

Quarzglasfasern für die Übertragung von Excimerlaserpulsen hoher Leistung

Fused Silica Fibers for Transmitting High Power Excimer Laser Pulses

Martin Dressel, Walter Neu, Harald Gerhardt, Laser-Laboratorium Göttingen e.V., Im Hassel 21, D-3400 Göttingen

Eingegangen am 29. Mai 1990

Key words

UV fiber, excimer lasers, fused silica, transmission characteristics, damage threshold, laser induced damage, medical application

Abstract

There is a large number of excimer laser applications in scientific research and medicine by transmitting the high-power UV radiation through optical fibers. We report the transmission characteristics and laser induced damage for different fibers and wavelength (193 nm, 248 nm and 308 nm). The definition of damage threshold concerning optical fibers is discussed in detail. Finally a few medical applications of fiber guided excimer lasers are highlighted.

Kurzfassung

Die Übertragung von Excimerlaserpulsen über Quarzfasern fand die letzten Jahre in Forschung und Anwendung steigendes Interesse. Es werden erstmals vergleichende Messungen an unterschiedlichen Fasern vorgestellt und Vorschläge zur Vereinheitlichung des Verfahrens für die Bestimmung der Zerstörschwellen und Transmissionseigenschaften von optischen Fasern gemacht. Die Ergebnisse für 193 nm, 248 nm und 308 nm liefern Anhaltspunkte für die Verbesserung der Quarzfasern. Abschliessend wird auf einige neuere medizinische Anwendungen fasergeführter Excimerlaser eingegangen.

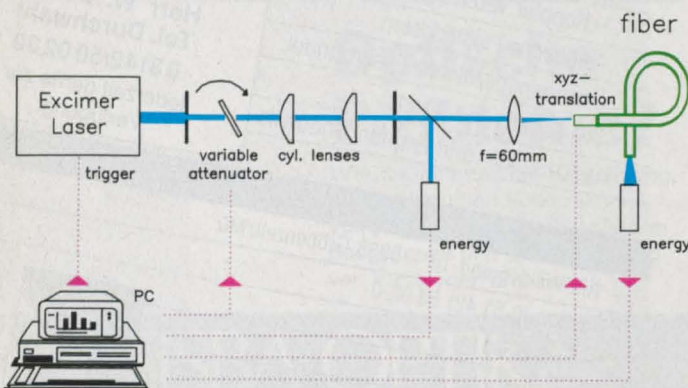


Abb. 1 Experimenteller Aufbau zur Fasereinkopplung und zur Messung der Transmission von Excimerlaserpulsen durch Quarzfasern

1. Einleitung

Regelmässig wird in dieser Zeitschrift über Anwendungen von Glasfasern ausserhalb der Nachrichtentechnik berichtet (z.B. [1 – 3]). Wie immer neue Einsatzmöglichkeiten speziell in der Medizin (z.B. Angioplastie, Chirurgie, Augen- und Zahnheilkunde) zeigen, ist hierbei die Übertragung von Excimerlaserpulsen durch Quarzfasern von besonderem Interesse. Die in letzter Zeit intensivierten Bemühungen zur Verbesserung

- des Ausgangsmaterials für den Faserziehprozess (d. h. Vorformen aus hochreinem, synthetischem Quarz),
- der Fasergeometrie und des Dotierungsprofils (Taperfasern [4], günstigeres Brechungsindexprofil)
- der Ziehparameter (Geschwindigkeit, Kraft),
- und der Strahleinkopplung speziell für Excimerlaser

haben noch nicht ihr Ziel erreicht, sehr intensive UV-Pulse unkritisch über eine mehr oder weniger lange Quarzfasern mit nur geringer Dämpfung zu transportieren.

UV-transparente optische Fasern werden weltweit von einer Reihe von Herstellern angeboten, doch geben die spezifizierten, mit einer Halogen- oder Quecksilberdampfampe gemessenen spektralen Dämpfungswerte kaum Aufschluss über die Eigenschaften für die Übertragung von extrem kurzen Laserpulsen mit entsprechend hoher Spitzenleistung. Hierüber können Faserhersteller regelmässig auch keine Auskunft erteilen. Dies war Anlass, einen Querschnitt kommerziell erhältlicher Quarzfasern, die zur Transmission von UV-Licht geeignet sind, auf ihre Übertragungseigenschaften für Excimerlaser hin zu untersuchen. Von besonderem Interesse waren dabei die Zerstörschwelle der Faser und die Transmissionseigenschaften bei den Wellenlängen 193 nm (ArF), 248 nm (KrF) und 308 nm (XeCl). Gerade mit Blick auf das schnell expandierende, vor allem medizinische Einsatzfeld soll einerseits versucht werden, dem Anwender zuverlässige und aufgrund normierter Messverfahren vergleichbare Daten an die Hand zu geben. Andererseits können die gesicherten Resultate umfassender Studien den Herstellern bei der Optimierung der Fasereigenschaften als Grundlage dienen.

