



Sicherheit von Laserschutzfiltern in Abhängigkeit des Strahldurchmessers

baua: Bericht

**Forschung
Projekt F 2335**

U. Urmoneit
H.-J. Krauß
G. Ott

**Sicherheit von Laserschutzfiltern in
Abhängigkeit des Strahldurchmessers**

Dortmund/Berlin/Dresden 2016

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Sicherheit von Laserschutzfiltern in Abhängigkeit des Strahldurchmessers“ – Projekt F 2335 – im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Dipl.-Phys. Uwe Urmoneit
Dr.-Ing. Hans-Joachim Krauß
Bayerisches Laserzentrum GmbH
Konrad-Zuse-Straße 2-6, 91052 Erlangen

Dipl.-Ing. Günter Ott
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Titelfoto: K. Fuchs
Bayerisches Laserzentrum GmbH

Umschlaggestaltung: Vanessa Seeger
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herstellung: Druck & Verlag Kettler GmbH, Bönen

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:
Nöldnerstr. 40 - 42, 10317 Berlin
Telefon: 030 51548-0
Telefax: 030 51548-4170

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

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

www.buaa.de/dok/8031452

DOI: 10.21934/buaa:bericht20160630

ISBN 978-3-88261-200-4



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzreferat	7
Abstract	8
1 Einleitung	9
2 Bisheriger Kenntnisstand	10
3 Verwendete Geräte und Messaufbauten	13
3.1 Laserstrahlquellen	13
3.1.1 Cw-Laser	13
3.1.2 Gepulste Laser	14
3.2 Messgeräte	17
3.2.1 LaserSpy©-Sensor: optischer Detektor	17
3.2.2 LM-1 IR: thermoelektrischer Messkopf	17
3.2.3 LM-200: thermoelektrischer Messkopf	18
3.2.4 Streuscheibe	18
3.2.5 LM-2: Halbleiterdetektor	19
3.2.6 LM-1000: thermoelektrischer Messkopf	19
3.2.7 Anzeigeeinheit FieldMaster GS bzw. LabMax - TOP	20
3.2.8 Wärmebildkamera	20
3.2.9 Fotodiode	20
3.2.10 Oszilloskop	20
3.2.11 Strahlabschwächer für die Wellenlänge 1064 nm	21
3.3 Messaufbauten zur Messung des Filterversagens	22
3.3.1 Messaufbauten für die Wellenlänge 1064 nm	22
3.3.2 Messaufbauten für die Wellenlänge 10600 nm	23
3.3.3 Messaufbau für die Wellenlänge 532 nm	25
3.3.4 Messaufbau für die Wellenlänge 1070 nm	26
4 Untersuchungsmethodik für die Standzeitmessungen von Laserschutzfiltern	28
4.1 Untersuchungsmethodik für Filterversagen bei der Wellenlänge 1064 nm	28
4.1.1 Versuchsparameter	28
4.2 Untersuchungsmethodik für Filterversagen bei der Wellenlänge 10600 nm	30
4.2.1 Versuchsparameter	31
4.3 Untersuchungsmethodik für Filterversagen bei der Wellenlänge 532 nm	33
4.3.1 Versuchsparameter	33
4.4 Untersuchungsmethodik für Filterversagen bei der Wellenlänge 1070 nm	36
4.4.1 Versuchsparameter	36
5 Ergebnisse und Diskussion der Standzeitversuche	37
5.1 Ergebnisse der Standzeitversuche an PMMA-Filtern bei 1064 nm	37
5.1.1 Einfluss des Laserstrahldurchmessers	37

5.1.2	Einfluss der Laserbetriebsart	39
5.1.3	Einfluss der Filterdicke	41
5.1.4	Schadensbild und Temperaturmessung	42
5.2	Diskussion der Ergebnisse der Standzeitversuche an PMMA-Filtern bei 1064 nm	44
5.2.1	cw-Laserbetrieb	44
5.2.2	Definition des Überhöhungswertes bzw. der Überhöhungsfunktion	45
5.2.3	Gepulster Laserbetrieb	48
5.3	Ergebnisse und Diskussion der Standzeitversuche an Cellulose Acetat-Filtern bei 1064 nm	51
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse für 1064 nm	53
5.5	Ergebnisse und Diskussion der Standzeitversuche an PMMA-Filtern bei 10600 nm	54
5.6	Ergebnisse und Diskussion der Standzeitversuche an Cellulose Acetat-Filtern bei 10600 nm	58
5.7	Ergebnisse und Diskussion der Standzeitversuche an PMMA-Filtern bei 532 nm	60
5.8	Ergebnisse und Diskussion der Standzeitversuche an PMMA-Filtern bei 1070 nm	62
6	Vergleich der Überhöhungsfunktionen in Abhängigkeit von Wellenlänge und Filtermaterial	63
7	Modellbildung und Simulation mit COMSOL Multiphysics®	65
7.1	Ermittlung der Materialkennwerte von PMMA-Laserschutzfiltern	65
7.2	Theoretische Grundlagen	67
7.2.1	Wärmeleitung	68
7.2.2	Wärmestrahlung	68
7.2.3	Konvektiver Wärmefluss	69
7.2.4	Strahlungstransport in teiltransparenten Medien	69
7.3	Simulation CO ₂ -Laserbeschuss auf PMMA-Laserschutzfilter	70
7.3.1	Physikalisches Modell	70
7.3.1.1	Wärmeleitung	71
7.3.1.2	Dichte	72
7.3.1.3	Wärmekapazität	72
7.3.1.4	Anfangs- und Randbedingungen	72
7.3.1.5	Abbruchkriterium	73
7.3.1.6	Geometrie und Netzstruktur der Simulation	74
7.3.2	Ergebnisse und Diskussion Simulation CO ₂ -Laserbeschuss	77
7.4	Simulation cw-Nd:YAG-Laserbeschuss auf PMMA-Laserschutzfilter	79
7.4.1	Physikalisches Modell	79
7.4.1.1	Strahlungstransport	79
7.4.1.2	Abbruchkriterium	79
7.4.1.3	Wärmekapazität	80
7.4.1.4	Absorptions- und Streukoeffizient	80
7.4.2	Ergebnisse und Diskussion - Simulation cw-Nd:YAG-Laserbeschuss	82
8	Handlungsanleitung für den Benutzer	88

9	Zusammenfassung	90
10	Ausblick	91
	Literaturverzeichnis	92
	Tabellenverzeichnis	93
	Abbildungsverzeichnis	94

Sicherheit von Laserschutzfiltern in Abhängigkeit des Strahldurchmessers

Kurzreferat

Neben der Laserleistung ist der Strahldurchmesser ein bedeutender Faktor für die Standzeit von Laserschutzfiltern gegen Laserstrahlung. Gegenstand der Untersuchungen im BAuA-Entwicklungsprojekt F 2335 ist daher die Abhängigkeit der Filterstandzeit vom Laserstrahldurchmesser und weiteren Einflussfaktoren. Für die Untersuchung dieser Abhängigkeiten wurden Versuchsaufbauten realisiert, die transmittierte Laserstrahlung hinter dem Schutzfilter detektieren und den Laser ab einem bestimmten Schwellenwert abschalten. Das Kriterium für das Versagen eines Filters wurde an den MZB-Wert (Maximal Zulässige Bestrahlung/Bestrahlungsstärke, welcher Personen ausgesetzt werden dürfen) (Henderson, et al., 2004) angelehnt. Diese Definition des Filterversagens bestimmt die Standzeit der Laserschutzfilter unter den gegebenen Laserparametern (z. B. Laserleistung und Strahldurchmesser). Die Experimente beinhalteten eine Reihe von Laserbelastungsprüfungen mit einem cw (continuous wave) Nd:YAG-Laser (Wellenlänge 1064 nm), einem cw Ytterbium-Faserlaser (1070 nm), gepulsten Nd:YAG-Lasern (1064 nm und 532 nm) und einem CO₂-Laser (10600 nm) unter Variation der Laserleistung und des Strahldurchmessers. Die gefundenen Abhängigkeiten der Standzeiten vom Strahldurchmesser folgen innerhalb der untersuchten Bereiche verschiedenen Funktionen, etwa einer Potenzfunktion im Falle von Polymethylmethacrylat-Laserschutzfiltern (PMMA-Laserschutzfiltern) bei Bestrahlung bei 1064 nm im cw-Betrieb des Lasers. Die Untersuchungen zeigen in diesem Fall, dass es mittels eines einfachen empirischen Modells möglich ist, für einen bestimmten Laserschutzfiltertyp (PMMA bei 1064 nm) durch wenige spezifische Standzeitversuche die Standzeiten für unterschiedlichste Strahldurchmesser innerhalb des untersuchten Bereichs zu berechnen. Die festgestellten experimentellen Ergebnisse konnten zum Teil mit einem physikalischen Modell in einer COMSOL Multiphysics[®] Simulation nachvollzogen werden.

Schlagwörter:

Laser, Laserschutzfilter, Strahldurchmesser, Laserbeständigkeit, Durchbrand, DIN EN 207

Safety of laser protection filters as a function of beam diameter

Abstract

Beside the total laser power, the laser beam diameter is a significant factor for the resistance of laser protection filters to laser radiation. In this report a study of the resistance of laser protection filters to laser radiation in dependence of the laser beam diameter is given. For the investigation of this effect an experimental setup was realized, which detects laser radiation near the MPE value (Henderson, et al., 2004) (Maximum Permissible Exposure; level of laser radiation to which, under normal circumstances, persons may be exposed without suffering adverse effects) behind the filter glasses, which was taken as a criteria for the failure of laser protection filters. This failure defines the laser resistance time of the protection filter under the given laser parameters (laser power and laser beam diameter). The experiments involved a number of laser irradiation tests with a cw (continuous wave) Nd:YAG laser (wavelength 1064 nm), a cw ytterbium fiber laser (1070 nm), pulsed Nd:YAG lasers (1064 nm and 532 nm) and a CO₂ laser (10600 nm), varying laser parameters such as power and beam diameter. The found dependencies of the laser resistance time versus laser beam diameter follow within the investigated laser parameter area different functions, such as a power function in the case of polymethyl methacrylate (PMMA) laser protection filters on the laser irradiation at 1064 nm in cw mode. The investigations show in this case that it is possible, by applying a simple empirical model, to calculate the laser resistance time for different laser beam diameters for a specific laser safety filter type (PMMA at 1064 nm) by only performing a few specific laser resistance tests within a fixed laser parameter area. The observed experimental results are reproduced in part by a physical model with a COMSOL Multiphysics® simulation.

Key words:

Laser, laser protection filter, beam diameter, laser resistance, burn-through, DIN EN 207

1 Einleitung

Das übergeordnete Ziel des BAuA-Projektes F 2335 ist es, die Abhängigkeit der jeweiligen Belastungsgrenze vom Laserstrahldurchmesser für verschiedene Schutzfiltermaterialien an diversen Laserstrahlquellen zu erfassen und ein Modell zu entwickeln, das die gefundenen Abhängigkeiten beschreibt. Letztendlich sollen die Untersuchungsergebnisse in angepasste Prüfvorschriften sowie in Handlungsempfehlungen für die Auswahl von Laserschutzbrillen münden und entsprechend publiziert werden. Die Norm DIN 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 aus dem Jahr 2012 der Prüfstrahldurchmesser auf 1 mm festgesetzt. Die Prüfpraxis zeigt jedoch, dass der Laserstrahldurchmesser neben der Laserleistung und der Wellenlänge einen wesentlichen Einflussfaktor für die Standzeit der Schutzbrillen darstellt. Schutzbrillenhersteller prüfen ihre Produkte nach Norm mit dem Prüfstrahldurchmesser $d_{63} = 1 \text{ mm}$. Andererseits sind Laserbetreiber dazu verpflichtet, ihren Mitarbeitern einen geeigneten Laseraugenschutz zur Verfügung zu stellen, auch für Strahldurchmesser ungleich 1 mm, wenn diese in der Praxis zugänglich sind. Hierfür bietet der informative Teil der Norm DIN EN 207 dem Anwender eine Überhöhungsfunktion zur Korrektur der Schutzstufe im Hinblick auf den real auftretenden Strahldurchmesser an. Neuere Erkenntnisse zeigen aber, dass diese Überhöhungsfunktion nicht die Realität abbildet. Zudem zeichnet sich ein Trend ab, höhere Schutzstufen als erforderlich auszuwählen. Schutzbrillen mit hohen Schutzstufen weisen wegen ihres hohen Gewichts und der eingeschränkten Sicht jedoch einen geringeren Tragekomfort auf. Dies führt zu einer geringeren Akzeptanz bei den Benutzern und verleitet dazu, für kurze oder anscheinend „harmlose“ Arbeiten den Laserschutz zu vernachlässigen. Da der Einfluss des Strahldurchmessers noch nicht ausreichend bekannt ist (Schmitz, 2013) (Zaeh, et al., 2011), ist eine genauere Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Standzeit der Laserschutzbrillen notwendig und damit Gegenstand dieses Projektes.

2 Bisheriger Kenntnisstand

Die Norm DIN 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 1 mm festgesetzt. Nach Norm DIN EN 207:2012-04 (207:2012-04, 2012) gilt eine Laserschutzbrille als geeignet, wenn der Filter einem direkten Laserbeschuss beim Dauerstrichbetrieb des Lasers (Laserbetriebsart D) mindestens 5 s und bei gepulsten Lasern (Laserbetriebsarten I, R und M) mindestens 50 Pulsen standhält. In Bezug auf die Impulsdauer des Laserstrahls sind folgende vier Laserbetriebsarten definiert, wie Tab. 2.1 zeigt: Dauerstrichlaser (D), Impulslaser (I), Riesenimpulslaser (R) und modengekoppelte Laser (M).

Tab. 2.1 Laserbetriebsarten und Impulslängen nach DIN EN 207:2012-04

Prüfbedingungen für Laserart	Typische Laserart	Impulslänge s	Mindest-Impulsanzahl
D	Dauerstrichlaser	5	1
I	Impulslaser	$> 10^{-6}$ bis 0,25	50
R	Gütegeschalteter 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, wie Tab. 2.2 zeigt.

Tab. 2.2 Schutzstufen für Laserschutzbrillen nach DIN EN 207:2012-04

Schutzstufe	Maximaler spektraler Transmissionsgrad bei der Laserwellenlänge τ (λ)	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 μ m		
		Für Prüfbedingung/Impulsdauer in s								
		D $\geq 3 \times 10^4$ E_D W/m ²	I, R 10^{-9} bis 3×10^4 $H_{I,R}$ J/m ²	M $< 10^{-9}$ E_M W/m ²	D $\geq 5 \times 10^{-4}$ E_D W/m ²	I, R 10^{-9} bis 5×10^{-4} $H_{I,R}$ J/m ²	M $< 10^{-9}$ H_M J/m ²	D $> 0,1$ E_D W/m ²	I, R 10^{-9} bis 0,1 $H_{I,R}$ J/m ²	M $< 10^{-9}$ 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}

Um die Problematik des Einflusses des Laserstrahldurchmessers zu berücksichtigen, wurden bereits 2002 Überhöhungsfunktionen zur Korrektur des bis dato frei wählbaren Prüfstrahldurchmessers in die Norm DIN EN 207:2002-12 (DIN EN 207:2002-12, 2002) eingeführt:

$$\text{cw-Betrieb:} \quad \frac{E(d_{63})}{E_n} = a_0 + a_1 \cdot e^{-\frac{d_{63}}{a_2}} \quad (2.1)$$

$$\text{gepulster Betrieb:} \quad \frac{H(d_{63})}{H_n} = a_0 + a_1 \cdot e^{-\frac{d_{63}}{a_2}} \quad (2.2)$$

mit d_{63} : Prüfstrahldurchmesser
 $E(d_{63})$: Bestrahlungsstärke bei d_{63}
 E_n : Nennwert der Bestrahlungsstärke aus Tabelle 1 der Norm DIN EN 207
 $H(d_{63})$: Bestrahlung bei d_{63}
 H_n : Nennwert der Bestrahlung aus Tabelle 1 der Norm DIN EN 207
 a_0, a_1, a_2 : Konstanten für Kunststoff- und Glasfilter

Um eine Vergleichbarkeit der Laserbeständigkeitsprüfungen zu erreichen, legt die aktuelle Version der Norm aus 2012 (207:2012-04, 2012) den Laserstrahldurchmesser d_{63} auf 1 mm fest. Die Überhöhungsfunktionen wurden aufgrund neuerer Erkenntnisse (Roshani, 2007) (Welzel, 2009) neu definiert und vom normativen in den informativen Teil der Norm verlegt, um dem Anwender bei der Auswahl der Schutzbrille die Möglichkeit zu geben, unterschiedliche Laserstrahldurchmesser zu berücksichtigen. Dazu wird das Ergebnis der unten angegebenen Korrekturfunktionen F für Kunststoff- bzw. Glasfilter mit den in Tab. 2.2 angegebenen Leistungs- und Energiedichtewerten multipliziert:

$$\text{Kunststoff:} \quad F(d_{63}) = d_{63}^{1,2233} \quad (2.3)$$

$$\text{Glas:} \quad F(d_{63}) = d_{63}^{1,1693} \quad (2.4)$$

Schutzbrillenhersteller prüfen ihre Produkte nach Norm mit dem Prüfstrahldurchmesser $d_{63} = 1$ mm. Andererseits sind Laserbetreiber dazu verpflichtet, ihren Mitarbeitern einen geeigneten Laseraugenschutz zur Verfügung zu stellen, auch für Strahldurchmesser ungleich 1 mm, wenn diese in der Anwendung zugänglich sind. Die Prüfpraxis zeigt jedoch, dass der Laserstrahldurchmesser neben der Laserleistung und der Wellenlänge einen wesentlichen Einflussfaktor für die Standzeit der Schutzbrillen darstellt. Deshalb bietet der informative Teil der Norm DIN EN 207 dem Anwender eine Überhöhungsfunktion zur Korrektur der Schutzstufe im Hinblick auf den real auftretenden Strahldurchmesser an. Neuere Erkenntnisse zeigen aber, dass diese Überhöhungsfunktion nicht die Realität abbildet.

Da der Einfluss des Strahldurchmessers noch nicht ausreichend bekannt ist (Schmitz, 2013) (Zaeh, et al., 2011), ist eine genauere Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Standzeit der Laserschutzbrillen notwendig und damit Gegenstand dieses Projektes. Ziel ist daher die detaillierte Untersuchung der unterschiedlichen Ab-

hängigkeiten der Filterstandzeit, um die gefundenen Zusammenhänge in die Normungsarbeit einfließen zu lassen, womit dem Anwender die Auswahl einer für den jeweiligen Praxisfall sicheren Laserschutzbrille ermöglicht wird. Hierzu wurde im ersten Schritt ein messtechnisch erfassbares Kriterium für das Filterversagen definiert und ein entsprechender Messaufbau realisiert. Die eingesetzten Laserstrahlquellen sowie die verwendeten Laserschutzfilter werden charakterisiert. Mit dem Messaufbau werden dann entsprechende Untersuchungsreihen durchgeführt. Neben dem Schutzfiltermaterial sollen die Filterdicke, die Wellenlänge, die Laserbetriebsart (cw, gepulst), die Laserleistung bzw. Bestrahlungsstärke und der Laserstrahldurchmesser als Einflussfaktoren (= Versuchsparameter) variiert werden.

3 Verwendete Geräte und Messaufbauten

3.1 Laserstrahlquellen

3.1.1 Cw-Laser

Nd:YAG-Laserstrahlquelle 1064 nm

Für die Untersuchungen im Dauerstrichbetrieb wurde der Nd:YAG-Laser QY-1000D der Firma HAAS Laser mit einer maximalen Leistung von ca. 650 W und der Wellenlänge $\lambda = 1064$ nm eingesetzt (Abb. 3.1, Tab. 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 Leistungsmesskopfs eingestellt.



Abb. 3.1 cw-Nd:YAG-Laserstrahlquelle QY-1000D der Fa. HAAS Laser

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

Bezeichnung	QY-1000D
Wellenlänge	1064 nm
Betriebsart	cw
max. Laserleistung	~650 W

Faserlaser 1070 nm

Für die Untersuchungen im Dauerstrichbetrieb mit $\lambda = 1070$ nm bei Laserleistungen > 1 kW wurde die Faserlaser-Strahlquelle YLR - 8000-R der Firma IPG Laser eingesetzt (Abb. 3.2, Tab. 3.2). Die Einstellung des Prüfstrahldurchmessers erfolgte über den Abstand der Fokussieroptik zur Probenoberfläche.



Abb. 3.2 cw Ytterbium-Faserlaser-Strahlquelle YLR - 8000-R der Fa. IPG Laser

Tab. 3.2 Technische Daten der Faserlaser-Strahlquelle

Bezeichnung	YLR - 8000-R
Wellenlänge	1070 nm
Betriebsart	cw
max. Laserleistung	~8 kW
Strahlparameterprodukt	~16 mm*mrad

3.1.2 Gepulste Laser

Nd:YAG-Laserstrahlquelle 1064 nm

Für die Untersuchungen im gepulsten Betrieb wurde der lampengepumpte Nd:YAG-Laser HL 204 P der Firma TRUMPF ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) mit einer maximalen mittleren Laserleistung von ca. 200 W und einer maximalen Pulsspitzenleistung von ca. 8 kW verwendet (Abb. 3.3, Tab. 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 Leistungsmesskopfs eingestellt.



Abb. 3.3 Gepulste Nd:YAG-Laserstrahlquelle HL 204 P der Fa. TRUMPF

Tab. 3.3 Technische Daten der gepulsten Nd:YAG-Laserstrahlquelle

Bezeichnung	HL 204 P
Wellenlänge	1064 nm
Betriebsart	gepulst (lampengepumpt)
max. Pulsspitzenleistung	~8 kW
max. mittlere Laserleistung	~200 W
Strahlparameterprodukt	~ 16 mm*mrad

CO₂-Laserstrahlquelle 10600 nm

Für die Untersuchungen im quasi-Dauerstrichbetrieb und im gepulsten Betrieb wurde der CO₂-Laser Diamond K150 der Firma Coherent mit einer maximalen mittleren Leistung von ca. 130 W und der Wellenlänge $\lambda = 10600$ nm eingesetzt (Abb. 3.4, Tab. 3.4). Die Einstellung des Prüfstrahldurchmessers erfolgte über den Abstand der Fokussieroptik zur Probenoberfläche. Die erforderliche Laserleistung wurde für jede Prüfung unter Zuhilfenahme eines kalibrierten Leistungsmesskopfs eingestellt.



Abb. 3.4 Gepulste CO₂-Laserstrahlquelle Diamond K150 der Fa. Coherent

Tab. 3.4 Technische Daten der gepulsten CO₂-Laserstrahlquelle

Bezeichnung	Diamond K150
Wellenlänge	10600 nm
Betriebsart	gepulst (HF-gepumpt an/aus)
max. Pulsspitzenleistung	~325 W
max. mittlere Laserleistung	~130 W
Beugungsmaßzahl M ²	~1,3

Frequenzverdoppelte Nd:YAG-Laserstrahlquelle 532 nm

Für die Untersuchungen bei der Wellenlänge 532 nm wurde ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser ORC 1000 der Fa. Clark mit einer maximalen mittleren Leistung von ca. 24 W eingesetzt (Abb. 3.5, Tab. 3.5). Die Einstellung des Prüfstrahldurchmessers erfolgte über den Abstand der Fokussieroptik zur Probenoberfläche. Die erforderliche Laserleistung wurde für jede Prüfung unter Zuhilfenahme eines kalibrierten Leistungsmesskopfs eingestellt.

**Abb. 3.5** Frequenzverdoppelte Nd:YAG-Laserstrahlquelle ORC 1000 der Fa. Clark**Tab. 3.5** Technische Daten der gepulsten Nd:YAG-Laserstrahlquelle (532 nm)

Bezeichnung	ORC 1000
Wellenlänge	532 nm
Betriebsart	gepulst (Q-Switch)
max. mittlere Laserleistung	~24 W
Pulsdauer (FWHM)	~500 ns
Pulsfrequenz	cw bis 20 kHz
Beugungsmaßzahl M ²	~25

3.2 Messgeräte

3.2.1 LaserSpy[®]-Sensor: optischer Detektor

Zur Detektion der Standzeiten der Laserschutzfilter bei Bestrahlung mit dem Festkörperlaser (Nd:YAG) wurde ein optischer Sensor vom Typ LaserSpy[®] der Firma Reis Lasertec verwendet (Datenblatt LaserSpy-Sensor). Dieser wurde als Überwachungselement zum Einbau in doppelwandig ausgeführten Laserschutzkabinen entwickelt. Die Reaktionszeit des Sensors liegt bei <15 ms bei einer spektralen Empfindlichkeit von 820 nm bis 1100 nm (Abb. 3.6, Tab. 3.6).



Abb. 3.6 Fotodioden-Ensemble des LaserSpy[®]-Sensors

Tab. 3.6 Technische Spezifikationen des LaserSpy[®]-Sensors

Wirkungsweise	optisch, berührungslos (Fotodioden mit vorge-setztem Infrarotfilter als optischer Detektor)
Betrieb	intermittierend
Ansprechzeit	<15 ms
spektrale Empfindlichkeit	820 nm bis 1100 nm

3.2.2 LM-1 IR: thermoelektrischer Messkopf

Zur Detektion der Standzeiten der Laserschutzfilter bei CO₂-Laserbestrahlung wurde der empfindliche Leistungsmesskopf LM-1 IR der Fa. Coherent verwendet (Abb. 3.7, Tab. 3.7).



Abb. 3.7 Leistungsmesskopf LM-1 IR der Fa. Coherent

Tab. 3.7 Spezifikation des Leistungsmesskopfs LM-1 IR

Wirkungsweise	thermoelektrisch
minimal messbare Leistung	~1 mW
maximal messbare Leistung	~1 W
minimale Auflösung	0,1 mW
spektrale Empfindlichkeit	1000 nm bis 10600 nm
Messgenauigkeit	± 5 %

3.2.3 LM-200: thermoelektrischer Messkopf

Für die Messung höherer Laserleistungen bis zu 200 W wurde der Leistungsmesskopf LM-200 der Fa. Coherent verwendet (Abb. 3.16, Tab. 3.8).

Tab. 3.8 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 %

3.2.4 Streuscheibe

Eine vergoldete Streuscheibe DG10-120 der Fa. Thorlabs mit 120iger Körnung (Abb. 3.8, Abb. 3.9) wurde als CO₂-Laserstrahl-Abschwächer (durch Streuung der auftreffenden Laserstrahlung) in Kombination mit dem Leistungsmesskopf LM-1 IR verwendet (siehe Abb. 3.7).



Abb. 3.8 Streuscheibe DG10-120, Thorlabs

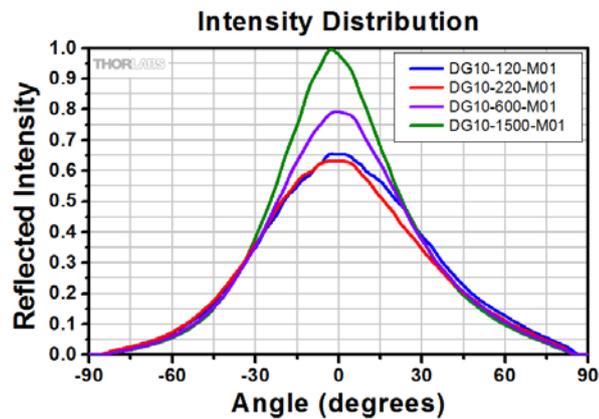


Abb. 3.9 Intensitätsverteilung Streuscheibe DG10-120

3.2.5 LM-2: Halbleiterdetektor

Für die Messung der Empfindlichkeit des LaserSpy[®]-Sensors wurde der Halbleiterdetektor LM-2 der Fa. Coherent mit folgenden Daten eingesetzt:

Tab. 3.9 Spezifikation des Halbleiterdetektormesskopfs LM-2

Wirkungsweise	Halbleiterdetektor
minimal messbare Leistung	~10 nW
maximal messbare Leistung	~50 mW
minimale Auflösung	1 nW
spektrale Empfindlichkeit	400 nm bis 1064 nm
Messgenauigkeit	± 5 %

3.2.6 LM-1000: thermoelektrischer Messkopf

Für die Messung von Laserleistungen bis 1000 W wurde der thermoelektrische Messkopf LM-1000 der Fa. Coherent mit folgenden Daten eingesetzt:

Tab. 3.10 Spezifikation des Leistungsmesskopfs LM-1000

Wirkungsweise	thermoelektrisch
minimal messbare Leistung	~10 W
maximal messbare Leistung	~1000 W
minimale Auflösung	100 mW
spektrale Empfindlichkeit	300 nm bis 10600 nm
Messgenauigkeit	± 5 %

3.2.7 Anzeigeeinheit FieldMaster GS bzw. LabMax - TOP

Der FieldMaster GS und der LabMax - TOP der Fa. Coherent sind mikroprozessor-gesteuerte Anzeigeeinheiten. Es lassen sich verschiedene Messköpfe der Fa. Coherent (z. B. LM-2, LM-200) an der Anzeigeeinheiten anschließen. Die Anzeigeeinheiten können sich auf die verschiedenen angeschlossenen Messköpfe automatisch einstellen und entsprechend Messgrößen zur Anzeige bringen.

3.2.8 Wärmebildkamera

Für Oberflächentemperaturmessungen an den Laserschutzfiltern während der Standzeitversuche wurde eine Wärmebildkamera vom Typ ThermoCAM SC2000 der Fa. FLIR mit folgenden technischen Daten eingesetzt:

Tab. 3.11 Spezifikation Wärmebildkamera ThermoCAM SC2000

Wirkungsweise	ungekühltes Mikro-Bolometer
Messbereich	-40°C bis 2000°C
spektrale Empfindlichkeit	7,5 µm bis 13 µm
Messgenauigkeit	± 2 %

3.2.9 Fotodiode

Zum Triggern des Oszilloskops und zum Starten der Standzeitmessungen wurde eine Fotodiode vom Typ BPW34 der Fa. OSRAM mit folgenden Daten verwendet:

Tab. 3.12 Spezifikation der Fotodiode BPW34

Wirkungsweise	Halbleiter
Detektorfläche	~7 mm ²
Empfindlichkeit	~0,62 A/W
Anstiegs- und Abfallzeit	20 ns
spektrale Empfindlichkeit	400 nm bis 1100 nm

3.2.10 Oszilloskop

Für die Erfassung der Filterstandzeiten wurde das 4-kanalige Oszilloskop TDM2024B der Fa. Tektronix mit folgender Spezifikation verwendet:

Tab. 3.13 Spezifikation des Oszilloskops TDM2024B

Bandbreite	200 MHz
Vertikalauflösung	8 bit

3.2.11 Strahlabschwächer für die Wellenlänge 1064 nm

Es wurde ein Strahlabschwächer für 1064 nm Wellenlänge aufgebaut, um die minimal einstellbare Laserleistung der cw-Nd:YAG-Laserstrahlquelle QY-1000D von ca. 8 W noch weiter reduzieren zu können. Der Aufbau des Strahlabschwächers ist in Abb. 3.10 schematisch und in Abb. 3.11 bildlich dargestellt. Direkt hinter dem Strahlengang der Laserstrahlquelle wurde ein Polarisationsstrahlteiler platziert, um die unpolarisierte Ausgangsstrahlung des Lasers für den Abschwächer zu polarisieren. Mit dem $\lambda/2$ -Plättchen vor dem zweiten Polarisationsstrahlteiler wird die Polarisation der Laserstrahlung verändert (über Winkel α einstellbar), so dass eine kontinuierliche Strahlabschwächung einstellbar ist. Hinter dem Strahlabschwächer wurde eine Plankonvexlinse mit 100 mm Brennweite für die Standzeitversuche eingesetzt. Somit konnten auch Laserleistungen unterhalb von 8 W für die Standzeitversuche eingestellt werden.

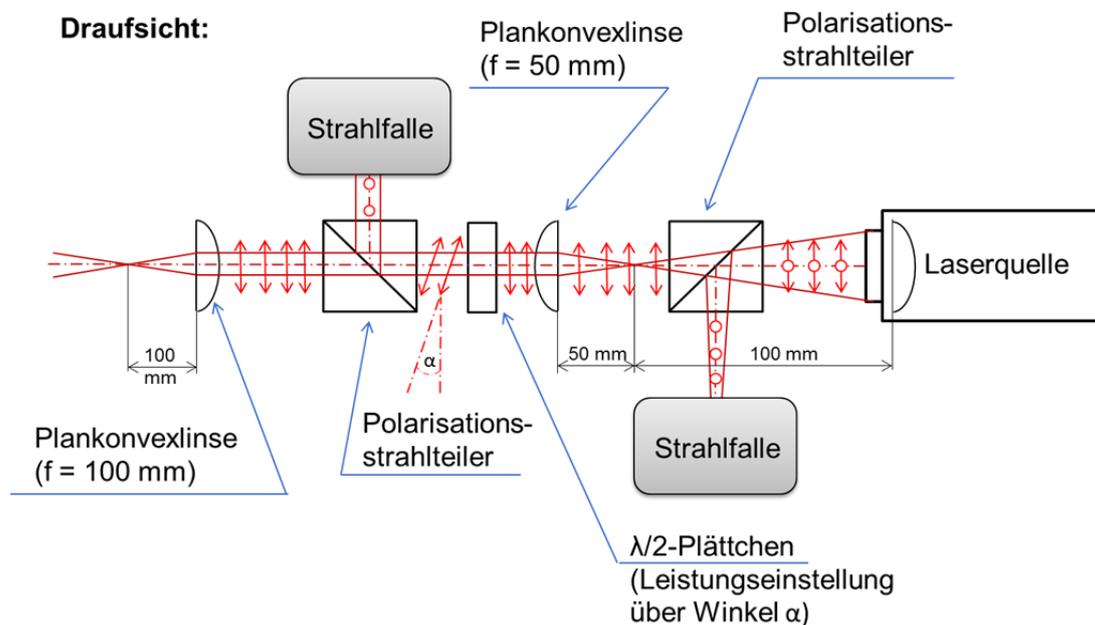


Abb. 3.10 Aufbau des Laserstrahlabschwächers für die Wellenlänge 1064 nm

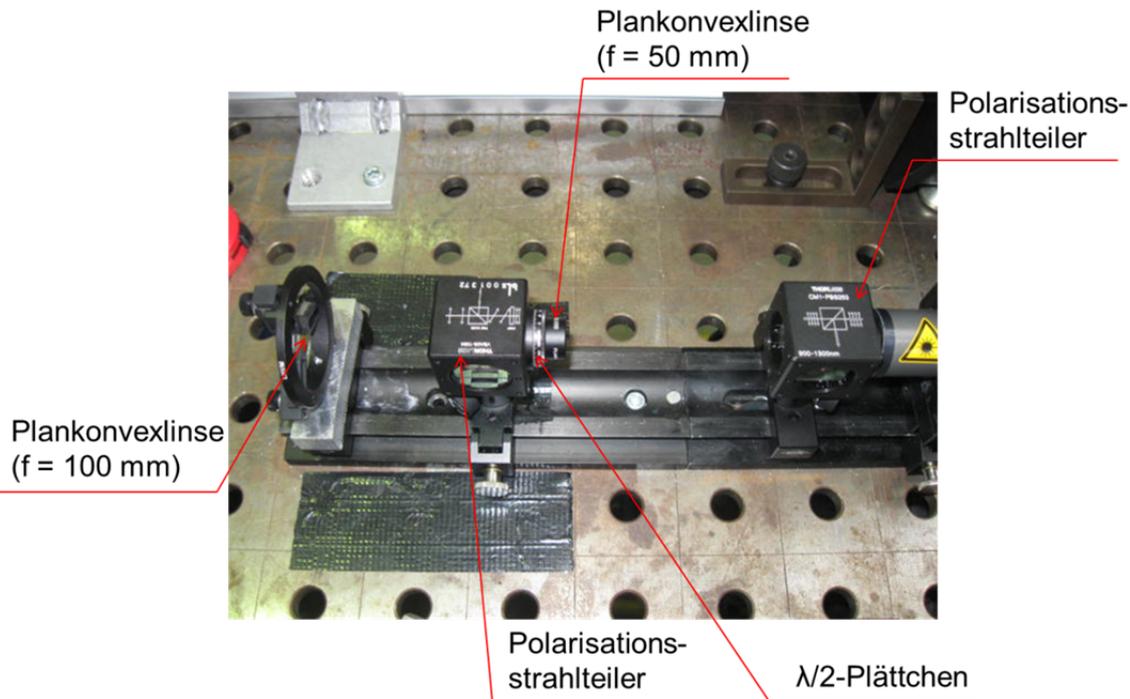


Abb. 3.11 Aufgebauter Stahlabschwächer

3.3 Messaufbauten zur Messung des Filterversagens

3.3.1 Messaufbauten für die Wellenlänge 1064 nm

Der experimentelle Messaufbau zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern bei einer Laserwellenlänge von 1064 nm ist in Abb. 3.12 und Abb. 3.13 dargestellt. Der LaserSpy[®]-Sensor ist durch ein Gehäuse vom Umgebungslicht abgeschirmt. Der zu prüfende Filter wird in die Gehäuseausparung auf der Vorderseite eingeschoben. Die Einstellung des Prüfstrahldurchmessers erfolgt über den Abstand der Fokussieroptik zur Filteroberfläche. Der exakte Startzeitpunkt für die Belastungsprüfung wird von der außen seitlich angebrachten Fotodiode erfasst und über das Oszilloskop aufgezeichnet. Der LaserSpy[®]-Sensor überwacht während der Bestrahlungsdauer den Raum hinter dem Filter und unterbricht den Lasersicherheitskreis, sobald eine Überschreitung eines definierten Schwellwertes vorliegt (Kriterium für Filterversagen). Im Messaufbau wurde eine Detektorempfindlichkeit des LaserSpy[®]-Sensors zw. 1 mW und 2 mW Laserleistung gemessen. Dieser Leistungsbereich liegt nahe am Wert für die maximal zulässige Bestrahlung ($MZB = 1,95 \text{ mW}$) bei der Wellenlänge von 1064 nm für 10 s Bestrahlungsdauer. Durch die Unterbrechung des Lasersicherheitskreises wird der Laser abgeschaltet und dieses Ereignis als zweites Signal im Oszilloskop aufgezeichnet. Die Zeitdifferenz zwischen Einschalten des Lasers (über Fotodiode detektiert) und Unterbrechung des Lasersicherheitskreises (über den LaserSpy[®]-Sensor) stellt die Standzeit des Laserschutzfilters dar.

