild an 600 h UV-gealtertem PMMA-Filter nach Laserbelastungsprüfung mit dem CO ₂ -Laser bei 10600 nm im cw-Betrieb mit 1,6 W	39
Abb. 5.14	Verlauf der optischen Dichte der PMMA-Filter (gemessen mit Cary 6000i) und optische Dichte der PMMA-Filter bei 1064 nm (gemessen mit Laserdensitometer) in Abhängigkeit des Alterungsstatus der Filter	41
Abb. 5.15	Verlauf der optischen Dichte der PC-Filter (gemessen mit Cary 6000i) und optische Dichte der PC-Filter bei 1064 nm (gemessen mit Laserdensitometer) in Abhängigkeit des Alterungsstatus der Filter	41
Abb. 5.16	Optische Dichte der PMMA-Filter bei 808 nm in Abhängigkeit des Alterungsstatus; angegeben sind Mittelwerte (n = 6)	42
Abb. 5.17	Optische Dichte der PC-Filter bei 808 nm in Abhängigkeit des Alterungsstatus; angegeben sind Mittelwerte (n = 6)	43
Abb. 5.18	Optische Dichte der PC-Filter bei 1064 nm in Abhängigkeit des Alterungsstatus; angegeben sind Mittelwerte (n = 6)	43

Abb. 5.19	Verlauf der optischen Dichte des PMMA-Filters nach 200 h UV-Alterung am Dünnschliff (gemessen mit Cary 6000i) und optische Dichte des gealterten Filters am Dünnschliff bei 1064 nm (gemessen mit Laserdensitometer)	44
Abb. 5.20	Verlauf der optischen Dichte des PC-Filters nach 200 h UV-Alterung am Dünnschliff (gemessen mit Cary 6000i) und optische Dichte des gealterten Filters am Dünnschliff bei 1064 nm (gemessen mit Laserdensitometer)	45
Abb. 5.21	Lichttransmission der PMMA-Filter in Abhängigkeit des Alterungsstatus; angegeben sind Mittelwerte (n = 6)	46
Abb. 5.22	Lichttransmission der PC-Filter in Abhängigkeit des Alterungsstatus; angegeben sind Mittelwerte (n = 6)	46
Abb. 5.23	Altfilter Nr. 3 während der Laserbelastungsprüfung am cw-Nd: YAG-Laser bei 1064 nm mit 80 W	49
Abb. 5.24	Altfilter Nr. 3 nach der Laserbelastungsprüfung am cw-Nd: YAG-Laser bei 1064 nm mit 80 W	49

Danksagung

Die Autoren danken den Mitgliedern des Forschungsbegleitkreises Martin Brose (Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse), Dr. Thomas Fröhlich (UVEX Arbeitsschutz GmbH), Dr. Roland Mayerhofer und Andreas Piller (Laservision GmbH & Co. KG), Dr. Friedrich Offenhäuser (Offenhäuser + Berger GmbH), Prof. Dr. Hans-Dieter Reidenbach (Technische Hochschule Köln), Dr. Bernhard Schmitz (ECS GmbH), Martin Schreiber (Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr), Anja Tröster und Dr. Andreas Winbauer (DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH) und Uwe Urmoneit (Bayerisches Laserzentrum) für ihre wertvollen Anregungen und fachlichen Beiträge sowie die Bereitstellung von Filtermaterialien und die Durchführungen von Messungen. Herrn Marco Janßen (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin) danken die Autoren für die messtechnische Unterstützung bei der Ermittlung der optischen Kennwerte.

Die Durchführung der Laserbelastungsprüfungen und die Auswertungen der Messungen wurden durch Fabian Stoll im Rahmen seiner Bachelorarbeit und Julia Ströbel im Rahmen ihrer Tätigkeit als studentische Hilfskraft unterstützt.