2. Präparation der Fasern und Einkopplung des Excimerlaserstrahls

Die vergleichenden Untersuchungen wurden an UV-geeigneten Standardfasern mit einem Kerndurchmesser von 200 μm durchgeführt. Die abisolierten Quarzfasern wurden mit einem Ultraschallschneidegerät (York Fiber Cleaver FK 11) gebrochen, wobei die Stirnflächen die Qualität von Spiegeloberflächen erreichen. Auf diese Weise kann auf jegliche Politur verzichtet wer-

den, welche die Gefahr der Verschmutzung der Oberfläche in sich birgt. Anschliessend genügt eine Reinigung mit Aceton, um Reste der Kunststoffisolierung zu entfernen, in seltenen Fällen mit konzentrierter Flusssäure [5]. Für eine ausführlichere Diskussion der wesentlichen Parameter bei der Faserpräparation und Lasereinkopplung sei auf die Aufsätze von P. Hering [1, 2] verwiesen.

Der experimentelle Aufbau zur Einkopplung des Excimerlasers ist in Abb. 1 skizziert. Der ausgeblendete, homogene Teil des Strahls kann ohne Beeinflussung des Profils durch einen schrittmotorgesteuerten, dielektrischen Abschwächer in der Intensität quasi-kontinuierlich über mehrere Grössenordnungen geregelt werden. Ein Zylinderlinsenteleskop gleicht die in horizontaler und vertikaler Richtung um etwa den Faktor 2 unterschiedlichen Divergenzen des Excimerlasers an, ehe eine Blende ausgeleuchtet und mittels einer 60 mm-Linse auf den Faserkern abgebildet wird. Nach unseren Erfahrungen lassen sich die Ergebnisse der Transmission und der Zerstörschwelle an der Fasereinkopplungsfläche durch die vollständige Ausfüllung des über die numerische Apertur der Faser gegebenen Akzeptanzwinkels kaum steigern (vgl. aber [6, 7]), jedoch wird mit der entsprechend kurzbrennweitigeren Linse die Justierung sehr viel kritischer. Über einen Strahlteiler kann die koppelseitige Energie nach einmaliger Eichung ständig gemessen werden. Die Quarzfaser ist in einem Stecker fixiert, den sie jedoch von ihrem Coating gereinigt um ca. 10 mm überragt, was vermeidet, dass der Laserstrahl während der Justage das Metall ablatiert und dadurch die Faserstirnfläche beschmutzt und beschädigt [2]. Zur Justierung wird die Faser in eine computergesteuerte XYZ-Positionierung eingebaut, zudem in eine Spiegelhalterung, um den axialen Einfall zu optimieren. Die Einkopplung erfolgt hinter dem Fokus, wobei der Faserkern vollständig auszuleuchten ist, ohne in das Cladding einzustrahlen. Die Feinjustage richtet sich nach der maximal transmittierten Energie und kann mit Hilfe eines Laborrechners (PC) vollautomatisch durchgeführt werden. Ein UV-empfindliches, hochauflösendes Laserstrahlanalysesystem dient zur Kontrolle des räumlichen Strahlprofils vor und hinter der Faser. Im Idealfall liegt ein kreisrunder Strahl mit einem Gauss'schen oder stufenförmigen Profil an der Faserstirnfläche vor.

3. Transmissionsverhalten

Die Tabellen 1 bis 3 fassen die Ergebnisse einer vergleichenden Untersuchung an 200 μm -Quarzfasern unterschiedlicher Hersteller zusammen. Für die Wellenlängen 193 nm (ArF), 248 nm (KrF) und 308 nm (XeCl) wurde jeweils die Zerstörschwelle und Transmission gemessen. Die Reintransmission, d. h. die transmittierte Energie unter Berücksichtigung der Fresnelschen Reflexionsverluste an der Ein- und Auskoppelfläche, wird für eine noch unbenutzte Faser von ca. 50 cm Länge bei einer Eingangsenergie von 1 mJ bzw. 2 mJ im Einzelschuss angegeben (respektive 10 cm Länge bei einer Eingangsenergie von 0,5 mJ bzw. 1 mJ für 193 nm Strahlung in Tab. 1).