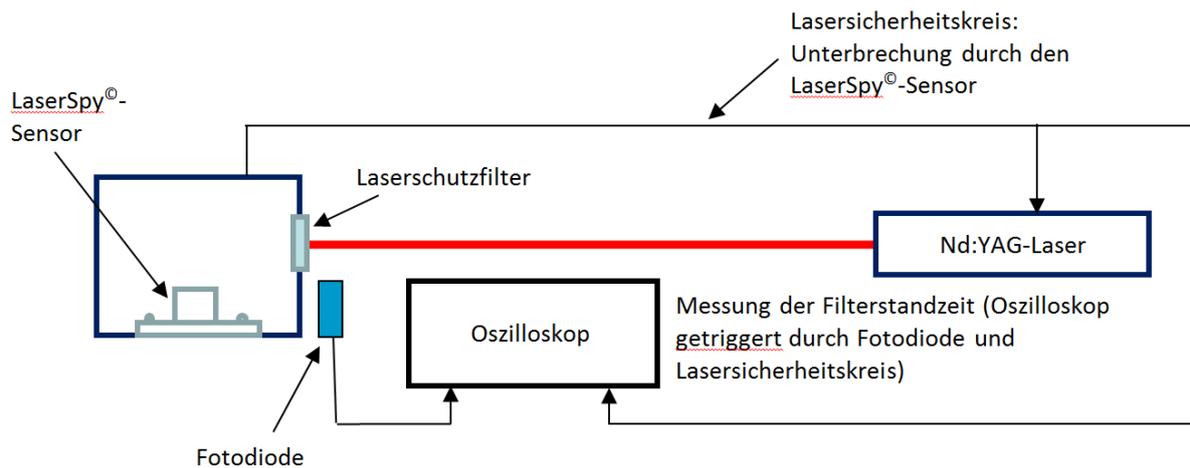


Abb. 3.12 Schematische Darstellung des Messaufbaus mit LaserSpy®-Sensor zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern bei 1064 nm

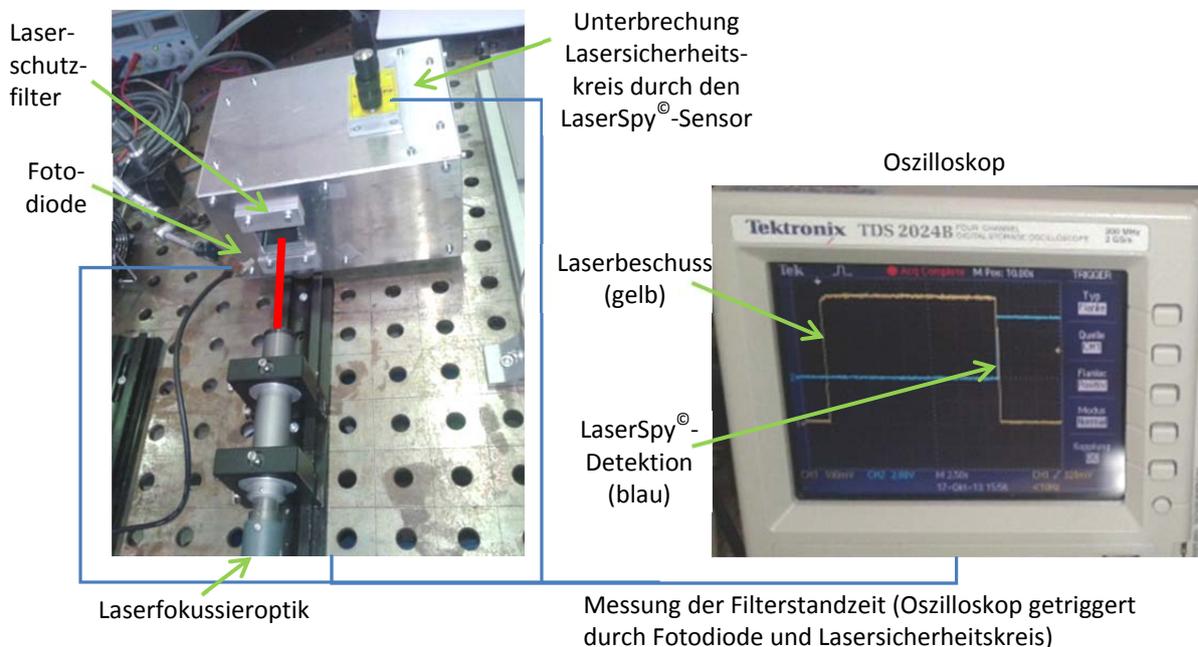


Abb. 3.13 Experimenteller Aufbau zur Standzeitmessung an Laserschutzfiltern bei 1064 nm

3.3.2 Messaufbauten für die Wellenlänge 10600 nm

Die experimentellen Messaufbauten zur Bestimmung der Standzeiten von Laserschutzfiltern bei einer Laserwellenlänge von 10600 nm sind in den Abb. 3.14 bis Abb. 3.16 dargestellt. Die Einstellung des Prüfstrahldurchmessers erfolgt über den Abstand der Fokussieroptik zur Filteroberfläche. In der Regel wird der Startzeitpunkt für die Belastungsprüfung von der manuell zu betätigenden ON/OFF-Box durch Drücken eines Tasters bestimmt. Die ON/OFF-Box triggert den CO₂-Laser an seinem Gate-Trigger-Signaleingang (digitales Steuersignal 0 V bedeutet Laserstrahlemission mit voreingestellter Pulsperiode PP und Pulsweite PW; 5 V bedeutet keine Laserstrahlemission/Laser-Off). Die Bestrahlungsdauer wird durch Zeitmessung in der ON/OFF-

Box festgehalten. Das Versagen des Laserschutzfilters wird manuell am Messsignal der gestreuten Leistung (LM-1 IR Messkopf) erkannt. Das Versagen des Laserschutzfilters ist stets mit einem Durchschuss (Loch) in der Probe (LS Filter) verbunden (plötzlicher starker Messsignal-Anstieg → Versagenskriterium, siehe Abschnitt 1.4.2).

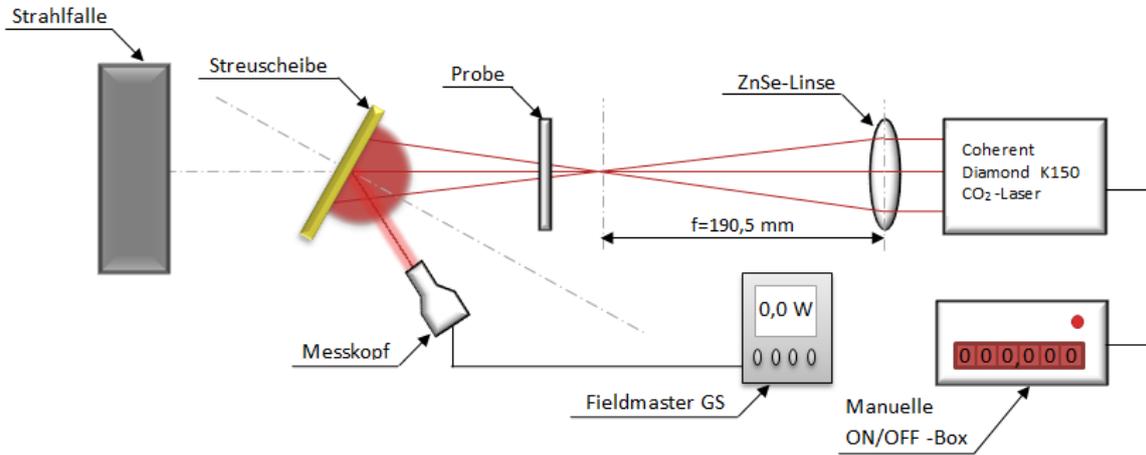


Abb. 3.14 Schematische Darstellung des CO₂-Laser-Messaufbaus zur Bestimmung der Filterstandzeit bei 10600 nm

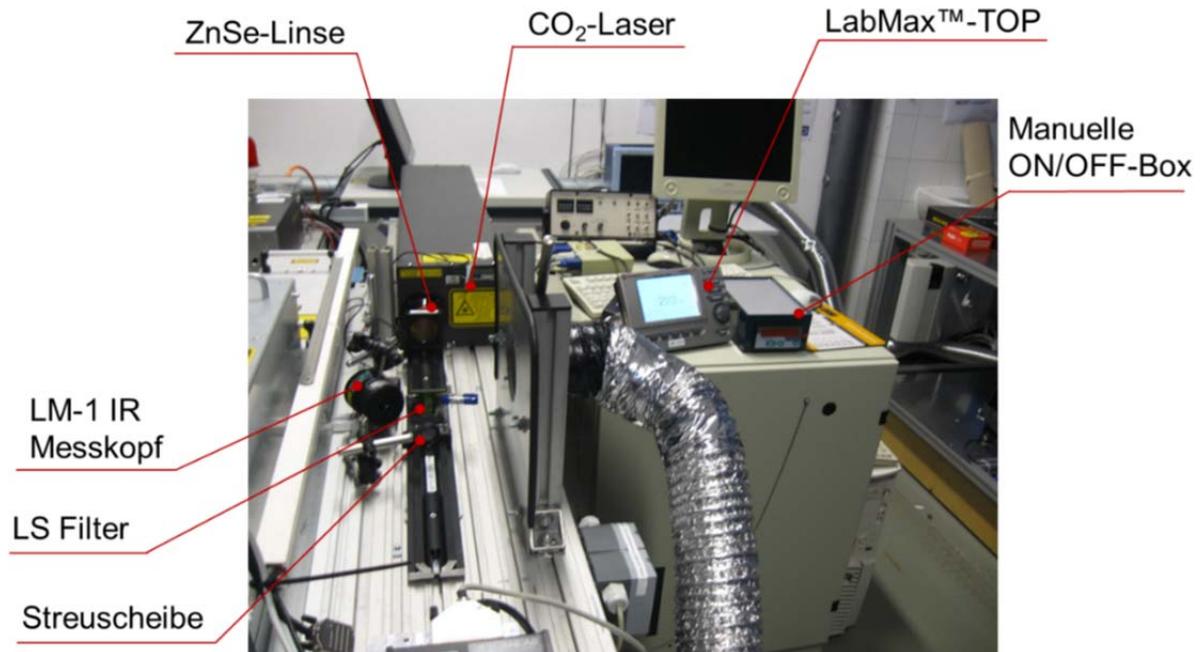


Abb. 3.15 Realisierter Messaufbau mit CO₂-Laser

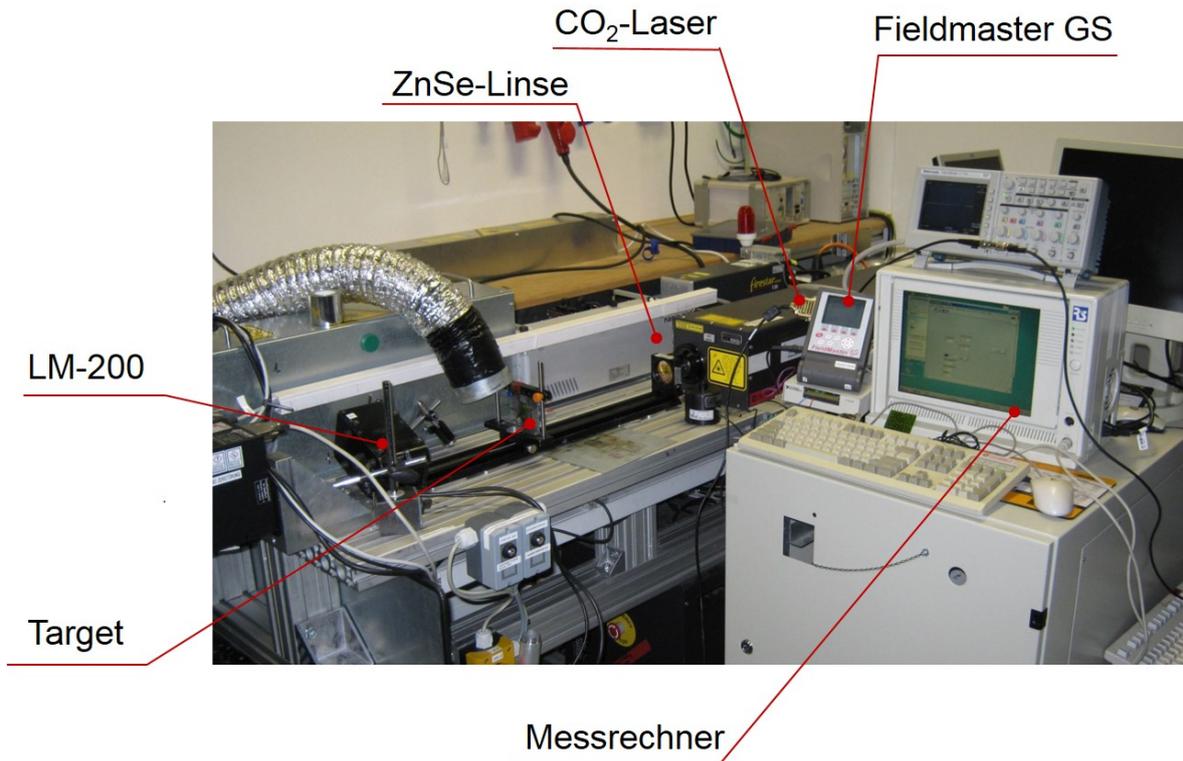


Abb. 3.16 Messaufbau mit CO₂-Laser für Standzeitversuche mit 10 Hz Pulsfrequenz

In Abb. 3.15 und Abb. 3.16 sind zwei unterschiedliche Messaufbauten gezeigt. Einmal wird der CO₂-Laser über die ON/OFF-Box über seinen Gate-Trigger-Signaleingang gesteuert (Abb. 3.14 und Abb. 3.15). Dieser Messaufbau wurde für alle Pulsfrequenzen ≥ 100 Hz verwendet. Für Versuchsdurchführungen bei einer Pulsfrequenz von 10 Hz hingegen wurde der Gate-Trigger-Signaleingang des CO₂-Lasers über einen zusätzlichen Messrechner mit einem LabView-Programm angesteuert (Abb. 3.16). Mithilfe des LabView-Programms kann ein definiertes Puls-Pausen-Verhältnis am Gate-Trigger-Signaleingang des Lasers eingestellt werden. Dadurch war es möglich, mit entsprechenden Einstellungen von Pulsperiode PP und Pulsweite PW, den CO₂-Laser Pulspakete in 10 Hz Taktung emittieren zu lassen.

3.3.3 Messaufbau für die Wellenlänge 532 nm

Der experimentelle Messaufbau zur Bestimmung der Standzeiten von Laserschutzfiltern bei einer Laserwellenlänge von 532 nm ist in Abb. 3.17 dargestellt. Eine bildliche Darstellung der Versuchsdurchführung ist in Abb. 3.18 zu sehen. Die Einstellung des Prüfstrahldurchmessers erfolgt über den Abstand der Fokussieroptik zur Filteroberfläche. Der Startzeitpunkt für die Belastungsprüfung wird vom ON/OFF-Timer durch Drücken eines Tasters festgehalten. Die Bestrahlungsdauer wird durch den ON/OFF-Timer gemessen. Das Versagen des Laserschutzfilters wird manuell am Messsignal der transmittierten Leistung am LM-200 Messkopf erkannt. Das Versagen des Laserschutzfilters ist stets mit einem Durchschuss (Loch) in der Probe verbunden, der einen starken Messsignal-Anstieg in der Anzeigeeinheit zur Folge hat.

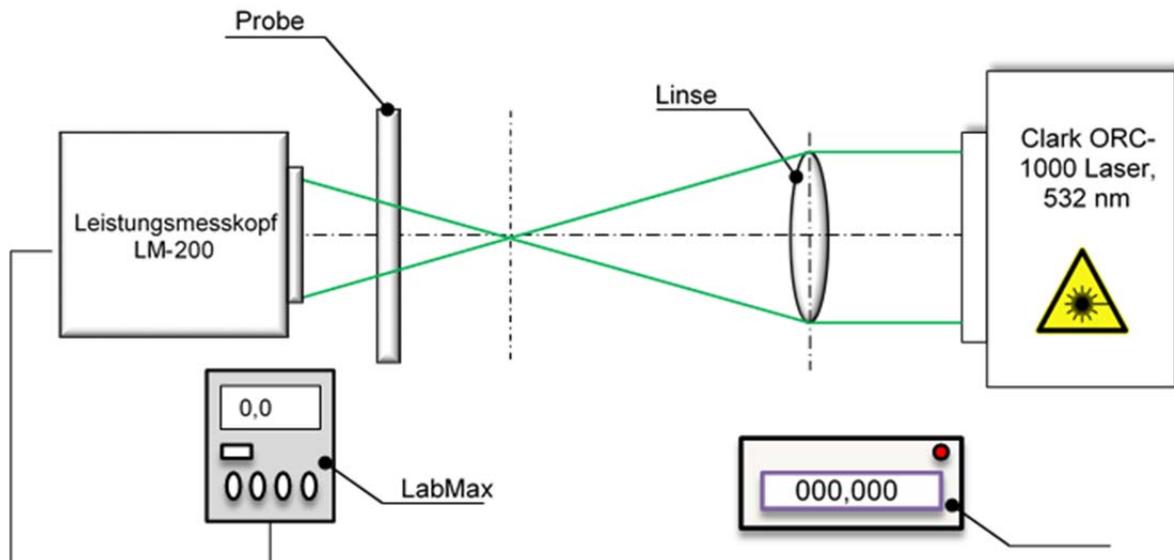


Abb. 3.17 Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Bestimmung der Filterstandzeit bei 532 nm

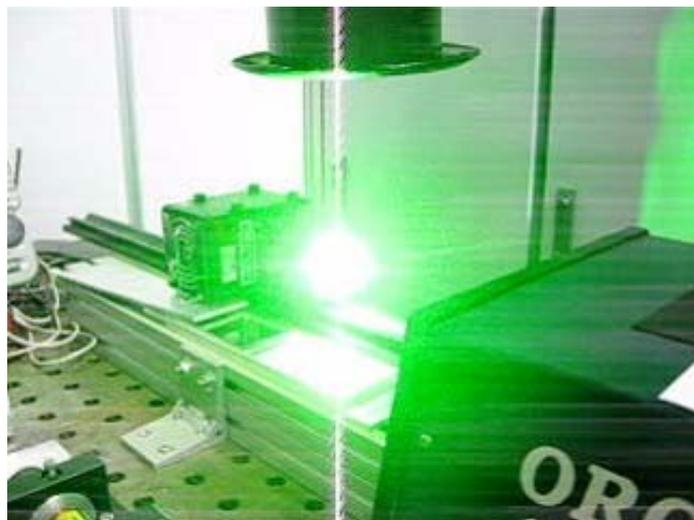


Abb. 3.18 Filterstandzeitmessung mit dem gepulsten Nd:YAG-Laser bei 532 nm

3.3.4 Messaufbau für die Wellenlänge 1070 nm

Der experimentelle Messaufbau zur Bestimmung der Standzeiten von Laserschutzfiltern bei einer Laserwellenlänge von 1070 nm ist in Abb. 3.19 gezeigt. Die Einstellung des Prüfstrahldurchmessers erfolgt über den Abstand der Fokussieroptik zur Filteroberfläche bei bekannter Kaustik. Der LaserSpy[®]-Sensor konnte nicht im Versuchsaufbau eingesetzt werden, da die Anschlussmöglichkeit in Bezug auf den Lasersicherheitskreis vor Ort nicht gegeben war. Stattdessen wurde ein geschwärztes Fotopapier als Laserstrahlungsdetektor verwendet, das ca. 200 mm hinter der Probe platziert wurde, wie in Abb. 3.20 zu erkennen ist. Ein Versagen des Laserschutzfilters wurde als Einbrand auf dem Fotopapier detektiert. Aufgrund der zur Verfügung stehenden maximalen Laserleistung von 8 kW wurde der Faserlaser YLR - 8000-R für Standzeitversuche mit großen Strahldurchmessern (> 10 mm) herangezogen. Die

Versuche erfolgten am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften *iwb* der Technischen Universität München.

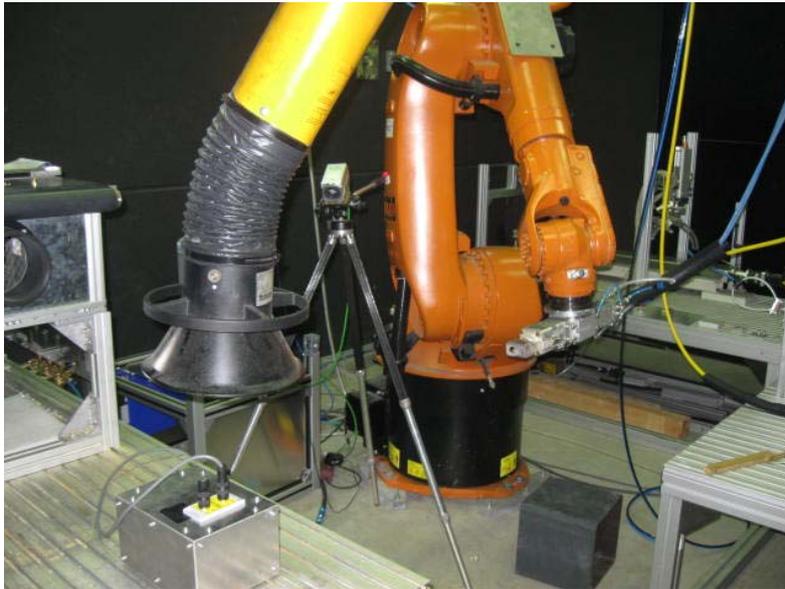


Abb. 3.19 Messaufbau mit Faserlaser am *iwb*, TU München; robotergeführte Fokussieroptik mit Brennweite 300 mm

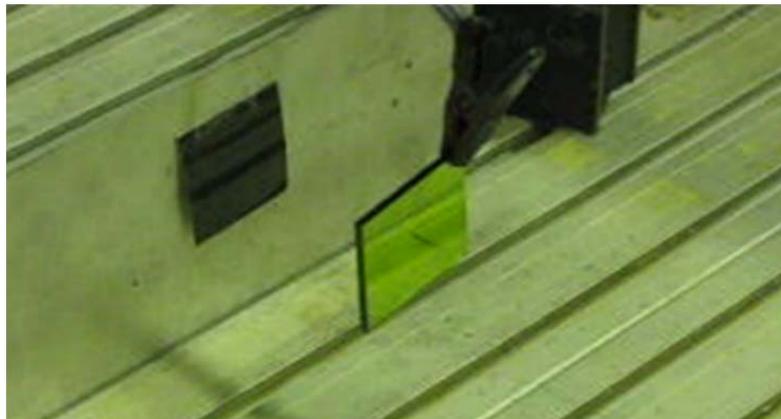


Abb. 3.20 Versuchsanordnung zur Standzeitermittlung am Faserlaser YLR-8000-R: entwickeltes SW-Fotopapier als Laserstrahlungsdetektor hinter der Probe platziert

4 Untersuchungsmethodik für die Standzeitmessungen von Laserschutzfiltern

Ein Versagen des Laserschutzfilters liegt vor, wenn bei der Laserbelastungsprüfung die Laserstrahlung hinter dem Laserschutzfilter (Augenseite) höhere Bestrahlungsstärke- bzw. Bestrahlungswerte annimmt, als der entsprechende MZB-Wert vorgibt. Werte für die maximal zulässige Bestrahlung (MZB) sind in der Norm DIN EN 60825-1 (DIN EN 60825-1:2008-05, 2008) festgelegt und dienen als Expositionsgrenzwerte am Laserarbeitsplatz.

4.1 Untersuchungsmethodik für Filterversagen bei der Wellenlänge 1064 nm

Für die Laserwellenlänge 1064 nm und eine Einwirkdauer von 10 s berechnet sich der MZB-Wert nach Norm wie folgt:

$$H_{MZB} = 90 \cdot t^{0,75} \cdot C_6 \cdot C_7 \frac{J}{m^2} \quad (4.1)$$

Mit

Wellenlänge $\lambda = 1064 \text{ nm}$
 Einwirkdauer $t = 10 \text{ s}$
 Korrekturfaktoren $C_6 = C_7 = 1$
 Augeneintrittsfläche $A = \pi (3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2$

ergibt sich eine korrespondierende Laserleistung von

$$E_{MZB} = \frac{H_{MZB}}{10 \text{ s}} \quad (4.2)$$

$$P_{MZB} = E_{MZB} \cdot A = 1,95 \text{ mW} \quad (4.3)$$

Damit beträgt der Grenzwert für die transmittierende Laserleistung als Kriterium für das Filterversagen für die Wellenlänge 1064 nm und 10 s Einwirkdauer 1,95 mW. Die gemessene Auslöseschwelle des LaserSpy[®]-Sensors (1 mW bis max. 2 mW) korrespondiert gut mit diesem Wert.

4.1.1 Versuchsparameter

Der Einfluss des Laserstrahldurchmessers auf die Filterstandzeit von Kunststofffiltern wurde in Abhängigkeit relevanter Einflussfaktoren, z. B. Laserleistung und Laserbetriebsart, untersucht. Es wurden Versuchsreihen unter Variation der im Folgenden beschriebenen Prozesskenngrößen durchgeführt.

Laserleistung

Die Laserleistung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Filterstandzeit. Bei kleinen Laserleistungen ist mit hohen Standzeiten zu rechnen. Durch das Anheben der Laserleistung kann die eingebrachte Energie zur thermischen Zerstörung des Filtermaterials und zur drastischen Verkürzung der Standzeiten führen. Die einzustellenden Laserleistungswerte wurden mit den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Leistungsmessköpfen der Serie LM (Fa. Coherent) am Ort des Filters vor den jeweiligen Versuchen gemessen.

Laserstrahldurchmesser

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.

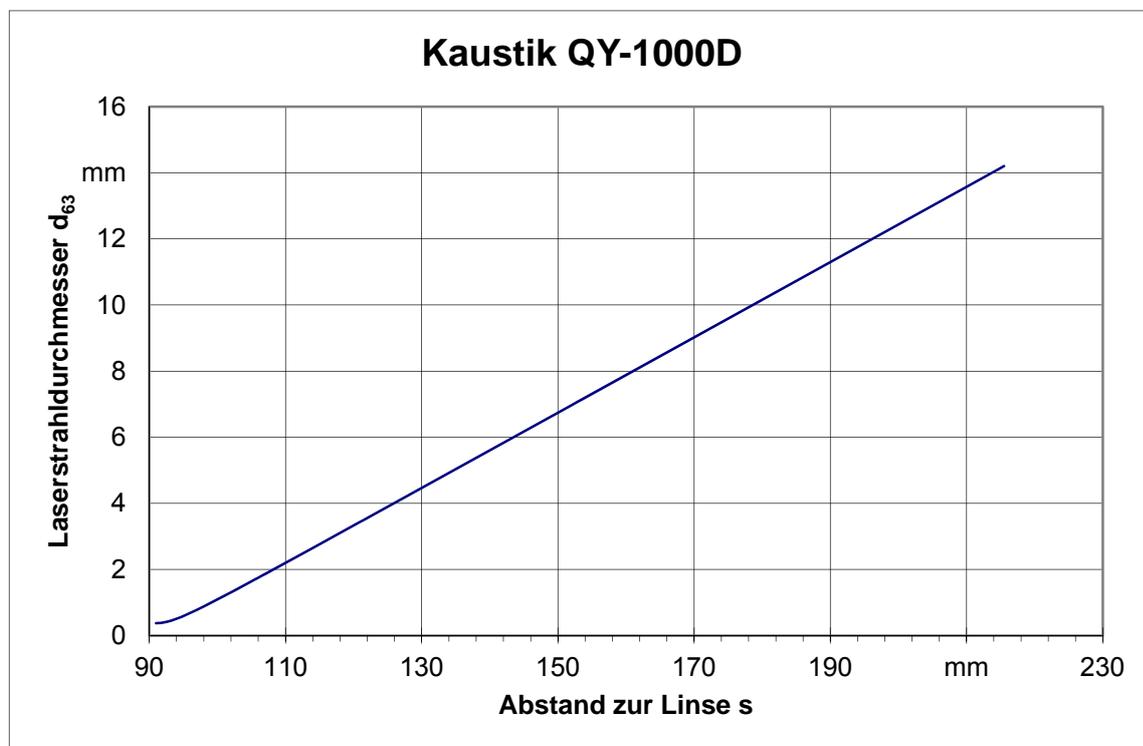


Abb. 4.1 Laserstrahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 100$ mm) des cw-Nd:YAG-Lasers QY-1000D, gemessen mit FokusMonitor (Fa. Primes)

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

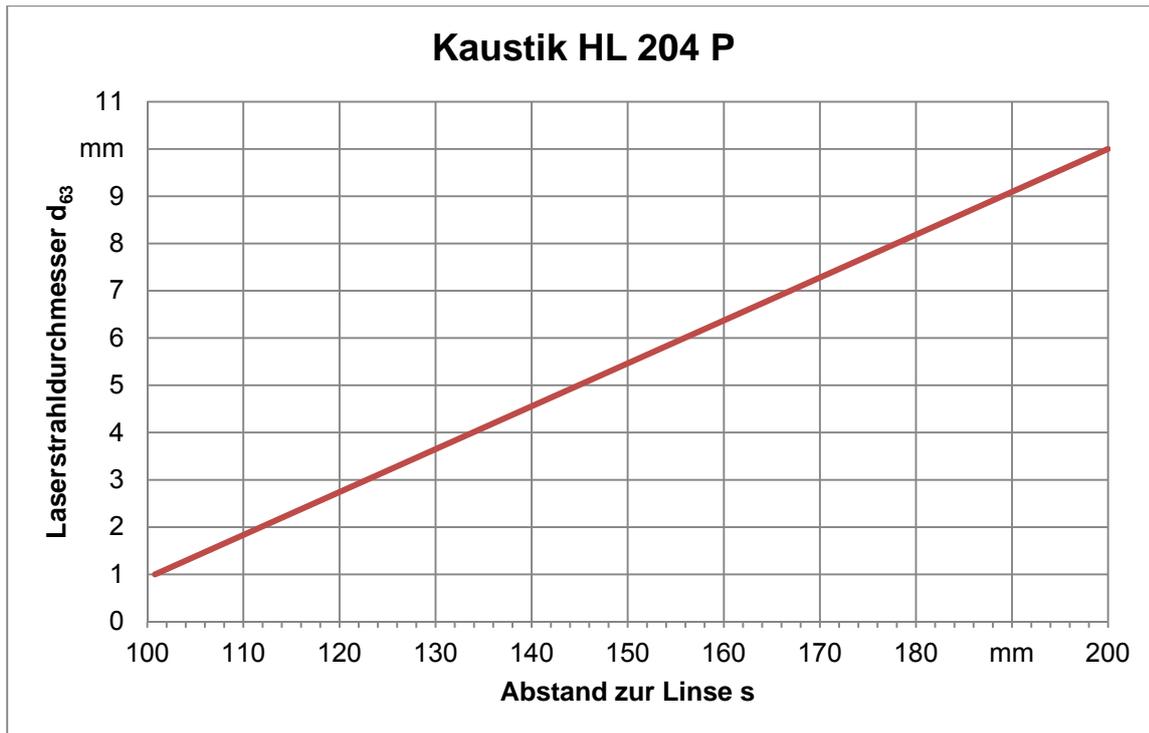


Abb. 4.2 Laserstrahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 100$ mm) des gepulsten Nd:YAG-Lasers HL 204 P, gemessen mit FokusMonitor (Fa. Primes)

Laserbetriebsart

Da unterschiedliche Laserbetriebsarten unterschiedliche Schädigungsmechanismen (Aufschmelzung, Abtrag) hervorrufen, wurden neben den Versuchen mit dem cw-Nd:YAG-Laser entsprechende Versuchsreihen mit dem gepulsten Nd:YAG-Laser durchgeführt. Dabei wurde die Pulsfrequenz auf 10 Hz eingestellt. Für die Einstellung der erforderlichen mittleren Laserleistung wurden die Pulsdauer und die Pulsspitzenleistung variiert.

4.2 Untersuchungsmethodik für Filterversagen bei der Wellenlänge 10600 nm

Für die Laserwellenlänge 10600 nm und eine Einwirkdauer von 10 s beträgt der MZB-Wert nach Norm 1000 W/m^2 . Da die Optische Dichte (OD) von den untersuchten Filtermaterialien (PMMA- bzw. CA-Filter) auch für sehr geringe Materialstärken bei 10600 nm sehr große Werte aufweist, was eine exakte Detektion des MZB-Wertes hinter dem Filter entsprechend den Versuchen mit dem Nd:YAG-Laser praktisch unmöglich macht, wurde als Versagenskriterium der Filterdurchschuss (erkennbares Loch) mit plötzlichem starkem Messsignalanstieg am Leistungsmesskopf LM-1 IR definiert.

4.2.1 Versuchsparameter

Der Einfluss des Laserstrahldurchmessers auf die Standzeit der untersuchten Filter wurde in Abhängigkeit relevanter Einflussfaktoren, z. B. mittlere Laserleistung, Pulsdauer und Pulsfrequenz, untersucht. Es wurden Versuchsreihen unter Variation der im Folgenden beschriebenen Prozesskenngrößen durchgeführt.

Mittlere Laserleistung

Die Laserleistung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Filterstandzeit. Bei kleinen Laserleistungen ist mit hohen Standzeiten zu rechnen. Durch das Anheben der Laserleistung kann die eingebrachte Energie zur thermischen Zerstörung des Filtermaterials und zur drastischen Verkürzung der Standzeiten führen. Die einzustellenden Laserleistungswerte wurden mit dem in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Leistungsmesskopf LM-200 (Coherent) am Ort des Filters vor den jeweiligen Versuchen gemessen. Die Leistungsmessungen am CO₂-Laser K150 erfolgten in Abhängigkeit der Pulsperiode PP und Pulsweite PW (Abb. 4.3).

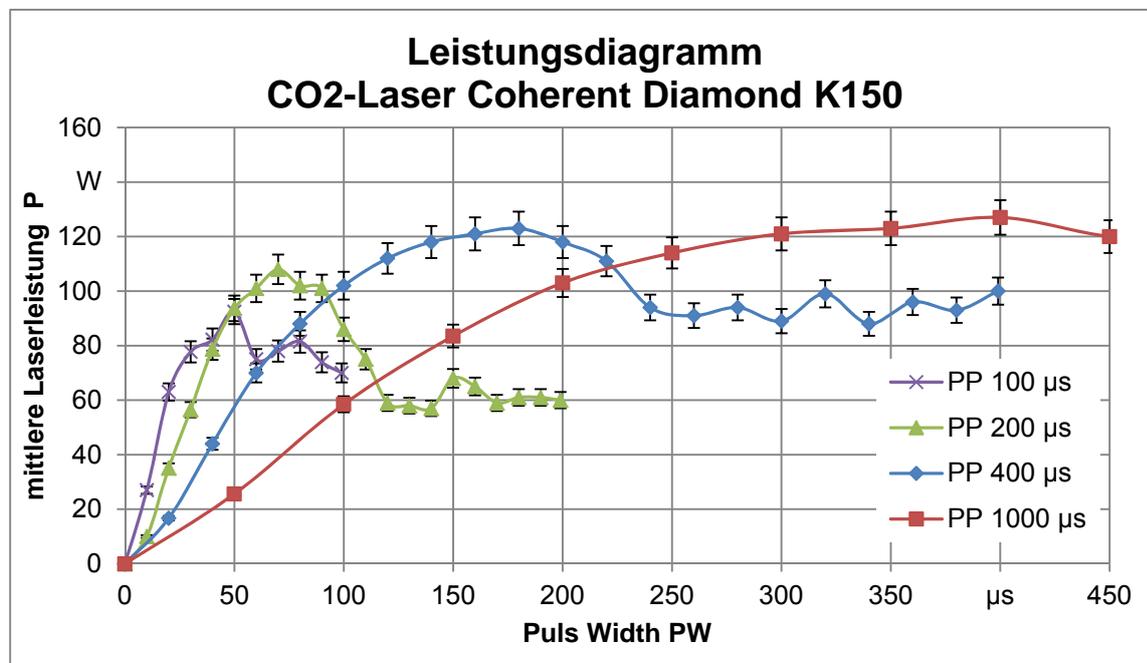


Abb. 4.3 Leistungsdiagramm CO₂-Laser Diamond K150 bei verschiedenen Pulsperioden PP in Abhängigkeit der Pulsweite PW

Laserstrahldurchmesser

Zur korrekten Einstellung des Strahldurchmessers d_{63} an der Filteroberfläche wurde die nach Abb. 4.4 berechnete und in Abb. 4.5 dargestellte Kaustik des mithilfe einer im Strahlengang befindlichen ZnSe-Linse (Brennweite $f = 190,5$ mm) fokussierten Laserstrahls herangezogen. Der Rohstrahlradius r_0 am Austritt des Laserstrahls wurde mit einer Lochblendenmessung zu 4 mm bestimmt. Die Beugungsmaßzahl M^2 ist vom Laserhersteller mit 1,3 angegeben.

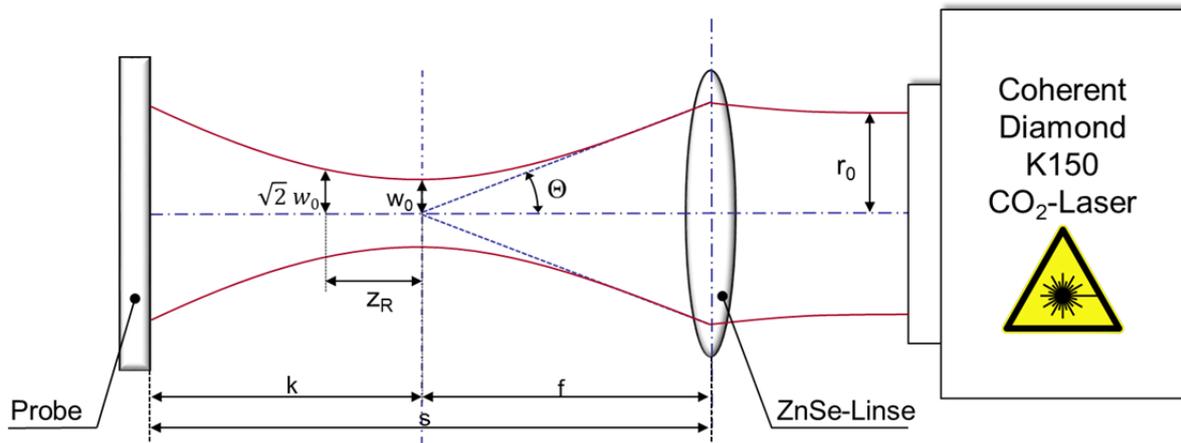


Abb. 4.4 Strahlkaustik eines fokussierten Gaußstrahls (schematisch)

Für die Berechnung des Strahldurchmessers d_{63} im Abstand s von der ZnSe-Linse gilt:

$$d_{63}(s) = \frac{2}{\sqrt{2}} w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{s-f}{z_R}\right)^2} \quad (4.4)$$

mit Fokusradius w_0 :

$$w_0 = \lambda \frac{M^2}{\pi r_0}$$

und Rayleigh-Länge z_R :

$$z_R = \frac{w_0}{r_0} * f$$

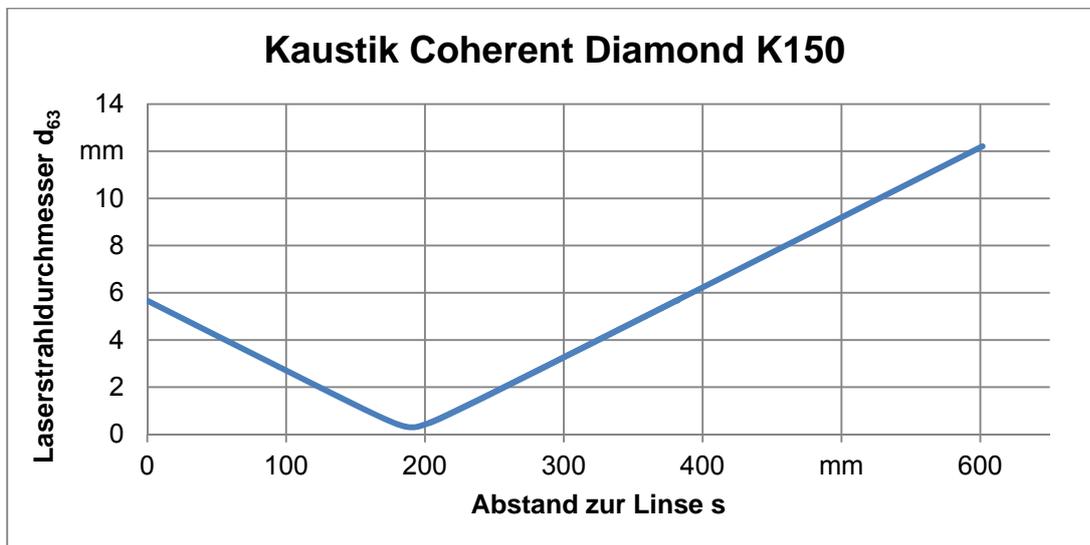


Abb. 4.5 Berechnete Strahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 190,5$ mm) der CO₂-Laserstrahlquelle Diamond K150

4.3 Untersuchungsmethodik für Filterversagen bei der Wellenlänge 532 nm

Für die Laserwellenlänge 532 nm und eine Einwirkdauer von 10 s berechnet sich der MZB-Wert nach Norm wie folgt:

$$H_{MZB} = 18 \cdot t^{0,75} \cdot C_6 \frac{J}{m^2} \quad (4.5)$$

Mit

Wellenlänge	$\lambda = 532 \text{ nm}$
Einwirkdauer	$t = 10 \text{ s}$
Korrekturfaktor	$C_6 = 1$
Augeneintrittsfläche	$A = \pi (3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2$

ergibt sich eine korrespondierende Laserleistung von

$$E_{MZB} = \frac{H_{MZB}}{10 \text{ s}} \quad (4.6)$$

$$P_{MZB} = E_{MZB} \cdot A = 0,39 \text{ mW} \quad (4.7)$$

Damit beträgt der Grenzwert für die transmittierende Laserleistung als Kriterium für das Filterversagen für die Wellenlänge 532 nm und 10 s Einwirkdauer 0,39 mW. Da der LaserSpy[®]-Sensor nicht im Wellenlängenbereich von 532 nm einsetzbar ist, wurde in diesem Fall für die Detektion des Filterversagens ein Leistungsmesskopf LM-1 IR eingesetzt.