Das Langzeitverhalten von Quarzfasern bei der Übertragung von Laserpulsen hoher Leistung ist in letzter Zeit ausführlich untersucht worden (193 nm: [8, 9]; 248 nm: [9, 10]; und 308 nm: [9 – 12]). Die wichtigste Phase der Alterung ist in den folgenden Spalten der Tabellen 2 und 3 angegeben. Mit 2 mJ Eingangsenergie wurde die verbleibende Transmission nach 1000 und 2000 Pulsen gemessen. Bei der Wellenlänge 193 nm konnte dies aufgrund der geringen Transmission und enorm schnellen und starken Alterung aller Quarzfaser nicht durchgeführt werden. In

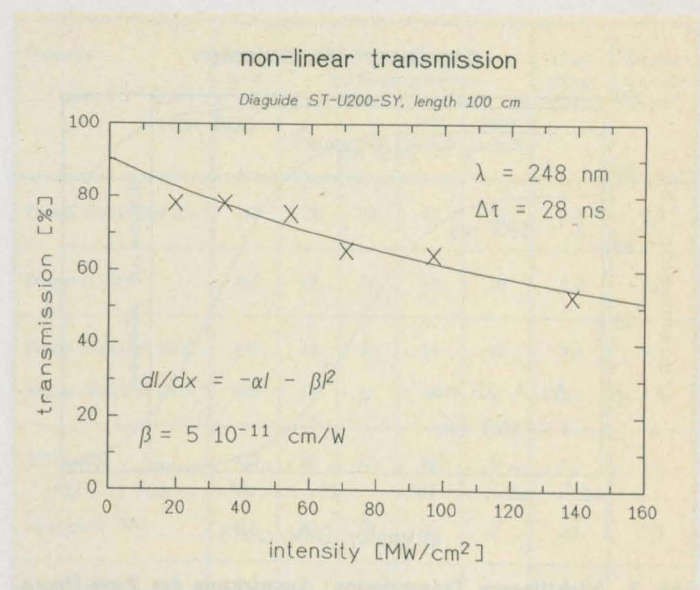


Abb. 2 Nichtlineare Absorption von Quarzfaser: Transmission von Excimerlaserpulsen der Wellenlänge $\lambda = 248 \text{ nm}$ (KrF) und mit einer Pulsbreite $\Delta\tau = 28 \text{ ns}$ durch eine 100 cm lange 200 μm -Quarzfaser (Diaguide ST-U200-SY) in Abhängigkeit von der eingestrahnten Intensität. Die Messwerte lassen sich unter Berücksichtigung der Zwei-Photonen-Absorption gut anpassen.

der Regel fällt hier die Transmission nach 5 Pulsen auf ca. 10% des ursprünglichen Werts ab; nach 30 Pulsen stabilisiert sich der Wert bei ca. 1%. Nach einem exponentiellen Abfall ist für 248 nm eine relativ konstante Dämpfung ab einer Schusszahl von 5000 zu beobachten. Für die Transmission der Excimerstrahlen der Wellenlänge 308 nm tritt das Plateau erst oberhalb von 10000 Schuss auf. Diese bestrahlungsabhängige Absorption ist auf die Bildung von Farbzentren zurückzuführen, die teilweise wieder ausheilen. Nach 15 Minuten Pause ist der Transmissionswert um 30% gestiegen; eine vollständige Rekonvaleszenz ist jedoch auch nach mehreren Stunden nicht zu erreichen [8].

Die Dämpfungsmessungen an den Fasern, deren Ergebnisse in der jeweils vorletzten Spalte der Tabellen 2 und 3 aufgelistet sind, erfolgten mittels der Rückschneide-Methode (cut back) von 100 cm auf 10 cm. Dieses in der Lichtwellenleiter-Messtechnik allgemein übliche Verfahren gewährleistet als einzige Methode, jeglichen Einfluss der Einkopplung auszuschliessen. Bei 193 nm erlaubte die aufgrund der Urbach-Kante geringe Transmission nur die direkten Messungen an 10 cm langen Fasern. Die relativ grossen Unterschiede zwischen den einzelnen Fasern deuten auf den Einfluss des Ziehprozesses für die Transmissionseigenschaften; zu nennen sind vor allem die Absorptionsbanden bei 245 nm und bei 630 nm. Die letztere entsteht mit einer 265-nm-Bande wahrscheinlich durch den Faserziehprozess [13]; die genaue Ursache der ersteren hingegen ist auch nach ESR-Untersuchungen noch unklar. Hierfür werden verschiedene intrinsische Defekte angeführt, wie Sauerstofflücken oder zweifach-koordinierte Si-Atome, die bei der Glasbildung entstehen können oder bei dem Ziehprozess; künstlich können sie durch Bestrahlung, auch mit UV-Licht, induziert werden [14 – 18].