4.3.1 Versuchsparameter

Der Einfluss des Laserstrahldurchmessers auf die Standzeit von Filtern (PMMA- als auch CA-Filter) wurde in Abhängigkeit relevanter Einflussfaktoren, z. B. mittlere Laserleistung und Pulsfrequenz, untersucht. Es wurden Versuchsreihen unter Variation der im Folgenden beschriebenen Prozesskenngrößen durchgeführt.

Mittlere Laserleistung

Die Laserleistung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Filterstandzeit. Bei kleinen Laserleistungen ist mit hohen Standzeiten zu rechnen. Durch das Anheben der Laserleistung kann die eingebrachte Energie zur thermischen Zerstörung des Filtermaterials und zur drastischen Verkürzung der Standzeiten führen. Die einzustellenden Laserleistungswerte wurden mit dem in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Leistungsmesskopf LM-200 (Coherent) am Ort des Filters vor den jeweiligen Versuchen gemessen. Abb. 4.6 zeigt die Leistungsmesskurven in Abhängigkeit des Lampenstroms und der Pulsfrequenz.

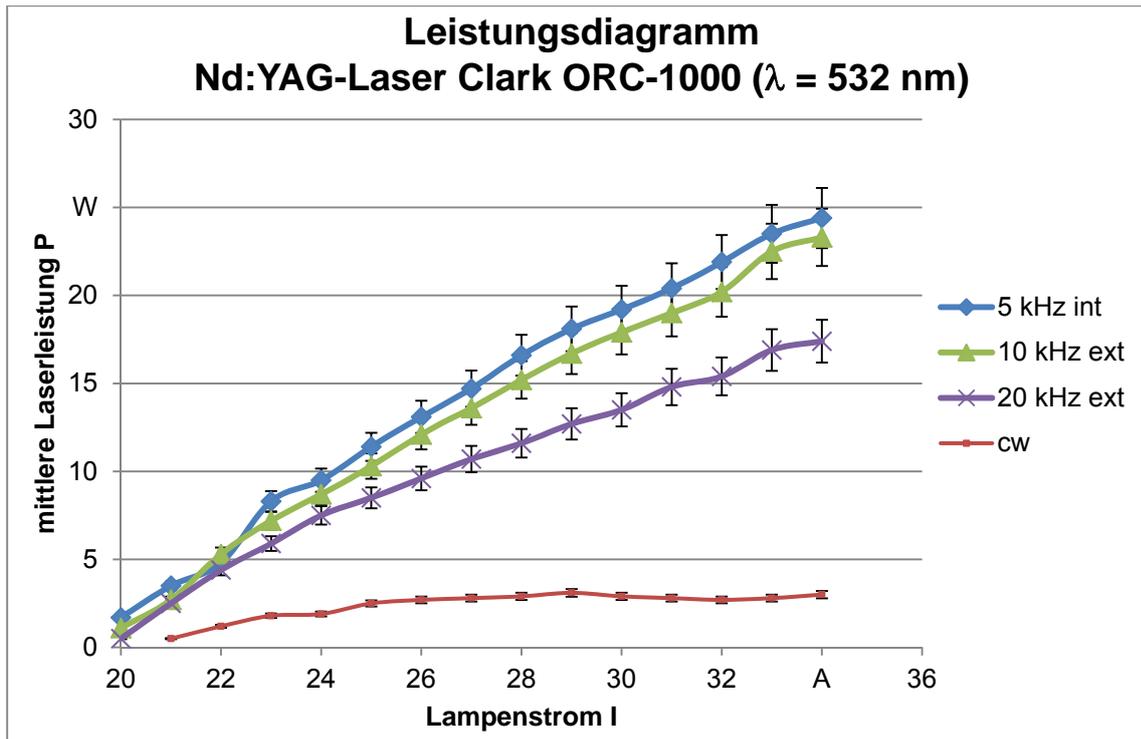


Abb. 4.6 Leistungsdiagramm frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser Clark ORC 1000 für cw- und gepulsten Betrieb mit unterschiedlichen Pulsfrequenzen

Laserstrahldurchmesser

Da der Rohstrahldurchmesser des frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers ORC 1000 nicht bekannt ist, wurde dieser mit Hilfe einer Blendenmessung wie folgt ermittelt.

$$r_{86} = \sqrt{\frac{2r_B^2}{\ln\left(\frac{P_0}{P_0 - P(r_B)}\right)}} \quad (4.8)$$

Dabei ist r_{86} der unbekannte Strahlaustrittsradius, r_B der bekannte Blendenradius, P_0 die eingestellte Ausgangsleistung und $P(r_B)$ die gemessene Laserleistung hinter der Blende. Mit der bekannten Brennweite der Fokussierlinse, der Strahlqualität M^2 und der Wellenlänge, kann dann die Kaustik der Versuchseinrichtung nach Gleichung 4.4 berechnet werden. Der schematische Versuchsaufbau für die Blendenmessung ist in Abb. 4.7 gezeigt.

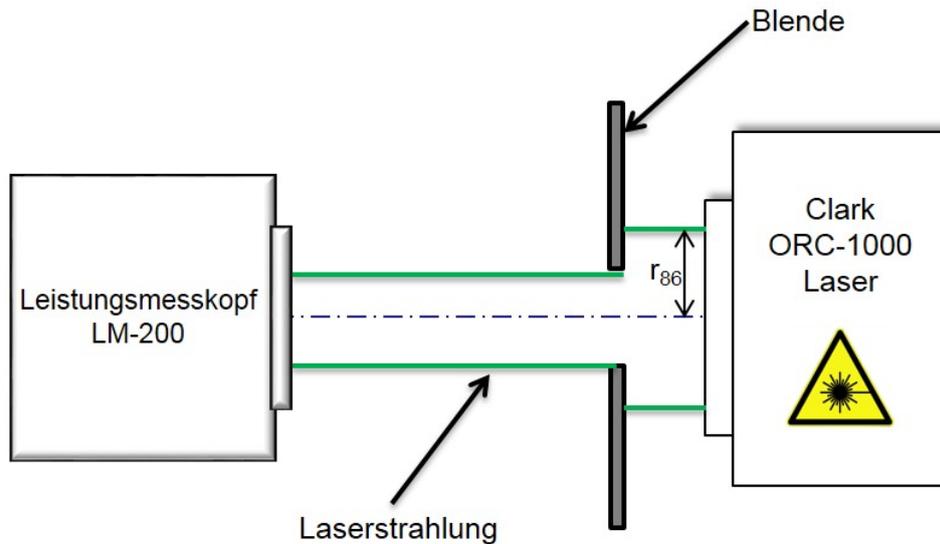


Abb. 4.7 Schematischer Versuchsaufbau der Blendenmessung zur Ermittlung des Rohstrahldurchmessers an der Strahlaustrittsöffnung des frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers ORC 1000

Zur korrekten Einstellung des Strahldurchmessers d_{63} an der Filteroberfläche wurde die nach Gleichung 4.4 berechnete und in Abb. 4.8 dargestellte Kaustik des mit Hilfe einer im Strahlengang befindlichen Linse (Brennweite $f = 215$ mm) fokussierten Laserstrahls herangezogen.

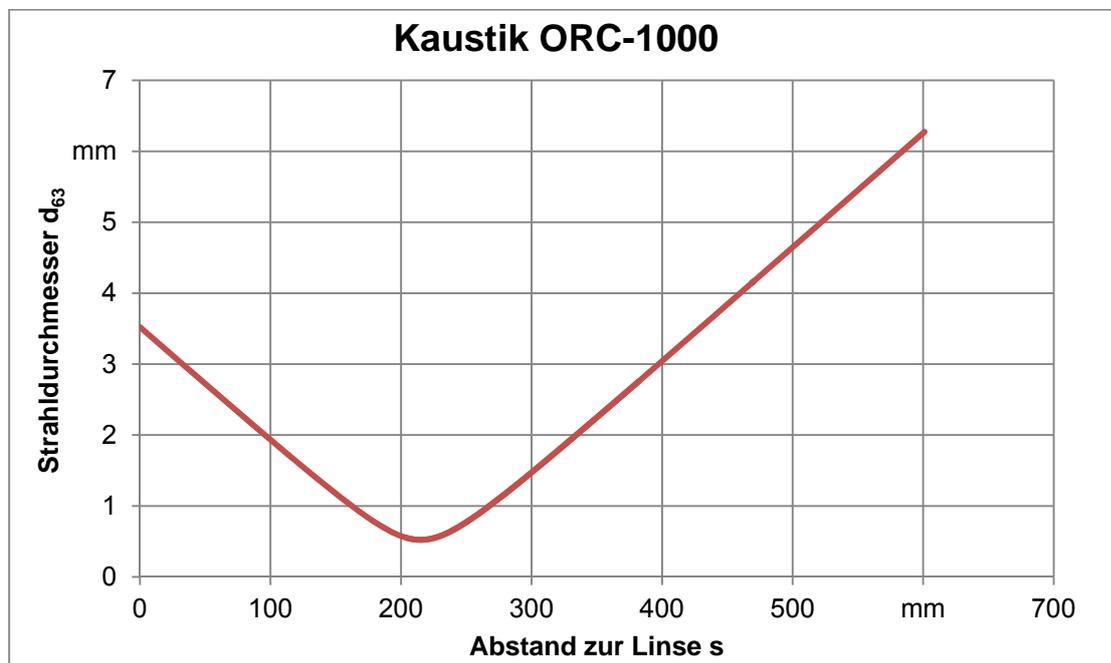


Abb. 4.8 Berechnete Strahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 215$ mm) der Nd:YAG-Laserstrahlquelle ORC 1000

4.4 Untersuchungsmethodik für Filterversagen bei der Wellenlänge 1070 nm

Die Filterstandzeitmessungen am 8 kW Faserlaser YLR - 8000-R der Fa. IPG Laser bei der Wellenlänge 1070 nm wurden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften *iwb* der Technischen Universität München durchgeführt, um bei großen Strahldurchmessern (> 10 mm) einen Anhaltspunkt für die Überhöhungswerte im nahen Infrarotbereich bei 1064 nm (die tatsächliche Laserwellenlänge liegt mit 1070 nm dicht daneben) bei sehr hohen Laserleistungen (> 1 kW) zu erhalten. Der LaserSpy[®]-Sensor konnte nicht im Versuchsaufbau eingesetzt werden, da die Anschlussmöglichkeit in Bezug auf den Lasersicherheitskreis vor Ort nicht gegeben war. Stattdessen wurde wie beschrieben ein geschwärztes Fotopapier als Laserstrahlungsdetektor verwendet.

4.4.1 Versuchsparameter

Der Einfluss von großen Laserstrahldurchmessern (> 10 mm) auf die Filterstandzeit von PMMA-Kunststofffiltern wurde unter Variation der im Folgenden beschriebenen Prozesskenngrößen untersucht.

Laserleistung

Die Laserleistung wurde anhand vorausgegangener Laserleistungsmessungen im Bereich 5 kW bis 8 kW eingestellt.

Laserstrahldurchmesser

Zur korrekten Einstellung des Laserstrahldurchmessers d_{63} auf der Probe wurde die mit einem MikroSpotMonitor der Fa. Primes hinter der Fokussieroptik (Brennweite $f = 300$ mm) gemessene und in Abb. 4.9 dargestellte Kaustik des Faserlasers YLR - 8000-R herangezogen.

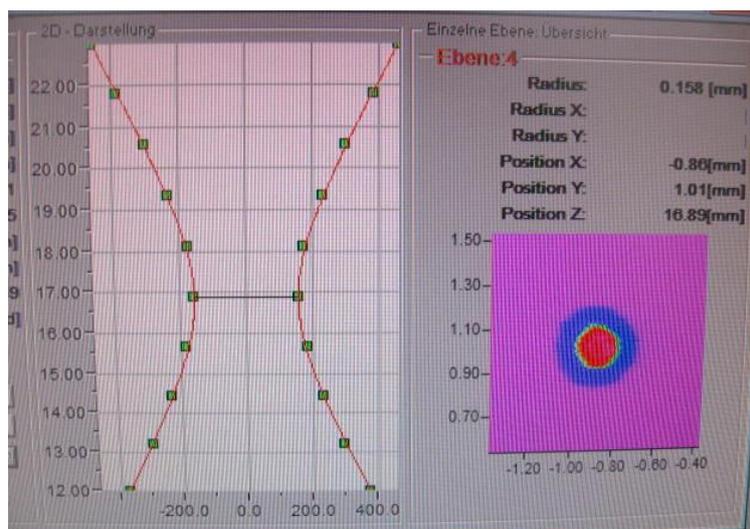


Abb. 4.9 Laserstrahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 300$ mm) des cw-Faserlasers YLR - 8000-R, gemessen mit MikroSpot-Monitor (Primes)

5 Ergebnisse und Diskussion der Standzeitversuche

5.1 Ergebnisse der Standzeitversuche an PMMA-Filtern bei 1064 nm

Die hier beschriebenen Untersuchungen wurden alle am PMMA-Filtermaterial eines Laserschutzbrillenherstellers vorgenommen (quadratische Abmessungen: 50 mm x 50 mm, 3 mm bzw. 6 mm Dicke). Dabei ist eine wichtige geometrische Einflussgröße auf die Beständigkeit gegen Laserstrahlung die Dicke des Schutzfilters. Einerseits muss sich der Laserstrahl bei dicken Filtern durch eine größere Absorberschicht durcharbeiten, bis er das Auge erreicht, andererseits ist eine bessere Wärmeableitung im Materialvolumen möglich, wodurch eine höhere Zerstörschwelle bzw. eine längere Standzeit resultiert. Durch die Untersuchung zweier unterschiedlicher Materialdicken (3 mm und 6 mm) soll eine Aussage über den Einfluss der Filterdicke auf die Filterstandzeit möglich sein.

In den folgenden Abschnitten werden die an den PMMA-Filtern mit dem cw- und dem gepulsten Nd:YAG-Laser bei 1064 nm erzielten Messergebnisse vorgestellt. Die aufgetragenen Filterstandzeiten stellen dabei immer einen Mittelwert aus jeweils fünf Messungen dar.

5.1.1 Einfluss des Laserstrahldurchmessers

Alle Filterstandzeiten T über der Laserleistung P zeigen für unterschiedliche Laserstrahldurchmesser bei cw-Laserbestrahlung einen ähnlichen Verlauf, wie Abb. 5.1 belegt. Bei einer Vergrößerung des Strahldurchmessers verschieben sich die Kurven zu höheren Standzeiten hin, wobei im unteren Leistungsbereich (< 50 W) aufgrund der großen Standardabweichungen diese Tendenz nicht eindeutig erkennbar ist. Bei einem größeren Strahldurchmesser verteilt sich die Laserleistung auf eine größere Fläche, d.h. die Intensität und damit die thermische Materialbelastung sinken, die Standzeit erhöht sich entsprechend.

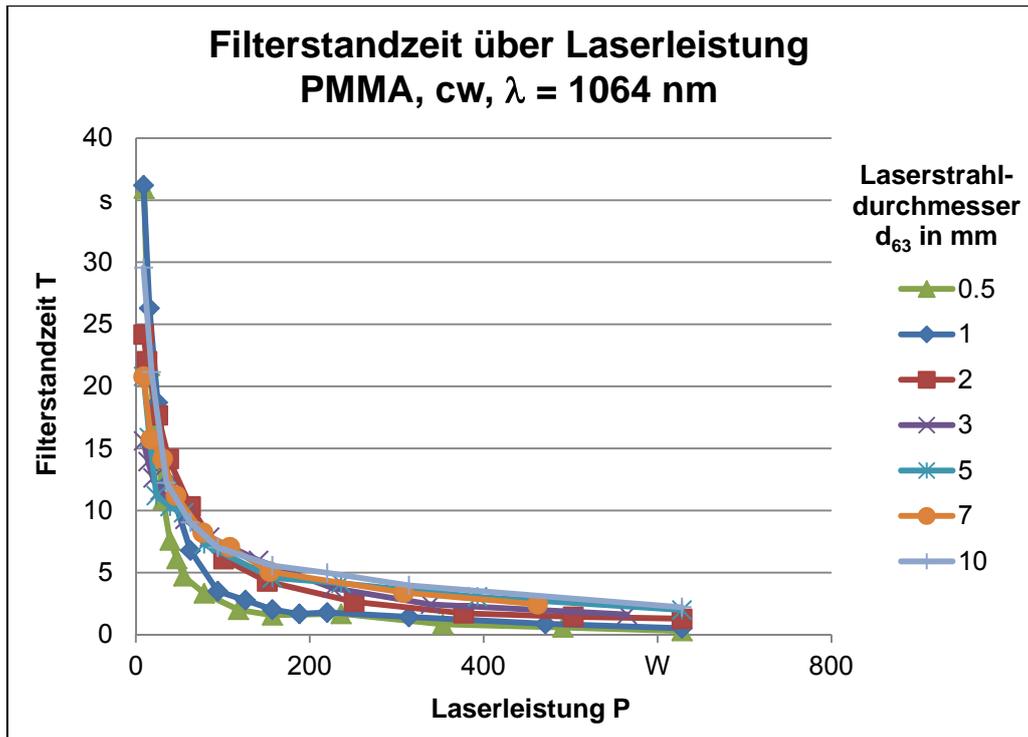


Abb. 5.1 Filterstandzeit T über Laserleistung P für PMMA-Filter bei verschiedenen Laserstrahldurchmessern d_{63} im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm

Die Trendlinien der Messreihen für unterschiedliche Strahldurchmesser folgen alle einer Potenzfunktion der Form, wie sie in Gleichung 5.1 angegeben ist:

$$T[s] = a[d_{63}] \cdot P^{-n[d_{63}]} \quad (5.1)$$

So ergibt sich beispielsweise für $d_{63} = 0,5$ mm eine Trendlinie

$$T[s] = 410,28 \cdot P^{-1,079}$$

Werden die gemessenen Standzeiten auf die Bestrahlungsstärke E bezogen, zeigt sich, dass sich mit zunehmendem Laserstrahldurchmesser bei gleicher Bestrahlungsstärke die Filterstandzeiten deutlich verringern (Abb. 5.2). Umgekehrt reduziert sich bei einer festgelegten Standzeit mit zunehmendem Strahldurchmesser die maximal zulässige Bestrahlungsstärke. Der Wärmefluss aus der bestrahlten Zone hängt neben der Wärmeleitfähigkeit des Materials auch vom resultierenden Temperaturgradienten ab. Der Temperaturgradient nimmt radial zur Mitte der bestrahlten Stelle hin ab, weshalb die Wärmeenergie aus dem Zentrum der bestrahlten Zone weniger schnell abgeführt wird, als aus deren Randbereichen (vgl. Temperaturmessungen in Abschnitt 5.1.4 und Abb. 7.2). Bei kleinen Strahldurchmessern muss die Wärmeenergie aber nur vergleichsweise kurze Strecken überwinden, um aus dem Bestrahlungszentrum abzufließen. Umgekehrt bedeutet dies einen größeren Wärmestau in der bestrahlten Zone bei großen Strahldurchmessern und damit eine schnellere Materialschädigung mit früherem Versagen des Filtermaterials. Die Filterstandzeit reduziert sich daher entsprechend deutlich.

Die Trendlinien für die Filterstandzeit T über der Bestrahlungsstärke E folgen analog zu Gleichung 5.2 einer Potenzfunktion der Form

$$T[s] = a[d_{63}] \cdot E^{-n[d_{63}]} \quad (5.2)$$

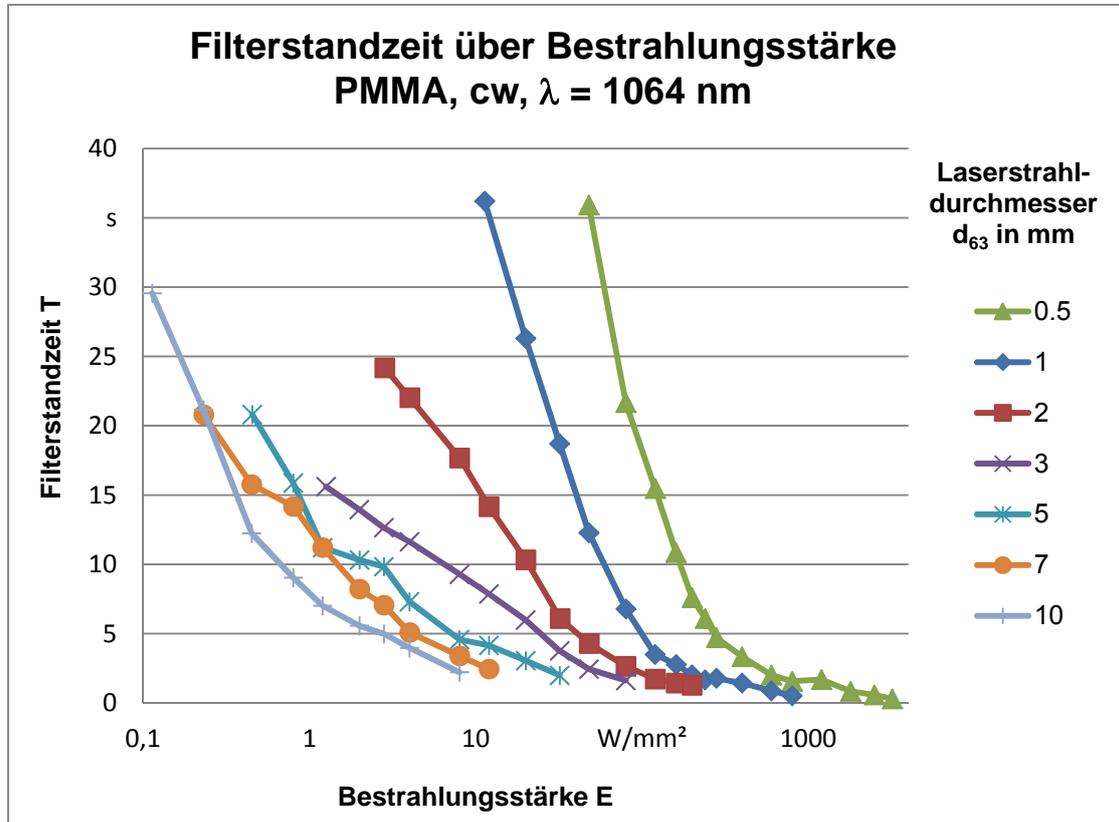


Abb. 5.2 Filterstandzeit T über Bestrahlungsstärke E für PMMA-Filter bei verschiedenen Laserstrahldurchmessern d_{63} im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm (logarithmische Darstellung)

5.1.2 Einfluss der Laserbetriebsart

Durch die hohen Bestrahlungsstärken bei gepulstem Laserbetrieb in kurzen Laserpulsen entsteht eine vergleichsweise große Schadenswirkung durch Materialablation, welche ein Versagen des Filters bei niedrigeren mittleren Laserleistungen zur Folge hat, als im Dauerstrichbetrieb des Lasers. Abb. 5.3 zeigt die Filterstandzeit über der mittleren Laserleistung für verschiedene Strahldurchmesser beim gepulsten Laserbetrieb. Im Vergleich zum cw-Laserbetrieb in Abb. 5.1 liegen die mittleren Laserleistungen bei deutlich niedrigeren Werten. Für große Strahldurchmesser verschieben sich die Kurven analog zum cw-Laserbetrieb hin zu höheren Filterstandzeitwerten.

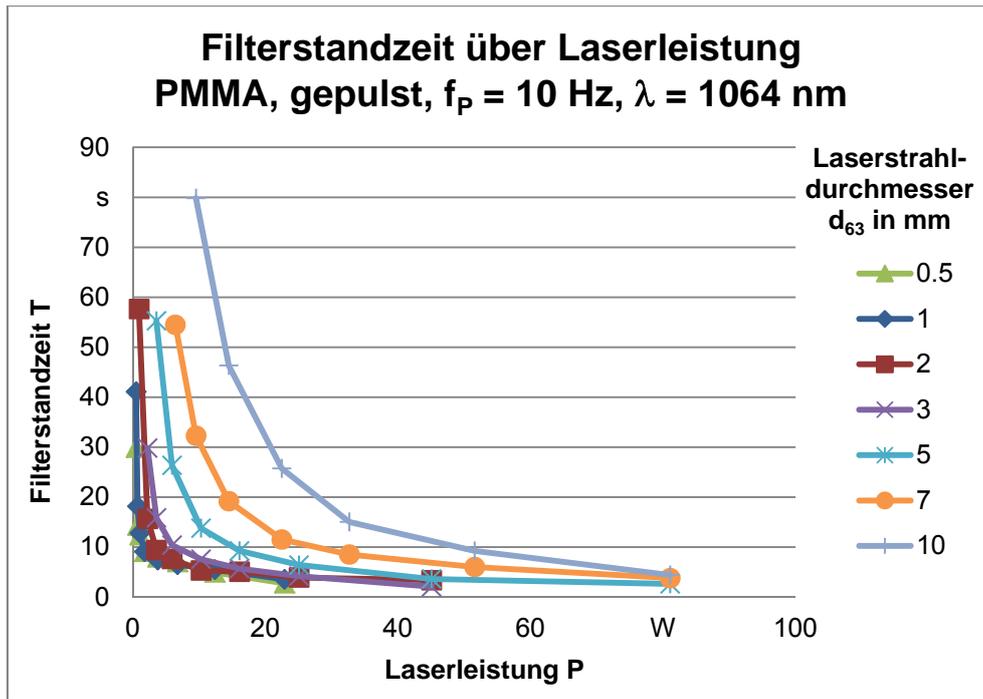


Abb. 5.3 Filterstandzeit T über der mittleren Laserleistung P für PMMA-Filter bei verschiedenen Laserstrahldurchmessern d_{63} im gepulsten Laserbetrieb mit 10 Hz bei 1064 nm

Die Abhängigkeit der Filterstandzeit von der Bestrahlungsstärke E zeigt sich im gepulsten Laserbetrieb ähnlich wie im cw-Betrieb: Wie in Abb. 5.4 zu erkennen ist, verschieben sich die Kurven bei kleineren Durchmessern hin zu größeren Filterstandzeiten bzw. Bestrahlungsstärken.

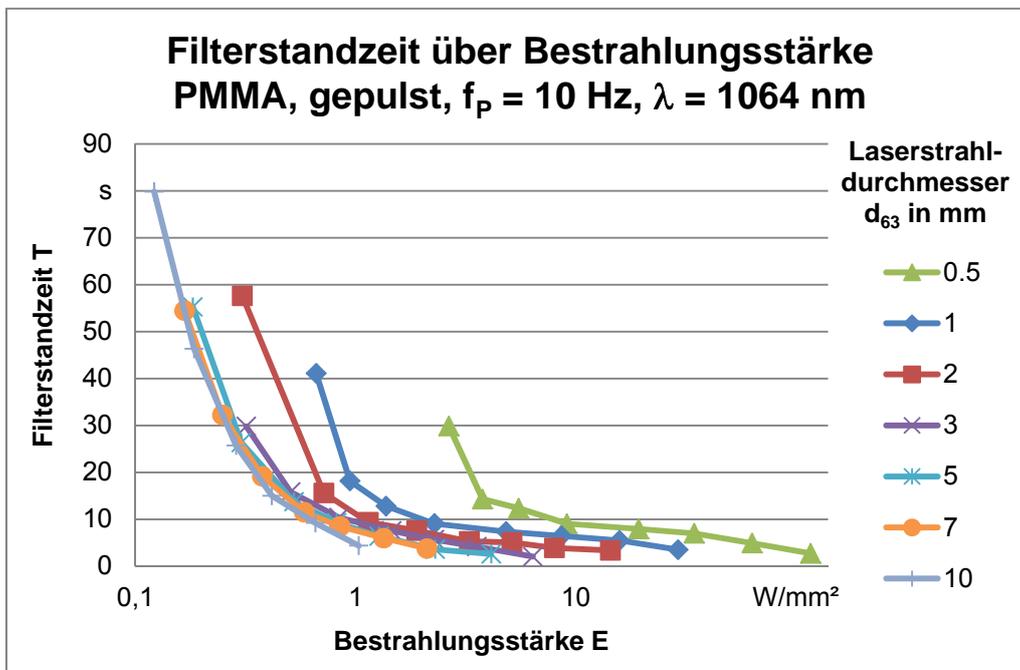


Abb. 5.4 Filterstandzeit T über Bestrahlungsstärke E für PMMA-Filter bei verschiedenen Laserstrahldurchmessern d_{63} im gepulsten Laserbetrieb mit 10 Hz bei 1064 nm (logarithmische Darstellung)

5.1.3 Einfluss der Filterdicke

Abb. 5.5 zeigt die Standzeiten für PMMA-Filter mit 3 mm Dicke, 6 mm Dicke, 2 x 3 mm Dicke (hintereinander gestellte Filter) mit einem 2 mm Luftspalt dazwischen sowie 2 x 3 mm Dicke auf Kontakt ohne eingestellten Luftspalt dazwischen.

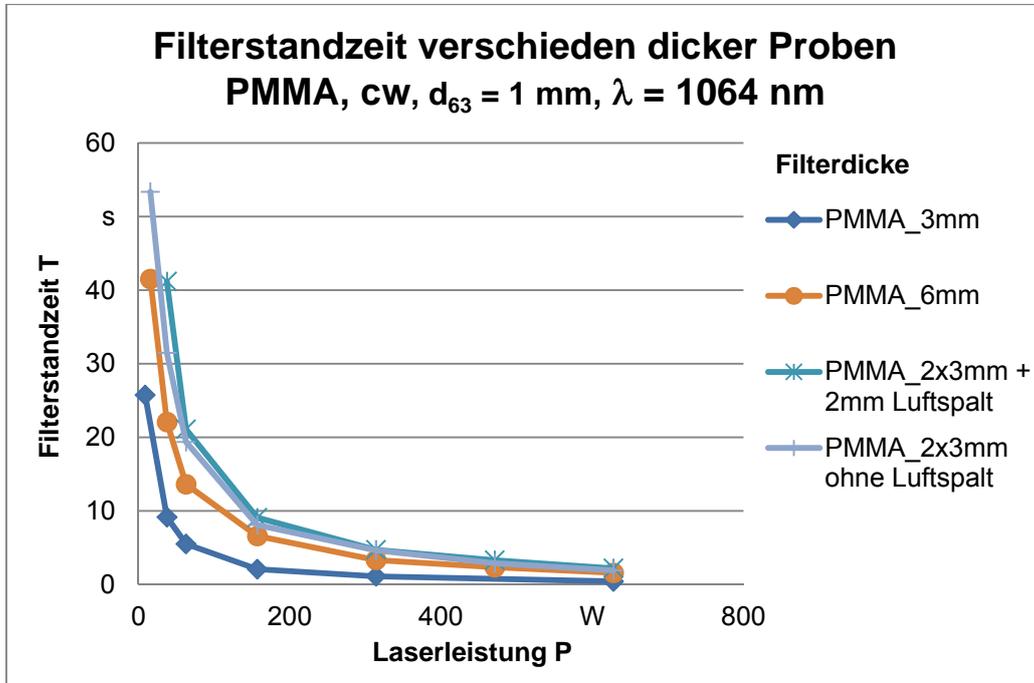


Abb. 5.5 Filterstandzeit T über Laserleistung P für unterschiedliche Filterdicken für 1 mm Laserstrahldurchmesser im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm

Der direkte Vergleich zwischen 3 mm und 6 mm dicken Filtern zeigt zunächst eine Verdoppelung der Filterstandzeit im unteren Leistungsbereich bis etwa 100 W. Darüber verdreifacht sich die Filterstandzeit. Eine größere Materialdicke bedeutet eine bessere Wärmeabfuhr. Zudem muss der Laserstrahl bis zum Versagen der Schutzwirkung ein größeres Materialvolumen zerstören.

Abb. 5.6 zeigt das Verhältnis der Filterstandzeiten der dicken Filter zu den Standzeiten der hintereinandergestellten Standardfilter mit 3 mm Dicke jeweils im Vergleich zur 3 mm dicken Standardprobe. Durch das Einbringen eines Luftspaltes zwischen zwei hintereinander angeordneten 3 mm dicken Filtern lässt sich bei Verdopplung der Materialmenge die Filterstandzeit sogar etwa vervierfachen. Auch in der Versuchsreihe ohne eingestellten Luftspalt konnte aufgrund der Welligkeit und Oberflächenrauheit der Filterproben ein kleiner Spalt nicht gänzlich vermieden werden. Entsprechend zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie bei den Versuchen mit dem 2 mm großen Luftspalt. Der Spalt wirkt dabei wie ein thermischer Isolator. Die Wärme in der ersten Filterschicht kann nicht durch Wärmefluss in die zweite Filterschicht übertragen werden. Zwar ist dadurch der Wärmefluss behindert, was für eine Reduzierung der Standzeiten sprechen würde. Die Laserstrahlung muss aber andererseits die erste Filterschicht derart durchdringen, dass sie in der zweiten Filterschicht eine thermische Wechselwirkung hervorruft. Dieser Effekt der entkoppelten Materialzerstörung überkompensiert den Effekt des behinderten Wärmeflusses, wodurch letztendlich höhere Filterstandzeiten resultieren.

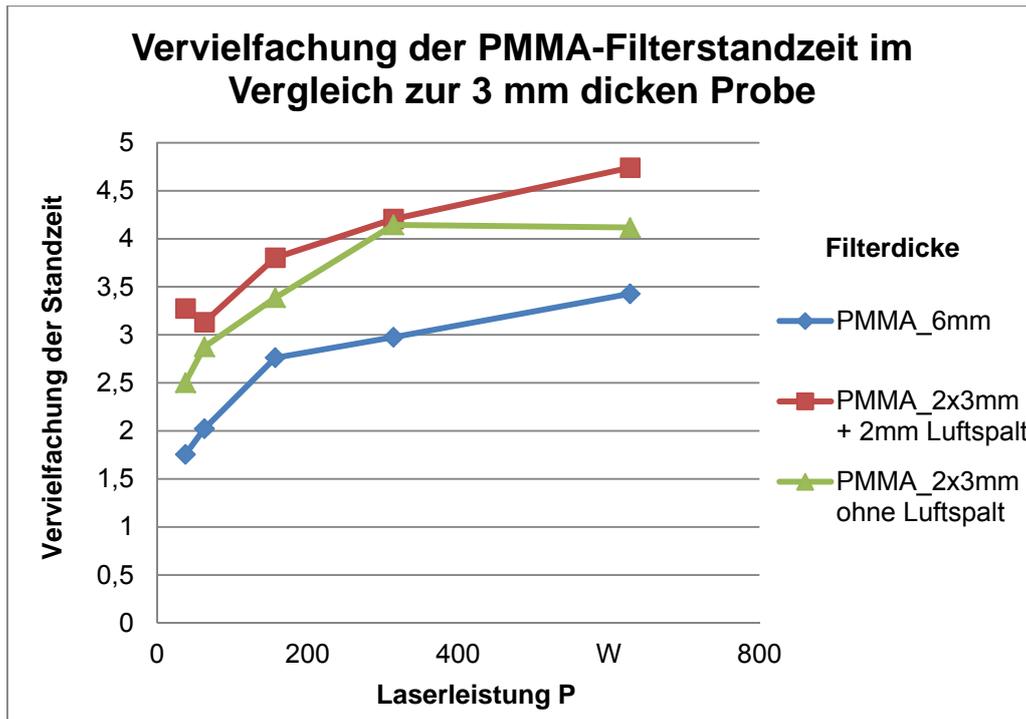


Abb. 5.6 Vervielfachung der Filterstandzeit durch größere Filterdicken bei 1 mm Laserstrahldurchmesser im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm

5.1.4 Schadensbild und Temperaturmessung

Durch Absorption der Laserstrahlung in den PMMA-Filtern entstehen hohe Temperaturen, wodurch das Filtermaterial aufschmilzt und teilweise verdampft. Innerhalb der bestrahlten Zone entstehen Gasblasen, welche Hohlräume im wiedererstarteten Filtermaterial hinterlassen. In der Wärmeeinflusszone (WEZ) um die bestrahlte Stelle herum verfärbt sich das Filtermaterial und wird für das menschliche Auge undurchsichtig. Risse durchsetzen die WEZ. Abb. 5.7 zeigt das typische Schadensbild nach einer Laserbelastungsprüfung mit dem cw-Nd:YAG-Laser im Querschliff. Der PMMA-Filter wurde bis zum Versagen (Unterbrechung des Lasersicherheitskreises durch den LaserSpy[®]-Sensor) geprüft. Durch die während der Laserbestrahlung hervorgerufene Zerstörung des Absorbermaterials, welche sich mit zunehmender Bestrahlungsdauer räumlich im Filtermaterial ausdehnt, reduziert sich die Optische Dichte (OD) zusehends, bis die Auslöseschwelle des LaserSpy[®]-Sensors erreicht und der Laser abgeschaltet wird.



Abb. 5.7 Querschnitt in PMMA durch die bestrahlte Stelle; Strahldurchmesser 1 mm; Laserleistung 157 W im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm; Bestrahlung bis zum Filterversagen (Unterbrechung des Lasersicherheitskreises durch den LaserSpy[®]-Sensor)

Mithilfe einer Wärmebildkamera wurden die Temperaturverteilungen während der Laserbelastungsprüfungen auf den Oberflächen der PMMA-Filter gemessen. Abb. 5.8 zeigt eine typische Temperaturverteilung bei einer Prüfung mit 10 mm Strahldurchmesser im cw-Betrieb des Nd:YAG-Lasers. Während der Laserbestrahlung steigt die Temperatur im Zentrum der Bestrahlung auf über 300 °C an und verharrt dann in etwa auf diesem Niveau (Plateaubildung). Offensichtlich wird ein stationärer Zustand erreicht, in dem das Material siedet und verdampft, wodurch keine weitere Temperaturerhöhung stattfindet. Durch den Wärmefluss in das umgebende Material verbreitert sich mit zunehmender Bestrahlungsdauer der Bereich maximaler Temperatur, d. h. die Materialschädigung dehnt sich räumlich aus, bis die Auslösung des LaserSpy[®]-Sensors die Bestrahlung stoppt. Auffällig dabei sind die steilen Flanken der Temperaturverteilung, d. h., der aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von PMMA steile Temperaturgradient an den Rändern der bestrahlten Zone.