4. Nichtlineare Absorption

Die Abbildung 2 zeigt die Intensitätsabhängigkeit der Transmis-

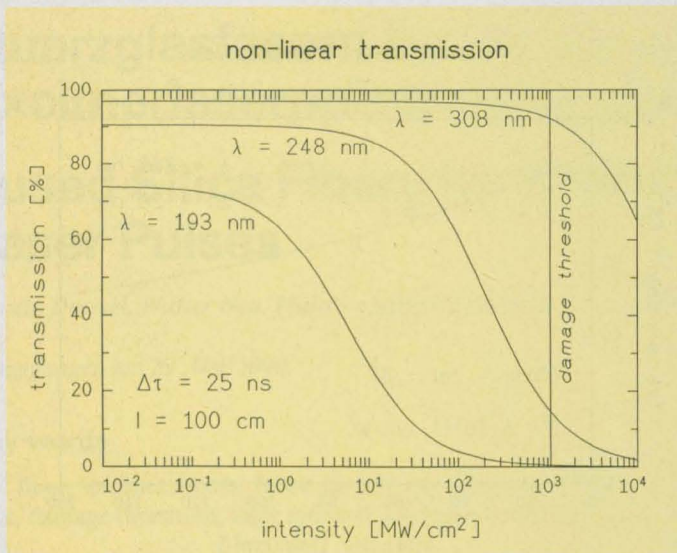


Abb. 3 Nichtlineare Transmission: Auswirkung der Zwei-Photonen-Absorption auf die intensitätsabhängige Transmission einer 200 µm-Quarzfasern für unterschiedliche Excimerwellenlängen (193 nm, 248 nm und 308 nm)

sion bei der Übertragung von Excimerlaserpulsen (Pulsdauer $\Delta\tau = 23$ ns) der Wellenlänge 248 nm durch Quarzfasern (Kern-durchmesser 200 µm). Hierbei wurde die Transmission mittels der oben beschriebenen Rückschneide-Methode für jede Energie neu bestimmt, um den Einfluss der Einkopplung einerseits und der Alterung oder vorheriger Schädigung andererseits auszuschließen. Die Messwerte lassen sich unter der Annahme von Zwei-Photonen-Absorption gut anpassen:

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha I - \beta I^2,$$

wobei $\beta = 5 \cdot 10^{-11}$ cm/W beträgt, was mit Literaturwerten für die nichtlineare Absorption von Quarzsubstraten (5,8 bzw. $4,5 \pm 2 \cdot 10^{-11}$ cm/W) im Rahmen der Genauigkeit von 50% sehr gut übereinstimmt [19, 20]. *Brimacombe* et al. [8] beobachteten hingegen relativ grosse nichtlineare Effekte ($\beta = (2 \pm 0,8) \cdot 10^{-10}$ cm/W), die möglicherweise auch auf die Einkopplung und Nichtvolumeneigenschaften zurückzuführen sind, die nicht eliminiert wurden, da für die Transmissionsmessung nicht mit der Rückschneide-Methode gearbeitet wurde.

Für 193 nm, 248 nm und 308 nm ist in Abb. 3 die Transmission in halblogarithmischer Darstellung aufgetragen, wie sie sich für eine 100 cm lange Faser ergibt, wenn man neben einem linearen Anteil die nichtlinearen Absorptionskoeffizienten ansetzt zu:

- β (193 nm) = $2 \cdot 10^{-9}$ cm/W [8]
- β (248 nm) = $5 \cdot 10^{-11}$ cm/W
- β (308 nm) = $5 \cdot 10^{-13}$ cm/W [8].

Da bei ca. 1 GW/cm² mit Zerstörung der Einkopplfläche der Faser zu rechnen ist, ist der begrenzende Faktor für die Transmission von Excimerlaserpulsen durch Quarzfasern bei 308 nm die Zerstörschwelle, während für die Wellenlängen von 248 nm und besonders 193 nm die vor allem durch die Zwei-Photonen-Absorption gegebene Dämpfung ausschlaggebend ist.

5. Methoden zur Bestimmung der Zerstörschwelle von Fasern

Steigert man die eingestrahelte Energie, so wird die Faser in der Regel an der Einkopplseite beschädigt; eine Zerstörung im Volumen (ca. 1–2 mm hinter der Stirnfläche im zweiten Fokus) wird selten beobachtet (vgl. [7]). Eine einheitliche Definition der Zerstörschwelle gibt es bisher nicht.

In Abb. 4 sind einige der parallel getesteten Aufbauten zur Bestimmung der Zerstörschwelle von Fasern gezeigt. Über ein Lichtmikroskop werden die Einkopplfläche der Faser beobachtet und gleichzeitig Veränderungen registriert (1). Diese Methode kann durch die Streuung eines kollinear zum Excimerstrahl geführten (2) oder eines unter einem bestimmten Winkel eingestrahlichten HeNe-Lasers (3) ergänzt werden. Besser noch ist das Streulicht einer von der Auskoppelseite rückwärts durch die Faser geführten Beleuchtung geeignet (4). Die Zerstörung der Oberfläche kann definiert werden als Änderung des durch das Mikroskopobjektiv betrachteten Bildes der Faserstirnfläche bei solch einer Beleuchtung. Das Verfahren ist durch eine Videokamera mit automatischer Bildverarbeitung im Laborrechner zu verfeinern und zu automatisieren. Die damit realisierte Bestimmung der Zerstörschwelle von optischen Fasern ist weitgehend dem standardisierten Messplatz zur Zerstörschwellenmessung von optischen Spiegeln für UV-Laser angeglichen [21]. Alternativ ist der an der Faserstirnfläche reflektierte Strahl eines unter 45° eingestrahlichten HeNe-Lasers mittels einer Fotodiode zu beobachten, wobei der direkte Reflex abzublocken ist (5). Dieses Verfahren reagiert jedoch lediglich auf grobe Veränderungen und ist nur bei absolut glatter Oberfläche einzusetzen. Eine funktionale Definition ist der Faser als Instrument zur Lichtübertragung angemessener (6): Demnach wäre die Zerstörung der Quarzfaser festzulegen als Abfall der transmittierten Energie auf z.B. 50% des anfänglichen Wertes. Dies liesse sich nicht nur erreichen durch Erhöhung der eingestrahlichten Intensität, sondern auch nach einer gewissen Pulszahl. Solch eine Definition erfasst neben der optischen Zerstörung der Faser auch die Alterung bei Dauerbelastung. Für die Definition der Zerstörschwellen ist dann eine

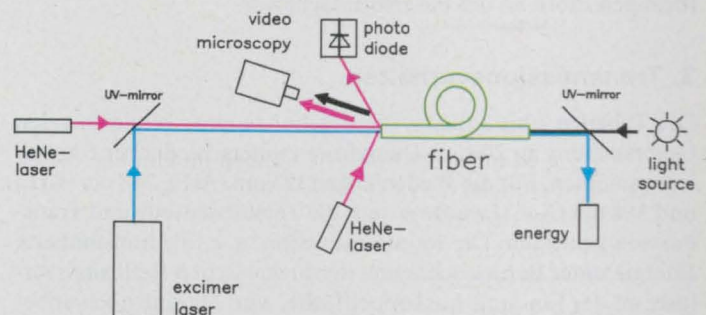


Abb. 4 Experimenteller Aufbau zur Bestimmung der Zerstörschwelle von optischen Fasern:

- (1) Direkte Beobachtung durch ein Videomikroskop mit Bildverarbeitung
- (2) Beobachtung der Streuung eines kollinear mit dem Excimerlaser eingestrahlichten HeNe-Lasers
- (3) Beobachtung der Streuung eines unter ca. 45° eingestrahlichten HeNe-Lasers
- (4) Beobachtung der Streuung des vom Auskoppelende rückwärts durch die Faser geleiteten Lichtes
- (5) Bestimmung der Streuung des unter 45° eingestrahlichten HeNe-Lasers mittels einer Photodiode
- (6) Messung der Transmission der Excimerlaserstrahlung durch die Faser