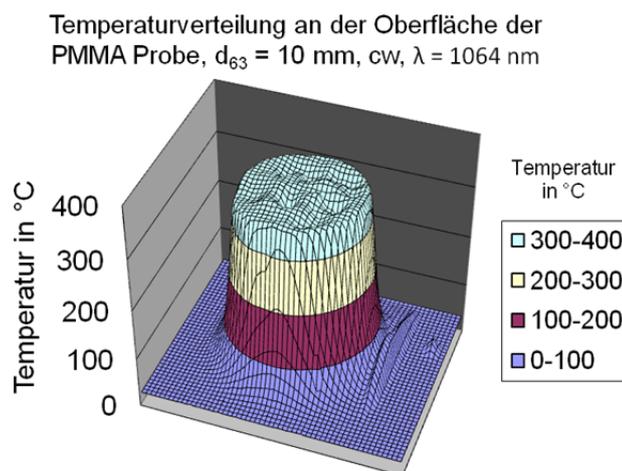


Abb. 5.8 Gemessene Temperaturverteilung an der Oberfläche eines PMMA-Filters während der Bestrahlung mit ca. 140 W Laserleistung und 10 mm Strahldurchmesser im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm

Abb. 5.9 zeigt die Durchmesser der Wärmeeinflusszonen (WEZ), d.h. die Durchmesser der unter dem Lichtmikroskop erkennbar durch die Laserbestrahlung beeinflussten Bereiche, über der Laserleistung in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser. Bei Laserleistungen unterhalb von etwa 100 W ergibt sich eine starke Abhängigkeit der Größe der WEZ von der Laserleistung. Bei größeren Laserleistungen stabilisiert sich die Größe der WEZ auf einen Wert, der in etwa dem Laserstrahldurchmesser d_{63} zuzüglich 10 mm entspricht.

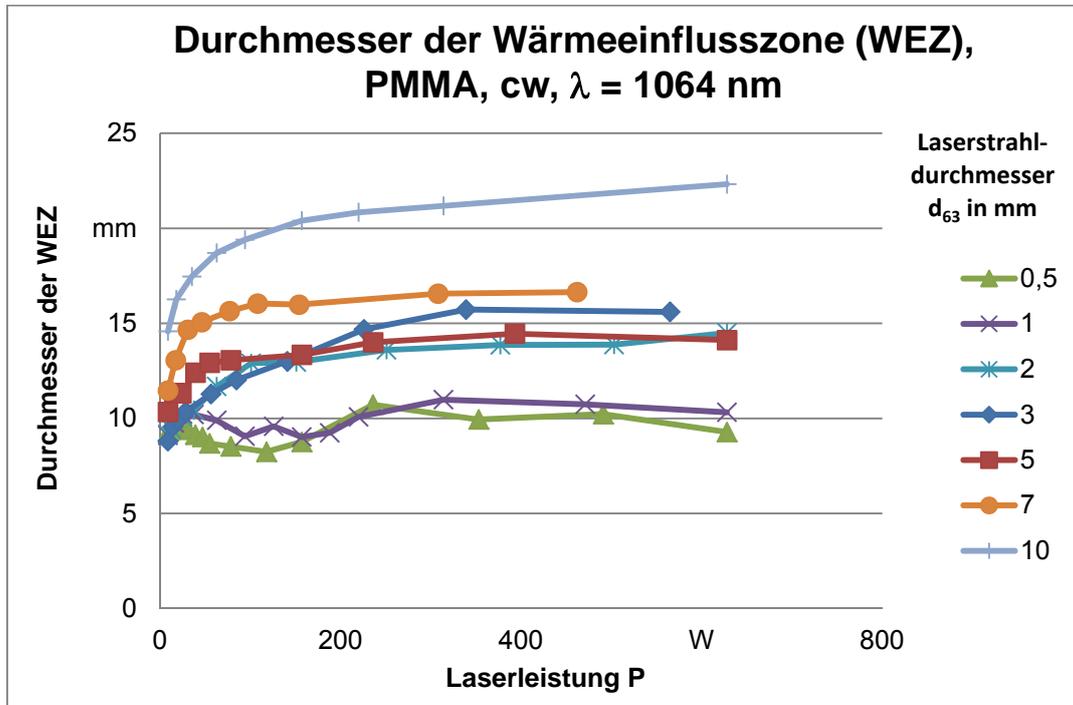


Abb. 5.9 Durchmesser der WEZ über der Laserleistung P für PMMA-Filter im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d_{63}

5.2 Diskussion der Ergebnisse der Standzeitversuche an PMMA-Filtern bei 1064 nm

5.2.1 cw-Laserbetrieb

Den Einfluss des Laserstrahldurchmessers auf die Filterstandzeit zeigen die im obigen Abschnitt dargestellten Kurven. Anhand der Trendlinien in Abb. 5.1 und Abb. 5.2 lassen sich für die jeweiligen Strahldurchmesser die Laserleistungen bzw. Bestrahlungsstärken ermitteln, welche einer Filterstandzeit von exakt 5 s entsprechen, wie sie die aktuelle Version der Norm DIN EN 207 vorschreibt. Diese Leistungs- bzw. Bestrahlungsstärkewerte stellen also die zur Erfüllung der Normvorgabe maximal zulässigen Werte dar und sind in Abb. 5.10 und Abb. 5.11 über dem Strahldurchmesser aufgetragen (im Folgenden als „zulässige Laserleistung“ und „zulässige Bestrahlungsstärke“ bezeichnet). Während die zulässige Laserleistung mit dem Strahldurchmesser nichtlinear ansteigt, zeigt die auf die Fläche normierte zulässige Leistung, also die zulässige Bestrahlungsstärke, eine exponentielle Abnahme mit dem Strahldurchmesser.

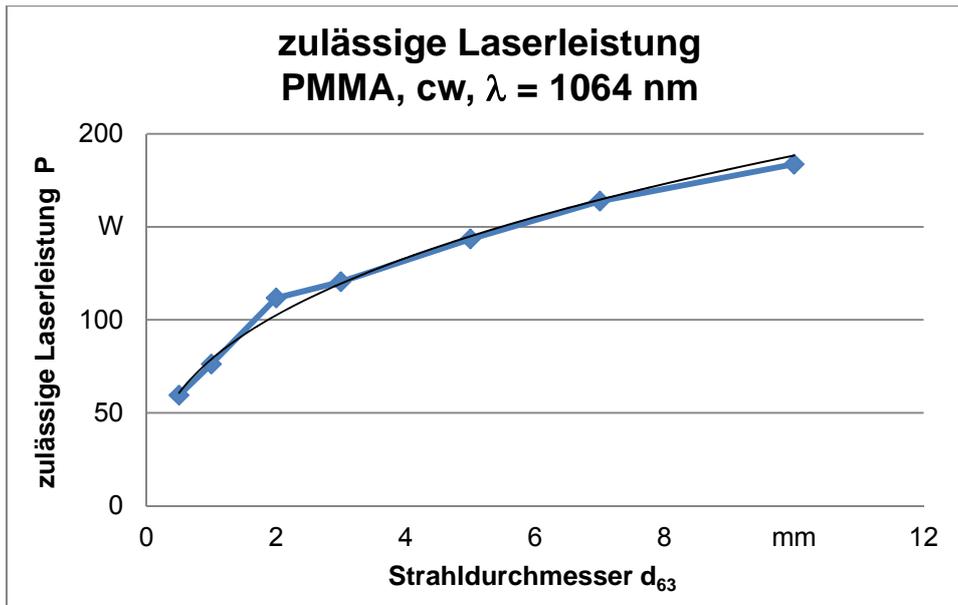


Abb. 5.10 Zulässige Laserleistung P für 5 s Filterstandzeit über dem Laserstrahldurchmesser d_{63} für PMMA-Filter im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm

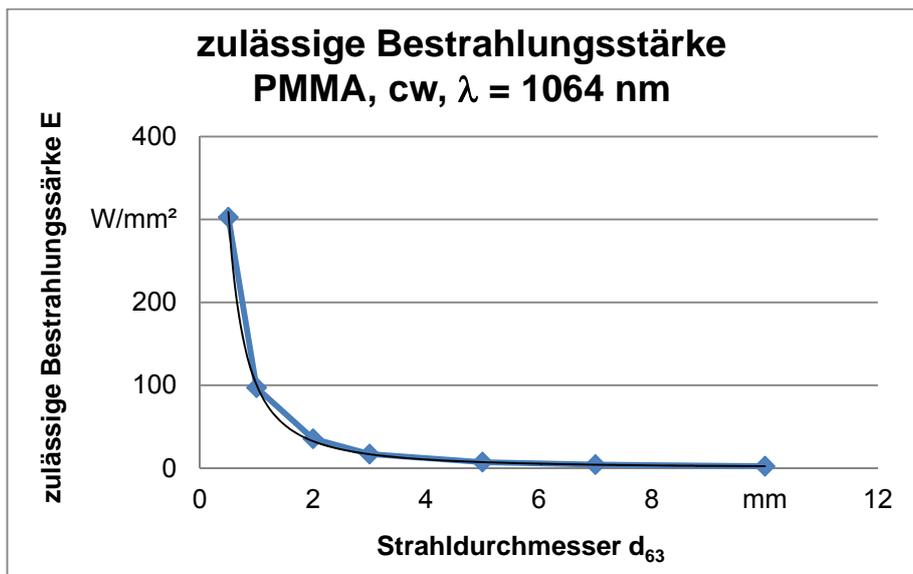


Abb. 5.11 Zulässige Bestrahlungsstärke für 5 s Filterstandzeit über dem Laserstrahldurchmesser d_{63} für PMMA-Filter im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm

5.2.2 Definition des Überhöhungswertes bzw. der Überhöhungsfunktion

Der Überhöhungswert ist der Quotient aus Bestrahlungsstärke (1 mm) und Bestrahlungsstärke (d_{63}). Dabei beschreibt die „Bestrahlungsstärke (1 mm)“ die zulässige Bestrahlungsstärke bei 1 mm Strahldurchmesser und „Bestrahlungsstärke (d_{63})“ die zulässige Bestrahlungsstärke beim Strahldurchmesser $d_{63} \neq 1$ mm für eine Filterstandzeit von exakt 5 s. Ziel der weiteren Untersuchungen ist es, die Abhängigkeiten des Überhöhungswertes (bzw. die funktionale Abhängigkeit als Überhöhungsfunktion) für PMMA-Filter experimentell zu ermitteln.

Anhand der experimentell ermittelten zulässigen Bestrahlungsstärken in Abb. 5.11, lassen sich Werte für die Überhöhung der zulässigen Bestrahlungsstärke bei Strahldurchmessern ungleich 1 mm in Bezug auf die zulässige Bestrahlungsstärke bei dem von der Norm DIN EN 207 geforderten Prüfstrahldurchmesser von 1 mm (sog. Überhöhungswerte $\ddot{U}W$) nach folgender Formel berechnen:

$$\ddot{U}W(d_{63}) = \frac{\text{zulässige Bestrahlungsstärke bei } d_{63}=1 \text{ mm}}{\text{zulässige Bestrahlungsstärke bei } d_{63}=x \text{ mm}} \quad (5.3)$$

Mit Gleichung 5.3 ergeben sich die folgenden Überhöhungswerte $\ddot{U}W$ (Tab. 5.1).

Tab. 5.1 Überhöhungswerte $\ddot{U}W$ für unterschiedliche Laserstrahldurchmesser d_{63}

d_{63} in mm	zulässige Bestrahlungsstärke lt. Abb. 4.11 in W/mm^2	$\ddot{U}W(d_{63})$ in a. u.
0,5	302,6	0,3
1,0	97,0	1,0
2,0	35,6	2,7
3,0	17,1	5,7
5,0	7,3	13,3
7,0	4,3	22,8
10,0	2,3	41,4

Die Überhöhungswerte, aufgetragen über dem Strahldurchmesser, folgen einer Kurve, welche sich als Potenzfunktion annähern lässt. Diese Näherungskurve wird im Folgenden als Überhöhungsfunktion F bezeichnet und kann für 3 mm dicke PMMA-Filter und cw-Nd:YAG-Laserbestrahlung wie folgt dargestellt werden:

$$F(d_{63}) = 0,9665 \cdot d_{63}^{1,6214} \quad (5.4)$$

Die verallgemeinerte Form der Überhöhungsfunktion für diesen Fall lautet:

$$F(d_{63}) = a \cdot d_{63}^n \quad (5.5)$$

Der Vorfaktor a kann ohne größeren Fehler gleich 1 gesetzt werden. Der Exponent n lässt sich durch Auflösen der Gleichung 5.5 nach n berechnen:

$$n = \frac{\log F(d_{63})}{\log d_{63}} \quad (5.6)$$

Abb. 5.12 zeigt den Verlauf der Überhöhungsfunktion aus Gleichung 5.4 für 3 mm dicke PMMA-Filter sowie der Überhöhungsfunktion, wie sie im informativen Anhang der aktuellen Norm DIN EN 207 angegeben ist. Trotz einer aktuell geforderten Prüfdauer von 5 s geht die in der Norm angegebene Überhöhungsfunktion noch auf Untersuchungen mit 10 s Filterstandzeit zurück. Zusätzlich ist die Überhöhungsfunktion für 6 mm dicke PMMA-Filter eingetragen.

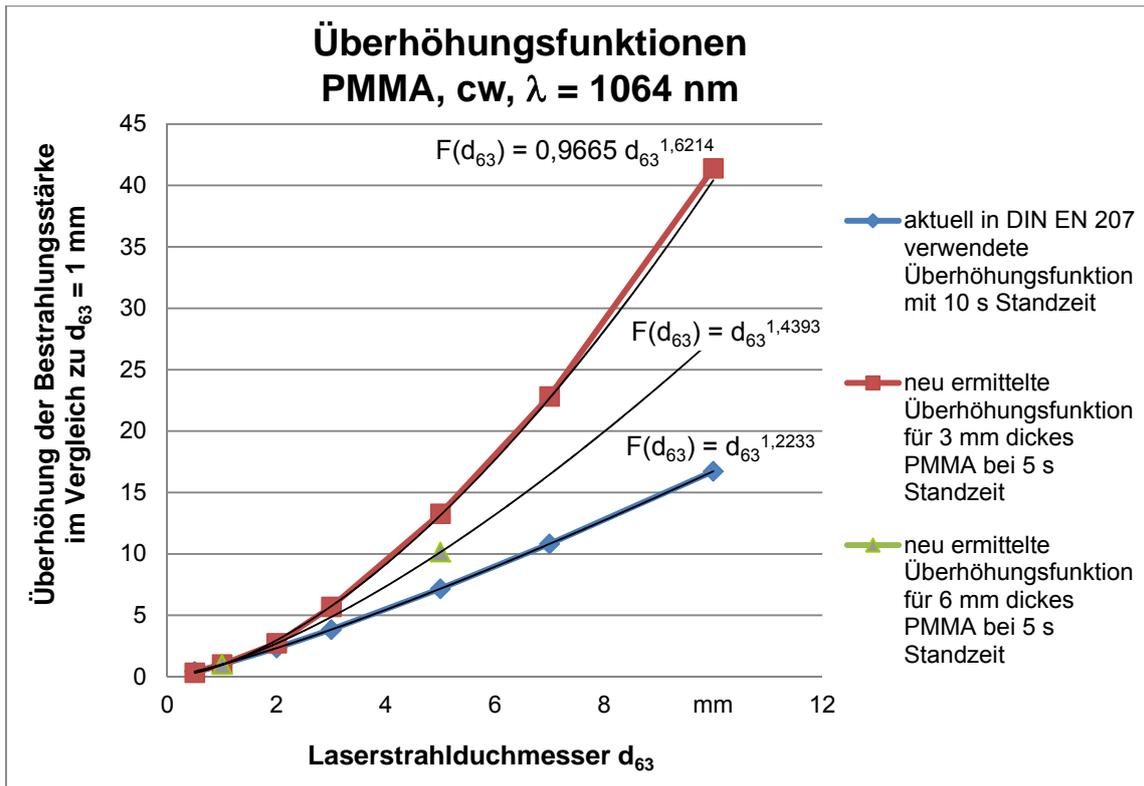


Abb. 5.12 Vergleich zwischen neu ermittelten Überhöhungsfunktionen für PMMA-Filter (Dicke 3 mm und 6 mm; 5 s Filterstandzeit; cw-Laserbetrieb bei 1064 nm) und aktueller Überhöhungsfunktion lt. DIN EN 207

Da die Überhöhungswerte aus Gleichung 5.3 Werte der Überhöhungsfunktion darstellen, kann in Gleichung 5.6 zur Berechnung des Exponenten n für $F(d_{63})$ ein experimentell ermittelter Überhöhungswert $\ddot{U}W(d_{63})$ eingesetzt werden. Beispielsweise ergibt sich für einen Strahldurchmesser von 5 mm der Exponent n zu 1,62 und damit die Überhöhungsfunktion $F(d_{63})$ zu $d_{63}^{1,62}$.

In Abb. 5.13 ist die aus allen Messreihen abgeleitete Überhöhungsfunktion aus Gleichung 5.4 neben den aus jeweils nur zwei Strahldurchmesserpaarungen, also aus einzelnen Überhöhungswerten errechneten Überhöhungsfunktionen aufgetragen. Insbesondere für weit auseinanderliegende Durchmesserpaarungen (z. B. 1 mm und 7 mm oder 1 mm und 10 mm) ergeben sich sehr gute Übereinstimmungen. Die Überhöhungsfunktion für 6 mm dicke PMMA-Filter in Abb. 5.12 wurde durch die oben beschriebene Zwei-Punkte-Berechnung bei 1 mm und 5 mm Strahldurchmesser berechnet.

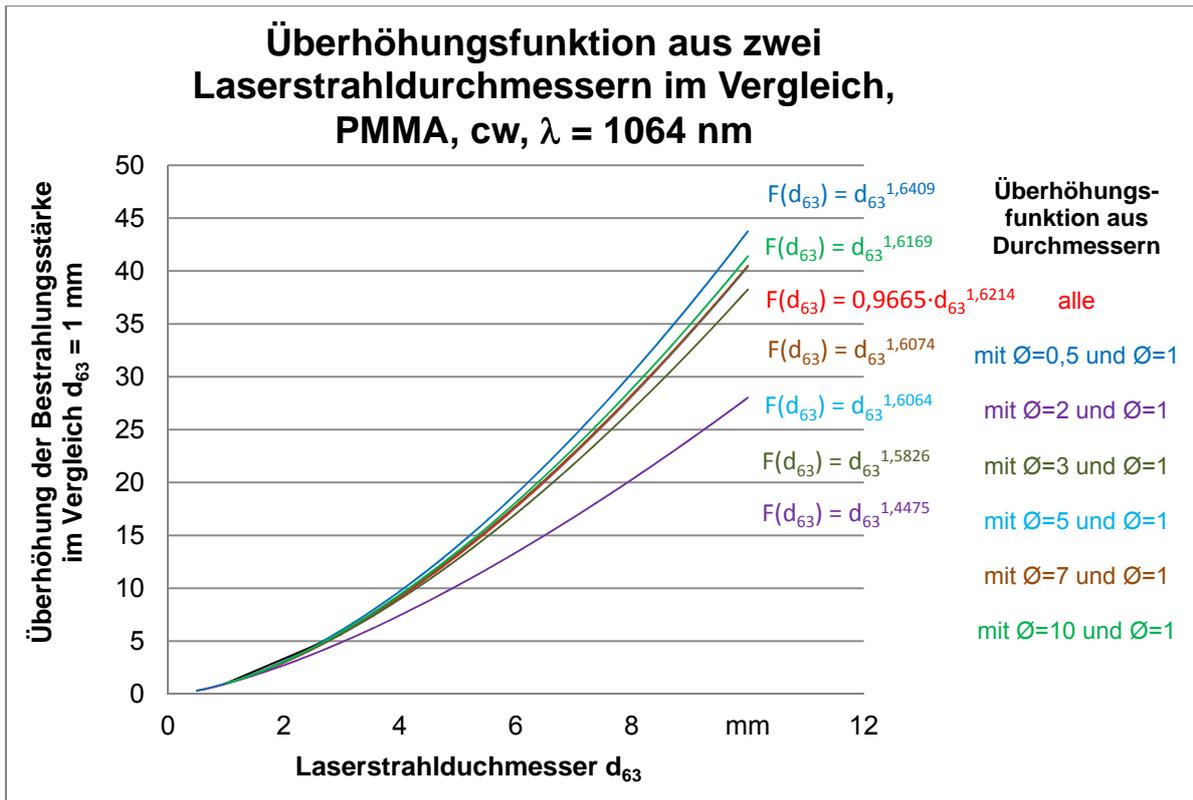


Abb. 5.13 Aus unterschiedlichen Strahldurchmesserpaarungen ermittelte Überhöhungsfunktionen für PMMA-Filter (Dicke 3 mm; 5 s Filterstandzeit; cw-Laserbetrieb bei 1064 nm) im Vergleich

Durch diese vereinfachte Berechnungsweise lassen sich mit Hilfe nur weniger Messungen hinreichend genaue Überhöhungsfunktionen für PMMA-Kunststofffilter im cw-Betrieb bei 1064 nm aufstellen.

5.2.3 Gepulster Laserbetrieb

Die für den gepulsten Laserbetrieb und eine Filterstandzeit von 5 s zulässige mittlere Laserleistung zeigt im Gegensatz zum cw-Betrieb des Nd:YAG-Lasers einen linear annäherbaren Verlauf, wie in Abb. 5.14 dargestellt. Die zulässige mittlere Bestrahlungsstärke hingegen zeigt, ähnlich wie im cw-Laserbetrieb, eine exponentielle Abnahme mit größer werdendem Strahldurchmesser (siehe Abb. 5.15, Abb. 5.28).

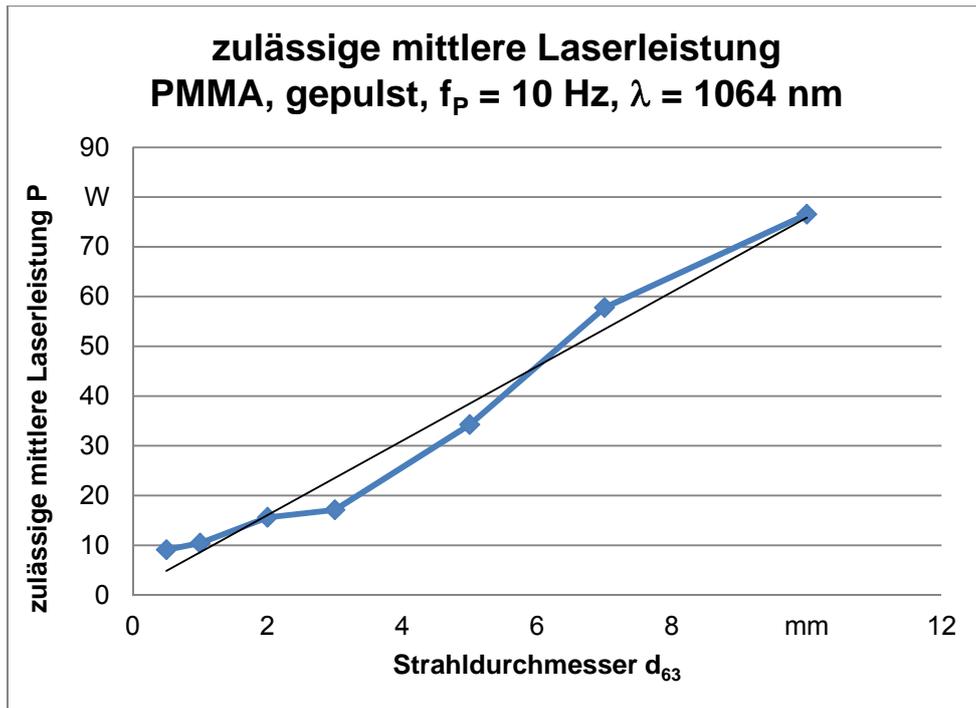


Abb. 5.14 Zulässige mittlere Laserleistung für 5 s Filterstandzeit über dem Strahldurchmesser für PMMA-Filter im gepulsten Laserbetrieb bei 1064 nm

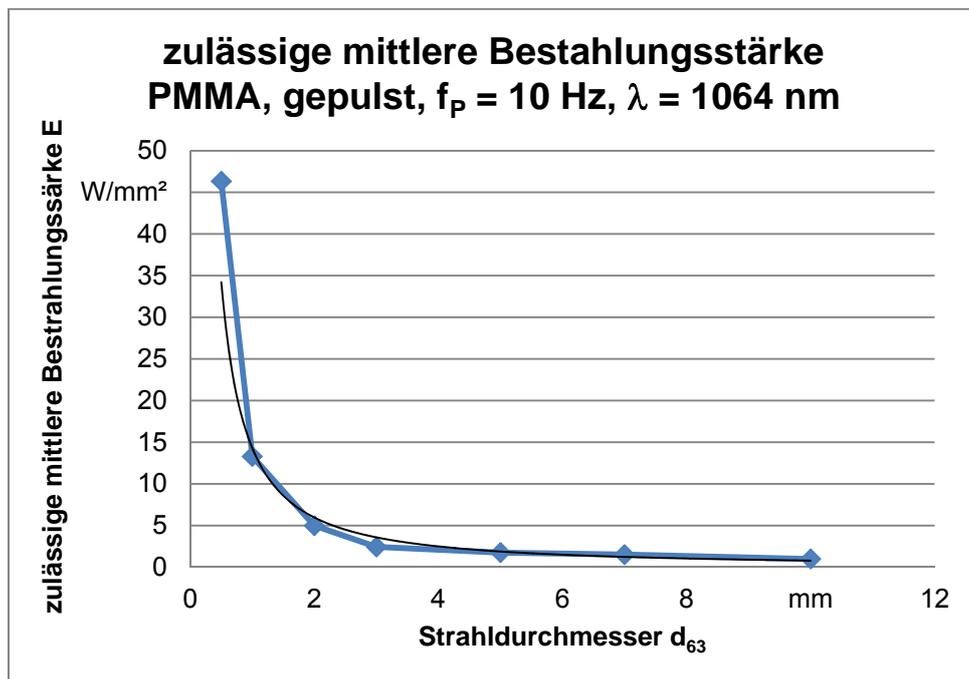


Abb. 5.15 Zulässige mittl. Bestrahlungsstärke für 5 s Standzeit über dem Strahldurchmesser für PMMA-Filter im gepulsten Laserbetrieb bei 1064 nm

Die mittels Gleichung 5.3 für den gepulsten Nd:YAG-Laserbetrieb berechneten Überhöhungswerte für PMMA-Filter zeigen, anders als für den cw-Betrieb, einen linearen Verlauf über dem Strahldurchmesser, wie Abb. 5.16 belegt. Die resultierende Überhöhungsfunktion ist daher eine Geradengleichung der Form

$$F(d_{63}) = m \cdot d_{63} + b \quad (5.7)$$

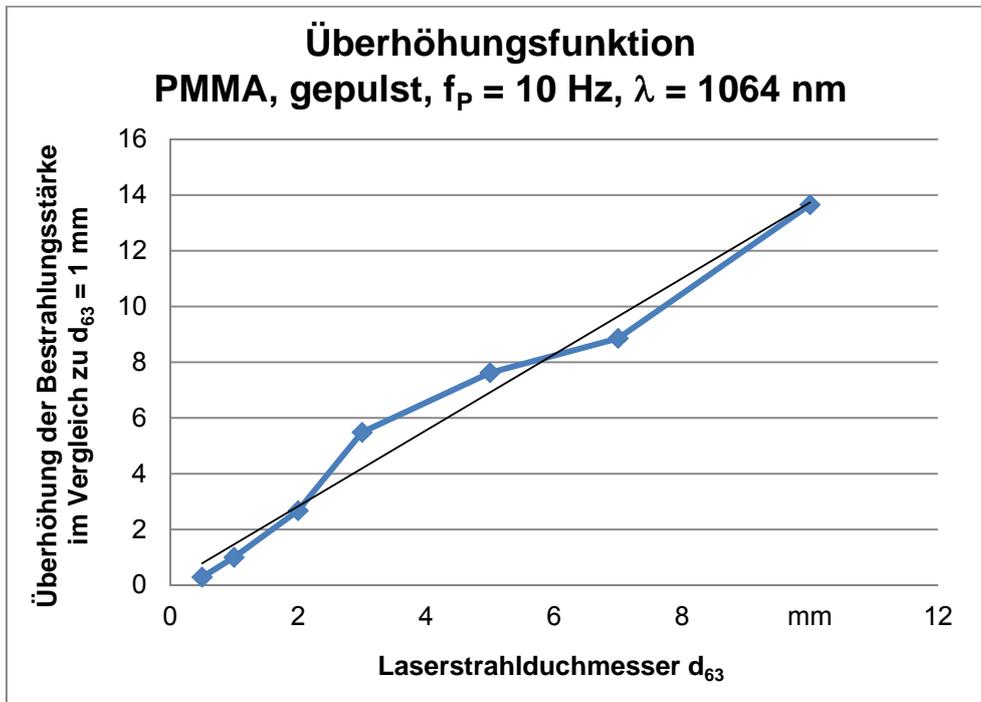


Abb. 5.16 Lineare Überhöhungsfunktion für PMMA-Filter (Dicke 3 mm; 5 s Filterstandzeit) im gepulsten Laserbetrieb mit 10 Hz bei 1064 nm

Abb. 5.17 zeigt den direkten Vergleich zwischen der Überhöhungsfunktion für den cw-Laserbetrieb und der Überhöhungsfunktion für den gepulsten Betrieb für 3 mm dicke PMMA-Filter bei 1064 nm. Deutliche Abweichungen sind für Strahldurchmesser > 3 mm festzustellen. Aufgrund des linearen Kurvenanstiegs für gepulsten Laserbetrieb ist eine weniger starke Abhängigkeit der zulässigen Bestrahlungsstärke vom Laserstrahldurchmesser gegeben, was insbesondere für größere Strahldurchmesser zu größeren Abweichungen der Kurven führt. Diese geringere Abhängigkeit vom Strahldurchmesser beim gepulsten Laserbetrieb ist in der Art der Wärmeeinbringung und im Zerstörungsmechanismus zu sehen, der sich vom cw-Betrieb unterscheidet. Durch die kurzen Laserpulse (typ. Pulsdauern im Bereich 1 ms bis 5 ms) und Puls-spitzenleistungen im Kilowattbereich wird ein größerer Anteil an Material durch Verdampfen (Ablation) abgetragen. Die Schmelzphase reduziert sich und weniger Wärme gelangt ins umgebende Material („kältere Bearbeitung“, kleinere WEZ). Dies hat zur Folge, dass sowohl das Trägermaterial PMMA, als auch der darin enthaltene Absorberfarbstoff mit jedem einzelnen Laserpuls verdampft wird. Die Wechselwirkung von gepulster Laserstrahlung mit dem Filtermaterial unterscheidet sich daher wesentlich von der Dauerstrich-Laserstrahl-Wechselwirkung im Filtermaterial, was sich in einer anderen Überhöhungswertabhängigkeit darstellt. In Abschnitt 0 werden diese Zusammenhänge durch eine Finite-Elemente-Simulation in COMSOL Multiphysics® nachgebildet.

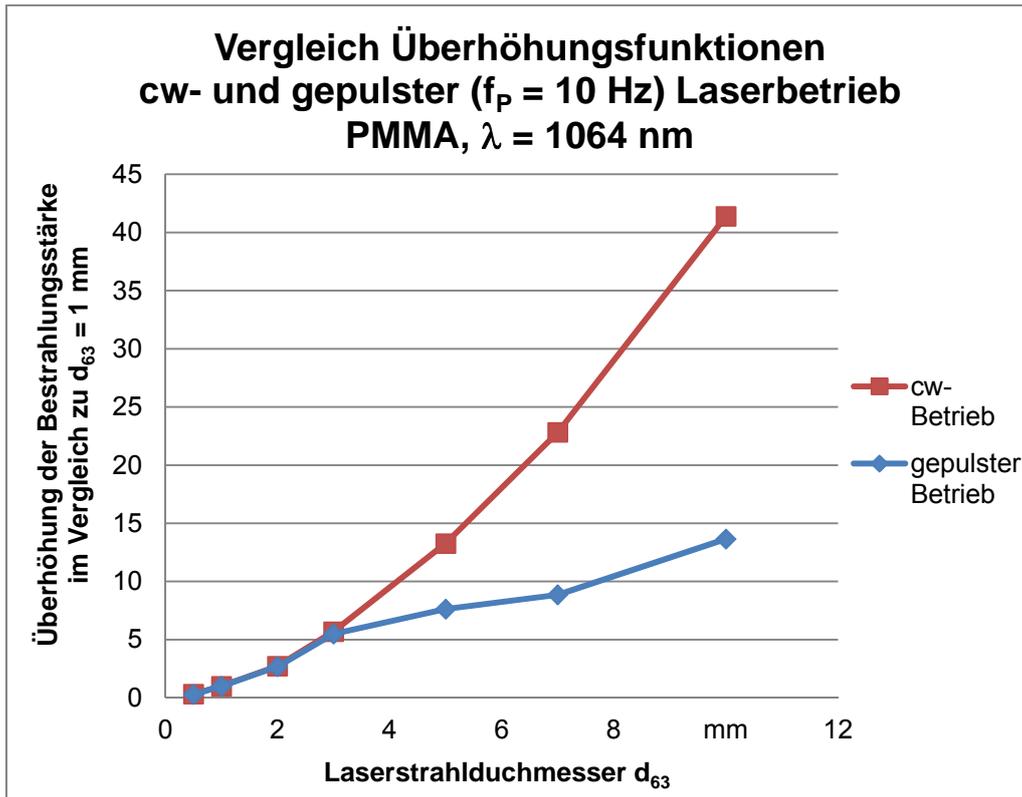


Abb. 5.17 Überhöhungsfunktionen der PMMA-Filter für cw- und gepulsten Laserbetrieb bei 1064 nm im Vergleich

5.3 Ergebnisse und Diskussion der Standzeitversuche an Cellulose Acetat-Filtern bei 1064 nm

Die Abmessungen der Cellulose Acetat-Filter (CA-Filter) betragen 80 mm x 80 mm x 3 mm. Im Folgenden werden die an den CA-Filtern mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm erzielten Messergebnisse vorgestellt. Die aufgetragenen Filterstandzeiten stellen dabei immer einen Mittelwert aus jeweils fünf Messungen dar.

Alle Filterstandzeiten über der Laserleistung zeigen für unterschiedliche Laserstrahldurchmesser einen ähnlichen Verlauf, wie Abb. 5.18 belegt. Bei einer Vergrößerung des Strahldurchmessers verschieben sich die Kurven zu höheren Standzeiten hin. Bei einem größeren Strahldurchmesser verteilt sich die Laserleistung auf eine größere Fläche, d.h. die Intensität und damit die thermische Materialbelastung sinken, die Standzeit erhöht sich entsprechend.

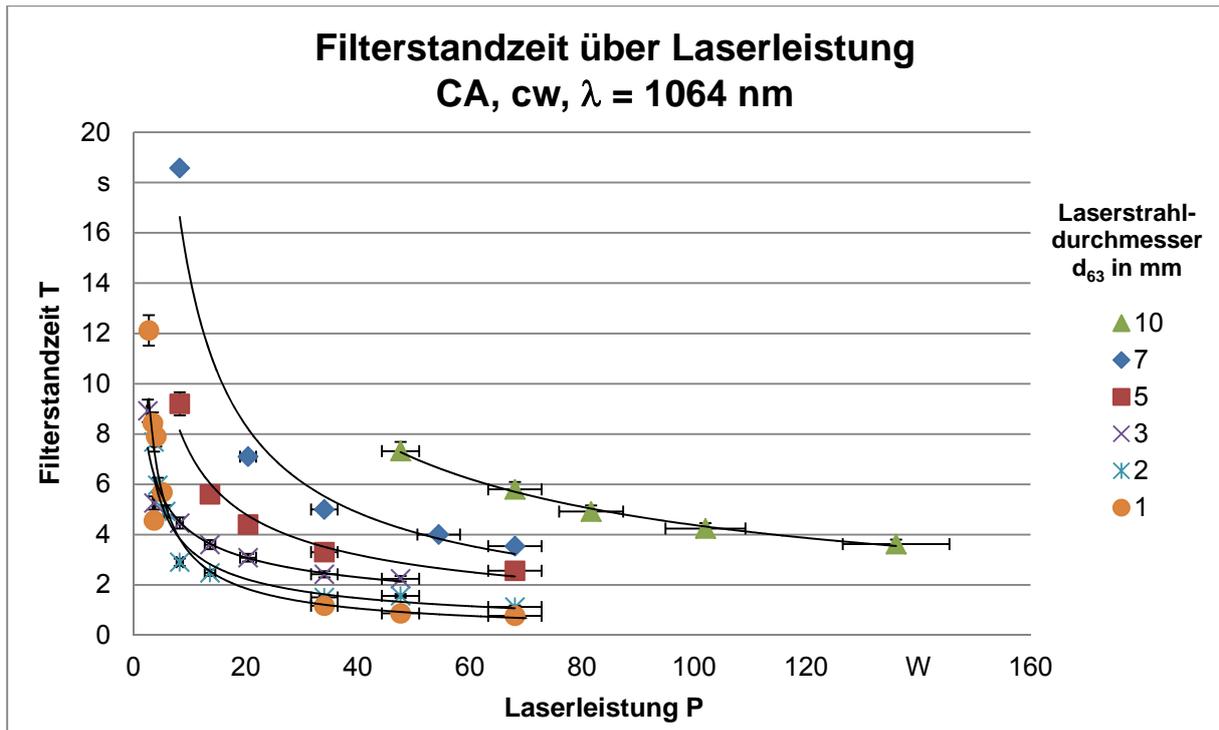


Abb. 5.18 Filterstandzeit T über Laserleistung P für CA-Filter für verschiedene Laserstrahldurchmesser d_{63} im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm

Die ermittelten Überhöhungswerte für die CA-Filter im cw-Betrieb des Nd:YAG-Lasers sind im Folgenden dargestellt. Die Überhöhungswerte liegen bei CA-Filtern für Strahldurchmesser ≥ 5 mm deutlich niedriger, als bei den PMMA-Filtern.

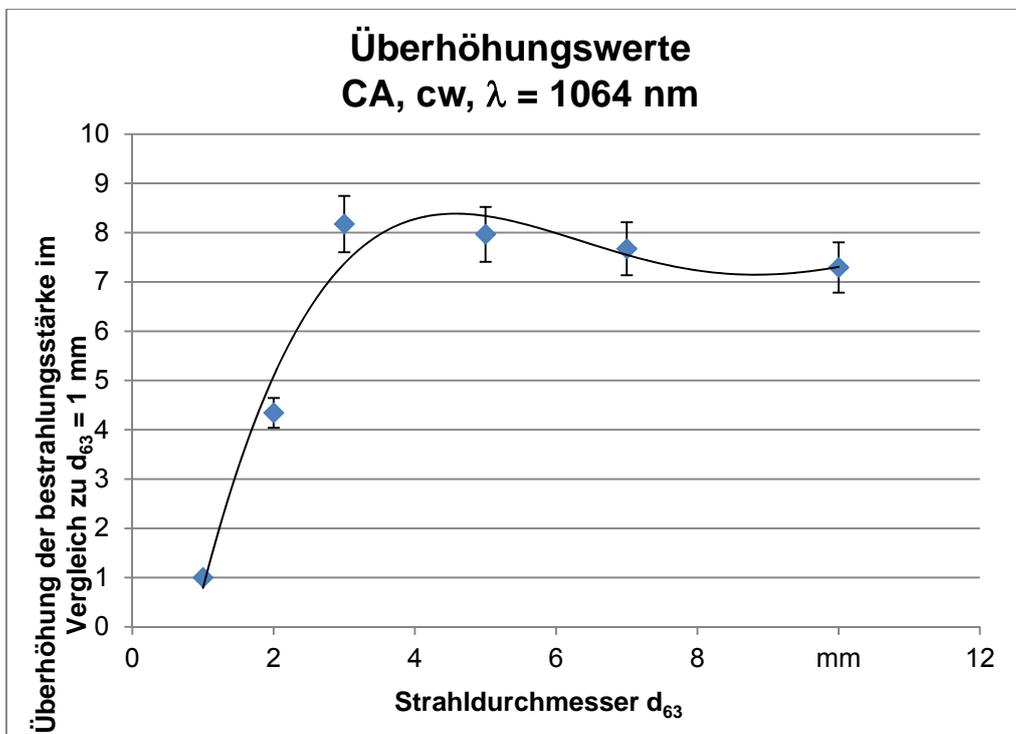


Abb. 5.19 Überhöhungswerte ($\ddot{U}W(d_{63})$, siehe Formel 5.3) für CA-Filter im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm

Beispiele für Laserstandzeitversuche an CA-Filtern sind in folgender Abbildung gezeigt.

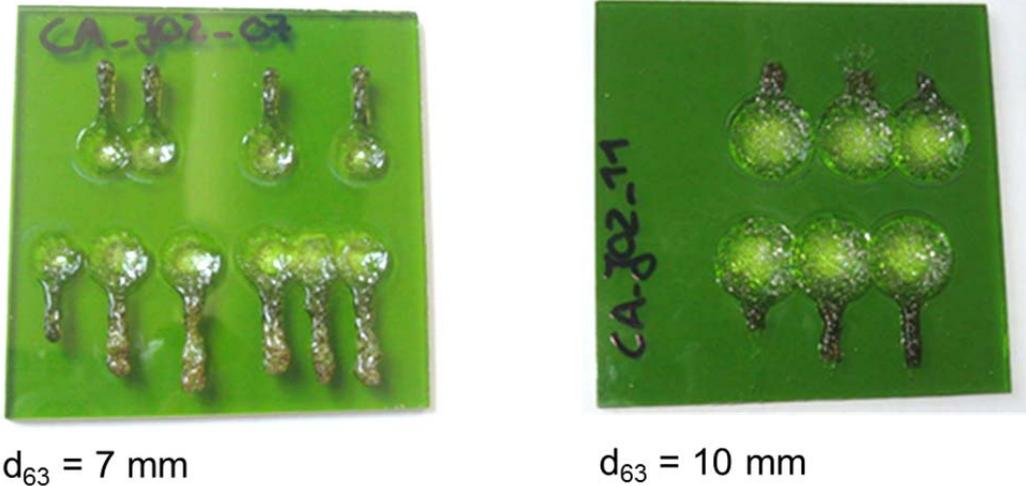


Abb. 5.20 Schadensbilder der Standzeitversuche an CA-Filtern mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm bei verschiedenen großen Strahldurchmessern

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse für 1064 nm

Die aus den Versuchsreihen gewonnenen Daten zeigen, dass die Abhängigkeit der Filterstandzeit vom Laserstrahldurchmesser komplexer ist, als sie im Anhang der aktuellen Norm DIN EN 207 dargestellt ist. Offenbar haben die Filterdicke und die Änderung der Zeitbasis von 10 s auf 5 s ebenso Einfluss auf die Überhöhungswerte, wie etwa die Laserbetriebsart und das Laserschutzfiltermaterial. Auf Basis der Messergebnisse lassen sich Überhöhungsfunktionen definieren bzw. Überhöhungswerte ermitteln, welche Korrekturfunktionen für zugängliche Strahldurchmesser ungleich 1 mm in der Anwendung darstellen. Während sich die Überhöhungsfunktion für 5 s Filterstandzeit im cw-Laserbetrieb als Potenzfunktion mit steilem Anstieg darstellen lässt (PMMA-Filter), wurde für den gepulsten Laserbetrieb eine lineare Abhängigkeit gefunden. Die Überhöhungsfunktion ist in diesem Fall eine Geradengleichung. Entsprechend geringer fällt die Abhängigkeit der zulässigen Bestrahlungsstärke für 5 s Standzeit vom Strahldurchmesser im gepulsten Betrieb aus. Weiterhin sind die Überhöhungswerte (siehe Abb. 5.19) im Fall der CA-Filterproben wesentlich niedriger, als bei den PMMA-Filtern und scheinen zu größeren Strahldurchmessern hin einen Grenzwert anzustreben. Da die erzielten Ergebnisse für PMMA- und CA-Filtermaterial zeigen, dass eine universell gültige Überhöhungsfunktion nicht existiert, muss diese für das jeweilige Filtermaterial durch Laserbelastungsprüfungen individuell ermittelt werden.

Mit den vorliegenden Untersuchungen wird gezeigt, dass für einen cw- und einen gepulsten Laser bei 1064 nm Wellenlänge ein einfaches empirisches Modell ausreichen kann, um die Filterstandzeit in Bezug auf unterschiedliche Laserstrahldurchmesser vorherzusagen. Somit kann in praktischen Laborsituationen oder bei Wartungsarbeiten an industriellen Laseranlagen, bei denen eventuell verschiedene La-

serstrahldurchmesser (ungleich 1 mm) zugänglich sind, die notwendige Mindestschutzstufe ermittelt werden, die erforderlich ist, um bei einem direkten Lasertreffer dieselbe Schutzdauer (5 s) zu gewährleisten, wie sie zur Prüfung des Filters herangezogen wird.

5.5 Ergebnisse und Diskussion der Standzeitversuche an PMMA-Filtern bei 10600 nm

In den durchgeführten Versuchsreihen mit dem CO₂-Laser wurden die PMMA-Filterstandzeiten unter Variation der Laserleistung in Abhängigkeit des Strahldurchmessers für verschiedene Pulsfrequenzen gemessen. Jeder einzelne Filterstandzeitwert in den gezeigten Graphen (Abb. 5.21 bis Abb. 5.25) stellt einen Mittelwert aus jeweils fünf Einzelmessungen dar.

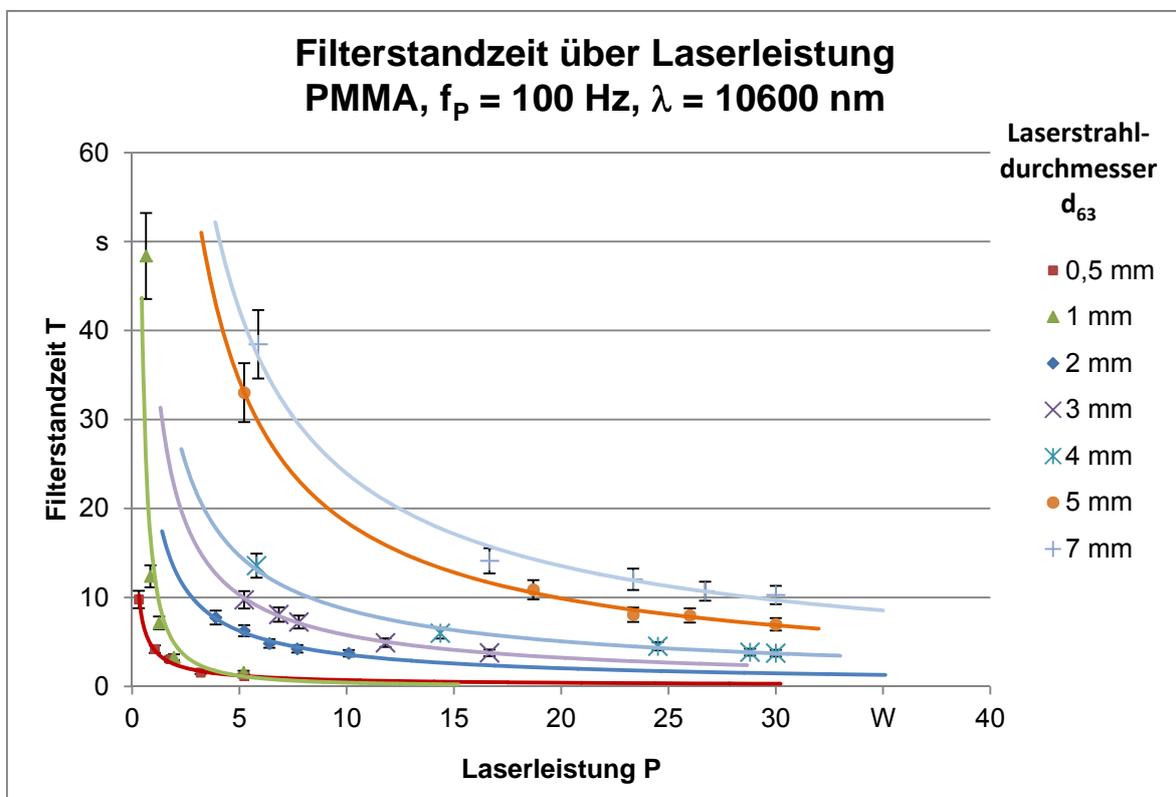


Abb. 5.21 PMMA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d_{63} bei der Pulsfrequenz 100 Hz bei 10600 nm

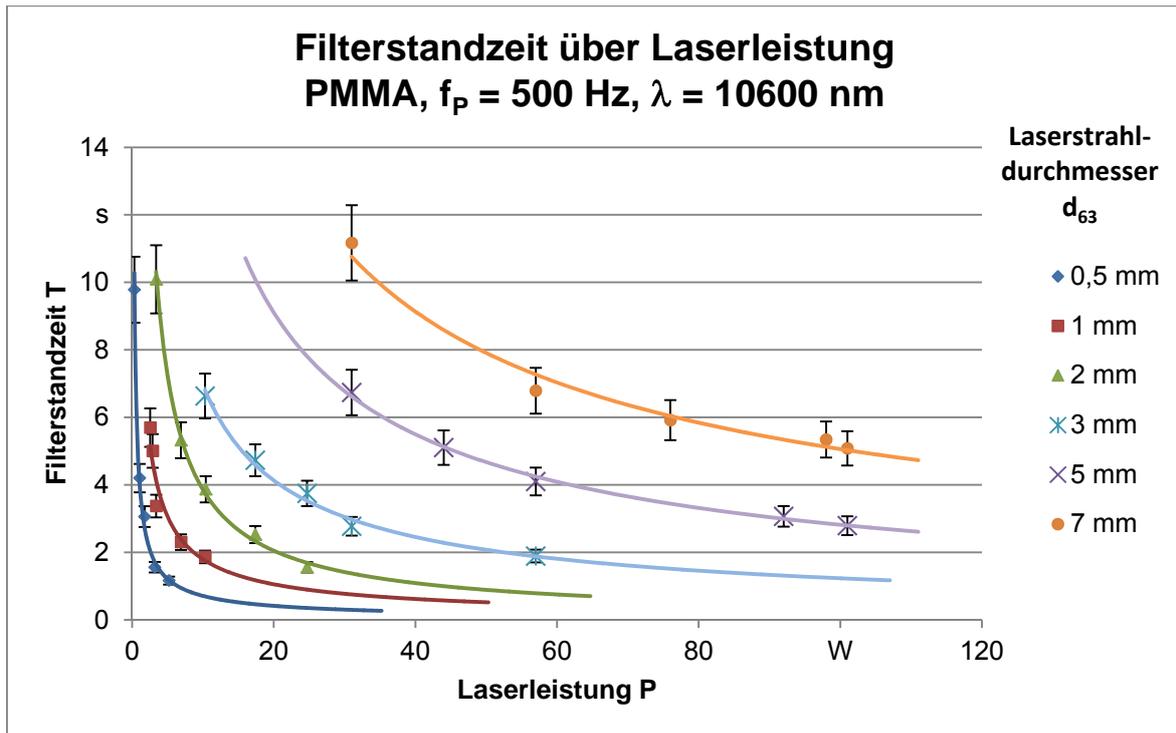


Abb. 5.22 PMMA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d_{63} bei der Pulsfrequenz 500 Hz bei 10600 nm

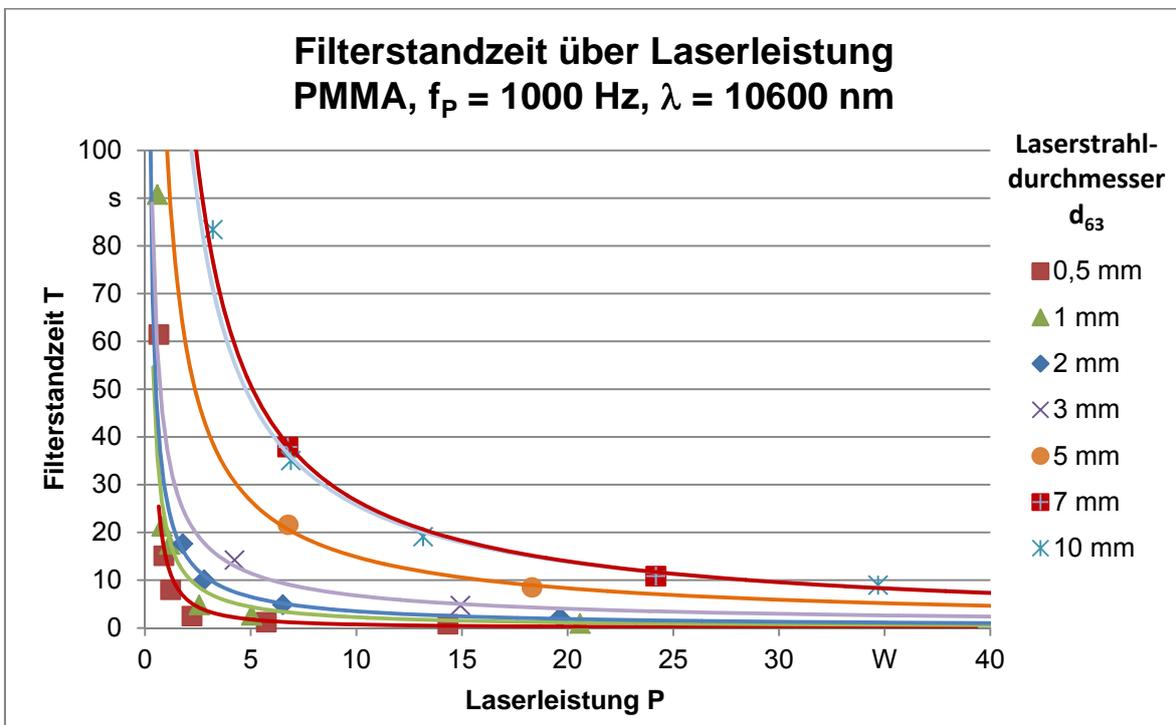


Abb. 5.23 PMMA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d_{63} bei der Pulsfrequenz 1 kHz bei 10600 nm

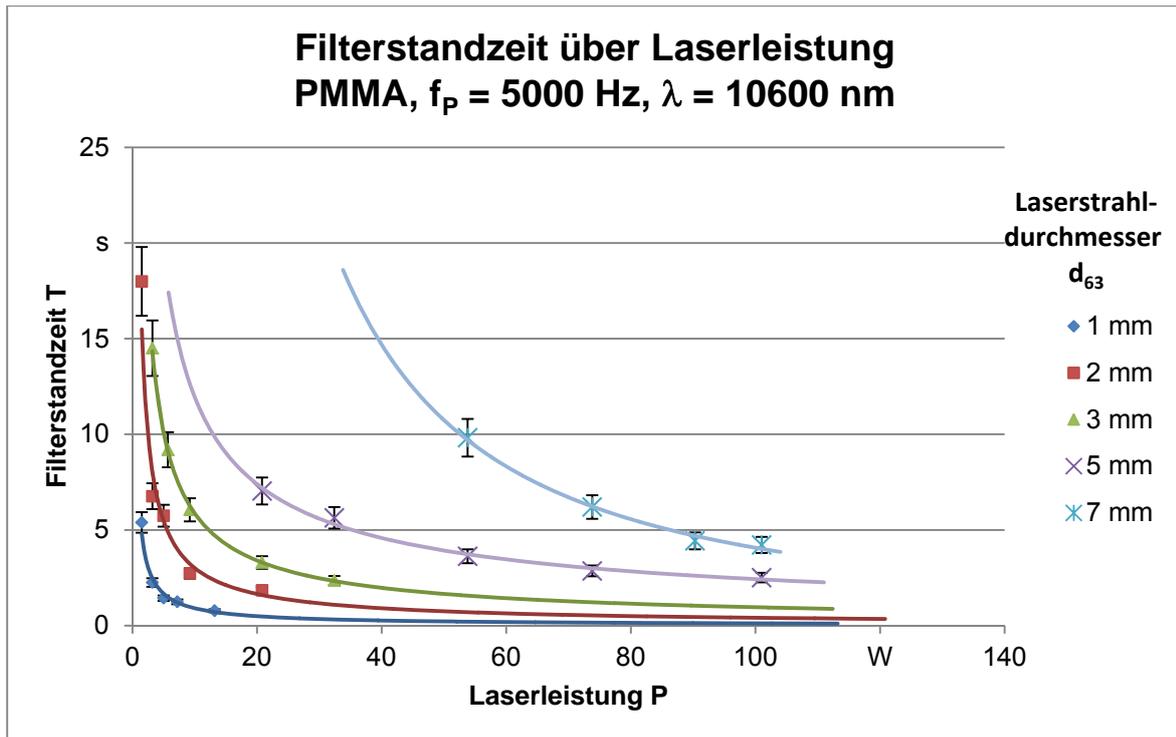


Abb. 5.24 PMMA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d_{63} bei der Pulsfrequenz 5 kHz bei 10600 nm

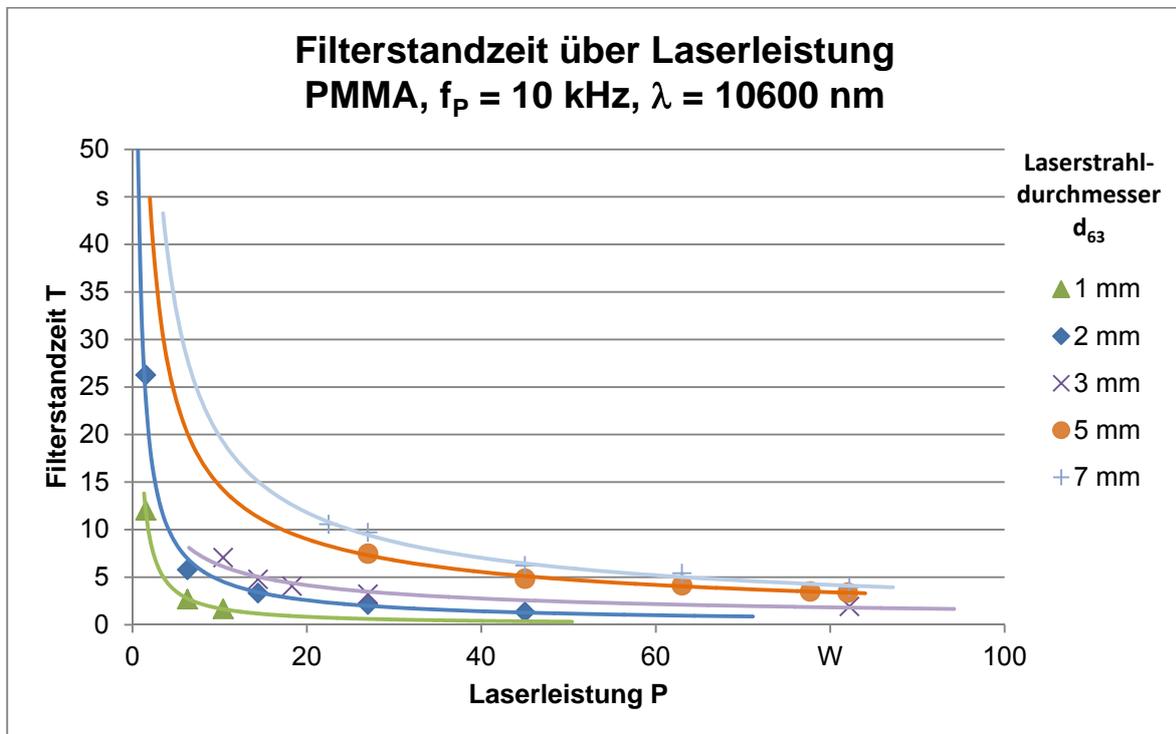


Abb. 5.25 PMMA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d_{63} bei der Pulsfrequenz 10 kHz bei 10600 nm

Durch die ermittelten Messpunkte konnten Trendkurven berechnet werden, um die zulässige Laserleistung für exakt 5 s Standzeit in Abhängigkeit von Strahldurchmesser und Pulsfrequenz zu ermitteln. Die Trendlinien folgen wieder einer Potenzfunktion der Form

$$T[s] = a[d_{63}] \cdot P^{-n[d_{63}]} \quad (5.8)$$

Die Variablen a und n der Funktion lassen sich anhand der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bereits mit wenigen über den Leistungsbereich verteilten Messungen bestimmen. Generell zeigen Abb. 5.21 bis Abb. 5.25, dass die Standzeiten über der Laserleistung für unterschiedliche Laserstrahldurchmesser alle einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Bei einer Vergrößerung des Strahldurchmessers verschieben sich die Kurven zu höheren Standzeiten hin. Bei einem größeren Strahldurchmesser verteilt sich die Laserleistung auf eine größere Fläche, d.h. die Bestrahlungsstärke und damit die thermische Materialbelastung sinken, die Standzeit erhöht sich entsprechend.

In Abb. 5.26 sind die Überhöhungswerte (bzw. deren funktionale Abhängigkeit) über dem Strahldurchmesser für verschiedene Pulsfrequenzen in einem Diagramm zusammengestellt. Im Gegensatz zu den experimentellen Ergebnissen am Nd:YAG-Laser bei der Wellenlänge 1064 nm zeigen die Versuche mit CO₂-Laserstrahlung (10600 nm Wellenlänge) einen logarithmusähnlichen Verlauf zwischen Überhöhungswerten und Strahldurchmesser. Bei bestimmten Laserparametern (hohe Laserleistung bei großem Strahldurchmesser) kam es aufgrund massiver Flammenbildung und intensiver Rauchentwicklung bei den Laserbelastungsprüfungen zur Beeinflussung der Messungen bzw. die Versuche mussten frühzeitig abgebrochen werden (siehe Abb. 5.27 und Abb. 5.28). Aus diesem Grund fehlen in Abb. 5.26 entsprechende Messpunkte. Versuche mit dickeren PMMA-Proben (6 mm und 9 mm Dicke) mussten ebenfalls wegen massiver Flammenbildung und intensiver Rauchentwicklung frühzeitig abgebrochen werden.

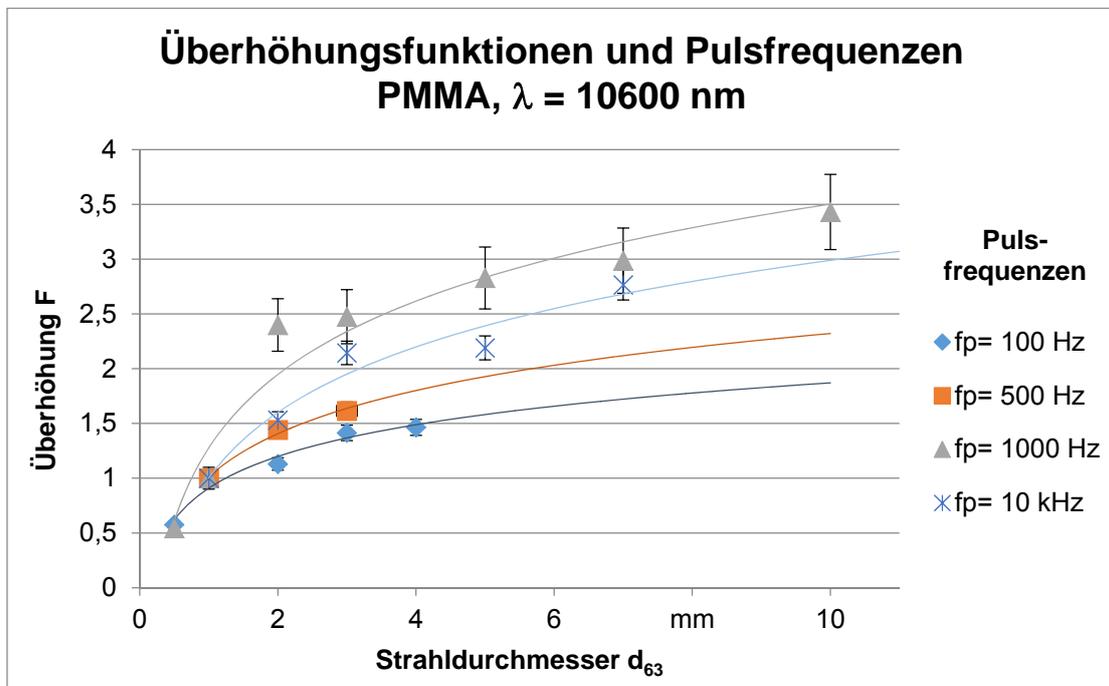


Abb. 5.26 Überhöhungsfunktionen für CO₂-Laserbestrahlung (10600 nm) von PMMA-Filtern für unterschiedliche Pulsfrequenzen f_p im Vergleich



Abb. 5.27 Massive Flammenbildung bei Laserbelastungsprüfungen am CO₂-Laser mit hoher Leistung und großem Strahldurchmesser



Abb. 5.28 Verbrannte PMMA-Probe nach Laserbelastungsprüfung mit hoher Leistung und großem Strahldurchmesser am CO₂-Laser

5.6 Ergebnisse und Diskussion der Standzeitversuche an Cellulose Acetat-Filtern bei 10600 nm

Im Folgenden werden die an den CA-Filtern mit dem CO₂-Laser bei einer Pulsfrequenz von 1000 Hz und einer Wellenlänge von 10600 nm erzielten Messergebnissen vorgestellt. Die Abmessungen der CA-Filter betragen 80 mm x 80 mm x 3 mm. Die aufgetragenen Filterstandzeiten stellen dabei immer einen Mittelwert aus jeweils fünf Messungen dar.

Alle Standzeiten über der Laserleistung zeigen für unterschiedliche Laserstrahldurchmesser einen ähnlichen Verlauf, wie Abb. 5.29 belegt. Bei einer Vergrößerung des Strahldurchmessers verschieben sich die Kurven zu höheren Standzeiten hin. Bei einem größeren Strahldurchmesser verteilt sich die Laserleistung auf eine größere Fläche, d. h. die Bestrahlungsstärke und damit die thermische Materialbelastung sinken, die Standzeit erhöht sich entsprechend.

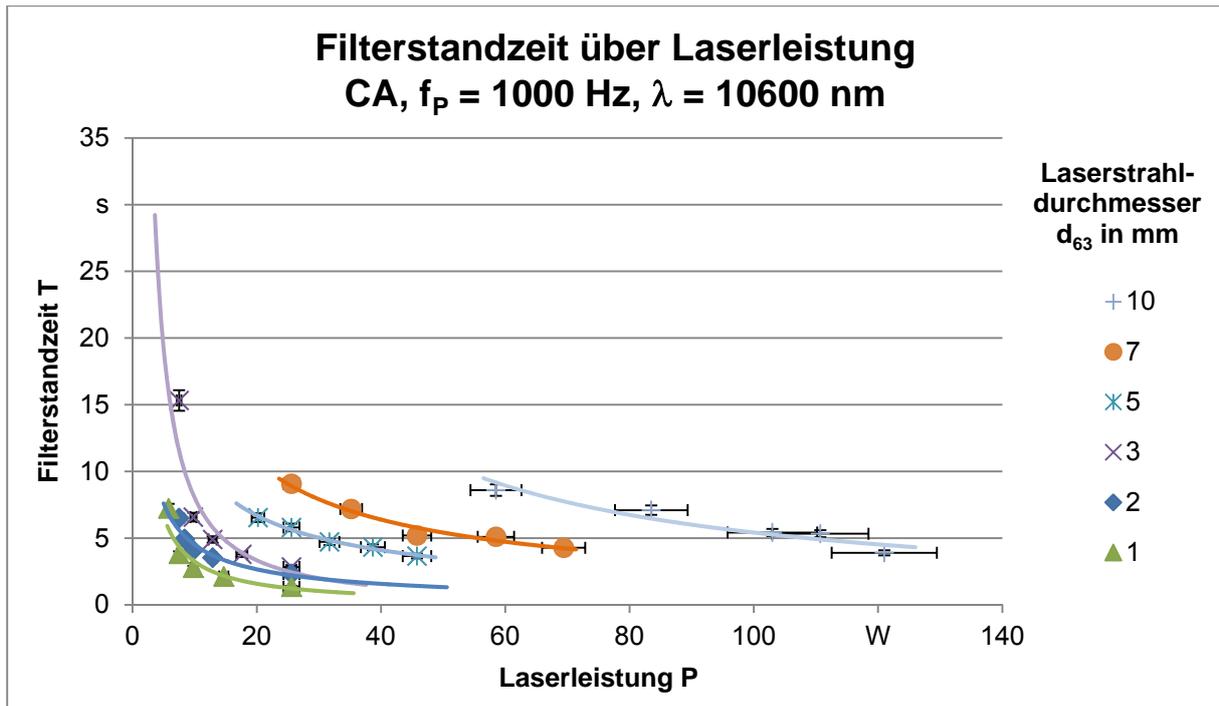


Abb. 5.29 CA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d_{63} bei der Pulsfrequenz 1000 Hz bei 10600 nm

Die ermittelten Überhöhungswerte für die CA-Filter im gepulsten CO₂-Laserbetrieb sind im Folgenden dargestellt. Die Überhöhungswerte liegen bei CA-Filtern für Strahldurchmesser ≥ 5 mm deutlich niedriger, als bei den PMMA-Filtern bei 1064 nm im cw-Laserbetrieb, wie in Abb. 5.12 zu sehen ist.

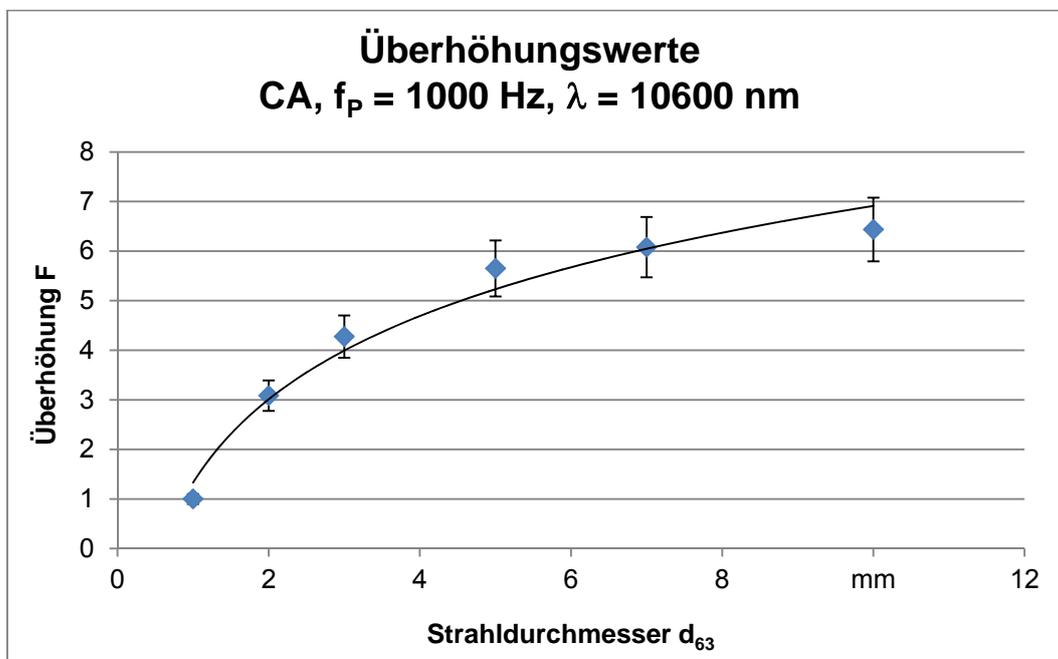


Abb. 5.30 Überhöhungswerte für CA-Filter im gepulsten CO₂-Laserbetrieb bei der Pulsfrequenz 1000 Hz bei 10600 nm

Beispiele für die Materialzerstörung bei Standzeitversuchen an CA-Filtern mit dem CO₂-Laser zeigt die folgende Abbildung.



Abb. 5.31 Schadensbilder von Standzeitversuchen an CA-Filtern mit dem CO₂-Laser bei einem Strahldurchmesser d_{63} von 10 mm bei 10600 nm

5.7 Ergebnisse und Diskussion der Standzeitversuche an PMMA-Filtern bei 532 nm

In den durchgeführten Versuchsreihen mit dem frequenzverdoppelten Nd:YAG-Laser (Wellenlänge 532 nm) wurden die PMMA-Filterstandzeiten unter Variation der mittleren Laserleistung in Abhängigkeit des Strahldurchmessers für verschiedene Pulsfrequenzen gemessen. Jeder einzelne Filterstandzeitwert in den gezeigten Graphen in Abb. 5.32 stellt einen Mittelwert aus jeweils fünf Einzelmessungen dar.

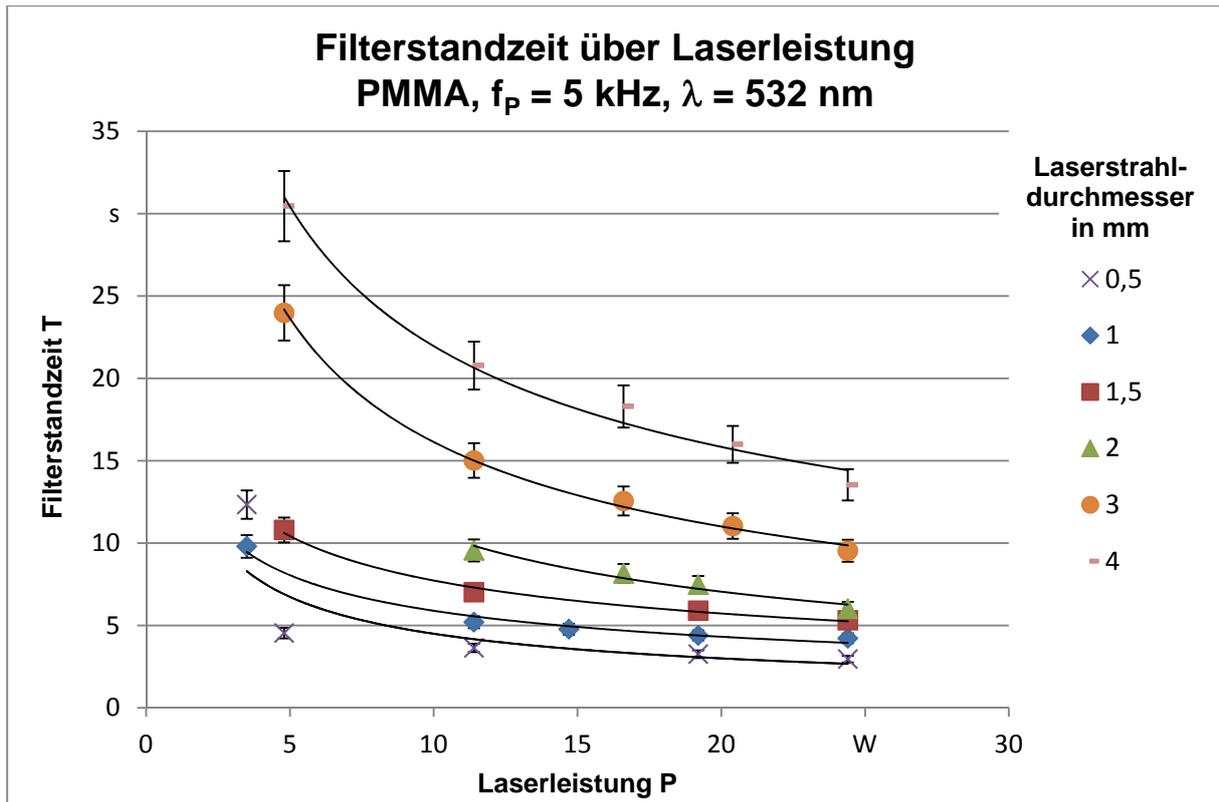


Abb. 5.32 PMMA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d_{63} bei der Pulsfrequenz 5 kHz bei 532 nm

Die ermittelten Überhöhungswerte für die Pulsfrequenz von 5 kHz sind im Folgenden dargestellt.

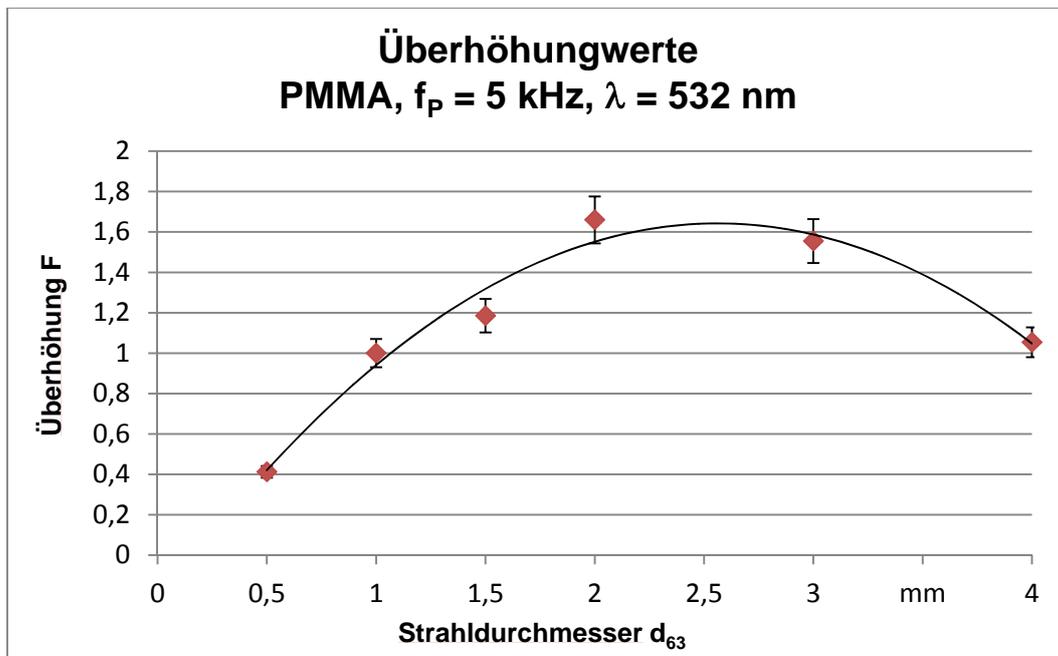


Abb. 5.33 Überhöhungswerte für PMMA-Filter im gepulsten Nd:YAG-Laserbetrieb bei der Pulsfrequenz 5 kHz bei 532 nm

Die experimentell ermittelten Überhöhungswerte liegen bei den PMMA-Filtern bei 532 nm Wellenlänge im untersuchten Strahldurchmesserbereich deutlich niedriger als bei den PMMA-Filtern bei 1064 nm im cw-Laserbetrieb, wie in Abb. 5.12 zu sehen ist.

5.8 Ergebnisse und Diskussion der Standzeitversuche an PMMA-Filtern bei 1070 nm

Die Laserbeschussversuche am *iwb* (TU München) mit einem Ytterbium-Faserlaser (YLR-8000-R, IPG Laser) mit der Wellenlänge 1070 nm wurden in der Betriebsart D (cw-Laserbetrieb) mit großen Strahldurchmessern (> 10 mm) und hohen Laserleistungen (bis zu 8 kW) durchgeführt. Bestrahlt wurden PMMA-Filter mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm x 3 mm. Die Versuchsanordnung ist in Abschnitt 3.3.4 dargestellt. Tab. 5.2 zeigt eine Übersicht der Beschussversuche mit dem Strahldurchmesser 18 mm.

Tab. 5.2 Ergebnisse der Beschussversuche an PMMA-Filtern mit dem cw-Faserlaser mit einem Strahldurchmesser von 18 mm

Laserleistung in kW	Bestrahlungsdauer in s	Bemerkung
5	1	Fotopapier → kein Effekt
6	1	Fotopapier → kein Effekt
8	1	Fotopapier → kein Effekt
	2	Fotopapier → kein Effekt
	4	Fotopapier → gewellt; Probe hat kl. Loch
	5	Fotopapier → brennt

Das experimentelle Ergebnis mit 8 kW Laserleistung, einem Laserstrahldurchmesser von 18 mm und einer Standzeit von 5 s ergibt einen Überhöhungswert F von ca. 3. Die Überhöhungsfunktion F in Abb. 5.12 steigt offenbar nicht unbegrenzt an, sondern fällt bei großen Strahldurchmessern (> 10 mm) und hohen Laserleistungen (> 1 kW) wieder ab. Aufgrund der sehr heftigen Reaktion bei einer Bestrahlung der PMMA-Filter mit einer Laserleistung von 8 kW, welche mit starker Flammenbildung und Rauchentwicklung einhergeht, ist es jedoch sehr schwierig, verlässliche Messwerte zu erhalten. Ein Abschirmeffekt auf die Lasereinstrahlung durch Flammen und Laserrauch ist wahrscheinlich. Der vorliegende Überhöhungswert von 3 kann daher nur als Indiz dafür gelten, dass die Überhöhungswerte bei großen Strahldurchmessern wieder abnehmen bzw. nicht unbegrenzt ansteigen.

6 Vergleich der Überhöhungsfunktionen in Abhängigkeit von Wellenlänge und Filtermaterial

In Abb. 6.1 sind die Überhöhungsfunktionen für Standzeitversuche mit dem Nd:YAG-Laser (cw- und gepulster Betrieb) und mit dem CO₂-Laser vergleichend dargestellt. Die Darstellung belegt, dass die Wellenlänge und die Laserbetriebsart signifikanten Einfluss auf die Überhöhungsfunktionen haben.

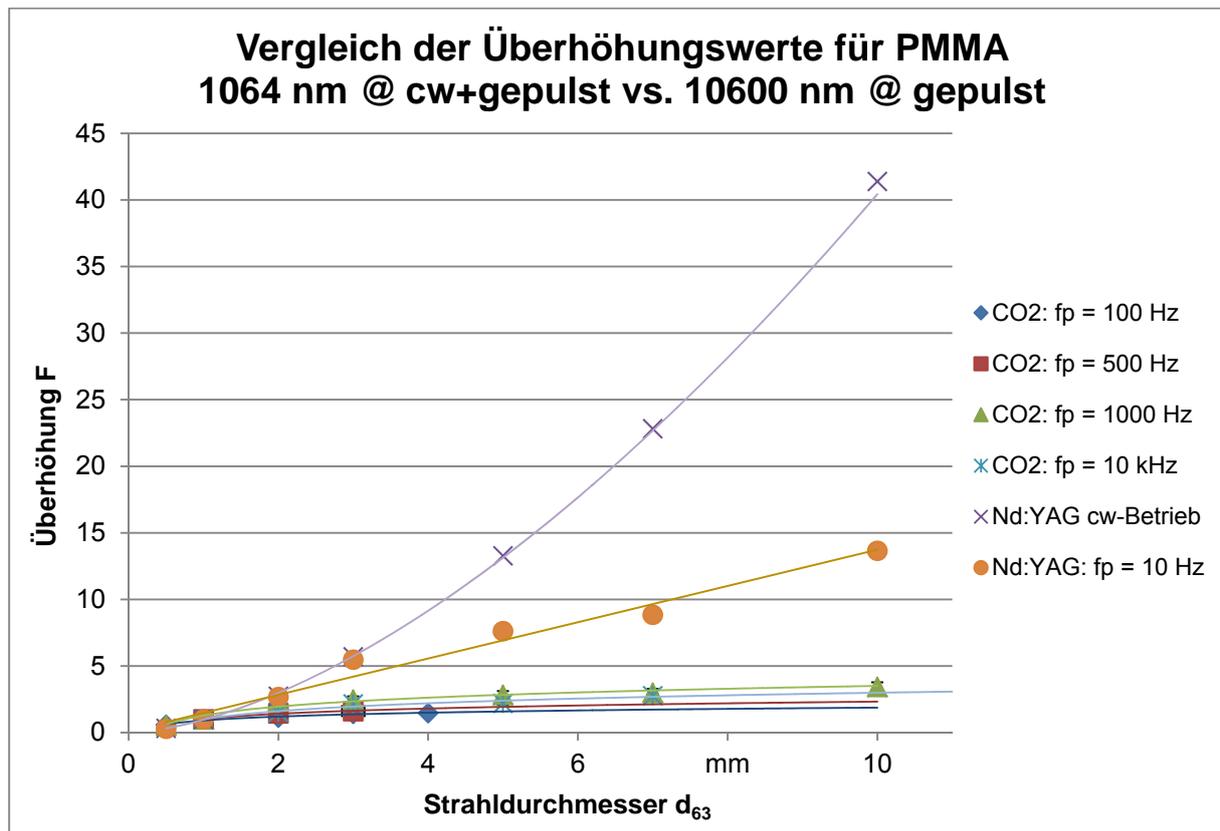


Abb. 6.1 Überhöhungsfunktionen für PMMA-Filter im Vergleich

Die unterschiedlichen Kurvenverläufe im Diagramm sind vor allem ein Resultat der unterschiedlichen Laserstrahl-Material-Wechselwirkung. Während es beim Nd:YAG-Laser durch eine Volumenabsorption der Strahlung v. a. zu einer Zerstörung des Absorbers im Filter kommt, wodurch dieser für die Laserstrahlung quasi transparent wird (Verringerung der optischen Dichte), bohrt sich der CO₂-Laserstrahl aufgrund der Oberflächenabsorption der Strahlung im PMMA-Grundmaterial durch Materialverdampfung durch den Filter. Anders als beim Nd:YAG-Laser spielt dabei die Betriebsart des CO₂-Lasers (cw- bzw. gepulst) offenbar keine signifikante Rolle, da 10 kHz Pulsfrequenz einem Quasi-Dauerstrich-Betrieb des Lasers gleichkommt. Die Standzeitversuche mit gepulster Nd:YAG-Laserstrahlung führen zu Überhöhungswerten, die zwischen den Überhöhungswertkurven der cw-Nd:YAG-Laserversuche und den Kurven der CO₂-Laserversuche liegen. Der Grund hierfür ist in einer kombinierten Materialschädigung aus Zerstörung des Absorbers und Verdampfung aufgrund der hohen Pulsspitzenleistungen zu suchen. Im Vergleich zu den an PMMA-Filtern mit dem cw-Nd:YAG-Laser erzielten Überhöhungswerten ($F > 40$), zeigen alle

anderen Versuchsreihen (gepulster Laserbetrieb, Wellenlängen 532 nm und 10600 nm, CA-Filtermaterial) deutlich niedrigere Überhöhungswerte. Eine Erklärung für die großen Überhöhungswerte bei PMMA und cw-Nd:YAG-Laserbestrahlung liefert der Bestrahlungsstärken-abhängige Streukoeffizienten-Ansatz in der physikalischen COMSOL Multiphysics[®]-Simulation (siehe Abschnitt 7.4). Im Rahmen der untersuchten Wellenlängen, Laserbetriebsarten und Filtermaterialien stellt somit der Beschuss von PMMA-Filtern mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm das Worst-Case-Szenario dar und findet sich entsprechend in der Empfehlung für eine Handlungsanleitung für Benutzer von Laserschutzbrillen (siehe Kapitel 8) wieder.

7 Modellbildung und Simulation mit COMSOL Multiphysics®

In diesem Kapitel soll ein mathematisches Modell entworfen werden, um die gefundenen Zusammenhänge für PMMA-Filter über eine Finite-Elemente-Simulation in COMSOL Multiphysics® (im Folgenden kurz COMSOL genannt) nachzubilden und evtl. auf andere Laserbelastungsfälle zu erweitern. COMSOL ist ein kommerzielles FEM-Programm, mit dessen Hilfe auf physikalischen Effekten beruhende Systeme modelliert und simuliert werden können. Grundlage für die Simulation der Standzeiten von Laserschutzfiltern bei Belastung mit dem CO₂-Laser ist das COMSOL-Modul „Wärmeleitung in Feststoffen“ und bei der Simulation des Nd:YAG-Beschusses zusätzlich das Modul „Strahlung in teiltransparenten Medien“.

Für die Simulation wurden die Materialkennwerte des verwendeten PMMA-Filtermaterials ermittelt, die wesentlichen physikalischen Effekte der Laserbeschussversuche festgelegt und diese schließlich mithilfe der dazu passenden Physikmodule in COMSOL implementiert. Nachdem die gemessenen Werte als Materialparameter übernommen wurden, konnte die Simulation mit dem jeweils festgelegten physikalischen Modell gestartet werden. Unter verschiedenen physikalischen Randbedingungen wurden schließlich umfangreiche Simulationsreihen durchlaufen und ausgewertet.

7.1 Ermittlung der Materialkennwerte von PMMA-Laserschutzfiltern

Zur Ermittlung der Materialkennwerte waren diverse Messverfahren bzw. Messgeräte notwendig. Um eine Vergleichbarkeit mit Literaturwerten zu ermöglichen, wurden dabei (sofern vorhanden) Normen zu Messmethoden, Durchführung und Auswertung herangezogen. Tab. 7.1 zeigt die jeweilige Kenngröße mit ihrem Symbol und die Messmethode nach Norm.

Tab. 7.1 Zu ermittelnde thermische, mechanische und optische Materialkennwerte für die verwendeten PMMA-Laserschutzfilter als Eingangsgrößen für die geplante Simulation

Zu messende Größe	Symbol	Messmethode	Norm
Wärmeleitfähigkeit	λ	Hot-Disk-Messung	ISO 22007-1
Dichte	ρ	Volumen-, Massebestimmung	DIN 1306
Spez. Wärmekapazität	$c_p(\vartheta)$	DSC	DIN EN ISO 11357
Transmissionsgrad	A	Spektrophotometrie	-
Absorptionskoeffizient	α	Spektrophotometrie	-
Anfangspunkt	T_A	TGA	DIN EN ISO 11358
Mittelpunkt	T_C	TGA	DIN EN ISO 11358
Endpunkt (Zersetzungst.)	T_B	TGA	DIN EN ISO 11358
Glasübergangstemp.	T_G	DSC	DIN EN ISO 11357
Bruchspannung	σ_B	Zugversuch	DIN EN ISO 527-1
Elastizitätsmodul	E	Zugversuch	DIN EN ISO 527-1

Tab. 7.2 stellt die ermittelten Kennwerte für die verwendeten PMMA-Laserschutzfilter den Literaturwerten für PMMA-Kunststoff gegenüber. Die Fehlerangaben bei den gemessenen Kennwerten wurden aus den bekannten Messunsicherheiten abgeleitet.

Tab. 7.2 Ermittelte Materialkennwerte für die verwendeten PMMA-Laserschutzfilter im Vergleich zu Literaturwerten für PMMA

Versuch und Größe	PMMA Literatur	Filtermaterial	Relativer Unterschied
DSC: T_G	108 °C	102 ± 1 °C	-5,5 % bis -6,7 %
DSC: c_p	1,47 kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	1,2925 ± 0,0646 kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	-7,7 % bis -16,5 %
TGA: T_A	321 ± 1 °C	355,24 ± 1 °C	+10,0 % bis +11,0 %
TGA: T_B	460 ± 1 °C	407,56 ± 0,1 °C	-11,2 % bis -11,6 %
TGA: T_C	383 ± 1 °C	381,4 ± 0,1 °C	-0,1 % bis -0,7 %
Hot-Disk: λ	0,19 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	0,221 ± 0,1 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	+11,0 % bis +21,6 %
Zugversuch: E	3300 MPa	3270 ± 60 MPa	-0,9 % bis +1,1 %
Zugversuch: σ_B	74 MPa	72,77 ± 0,53 MPa	-2,4 % bis -1,0 %
Dichte: ρ	1,18 g·cm ⁻³	1,1866 ± 0,0042 g·cm ⁻³	+0,2 % bis +1,0 %
Spektrophotometrie: α_{1064}	70,2 m ⁻¹	5356,6 ± 75,7 m ⁻¹	+7523 % bis +7738 %

Die Unterschiede der ermittelten Kennwerte zu den Literaturwerten in Tab. 7.2 sind bedingt durch den Füllstoff, der als Metallkomplex dem PMMA zugesetzt wurde, um das Schutzziel einer hohen optischen Dichte im IR-Spektrum (900 nm bis 1100 nm) zu erreichen. Die zusätzliche Einbringung von Weichmachern und Bindemitteln hat ebenfalls Änderungen in den Materialkennwerten zur Folge. Dies führt zusammengefasst zu folgenden Kennwertänderungen (im Vergleich zu den Literaturangaben):

- Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit
- Verringerung der spezifischen Wärmekapazität
- geringe Erhöhung der Dichte
- Erhöhung der thermischen Beständigkeit
- Veränderung des Transmissionsgrads bei charakteristischen Wellenlängen
- kein Phasenübergang vor thermischer Zersetzung (siehe Abb. 7.1)



Abb. 7.1 PMMA-Filter links im Ausgangszustand, rechts nach Erhitzung auf 330°C

Zur Bestätigung der Zersetzungstemperatur T_B konnte eine Temperaturmessung mit einer Wärmebildkamera herangezogen werden. Mit der Kamera wurden die Tempe-

aturverteilungen während der Laserbelastungsprüfungen auf den Oberflächen der PMMA-Filter gemessen. Abb. 7.2 zeigt eine typische Temperaturverteilung bei einer Prüfung mit 10 mm Strahldurchmesser mit dem Nd:YAG-Laser im cw-Betrieb. Während der Laserbestrahlung steigt die Temperatur im Zentrum der Bestrahlung auf deutlich über 300°C an und verharrt dann in etwa auf diesem Niveau (Plateaubildung). Offensichtlich wird ein stationärer Zustand erreicht, in dem das Material siedet und verdampft, wodurch keine weitere Temperaturerhöhung stattfindet. Durch den Wärmefluss in das umgebende Material verbreitert sich mit zunehmender Bestrahlungsdauer der Bereich maximaler Temperatur, d.h. die Materialschädigung dehnt sich aus, bis das Auslösen des LaserSpy[®]-Sensors die Bestrahlung stoppt. Auffällig dabei sind die steilen Flanken der Temperaturverteilung, also der aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von PMMA steile Temperaturgradient an den Rändern der bestrahlten Zone.

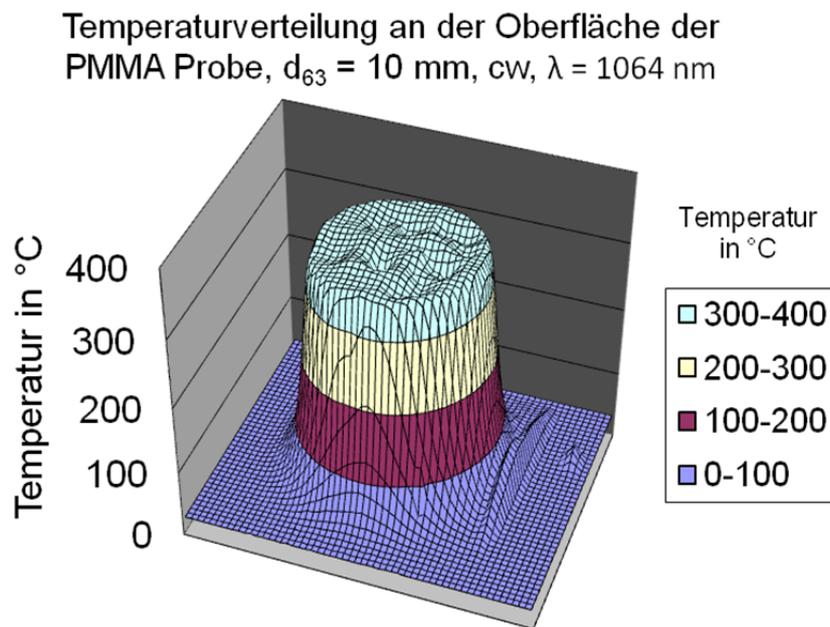


Abb. 7.2 Gemessene Temperaturverteilung an der Oberfläche eines PMMA-Filters während der Nd:YAG-Laserbestrahlung mit 140 W Leistung und 10 mm Strahldurchmesser im cw-Betrieb

7.2 Theoretische Grundlagen

Für das Simulationsmodell müssen die relevanten physikalischen Prozesse wie Wärmeleitung, Wärmeübergang und die Absorption der Laserstrahlung modelliert werden. Alle im Modell berücksichtigten Prozesse sind in Abb. 7.3 schematisch dargestellt und werden in weiteren Abschnitten angesprochen.

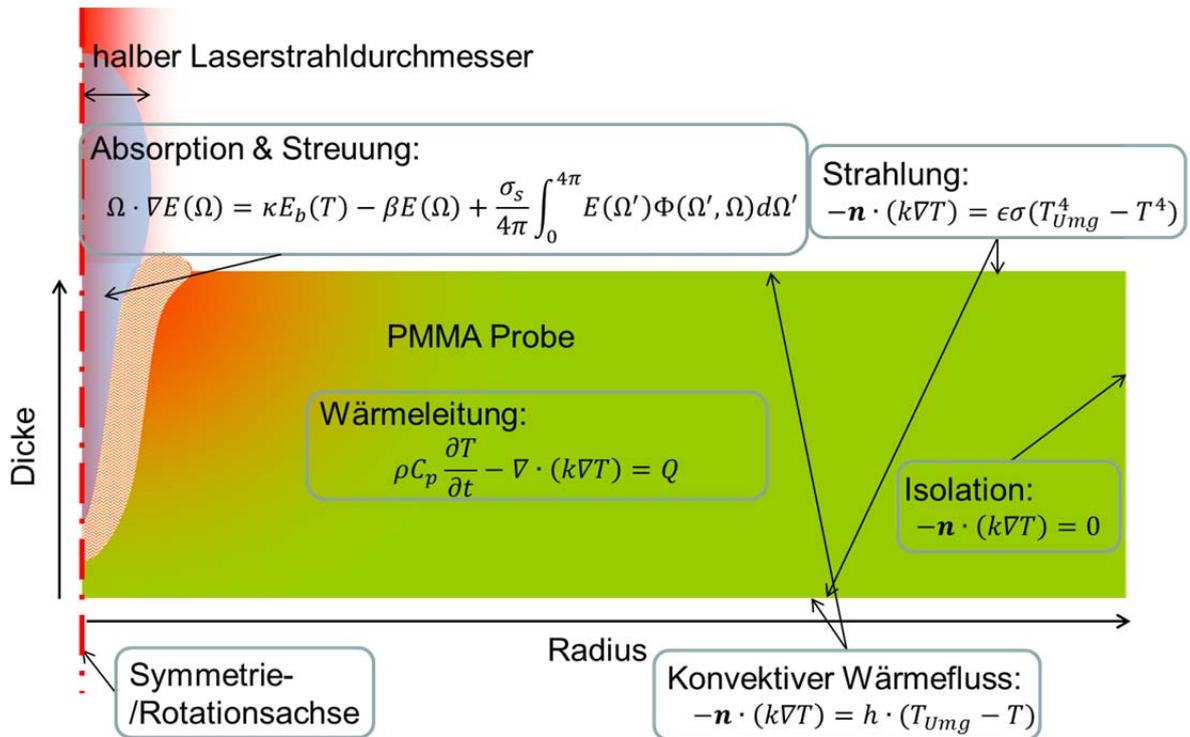


Abb. 7.3 Physikalische Prozesse bei der Laserbestrahlung von PMMA-Filtern

7.2.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung in homogenen Medien mit Wärmequelle wird allgemein durch die Differentialgleichung (Kuypers, 1996) (Marek, et al., 2012)

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \nabla \cdot [k \cdot \nabla T(\vec{r}, t)] + q_v(\vec{r}) \quad (7.1)$$

beschrieben. Dabei ist ρ die Dichte, C_p die spezifische Wärmekapazität, T die Temperatur, k die Wärmeleitfähigkeit, q_v der pro Volumen eingebrachte Wärmefluss und ∇ der Nabla-Operator $(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$.

7.2.2 Wärmestrahlung

Die vom Filterkörper abgestrahlte Wärmeleistung kann über das Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnet werden. Dieses besagt, dass sich die Strahlungsleistung \dot{Q} [W] in Abhängigkeit der Wärmeenergie Q [J], des Emissionsgrades ϵ ($0 < \epsilon < 1$ bei realen Materialien), der Stefan-Boltzmann-Konstante σ ($5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$), der strahlenden Fläche A und der Temperatur T zu

$$\dot{Q} = \frac{\partial Q}{\partial t} = \epsilon \sigma A T^4 \quad (7.2)$$

berechnet. Gleichzeitig nimmt der Laserschutzfilter auch Strahlung aus der Umgebung auf. Da der Emissionsgrad gleich dem Absorptionsgrad des Laserschutzfilter-

materials ist, kann die effektive Wärmestrahlungsleistung eines Gegenstandes in einem Raum mit Umgebungstemperatur $T_{Umgebung}$ durch die Gleichung

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A (T^4 - T_{Umgebung}^4) \quad (7.3)$$

beschrieben werden.

7.2.3 Konvektiver Wärmefluss

Außer durch Abstrahlung kann Wärmeenergie auch durch Konvektion vom Laserschutzfilter abgeführt werden. Dieser Wärmeabfluss wird durch

$$q = h \cdot (T - T_{Umgebung}) \quad (7.4)$$

beschrieben. Dabei ist q der Wärmefluss, h der Wärmeübergangskoeffizient, T die Temperatur und $T_{Umgebung}$ die Umgebungstemperatur. Dies bedeutet, dass der durch die Luftströmung an der Probenoberfläche bedingte Wärmetransport durch den Wärmeübergangskoeffizienten charakterisiert wird. Dazu gehören sowohl die freie Konvektion, die durch die temperaturbedingte Dichteänderung entsteht, als auch auftretende Luftverwirbelungen.

7.2.4 Strahlungstransport in teiltransparenten Medien

Die Nd:YAG-Laserstrahlung mit der Wellenlänge 1064 nm wird nicht direkt vom Trägermaterial PMMA absorbiert, sondern wechselwirkt mit dem Farbfüllstoff im Laserschutzfilter. Dieser absorbierende Farbfüllstoff wird bereits bei Temperaturen unterhalb der Schmelz-/Verdampfungstemperatur von PMMA zersetzt und kann deshalb die Laserstrahlung bei dieser Wellenlänge dann nicht mehr absorbieren, obwohl das Trägermaterial (PMMA, gering absorbierend im nahen Infrarot-Wellenlängenbereich) noch vorhanden ist. Diese Zersetzungstemperatur liegt bei circa 240°C (Frind, 2014). Bei der Zersetzung des Farbfüllstoffs zeigt sich im Laserschutzfilter ein Aufschäum-Effekt (siehe Abb. 7.15). In dem aufgeschäumten Material wird die Laserstrahlung mehrfach gebrochen, was eine Streuung des Laserlichts bedeutet. Die Streuung in teiltransparenten Medien kann mithilfe der Transportgleichung für Strahlung beschrieben werden und lautet wie folgt:

$$\Omega \cdot \nabla E(\Omega) = \kappa E_b(T) - \beta E(\Omega) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} E(\Omega') \Phi(\Omega', \Omega) d\Omega' \quad (7.5)$$

Dabei ist $E(\Omega)$ die Bestrahlungsstärke in Raumrichtung Ω , ∇ der Nabla-Operator $(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$, κ der Absorptionskoeffizient, σ_s der Streukoeffizient, $\beta = \kappa + \sigma_s$ der Extinktionskoeffizient und $\Phi(\Omega', \Omega)$ die Phasenfunktion, welche die Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass ein Strahl aus der Richtung Ω' in Richtung Ω gestreut wird. Außerdem ist E_b die Schwarzkörper-Bestrahlungsstärke und es gilt

$$E_b(T) = \frac{n^2 \sigma T^4}{\pi} \quad (7.6)$$

wobei n der Brechungsindex, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ die Stefan-Boltzmann-Konstante, π die Kreiszahl und T die Temperatur ist.

Abb. 7.4 zeigt schematisch, welche optischen Prozesse innerhalb des Laserschutzfilters beim Laserbeschuss in der Simulation berücksichtigt werden.

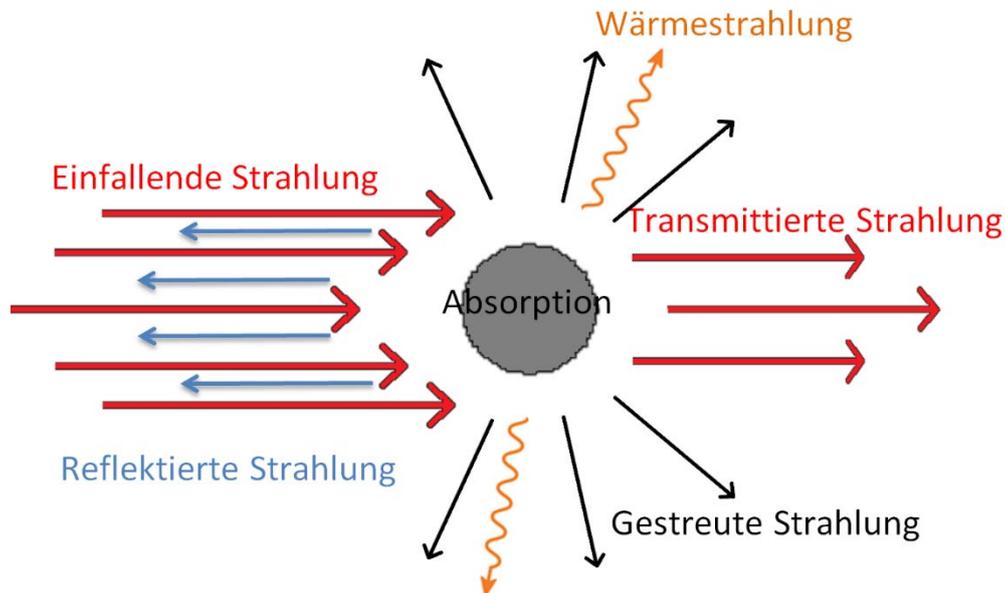


Abb. 7.4 Schematische Darstellung der simulierten physikalischen Prozesse

7.3 Simulation CO₂-Laserbeschuss auf PMMA-Laserschutzfilter

7.3.1 Physikalisches Modell

Für die Simulation der Filterstandzeit bei CO₂-Laserbestrahlung wurde für die Probe eine zweidimensionale, rotationssymmetrische Geometrie mit Radius $r = 30$ mm und der Dicke $d = 3$ mm definiert. Die Materialeigenschaften der PMMA-Laserschutzfilter sind in Abschnitt 7.1 aufgeführt. In diesem Modell wird die Wärmeleitung im Material, die Wärmestrahlung an die Umgebung und ein Teil des konvektiven Wärmeflusses abgebildet. Der konvektive Wärmefluss wird nur als Randbedingung für die Probengeometrie berücksichtigt, da somit die Luftströmung nicht zusätzlich berechnet werden muss, wodurch die Rechenzeit für die Simulation reduziert wird. Dies ist möglich, da die Konvektion in diesem physikalischen Modell nur einen geringen Einfluss hat. Der Phasenübergang von fest zu gasförmig kann als direkter Übergang, also ohne eine flüssige Phase, angenommen werden (Frind, 2014). Die Wechselwirkung von Laserstrahl und Materialprobe wird als Wärmequelle auf der Oberfläche mit einer Gaußverteilung implementiert.

7.3.1.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung im Material wird durch

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (7.7)$$

beschrieben. Da die Wärmequelle statisch auf der Oberfläche der Geometrie sitzt und ihre Position nicht verändert, wenn Material verdampft ist, wurde eine richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit $k(T)$ eingeführt. Diese wird mit Erreichen der Verdampfungstemperatur in Strahlrichtung erhöht und senkrecht dazu verringert und hat im zweidimensionalen Fall folgende Gestalt:

$$k(T) = \begin{pmatrix} k_0 \cdot (1 - 0,9 \cdot h(T)) & 0 \\ 0 & k_0 \cdot (1 + 100 \cdot h(T)) \end{pmatrix} \quad (7.8)$$

Die Funktion $h(T)$ beschreibt den Phasenübergang von fest zu gasförmig. Diese Funktion ist 0, wenn das Material fest ist und 1, wenn das Material verdampft ist. Der Phasenübergang erstreckt sich über den Temperaturbereich von T_A bis T_B , weshalb zwischen diesen Temperaturen bei der Funktion $h^*(T)$ linear interpoliert wird. Aus numerischen Stabilitätsgründen wurde die Funktion mit der zweimal stetig differenzierbaren COMSOL-Funktion `flc2hs` implementiert (siehe Abb. 7.5 oder für nähere Informationen COMSOL Reference Manual).

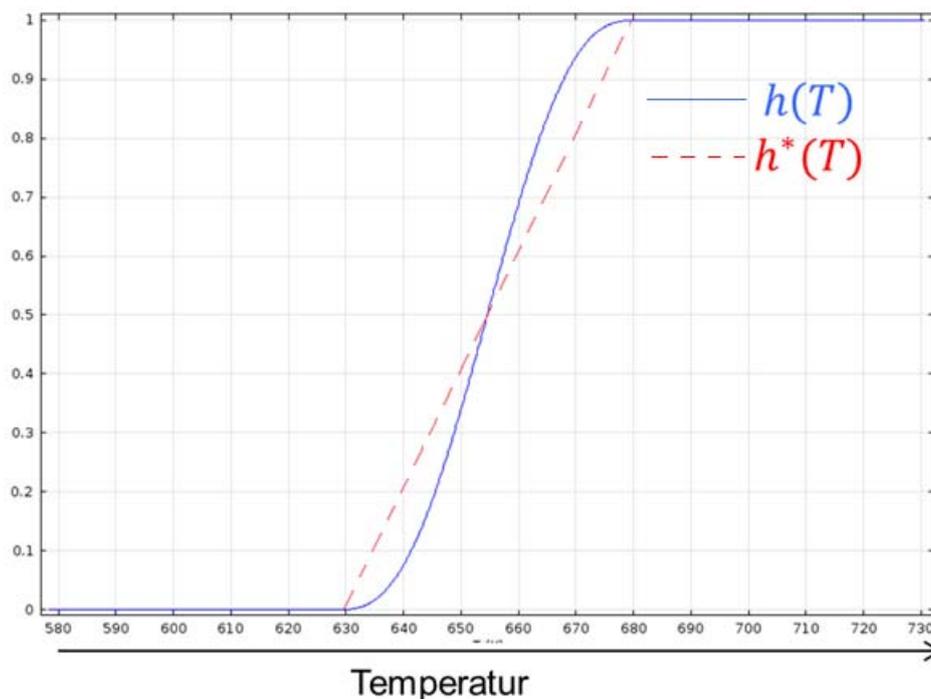


Abb. 7.5 Phasenübergangsfunktion $h(T)$

Die gestrichelte Linie in Abb. 7.5 stellt die folgende Funktion dar:

$$h^*(T) = \frac{T - T_{Start}}{T_{End} - T_{Start}} \cdot (H(T - T_{Start}) \cdot H(T_{End} - T) + H(T - T_{End})) \quad (7.9)$$

Bei der Simulation in COMSOL wurde folgende zweifach differenzierbare Funktion verwendet, um den Simulationsberechnungen numerische Stabilität zu geben:

$$h^*(T) \approx h(T) = flc2hs\left(T - \frac{T_{End} + T_{Start}}{2}, \frac{T_{End} - T_{Start}}{2}\right) \quad (7.10)$$

7.3.1.2 Dichte

Um die Dichteänderung während des Verdampfens zu berücksichtigen, ist die Dichte temperaturabhängig angenommen.

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot (1 - h(T)) + \rho_{Luft} \quad (7.11)$$

Da die Dichte von Luft im Vergleich zur Dichte des PMMA sehr gering ist, kann sie auch schon bei niedrigen Temperaturen einfach dazu addiert werden.

7.3.1.3 Wärmekapazität

Außer der spezifischen Wärmekapazität wurde in der Simulation auch die latente Wärme berücksichtigt. Bei Temperaturen über der Verdampfungstemperatur wird die Wärmekapazität auf den Wert für Luft gesetzt.

$$C_p(T) = C_{p,0} + \frac{dh(T)}{dT} \cdot \Delta h_{Latent} \quad \text{für } T \leq T_{End} \quad (7.12)$$

$$C_p(T) = C_{p,Luft} \quad \text{für } T > T_{End} \text{ (PMMA verdampft)} \quad (7.13)$$

7.3.1.4 Anfangs- und Randbedingungen

Neben den physikalischen Prozessen, die durch eine Differenzialgleichung beschrieben werden, sind noch Anfangs- und Randbedingungen notwendig. Die verwendeten Anfangs- und Randbedingungen werden hier beschrieben:

Laserstrahl:

Der Laserstrahl kann auf Grund seiner Strahlqualität ($M^2 \sim 1,4$) als gaußförmig angenommen werden und wurde als Oberflächenwärmequelle mit den Parametern d_{63} und der Gesamtleistung P implementiert.

Strahlungsenergie:

Die Strahlungsenergie, die an die Umgebung abgegeben wird, wurde mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben.

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A \cdot (T_{Umgebung}^4 - T^4) \quad (7.14)$$

Konvektiver Wärmefluss:

Der Wärmeaustausch mit der Umgebung wurde, abgesehen von der Strahlung, in diesem Modell durch die Randbedingung

$$q = h \cdot (T_{Umgebung} - T) \quad (7.15)$$

berücksichtigt.

Anfangswerte:

Als einziger Anfangswert muss die Anfangstemperatur der Probe festgelegt werden. Dieser wurde gleich der Umgebungstemperatur auf

$$T_A = T_{Umgebung} = 20^\circ \text{C} \quad (7.16)$$

gesetzt.

7.3.1.5 Abbruchkriterium

Die Filterstandzeit wurde in der Simulation als diejenige Zeit definiert, bei der die Temperatur auf der nicht beschossenen Seite (Augenseite) in einem bestimmten Abstand zur Strahlachse die Verdampfungstemperatur erreicht hat. Diese Durchmesser (d_{\max} , d_{\min}) wurden bei den Versuchsproben gemessen. Da die Austrittslöcher oval sind (wegen gerichteter Absaugung bei der Versuchsdurchführung), mit den Halbachsen $d_{\max}/2$ und $d_{\min}/2$ (siehe Abb. 7.6), wurde das Abbruchkriterium jedes Mal bei zwei Durchmessern überprüft. Hier am Beispiel von $d_{63} = 1 \text{ mm}$ in Tab. 7.3 dargestellt.

Tab. 7.3 Unterschiedliche Lochdurchmesser auf der Augenseite des Filters bei Strahldurchmesser $d_{63} = 1 \text{ mm}$

Laserstrahldurchmesser d_{63}	1 mm
d_{\max}	0,501 mm
d_{\min}	0,363 mm
mittlerer Lochdurchmesser Augenseite	0,432 mm

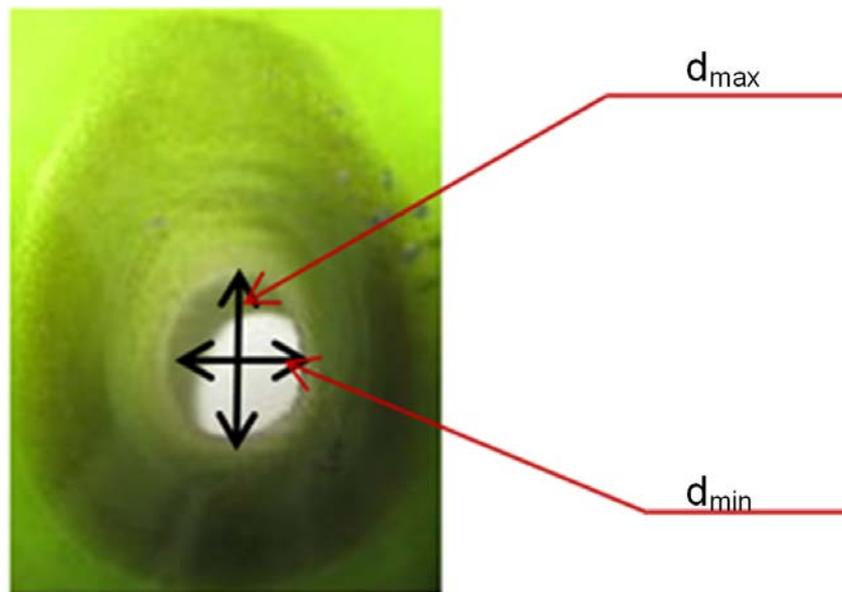


Abb. 7.6 Austrittsloch eines CO₂-Laserbeschusses auf der Augenseite eines PMMA-Filters

7.3.1.6 Geometrie und Netzstruktur der Simulation

Wie oben bereits beschrieben, wurde eine zweidimensionale, rotationssymmetrische Geometrie für die Simulation gewählt, um bei geringerem Rechenaufwand genauere Simulationsergebnisse zu erzielen. Um den Simulationsrechenaufwand weiter zu verringern, wurde das Simulationsnetz im Bereich der Einwirkzone des Laserstrahls (wo große Temperaturgradienten vorliegen) feinmaschiger gewählt und in den weit vom Laserstrahl entfernten Bereichen des Laserschutzfilters grobmaschig, wie in Abb. 7.7 zu sehen ist.

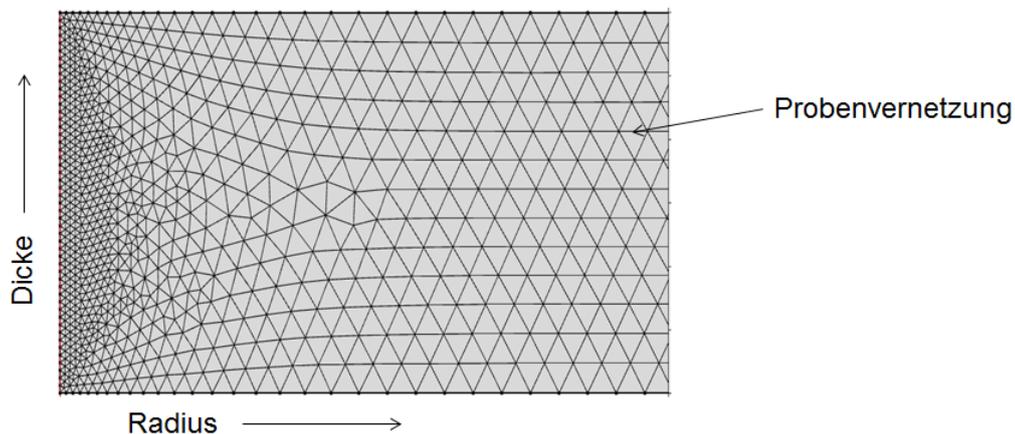


Abb. 7.7 Ausschnitt des Simulationsnetzes um die Laserstrahleinwirkzone

Die Qualität der Simulationsergebnisse kann auf die Netzqualität zurückgeführt werden. Die Netzqualität hängt von den einzelnen Elementqualitäten Q in der Summe ab. Bei der Netzqualität handelt es sich um eine Kenngröße für die Vernetzung, sie hat somit einen Einfluss auf die numerische Stabilität der Simulation. Es werden Einflüsse wie die Winkel zwischen den Kanten und die Größe benachbarter Elemente

berücksichtigt. Eine Möglichkeit, die Elementqualität Q in zwei Dimensionen und einer Dreieckvernetzung zu definieren, zeigt folgende Gleichung

$$Q = \frac{4 \cdot \sqrt{3} \cdot A}{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2} \quad (7.17)$$

mit den Bezeichnungen aus Abb. 7.8.

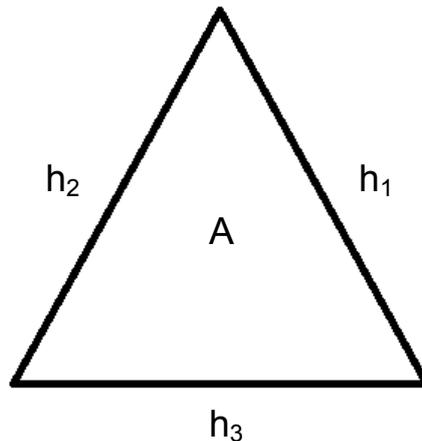


Abb. 7.8 Dreieck zur Verdeutlichung der Definition der Netzqualität

Daraus folgt beispielsweise für ein Element mit gleich langen Seiten h_1 , h_2 und h_3 die Elementqualität $Q = 1$ (sehr gut).

Zur Veranschaulichung, warum eine zweidimensionale Geometrie verwendet wurde, ist in Tab. 7.4 die Anzahl der Elemente sowie die minimale und die durchschnittliche Elementqualität angegeben. In Abb. 7.9 und Abb. 7.10 sind Histogramme der Elementqualität in zwei und drei Dimensionen dargestellt, welche zeigen, wie häufig Elemente einer bestimmten Qualität in der gesamten Geometrie vorkommen. Dabei ist eine Elementqualität von 1 sehr gut, Elemente mit einer Qualität nahe 0 führen zu numerischer Instabilität. Daraus kann abgelesen werden, dass die durchschnittliche und minimale Elementqualität in zwei Raumdimensionen wesentlich größer ist und somit zu numerisch stabileren Ergebnissen führt. Außerdem ist die Anzahl der Elemente in drei Dimensionen deutlich größer, was zu längeren Rechenzeiten führt.

Tab. 7.4 Kenngrößen zur Netzqualität

	zweidimensionale Geometrie	dreidimensionale Geometrie
Anzahl der Elemente	~4.000	~40.000
minimale Elementqualität	~0,75	~0,17
durchschnittliche Elementqualität	~0,98	~0,76

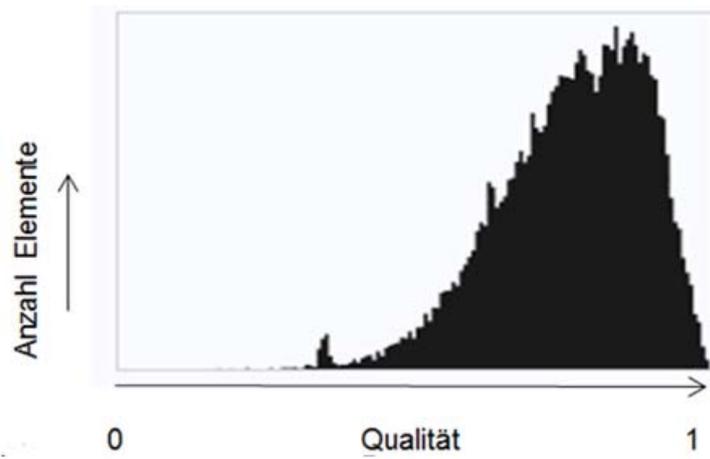


Abb. 7.9 Histogramm zur Elementqualität bei 3-D Geometrie



Abb. 7.10 Histogramm zur Elementqualität bei 2-D Geometrie

7.3.2 Ergebnisse und Diskussion Simulation CO2-Laserbeschuss

Abb. 7.11 und Abb. 7.12 stellen die Ergebnisse der Simulation den experimentellen Ergebnissen gegenüber.

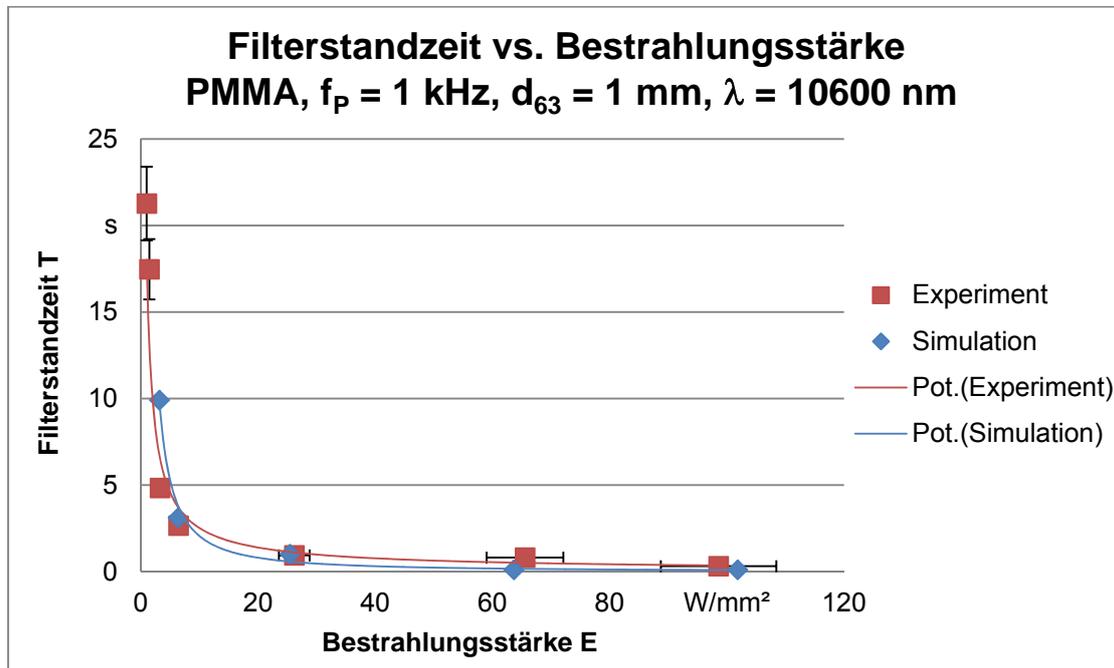


Abb. 7.11 Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 10600 nm und $d_{63} = 1$ mm

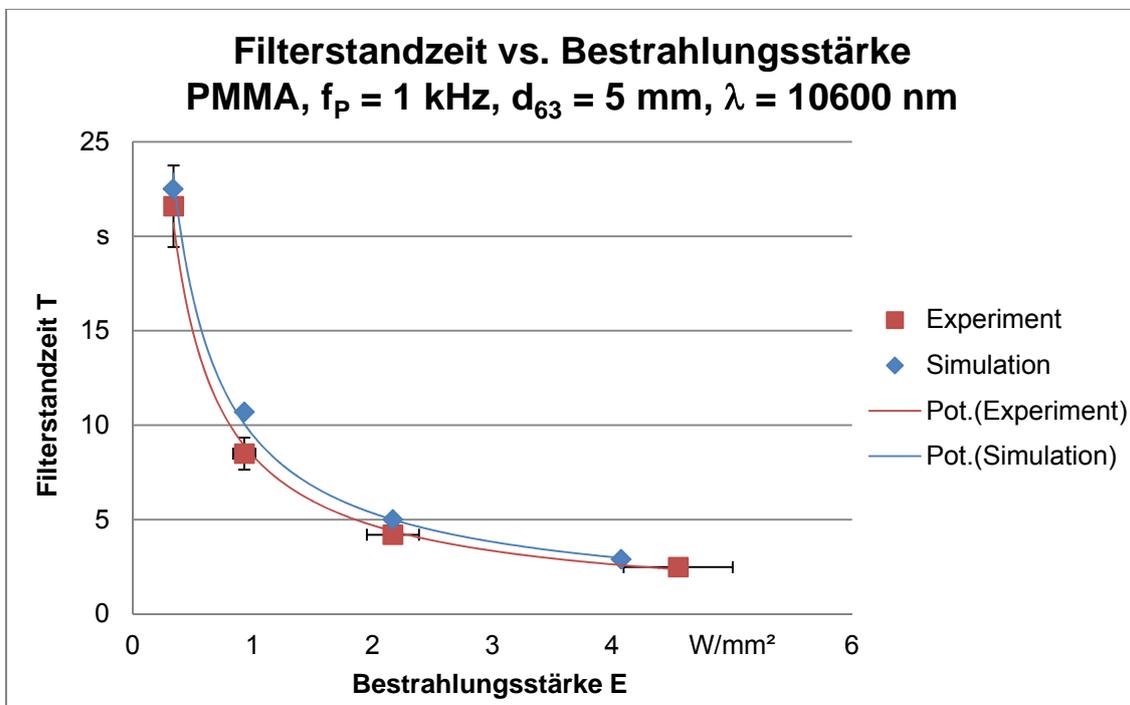


Abb. 7.12 Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 10600 nm und $d_{63} = 5$ mm

Aus den experimentellen Ergebnissen wurde durch die Methode der kleinsten Quadrate eine zulässige Bestrahlungsstärke für 5 s Standzeit ermittelt. Durch die Simulation wurden Filterstandzeiten simuliert und daraus wiederum zulässige Bestrahlungsstärkewerte berechnet. Diese zulässigen Bestrahlungsstärken sowie die nach Gleichung 5.3 bestimmten Überhöhungswerte sind in Tab. 7.5 zusammengefasst.

Tab. 7.5 Zulässige Bestrahlungsstärken (aus den Simulationsergebnissen) für 5 s Filterstandzeit und Überhöhungswerte in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser für PMMA-Filter bei 10600 nm

Strahldurchmesser d_{63} in mm	zulässige Bestrahlungs- stärke E in W/mm^2	Überhöhungswerte $F(d_{63})$
0,5	12,7	0,52
1	6,6	1,0
2	3,4	1,9
3	2,8	2,3
5	2,4	2,8
7	2,1	3,2

Abb. 7.13 stellt die durch Simulation berechnete Überhöhungsfunktion der experimentell ermittelten Überhöhungsfunktion gegenüber.

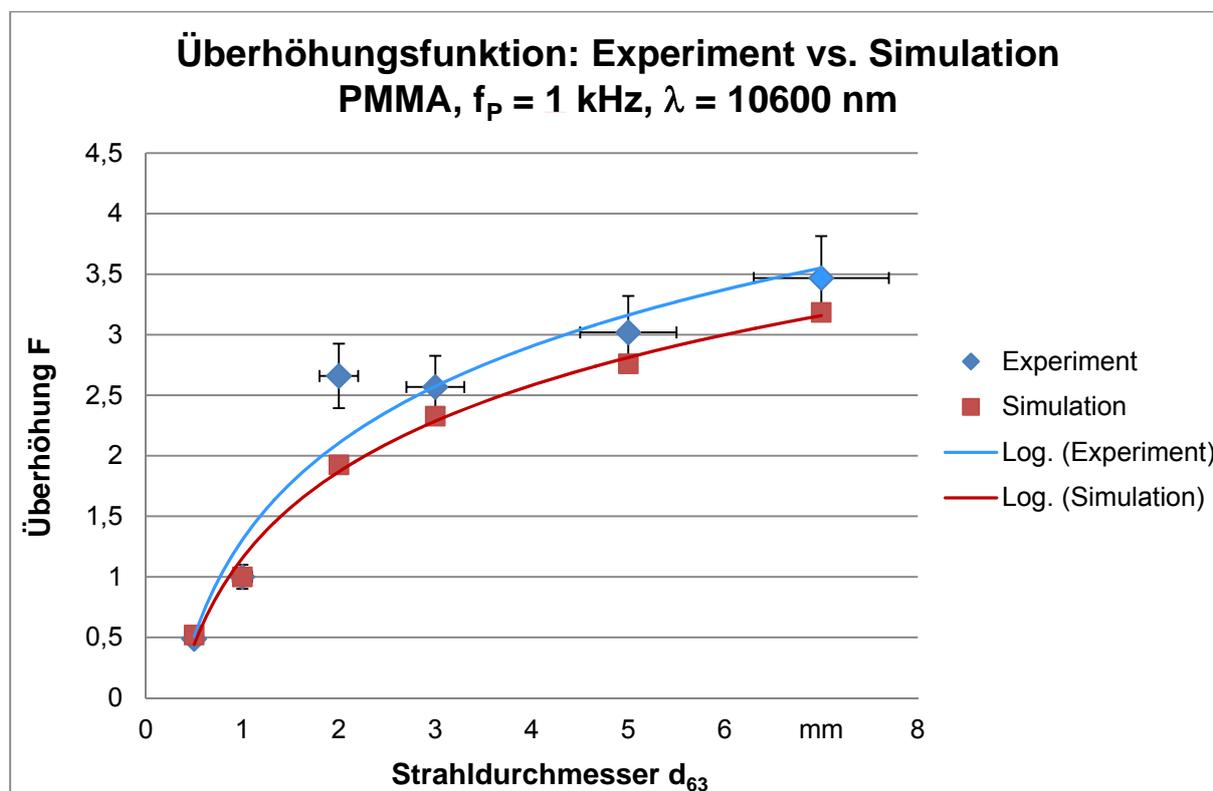


Abb. 7.13 Aus Simulation und Experiment resultierende Überhöhungsfunktionen für PMMA-Filter bei 10600 nm im Vergleich

Die gute Übereinstimmung der Ergebnisse von Simulation und Experiment in Abb. 7.13 lässt den Schluss zu, dass es im Simulationsmodell gelungen ist, die wesentlichen physikalischen Effekte zu erfassen. Zudem darf als bestätigt angesehen werden, dass der Energie- bzw. Wärmeübergang an die Umgebung durch turbulente Luftströmungen keinen entscheidenden Einfluss auf die Standzeit hat. Auf Grund der vorhandenen experimentellen Daten konnte das Modell bei verschiedenen Strahldurchmessern und verschiedenen Laserleistungen im Rahmen der vorliegenden Messgenauigkeit verifiziert werden. Es liegt die Vermutung nahe, dass dieses Modell seine Gültigkeit auch bei unterschiedlichen Materialparametern (z. B. spez. Wärmekapazität, Verdampfungstemperatur oder Wärmeleitfähigkeit) behält. Sobald neben dem Materialabtrag ein weiterer Schädigungsmechanismus auftritt, verliert dieses Modell seine Gültigkeit (z. B. wegen Streueffekten im Filtermaterial).

7.4 Simulation cw-Nd:YAG-Laserbeschuss auf PMMA-Laserschutzfilter

7.4.1 Physikalisches Modell

Das physikalische Modell für die Simulation der Bestrahlung mit dem cw-Nd:YAG-Laser (1064 nm) ist am oben beschriebenen Modell der Bestrahlung mit dem CO₂-Laser (10600 nm) angelehnt. Die Laserstrahlung wird jedoch nicht mehr als Oberflächenwärmequelle implementiert, sondern als eine Wärmequelle über die Strahlungstransportgleichung für teiltransparente bzw. teilabsorbierende Medien berechnet. Dabei stellt die absorbierte Strahlungsleistung die Wärmequelle im Material dar. Da das Versagen des Laserschutzfilters nicht mit einem Durchschuss, sondern der Zerstörung des Farbfüllstoffs verbunden ist, wie in Abb. 7.15 gezeigt ist, wird ein anderes Abbruchkriterium gewählt.

7.4.1.1 Strahlungstransport

Die Ausbreitung der Strahlung innerhalb des Materials wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla E(\boldsymbol{\Omega}) = \kappa E_b(T) - \beta E(\boldsymbol{\Omega}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} E(\boldsymbol{\Omega}') \Phi(\boldsymbol{\Omega}', \boldsymbol{\Omega}) d\boldsymbol{\Omega}' \quad (7.18)$$

7.4.1.2 Abbruchkriterium

Da bei den experimentellen Versuchen mit Nd:YAG-Laserstrahlung beim Filterversagen kein Loch erkennbar ist, sondern der Farbfüllstoff im Material zersetzt wird und sich die Struktur verändert, wird die Temperatur auf der Probenrückseite nicht mehr als Abbruchkriterium herangezogen, sondern die transmittierte Strahlungsleistung P_{Trans} auf der Augenseite berechnet. Übersteigt dieser Wert die Auslöseschwelle des LaserSpy[®]-Sensors, wird die Standzeit gespeichert und die Simulation beendet. Mathematisch kann dies als

$$P_{Trans} = \int_0^{r_{PMMA}} E(r, z = 0) \cdot 2\pi r dr \geq P_{Auslöse} \quad (7.19)$$

dargestellt werden. Dabei ist r_{PMMA} der Radius der PMMA-Probe, $E(r, z = 0)$ die Bestrahlungsstärke auf der Probenrückseite und $P_{Auslöse}$ die Leistung, bei der der MZB-

Wert überschritten ist, bzw. im Experiment die Leistung, bei der der LaserSpy[®]-Sensor auslöst.

7.4.1.3 Wärmekapazität

Um die Zersetzung des Farbfüllstoffes im Filtermaterial zu berücksichtigen, wurde zusätzlich zur thermodynamischen spezifischen Wärmekapazität und der latenten Wärme des Phasenübergangs eine latente Wärme eingeführt, welche die endotherme Zersetzung des Farbfüllstoffes simuliert. Die gesamte Wärmekapazität lautet dann für

$$T \leq T_{End}: \quad C_p(T) = C_{p,0} + \frac{dh(T)}{dT} \cdot \Delta h_{Latent} + \frac{dh_{Füllstoff}(T)}{dT} \cdot \Delta h_{Füllstoff} \quad (7.20)$$

und für

$$T > T_{End}(PMMA \text{ verdampft}): \quad C_p(T) = C_{p,Luft} \quad (7.21)$$

Hierbei ist $h_{Füllstoff}(T)$ eine Funktion, die grundsätzlich den gleichen Verlauf hat, wie die $h(T)$ -Funktion (siehe Abb. 7.5), mit dem Unterschied, dass sie bereits bei der Zersetzungstemperatur des Farbfüllstoffes ansteigt. Das Produkt aus der Ableitung dieser Funktion und $\Delta h_{Füllstoff}$ ist diejenige Energie, die benötigt wird, um den Farbfüllstoff zu zersetzen.

7.4.1.4 Absorptions- und Streukoeffizient

Um die physikalischen Gegebenheiten und die Veränderung der Materialparameter durch den Laserbeschuss mit zu berücksichtigen, sind die Größen Streukoeffizient σ_s und Absorptionskoeffizient κ (kappa in Abb. 7.14) abhängig von der eingestrahlenen Bestrahlungsstärke bzw. der Temperatur. PMMA als Trägermaterial der Laserschutzfilter ist für Licht der Wellenlänge 1064 nm nahezu transparent (Frind, 2014). Folglich wird die Laserstrahlung hauptsächlich durch den Farbfüllstoff im Laserschutzfilter absorbiert. Da der Farbfüllstoff sich ab ca. 250°C zersetzt, sinkt der Absorptionskoeffizient wie in Abb. 7.14 dargestellt im Bereich der Zersetzungstemperatur auf null ab.

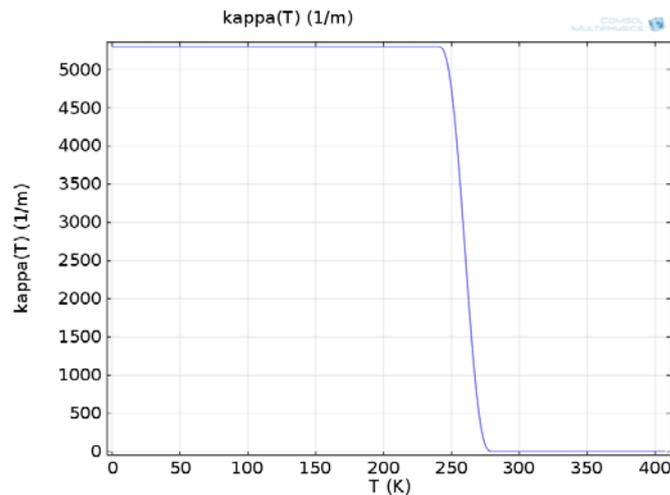


Abb. 7.14 Angenommener Verlauf des temperaturabhängigen Absorptionskoeffizienten für das verwendete PMMA-Laserschutzfiltermaterial

Wie in den Querschliffen durch die bestrahlten Stellen der PMMA-Filter in Abb. 7.15 zu erkennen ist, nimmt das Schadensausmaß bei höheren Bestrahlungsstärken zu und es bilden sich mehr Blasen und größere Hohlräume im Material aus. Die entstandenen Blasen und Hohlräume wirken als Streuzentren für den auftreffenden Laserstrahl. Daraus folgt, dass der Streukoeffizient mit der Bestrahlungsstärke ansteigt.

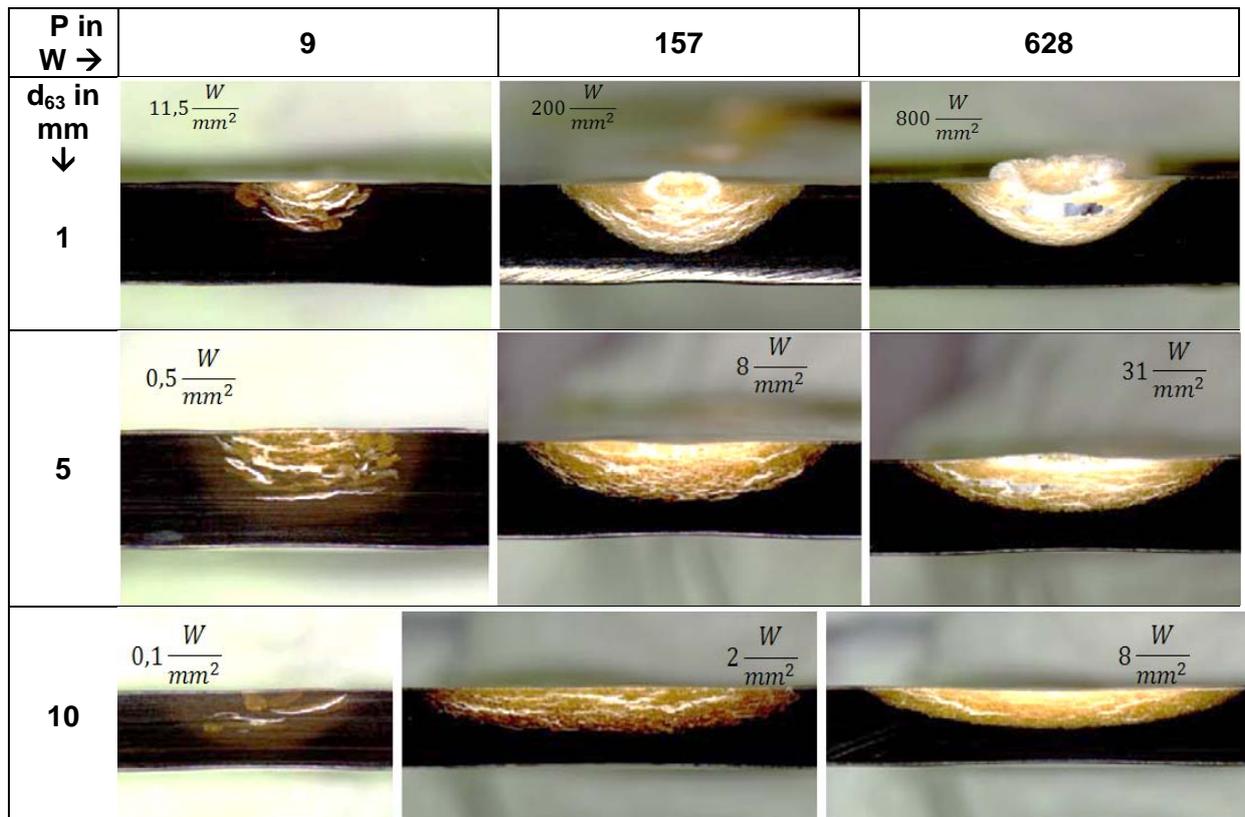


Abb. 7.15 Querschnitte an PMMA-Filtern durch die Beschussstellen mit unterschiedlichen Strahldurchmessern und Laserleistungen bei 1064 nm

Da der Effekt der Hohlraumbildung vermutlich nicht beliebig zunimmt, sondern in eine Sättigung übergeht, bleibt der Streukoeffizient ab einer gewissen Bestrahlungsstärke (ab ca. 15 W/mm²) konstant. Aus diesem Grund wurde der Streukoeffizient abhängig von der eingestrahlichten Bestrahlungsstärke wie in Abb. 7.16 angesetzt.

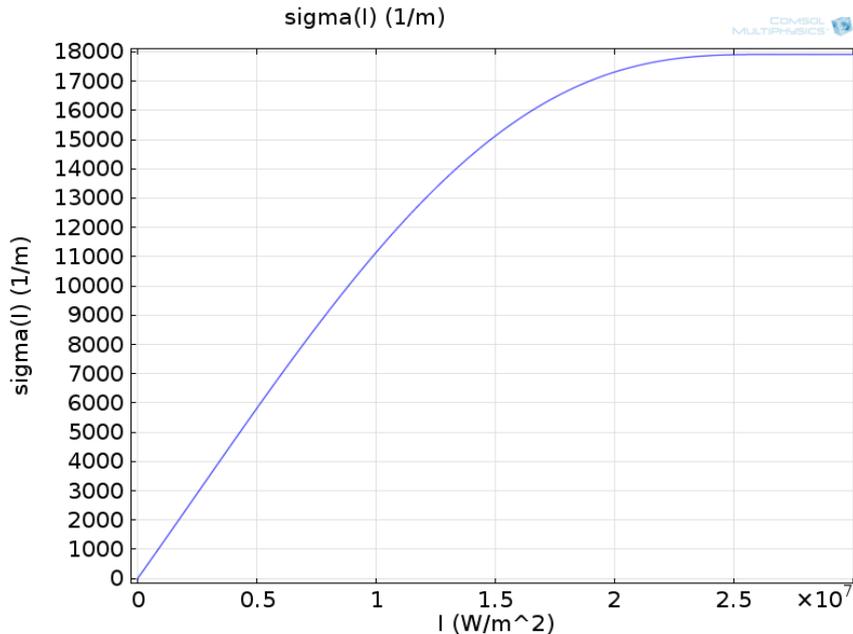


Abb. 7.16 Angenommener Verlauf des Streukoeffizienten in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke für das verwendete PMMA-Laserschutzfiltermaterial

7.4.2 Ergebnisse und Diskussion - Simulation cw-Nd:YAG-Laserbeschuss

Im Fokus der Simulation stand die Untersuchung der Filterstandzeit T bei verschiedenen Strahldurchmessern d_{63} in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke E . Der Verlauf der Simulationsergebnisse folgt, wie auch im Experiment, einer Funktion der Form

$$T(E) = a(d_{63}) \cdot E^{-b(d_{63})} \quad (7.22)$$

mit unterschiedlichen Konstanten $a(d_{63})$ und $b(d_{63})$ bei den verschiedenen Strahldurchmessern. Die folgenden Abbildungen stellen die Ergebnisse der Simulation den experimentell ermittelten Standzeiten vergleichend gegenüber.

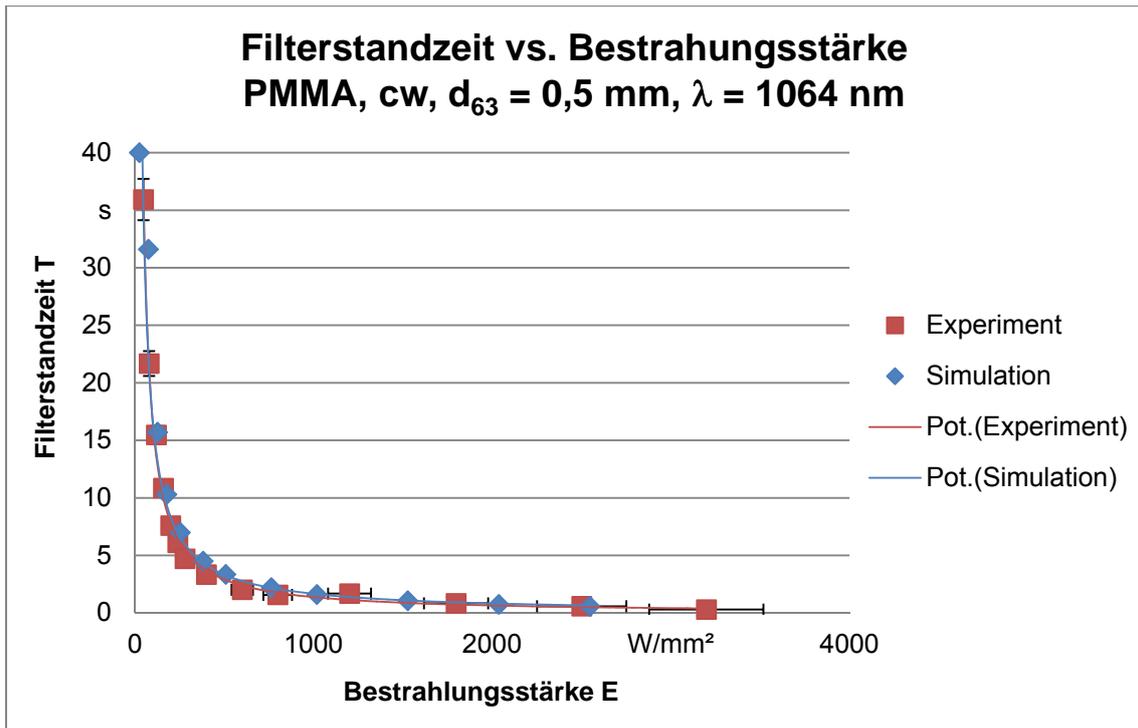


Abb. 7.17 Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 0,5 \text{ mm}$

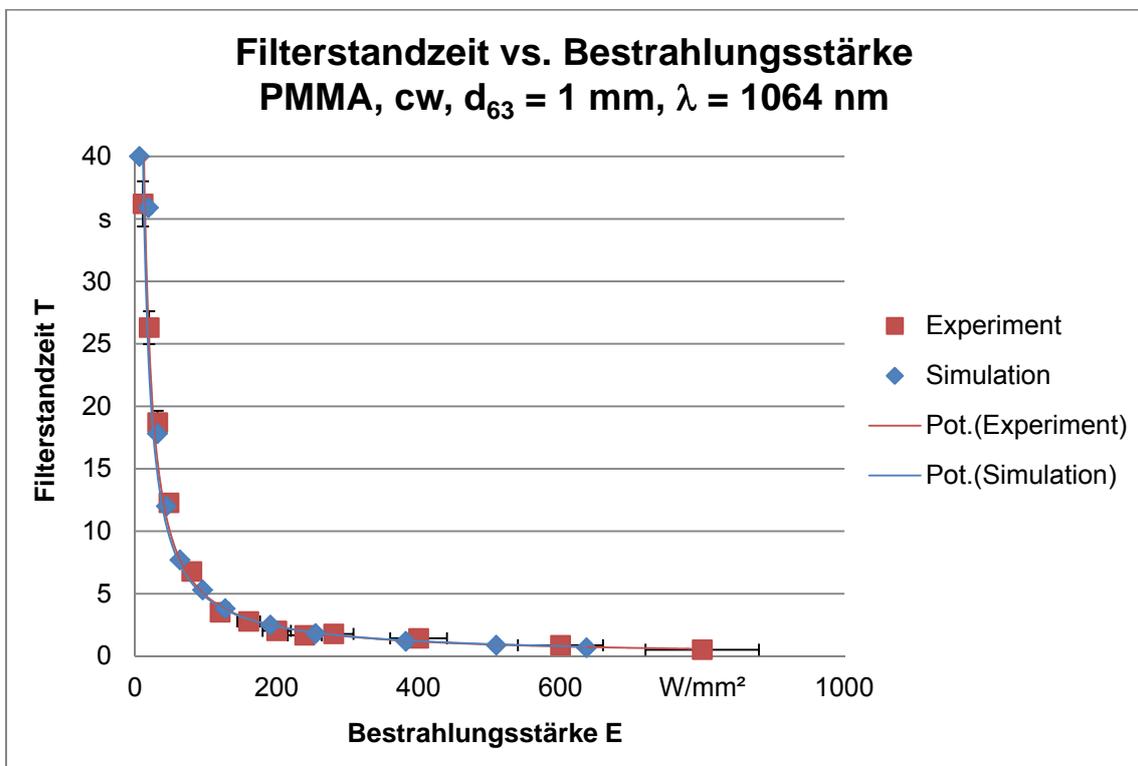


Abb. 7.18 Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 1 \text{ mm}$

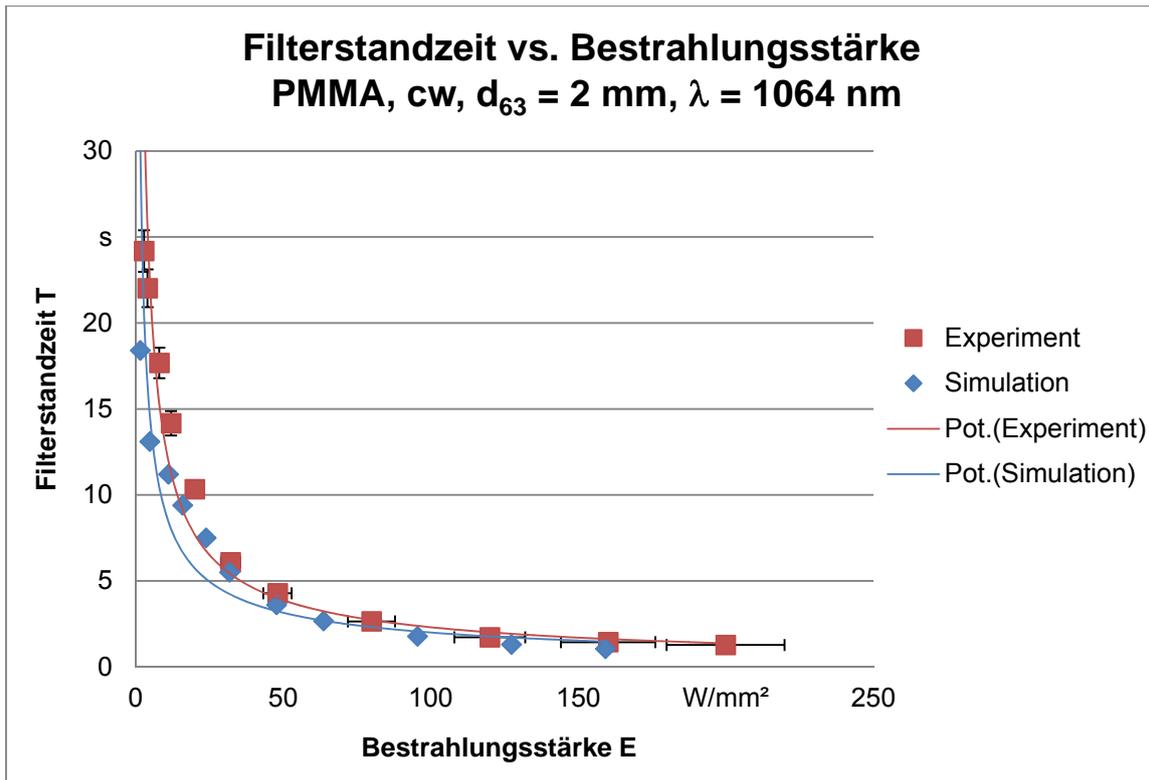


Abb. 7.19 Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 2 \text{ mm}$

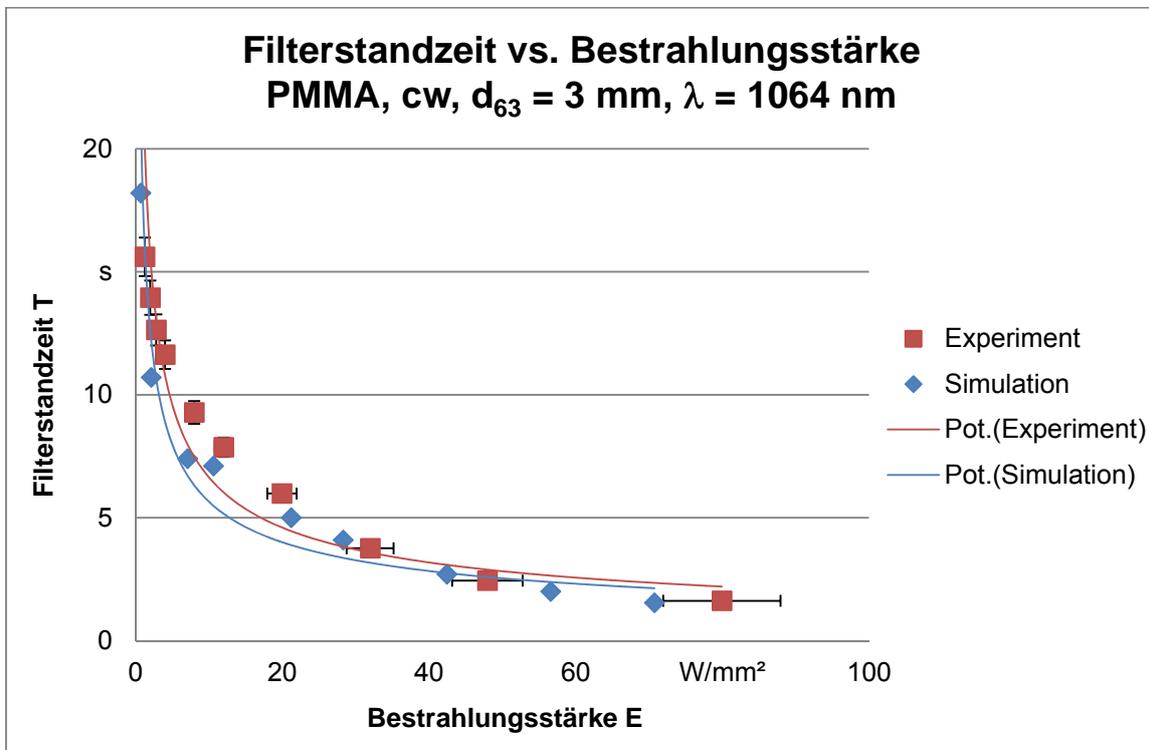


Abb. 7.20 Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 3 \text{ mm}$

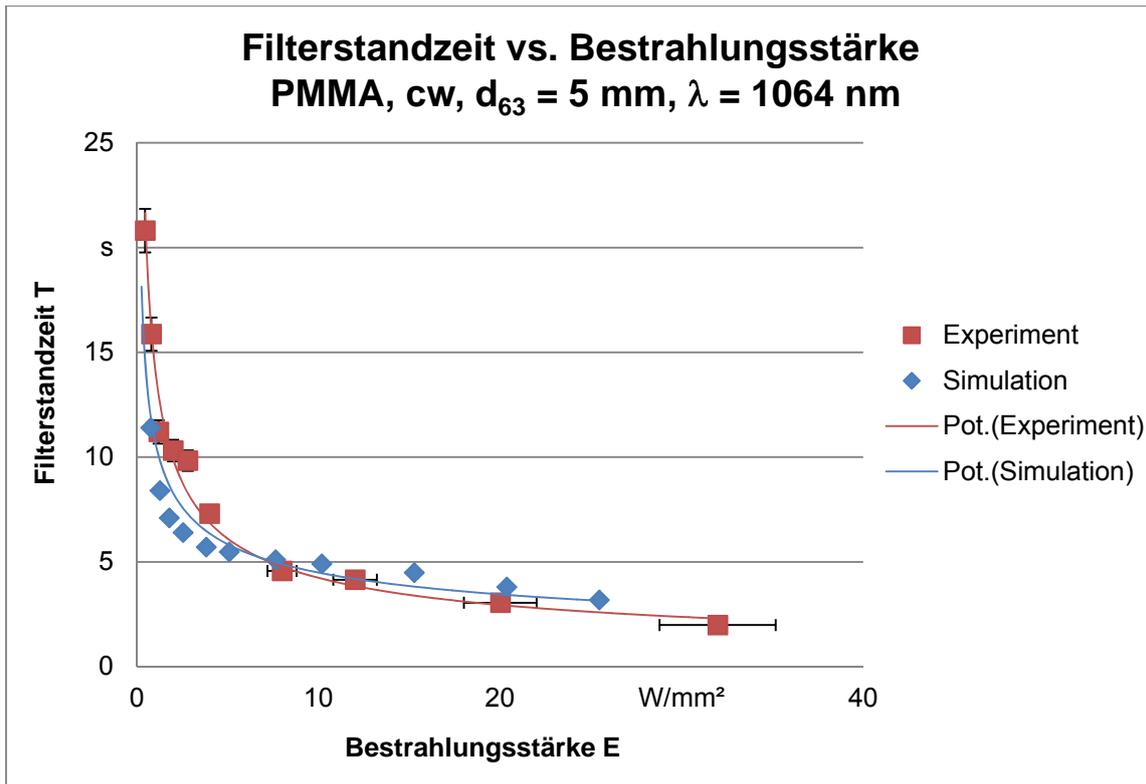


Abb. 7.21 Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 5 \text{ mm}$

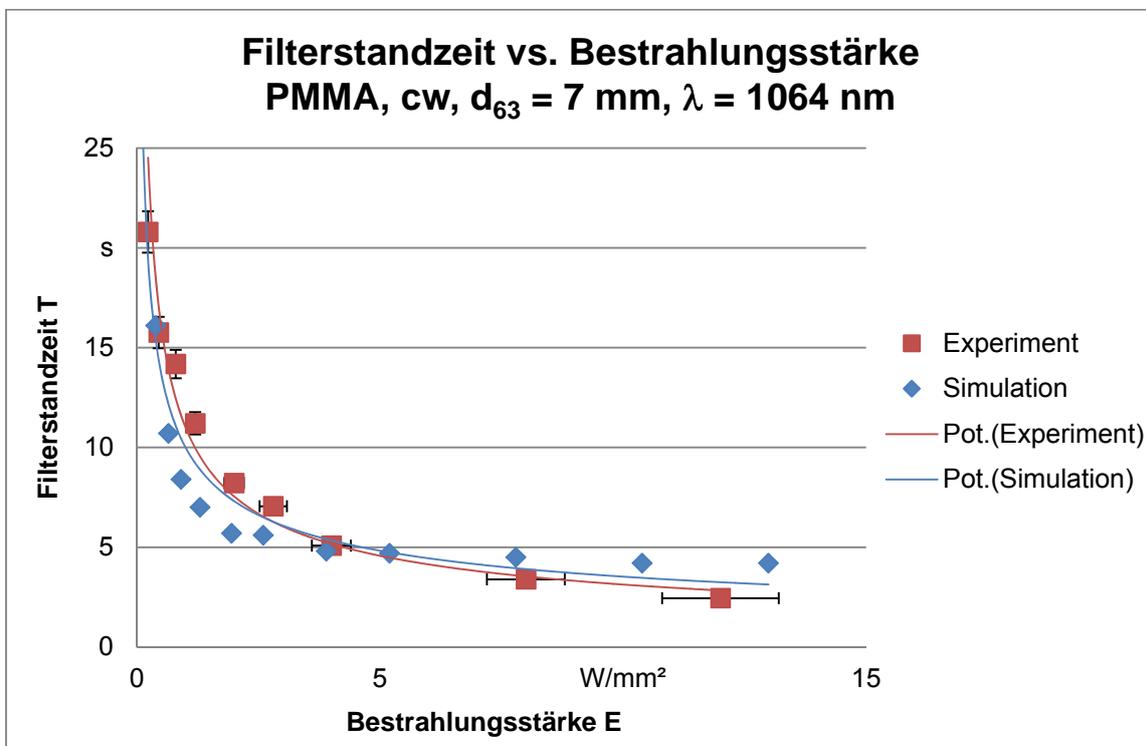


Abb. 7.22 Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 7 \text{ mm}$

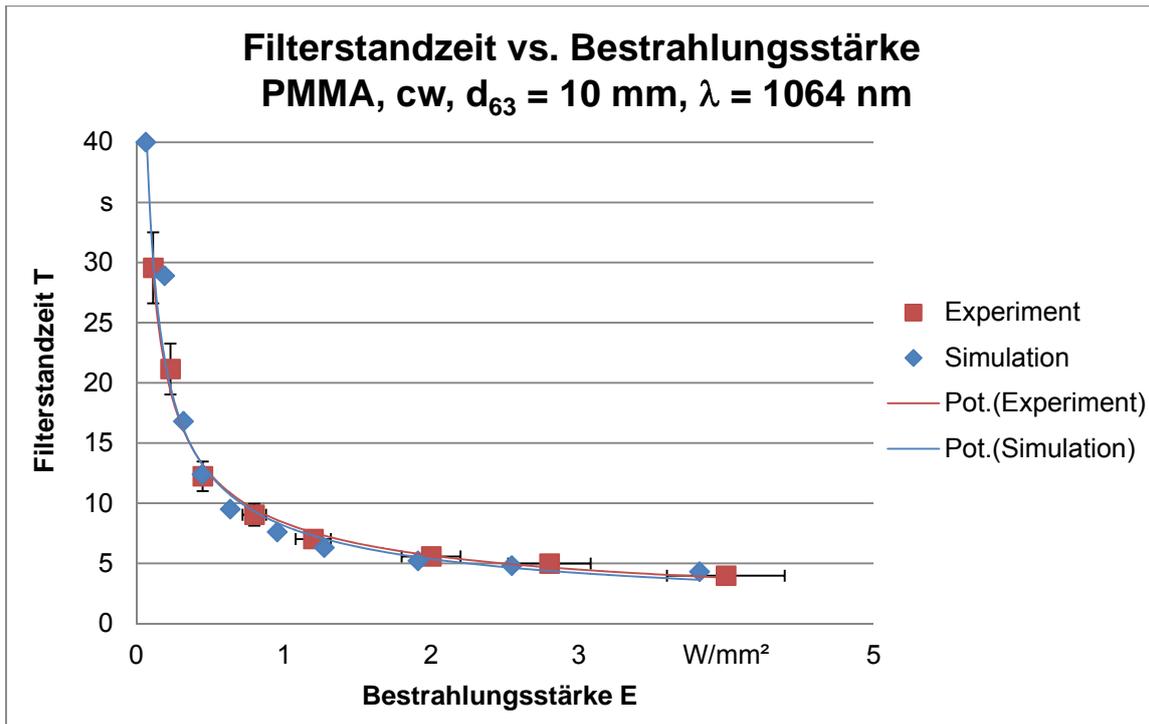


Abb. 7.23 Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 10$ mm

Aus diesen Fitkurven kann die maximal zulässige Bestrahlungsstärke E bestimmt werden, indem in die Gleichung 7.22 für die Filterstandzeit T 5 Sekunden eingesetzt und nach der Bestrahlungsstärke aufgelöst wird.

$$5[s] = a \cdot E_{Max}^{-b} \quad (7.23)$$

$$\rightarrow E_{Max} = \left(\frac{a}{5[s]} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Es ergeben sich die in Tab. 7.6 angegebenen zulässige Bestrahlungsstärken und nach Gl. 4.2 bestimmten Überhöhungswerte aus der Simulationsrechnung.

Tab. 7.6 Zulässige Bestrahlungsstärken für 5 s Filterstandzeit und Überhöhungswerte in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser für PMMA-Filter bei 1064 nm (Simulationsrechnung)

Strahldurchmesser d_{63} in mm	zulässige Bestrahlungsstärke E_{Max} in W/mm^2	$F(d_{63})$
0,5	302,6	0,3
1	97,0	1,0
2	24,7	3,8
3	12,8	7,4
5	7,6	12,5
7	4,6	20,3
10	2,5	41,9

Abb. 7.24 stellt die durch Simulation berechnete Überhöhungsfunktion der experimentell ermittelten Überhöhungsfunktion gegenüber.

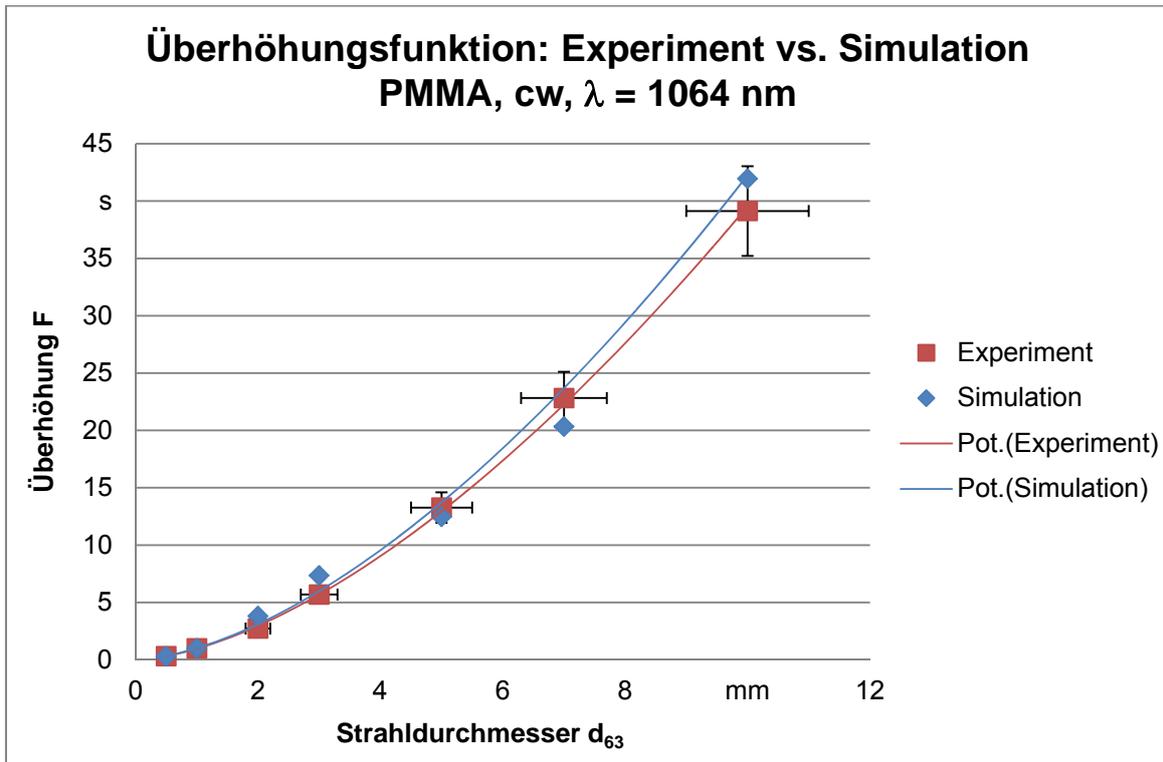


Abb. 7.24 Aus Simulation und Experiment resultierende Überhöhungsfunktionen für PMMA-Filter für cw-Laserbetrieb bei 1064 nm im Vergleich

Durch den Ansatz, dass der Streukoeffizient abhängig von der Bestrahlungsstärke ist, konnte die beim cw-Nd:YAG-Laser experimentell gefundene Potenzfunktion der Überhöhung in der Simulation nachgebildet werden. Der Verlauf des Streukoeffizienten wurde empirisch ermittelt. Somit wird deutlich, dass die Filterstandzeiten aus Simulation und Experiment gut übereinstimmen. Außerdem kann anhand der Schliffbilder der Verlauf des Streukoeffizienten nachvollzogen werden.

8 Handlungsanleitung für den Benutzer

Ausgehend von den in den vorherigen Kapiteln dargestellten Strahldurchmesserabhängigkeiten wird die im Folgenden beschriebene Handlungsempfehlung für die Auswahl der erforderlichen Brillenschutzstufe durch den Benutzer vorgeschlagen. Für die Schutzstufenermittlung bei Dauerstrichlasern (Laserbetriebsart D) und für die mittlere Leistung gepulster Laser (Laserbetriebsarten I, R und M) soll wie folgt vorgegangen werden:

Eine D-Schutzstufe ist für alle Dauerstrichlaser sowie für alle wiederholt gepulsten Laser zu ermitteln. Für gepulste Laser ist zusätzlich zu den Anforderungen im gepulsten Betrieb die im Mittel abgegebene Laserleistung (P_m) zur Berechnung der D-Schutzstufe anzuwenden.

Die Bestrahlungsstärke E bzw. E_m des Laserstrahls errechnet sich aus der Laserleistung P bzw. P_m und der Strahlquerschnittsfläche A wie folgt:

$$E = \frac{P}{A} \quad ; \quad E_m = \frac{P_m}{A} \quad (8.1)$$

Ist der zu erwartende Strahldurchmesser d_{63} auf der Laserschutzbrille > 1 mm und ist die Laserleistung P bzw. P_m größer als 10 W oder der Wert der Bestrahlungsstärke E bzw. E_m größer als 10^5 W/m², dann ist im Wellenlängenbereich von 315 nm bis 1 mm ein zusätzlicher Korrekturfaktor $F(d_{63})$ anzuwenden. Dieser Korrekturfaktor wird durch eine Überhöhungsfunktion ermittelt, welche mit dem tatsächlich zugänglichen Durchmesser berechnet wird. Der Korrekturfaktor ist dabei stark von den eingesetzten Filtermaterialien, dem Aufbau sowie der Dicke des Schutzproduktes abhängig. Ist die tatsächlich vorliegende Überhöhungsfunktion nicht bekannt, dann ist im Durchmesserbereich d_{63} größer 1 mm der Korrekturfaktor $F(d_{63})$ wie folgt zu berechnen:

$$F(d_{63}) = (d_{63} \text{ in mm})^{1,7} \quad \text{für } 1 \text{ mm} < d_{63} \leq 15 \text{ mm und}$$

$$F(d_{63}) = 100 \quad \text{für } d_{63} > 15 \text{ mm}$$

Die korrigierte Bestrahlungsstärke E' zur Auswahl der erforderlichen Brillenschutzstufe erhält man dann durch:

$$E' = E \cdot F(d_{63}) \quad (8.2)$$

Der Korrekturfaktor $F(d_{63})$, wie oben angegeben, wurde in der Arbeitsgemeinschaft zur Überarbeitung der BGI 5092 (Auswahl und Benutzung von Laser-Schutz- und Justierbrillen) auf Basis der Ergebnisse des vorliegenden BAuA-Projektes F 2335 als Worst Case Fall definiert. Für Wellenlängen unterhalb 315 nm liegen derzeit noch keine Ergebnisse vor. Durch die Definition der unteren Grenze für die Anwendung der Korrekturfunktion bei einer Bestrahlungsstärke von 10^5 W/m² kann es im Einzelfall zu größeren Sprüngen bei der Schutzstufe (bis zu drei Schutzstufen) an eben dieser Grenze kommen. Hier ist ggfs. eine Einzelfallbetrachtung der tatsächlich vorliegenden Gefährdung erforderlich.

Beispiel für die Ermittlung der erforderlichen Brillenschutzstufe:

Ein Dauerstrichlaser (cw) hat folgende Laserparameter:

Wellenlänge: 1064 nm
 max. Laserleistung: 100 W
 zugänglicher Strahldurchmesser: 7 mm

Welche Anforderungen ergeben sich für einen Laserschutzfilter?

1. Bestimmung der Anforderungen an die Laserbeständigkeit (Gleichung 8.1)

$$E = \frac{P}{A} = \frac{100 \text{ W}}{\pi \cdot \frac{0,007^2}{4}} = 18198 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Korrekturfaktor:

$$F(d_{63}) = d_{63}^{1,7} = 7^{1,7} = 27,33$$

Korrigierte Energiedichte für die Auswahl der Schutzstufe nach Gleichung 8.2:

$$E' = E \cdot F(d_{63}) = 18198 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 27,33 = 497351 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

2. Bestimmung der erforderlichen Schutzstufe anhand der Norm EN 207 führt in diesem Fall zu einer Schutzstufe D LB5.

9 Zusammenfassung

Die bei den Untersuchungen an PMMA-Schutzfiltern mit Laserstrahlung der Wellenlängen 1064 nm (Nd:YAG-Laser) und 10600 nm (CO₂-Laser) ermittelten Standzeiten konnten durch Finite-Elemente-Simulationen mit COMSOL Multiphysics[®] nachgebildet und die potenzförmige Überhöhungsfunktion beim cw-Nd:YAG-Laser sowie die logarithmusartige Überhöhungsfunktion beim CO₂-Laser verifiziert werden. Aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation kann davon ausgegangen werden, dass Effekte, die in der Simulation nicht berücksichtigt wurden, wie beispielsweise die Absaugung des Laserrauchs mit den damit hervorgerufenen Luftverwirbelungen, in den untersuchten Fällen keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Überhöhungsfunktionen haben. Außerdem zeigen die Ergebnisse der Simulationen, dass die thermischen Materialparameter, wie etwa die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeübergangsrandbedingungen, zwar die absoluten Standzeiten bei den verschiedenen Strahldurchmessern ändern, aber ansonsten die Überhöhungsfunktionen wenig beeinflussen.

Die ablaufenden Prozesse sind bei den CO₂-Standzeitversuchen an PMMA-Filtern einfacher zu verstehen und zu simulieren als bei den cw-Nd:YAG-Standzeitversuchen, da das Filtermaterial direkt verdampft und die Laserstrahlung nicht wie beim Nd:YAG-Laser im aufgeschäumten Material gestreut wird, was zu einer komplexeren Betrachtung der Strahl-Stoff-Wechselwirkung in der Simulation führt. Die von der Bestrahlungsstärke abhängige Streuung der Laserstrahlung im bestrahlten Probenbereich im Falle der cw-Nd:YAG-Standzeitversuche, in dem der Farbstoff zersetzt und das Trägermaterial aufgeschäumt wird, bedingt den deutlichen Unterschied im Verlauf der Überhöhungsfunktionen. Liegen für den CO₂-Laser die Überhöhungswerte für PMMA stets unterhalb von 10, erreichen diese beim cw-Nd:YAG-Laser Werte über 40. Für den gepulsten Nd:YAG Betrieb liegt eine mehr ablativ Wechselwirkung im Filtermaterial als im cw-Nd:YAG Betrieb vor, sodass hier die Überhöhungsfunktionswerte zwischen den vom cw-Nd:YAG Betrieb und den CO₂-Laser Betrieb liegen (siehe Abb. 6.1).

Weiterführende Standzeitversuche an einem anderen Filtermaterial (Cellulose Acetat CA) haben zudem gezeigt, dass die Überhöhungsfunktion nicht nur von der Wellenlänge und der Laserbetriebsart abhängt, sondern ebenso vom betrachteten Filtermaterial. Jedoch sind die ermittelten Überhöhungswerte für CA-Filter deutlich niedriger als für PMMA-Filter. Daher wurde der Laserbeschuss von PMMA-Filtermaterial mit dem cw-Nd:YAG-Laser als Worst Case Fall angenommen und zur Erstellung einer Handlungsanleitung für den Benutzer zur Auswahl einer geeigneten Laserschutzbrille herangezogen. Diese kann Hilfestellung in der Normungsarbeit und in der Erstellung von BGI-Schriften leisten.

10 Ausblick

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen belegen, dass die Wellenlänge und die Laserbetriebsart signifikanten Einfluss auf die Überhöhungswerte in Abhängigkeit des Laserstrahldurchmessers haben. Eine genauere Untersuchung der Streuung in dem mit cw-Nd:YAG-Laserstrahlung beaufschlagten Volumen des PMMA-Filters und eine Messung des Streukoeffizienten sollte zu einem noch besseren Verständnis der Laserstrahlwechselwirkung mit dem Filtermaterial und einer weiteren Optimierung der Simulation führen. Eine Weiterentwicklung des physikalischen Simulationsansatzes könnte es zudem ermöglichen, auch Standzeitversuche mit gepulster Nd:YAG-Laserstrahlung abzubilden. Dabei sollte keine statische Geometrie mehr verwendet werden, sondern ein Netz, das sich der aktuellen Form der Probe beim Laserbeschuss anpasst (sog. „Deformed Geometry“ Ansatz).

Weiterhin könnten experimentelle Untersuchungen im UV-Wellenlängenbereich sowie mit UKP-Laserstrahlquellen im ps- und fs-Pulsdauerbereich Aufschluss über Überhöhungseffekte in diesen bislang nicht betrachteten Wellenlängen- und Pulsdauerbereichen geben. Außerdem könnten die Untersuchungen auf weitere Laserschutzfiltermaterialien ausgedehnt und mögliche bislang nicht beachtete Einflussfaktoren wie Polarisation und Einfallswinkel der Laserstrahlung näher betrachtet werden.

Literaturverzeichnis

DIN EN 207:2012-04 Persönlicher Augenschutz - Filter und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung (Laserschutzbrillen) [Buch]. - Berlin : Beuth Verlag, 2012.

Datenblatt LaserSpy-Sensor reislasertec.de [Online]. - Reis Lasertec. - 16. 06 2014. - <http://www.reislasertec.de/de/produkte/lasersicherheitstechnik/laserspy-safety-sensor>.

DIN EN 207:2002-12 Persönlicher Augenschutz - Filter und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung (Laserschutzbrillen) [Buch]. - Berlin : Beuth Verlag, 2002.

DIN EN 60825-1:2008-05 Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen [Buch]. - Berlin : Beuth Verlag, 2008.

Frind Phillip Ermittlung der Materialkennwerte von Laserschutzfiltern aus PMMA [Bericht]. - Erlangen : BA-Arbeit, 2014.

Henderson R. und Schulmeister K. Laser Safety [Buch]. - Bristol : Institute of Physics Publishing, 2004.

Kuypers Friedhelm: Physik für Ingenieure [Buch]. - [s.l.] : VCH, 1996.

Marek R. und Nitsche K. Praxis der Wärmeübertragung [Buch]. - [s.l.] : Hanser, 2012.

Roshani B. Studying the Damage threshold of Laser safety materials According to European Norm for Laser Eye Safety, EN 207 [Bericht] : Master Thesis. - Hochschule Aalen : [s.n.], 2007.

Schmitz B. Testing and Assessment of Laser Safety Eyewear - The European Regulatory Framework [Buch]. - Orlando : Prox. of the Int. Laser Safety Cof. ILSC 2013, March 18-21, 2013.

Urmoneit U. [et al.] Influence of laser beam diameter on the resistance of laser protection filters to laser radiation [Journal] // Proc. of the 8th Int. conf. on Laser Assisted Net Shape Engineering LANE 2014. - [s.l.] : Elseviers Physics Procedia, 2014. - Bd. 56. - S. 1377-1383.

Welzel N. Untersuchungen zum Einfluss des Prüfstrahldurchmessers auf die Schädigung von optischem Filtermaterial bei Laserbelastungsprüfungen [Bericht] : Studienarbeit. - [s.l.] : Universität Erlangen-Nürnberg, 2009.

Zaeh M. F. und Braunreuther S. Kein sicherer Schutz: Lasersicherheit durch Laserschutzbrillen [Journal] // Der Praktiker. - 2011. - Bd. 62 (3). - S. 94-96.

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Laserbetriebsarten und Impulslängen nach DIN EN 207:2012-04	10
Tab. 2.2	Schutzstufen für Laserschutzbrillen nach DIN EN 207:2012-04	10
Tab. 3.1	Technische Daten der cw-Nd:YAG-Laserstrahlquelle	13
Tab. 3.2	Technische Daten der Faserlaser-Strahlquelle	14
Tab. 3.3	Technische Daten der gepulsten Nd:YAG-Laserstrahlquelle	15
Tab. 3.4	Technische Daten der gepulsten CO ₂ -Laserstrahlquelle	16
Tab. 3.5	Technische Daten der gepulsten Nd:YAG-Laserstrahlquelle (532 nm)	16
Tab. 3.6	Technische Spezifikationen des LaserSpy [®] -Sensors	17
Tab. 3.7	Spezifikation des Leistungsmesskopfs LM-1 IR	18
Tab. 3.8	Spezifikation des Leistungsmesskopfs LM-200	18
Tab. 3.9	Spezifikation des Halbleiterdetektormesskopfs LM-2	19
Tab. 3.10	Spezifikation des Leistungsmesskopfs LM-1000	19
Tab. 3.11	Spezifikation Wärmebildkamera ThermoCAM SC2000	20
Tab. 3.12	Spezifikation der Fotodiode BPW34	20
Tab. 3.13	Spezifikation des Oszilloskops TDM2024B	20
Tab. 5.1	Überhöhungswerte ÜW für unterschiedliche Laserstrahldurchmesser d_{63}	46
Tab. 5.2	Ergebnisse der Beschussversuche an PMMA-Filtern mit dem cw-Faserlaser mit einem Strahldurchmesser von 18 mm	62
Tab. 7.1	Zu ermittelnde thermische, mechanische und optische Materialkennwerte für die verwendeten PMMA-Laserschutzfilter als Eingangsgrößen für die geplante Simulation	65
Tab. 7.2	Ermittelte Materialkennwerte für die verwendeten PMMA-Laserschutz-filter im Vergleich zu Literaturwerten für PMMA	66
Tab. 7.3	Unterschiedliche Lochdurchmesser auf der Augenseite des Filters bei Strahldurchmesser $d_{63} = 1$ mm	73
Tab. 7.4	Kenngößen zur Netzqualität	75
Tab. 7.5	Zulässige Bestrahlungsstärken (aus den Simulationsergebnissen) für 5 s Filterstandzeit und Überhöhungswerte in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser für PMMA-Filter bei 10600 nm	78
Tab. 7.6	Zulässige Bestrahlungsstärken für 5 s Filterstandzeit und Überhöhungswerte in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser für PMMA-Filter bei 1064 nm (Simulationsrechnung)	86

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	cw-Nd:YAG-Laserstrahlquelle QY-1000D der Fa. HAAS Laser	13
Abb. 3.2	cw Ytterbium-Faserlaser-Strahlquelle YLR - 8000-R der Fa. IPG Laser	14
Abb. 3.3	Gepulste Nd:YAG-Laserstrahlquelle HL 204 P der Fa. TRUMPF	15
Abb. 3.4	Gepulste CO ₂ -Laserstrahlquelle Diamond K150 der Fa. Coherent	15
Abb. 3.5	Frequenzverdoppelte Nd:YAG-Laserstrahlquelle ORC 1000 der Fa. Clark	16
Abb. 3.6	Fotodioden-Ensemble des LaserSpy©-Sensors	17
Abb. 3.7	Leistungsmesskopf LM-1 IR der Fa. Coherent	18
Abb. 3.8	Streuscheibe DG10-120, Thorlabs	19
Abb. 3.9	Intensitätsverteilung Streuscheibe DG10-120	19
Abb. 3.10	Aufbau des Laserstrahlabschwächers für die Wellenlänge 1064 nm	21
Abb. 3.11	Aufgebauter Stahlabschwächer	22
Abb. 3.12	Schematische Darstellung des Messaufbaus mit LaserSpy©-Sensor zur Bestimmung der Standzeit von Laserschutzfiltern bei 1064 nm	23
Abb. 3.13	Experimenteller Aufbau zur Standzeitmessung an Laserschutzfiltern bei 1064 nm	23
Abb. 3.14	Schematische Darstellung des CO ₂ -Laser-Messaufbaus zur Bestimmung der Filterstandzeit bei 10600 nm	24
Abb. 3.15	Realisierter Messaufbau mit CO ₂ -Laser	24
Abb. 3.16	Messaufbau mit CO ₂ -Laser für Standzeitversuche mit 10 Hz Pulsfrequenz	25
Abb. 3.17	Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Bestimmung der Filterstandzeit bei 532 nm	26
Abb. 3.18	Filterstandzeitmessung mit dem gepulsten Nd:YAG-Laser bei 532 nm	26
Abb. 3.19	Messaufbau mit Faserlaser am iwib, TU München; robotergeführte Fokussieroptik mit Brennweite 300 mm	27
Abb. 3.20	Versuchsordnung zur Standzeitermittlung am Faserlaser YLR-8000-R: entwickeltes SW-Fotopapier als Laserstrahlungsdetektor hinter der Probe platziert	27
Abb. 4.1	Laserstrahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 100$ mm) des cw-Nd:YAG-Lasers QY-1000D, gemessen mit FokusMonitor (Fa. Primes)	29
Abb. 4.2	Laserstrahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 100$ mm) des gepulsten Nd:YAG-Lasers HL 204 P, gemessen mit FokusMonitor (Fa. Primes)	30

Abb. 4.3	Leistungsdiagramm CO ₂ -Laser Diamond K150 bei verschiedenen Pulsperioden PP in Abhängigkeit der Pulsweite PW	31
Abb. 4.4	Strahlkaustik eines fokussierten Gaußstrahls (schematisch)	32
Abb. 4.5	Berechnete Strahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 190,5$ mm) der CO ₂ -Laserstrahlquelle Diamond K150	32
Abb. 4.6	Leistungsdiagramm frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser Clark ORC 1000 für cw- und gepulsten Betrieb mit unterschiedlichen Pulsfrequenzen	34
Abb. 4.7	Schematischer Versuchsaufbau der Blendenmessung zur Ermittlung des Rohstrahldurchmessers an der Strahlaustrittsöffnung des frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers ORC 1000	35
Abb. 4.8	Berechnete Strahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 215$ mm) der Nd:YAG-Laserstrahlquelle ORC 1000	35
Abb. 4.9	Laserstrahlkaustik der Fokussieroptik (Brennweite $f = 300$ mm) des cw- Faserlasers YLR - 8000-R, gemessen mit MikroSpot-Monitor (Primes)	36
Abb. 5.1	Filterstandzeit T über Laserleistung P für PMMA-Filter bei verschiedenen Laserstrahldurchmessern d_{63} im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm	38
Abb. 5.2	Filterstandzeit T über Bestrahlungsstärke E für PMMA-Filter bei verschiedenen Laserstrahldurchmessern d_{63} im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm (logarithmische Darstellung)	39
Abb. 5.3	Filterstandzeit T über der mittleren Laserleistung P für PMMA-Filter bei verschiedenen Laserstrahldurchmessern d_{63} im gepulsten Laserbetrieb mit 10 Hz bei 1064 nm	40
Abb. 5.4	Filterstandzeit T über Bestrahlungsstärke E für PMMA-Filter bei verschiedenen Laserstrahldurchmessern d_{63} im gepulsten Laserbetrieb mit 10 Hz bei 1064 nm (logarithmische Darstellung)	40
Abb. 5.5	Filterstandzeit T über Laserleistung P für unterschiedliche Filterdicken für 1 mm Laserstrahldurchmesser im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm	41
Abb. 5.6	Vervielfachung der Filterstandzeit durch größere Filterdicken bei 1 mm Laserstrahldurchmesser im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm	42
Abb. 5.7	Querschliff in PMMA durch die bestrahlte Stelle; Strahldurchmesser 1 mm; Laserleistung 157 W im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm; Bestrahlung bis zum Filterversagen (Unterbrechung des Lasersicherheitskreises durch den LaserSpy©-Sensor)	43
Abb. 5.8	Gemessene Temperaturverteilung an der Oberfläche eines PMMA-Filters während der Bestrahlung mit ca. 140 W Laserleistung und 10 mm Strahldurchmesser im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm	43
Abb. 5.9	Durchmesser der WEZ über der Laserleistung P für PMMA-Filter im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d_{63}	44

Abb. 5.10	Zulässige Laserleistung P für 5 s Filterstandzeit über dem Laserstrahldurchmesser d63 für PMMA-Filter im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm	45
Abb. 5.11	Zulässige Bestrahlungsstärke für 5 s Filterstandzeit über dem Laserstrahldurchmesser d63 für PMMA-Filter im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm	45
Abb. 5.12	Vergleich zwischen neu ermittelten Überhöhungsfunktionen für PMMA-Filter (Dicke 3 mm und 6 mm; 5 s Filterstandzeit; cw-Laserbetrieb bei 1064 nm) und aktueller Überhöhungsfunktion lt. DIN EN 207	47
Abb. 5.13	Aus unterschiedlichen Strahldurchmesserpaarungen ermittelte Überhöhungsfunktionen für PMMA-Filter (Dicke 3 mm; 5 s Filterstandzeit; cw-Laserbetrieb bei 1064 nm) im Vergleich	48
Abb. 5.14	Zulässige mittlere Laserleistung für 5 s Filterstandzeit über dem Strahldurchmesser für PMMA-Filter im gepulsten Laserbetrieb bei 1064 nm	49
Abb. 5.15	Zulässige mittl. Bestrahlungsstärke für 5 s Standzeit über dem Strahldurchmesser für PMMA-Filter im gepulsten Laserbetrieb bei 1064 nm	49
Abb. 5.16	Lineare Überhöhungsfunktion für PMMA-Filter (Dicke 3 mm; 5 s Filterstandzeit) im gepulsten Laserbetrieb mit 10 Hz bei 1064 nm	50
Abb. 5.17	Überhöhungsfunktionen der PMMA-Filter für cw- und gepulsten Laserbetrieb bei 1064 nm im Vergleich	51
Abb. 5.18	Filterstandzeit T über Laserleistung P für CA-Filter für verschiedene Laserstrahldurchmesser d63 im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm	52
Abb. 5.19	Überhöhungswerte (ÜW(d63), siehe Formel 5.3) für CA-Filter im cw-Laserbetrieb bei 1064 nm	52
Abb. 5.20	Schadensbilder der Standzeitversuche an CA-Filtern mit dem cw-Nd:YAG-Laser bei 1064 nm bei verschiedenen großen Strahldurchmessern	53
Abb. 5.21	PMMA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d63 bei der Pulsfrequenz 100 Hz bei 10600 nm	54
Abb. 5.22	PMMA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d63 bei der Pulsfrequenz 500 Hz bei 10600 nm	55
Abb. 5.23	PMMA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d63 bei der Pulsfrequenz 1 kHz bei 10600 nm	55
Abb. 5.24	PMMA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d63 bei der Pulsfrequenz 5 kHz bei 10600 nm	56

Abb. 5.25	PMMA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d_{63} bei der Pulsfrequenz 10 kHz bei 10600 nm	56
Abb. 5.26	Überhöhungsfunktionen für CO ₂ -Laserbestrahlung (10600 nm) von PMMA-Filtern für unterschiedliche Pulsfrequenzen f_p im Vergleich	57
Abb. 5.27	Massive Flammenbildung bei Laserbelastungsprüfungen am CO ₂ -Laser mit hoher Leistung und großem Strahldurchmesser	58
Abb. 5.28	Verbrannte PMMA-Probe nach Laserbelastungsprüfung mit hoher Leistung und großem Strahldurchmesser am CO ₂ -Laser	58
Abb. 5.29	CA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d_{63} bei der Pulsfrequenz 1000 Hz bei 10600 nm	59
Abb. 5.30	Überhöhungswerte für CA-Filter im gepulsten CO ₂ -Laserbetrieb bei der Pulsfrequenz 1000 Hz bei 10600 nm	59
Abb. 5.31	Schadensbilder von Standzeitversuchen an CA-Filtern mit dem CO ₂ -Laser bei einem Strahldurchmesser d_{63} von 10 mm bei 10600 nm	60
Abb. 5.32	PMMA-Filterstandzeit T über mittlerer Laserleistung P in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser d_{63} bei der Pulsfrequenz 5 kHz bei 532 nm	61
Abb. 5.33	Überhöhungswerte für PMMA-Filter im gepulsten Nd:YAG-Laserbetrieb bei der Pulsfrequenz 5 kHz bei 532 nm	61
Abb. 6.1	Überhöhungsfunktionen für PMMA-Filter im Vergleich	63
Abb. 7.1	PMMA-Filter links im Ausgangszustand, rechts nach Erhitzung auf 330°C	66
Abb. 7.2	Gemessene Temperaturverteilung an der Oberfläche eines PMMA-Filtern während der Nd:YAG-Laserbestrahlung mit 140 W Leistung und 10 mm Strahldurchmesser im cw-Betrieb	67
Abb. 7.3	Physikalische Prozesse bei der Laserbestrahlung von PMMA-Filtern	68
Abb. 7.4	Schematische Darstellung der simulierten physikalischen Prozesse	70
Abb. 7.5	Phasenübergangsfunktion $h(T)$	71
Abb. 7.6	Austrittsloch eines CO ₂ -Laserbeschusses auf der Augenseite eines PMMA-Filtern	74
Abb. 7.7	Ausschnitt des Simulationsnetzes um die Laserstrahleinwirkzone	74
Abb. 7.8	Dreieck zur Verdeutlichung der Definition der Netzqualität	75
Abb. 7.9	Histogramm zur Elementqualität bei 3-D Geometrie	76
Abb. 7.10	Histogramm zur Elementqualität bei 2-D Geometrie	76
Abb. 7.11	Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 10600 nm und $d_{63} = 1$ mm	77

Abb. 7.12	Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 10600 nm und $d_{63} = 5$ mm	77
Abb. 7.13	Aus Simulation und Experiment resultierende Überhöhungsfunktionen für PMMA-Filter bei 10600 nm im Vergleich	78
Abb. 7.14	Angenommener Verlauf des temperaturabhängigen Absorptionskoeffizienten für das verwendete PMMA-Laserschutzfiltermaterial	81
Abb. 7.15	Querschnitte an PMMA-Filtern durch die Beschussstellen mit unterschiedlichen Strahldurchmessern und Laserleistungen bei 1064 nm	81
Abb. 7.16	Angenommener Verlauf des Streukoeffizienten in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke für das verwendete PMMA-Laserschutzfiltermaterial	82
Abb. 7.17	Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 0,5$ mm	83
Abb. 7.18	Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 1$ mm	83
Abb. 7.19	Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 2$ mm	84
Abb. 7.20	Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 3$ mm	84
Abb. 7.21	Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 5$ mm	85
Abb. 7.22	Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 7$ mm	85
Abb. 7.23	Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Filterstandzeiten T bei verschiedenen Bestrahlungsstärken E für PMMA-Filter bei 1064 nm und $d_{63} = 10$ mm	86
Abb. 7.24	Aus Simulation und Experiment resultierende Überhöhungsfunktionen für PMMA-Filter für cw-Laserbetrieb bei 1064 nm im Vergleich	87

Danksagung

Die Autoren danken den Mitgliedern des Forschungsbegleitkreises Martin Brose (BG ETEM), Joachim Franek (Physik Ingenieurbüro Franek), Dr. Thomas Fröhlich (Laservision GmbH & Co. KG), Max Josef Graf (Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr), Florian Lugauer (Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München), Dr. Patrick Niklaus (DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH), Dr. Friedrich Offenhäuser (Offenhäuser + Berger GmbH), Prof. Dr. Hans-Dieter Reidenbach (Technische Hochschule Köln) und Dr. Bernhard Schmitz (ECS GmbH) für ihre wertvollen Anregungen und fachlichen Beiträge sowie die Bereitstellung von Proben für das Projekt. Herrn Marco Janßen (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin) danken die Autoren für die messtechnische Unterstützung mit der Wärmebildkamera.

Einen großen Anteil am Gelingen der Experimente und Auswertungen hatten die studentischen Hilfskräfte Philipp Frind (Bachelorarbeit), Adam Hotz (Masterarbeit), Christina Diercks (Bachelorarbeit), Jennifer Lutz (Praktikumsarbeit), Tom Schäfer (Praktikumsarbeit) und Manuel Dillmann (Praktikumsarbeit).