Fasertyp	Länge [mm]	Reintransmission [%] bei Eingangsenergie		Zerstörschwelle [J/cm ²]
		0,5 mJ	1 mJ	
		Einzelschuß		
Ceram Optec Optram	100	8,1	7,0	6,4
Diaguide STU	105	3,2	2,5	5,4
Ensign-Bickford HCG	80	21	15	6,1
Ensign-Bickford HCN	87	1,9	1,2	5,4
EOTec FG	109	7,8	6,5	5,1
Fiberguide SFS	122	14	12	5,8
Heraeus (220 µm)	90	19	13	9,0
Hund	113	15	13	4,7
Quartz & Silice AS	90	11	8,8	5,7
Quartz & Silice PCS	83	0	0	2,7

Tabelle 1 Transmissionswerte und Zerstörschwelle getesteter Fasern (200 µm Kerndurchmesser) für einen Excimerlaser der Wellenlänge $\lambda = 193$ nm (ArF) und einer typischen Pulsdauer $\Delta\tau = 17$ ns

Tabelle 3 Transmissionswerte, Dämpfung und Zerstörschwelle getesteter Fasern (200 µm Kerndurchmesser) für einen Excimerlaser der Wellenlänge $\lambda = 308$ nm (XeCl) und einer typischen Pulsdauer $\Delta\tau = 28$ ns
^a gemessen nach Rückschneide-Methode

Anzahl von Schüssen zu wählen, die dem normalen Einsatz entspricht; Energien unter der Schwelle können im Umfang dieser Pulsanzahl übertragen werden, ohne dass die Transmission unter 50% sinkt. Für den medizinischen Bereich mit den üblichen Einwegfaserprodukten sind ca. 10^4 Schuss notwendig; industrielle Anwendungen erfordern häufig eine erheblich höhere Lebensdauer (z. B. 10^9 Pulse).

6. Laserinduzierte Zerstörung

Die Ergebnisse unserer Messungen der Zerstörschwelle von Quarzfasern für Excimerlaserpulse der Wellenlängen 193 nm (ArF), 248 nm (KrF) und 308 nm (XeCl) sind in der jeweils letzten Spalte der Tabellen 1 bis 3 angegeben. In Anlehnung an die Zerstörschwellenbestimmung bei optischen Komponenten [21] wählten wir hierfür das Auftreten von ersten deutlichen Defekten meist an der Einkopplfläche als Zerstörung der Faser, ohne dass dies schon Einfluss auf die Transmission haben muss; teilweise ist die Übertragung von einzelnen Pulsen der doppelten Energie möglich. An perfekt präparierten Oberflächen können Intensi-

Fasertyp	Länge [mm]	Reintransmission [%] bei Eingangsenergie				Dämpfung ^a [dB/m]	Zerstörschwelle [J/cm ²]
		1 mJ	2 mJ	2 mJ			
		Einzelschuß		1000 Schuß	2000 Schuß		
Ceram Optec Optram	456	53	40	19	15	2,0	7,9
Diaguide STU	485	48	37	12	10	2,2	8,6
Ensign-Bickford HCG	500	43	33	14	13	2,4	7,9
Ensign-Bickford HCN	540	15	11	6	5	5,1	7,5
EOTec FG	460	26	21	22	9	4,2	7,5
Fiberguide SFS	465	37	29	3	2	3,1	7,5
Heraeus (220 µm)	575	51	35	14	10	1,7	7,5
Hund	490	35	26	10	9	3,1	7,5
Quartz & Silice AS	522	13	11	1	1	6,3	7,7
Quartz & Silice PCS	554	14	12	5	3	5,1	8,3

Tabelle 2 Transmissionswerte, Dämpfung und Zerstörschwelle getesteter Fasern (200 µm Kerndurchmesser) für einen Excimerlaser der Wellenlänge $\lambda = 248$ nm (KrF) und einer typischen Pulsdauer $\Delta\tau = 23$ ns

^a gemessen nach Rückschneide-Methode

Fasertyp	Länge [mm]	Reintransmission [%] bei Eingangsenergie				Dämpfung ^a [dB/m]	Zerstörschwelle [J/cm ²]
		1 mJ	2 mJ	2 mJ			
		Einzelschuß		1000 Schuß	2000 Schuß		
Ceram Optec Optram	543	79	84	81	84	0,16	19,7
Diaguide STU	525	79	86	84	84	0,15	19
Ensign-Bickford HCG	495	79	84	79	79	0,19	18
Ensign-Bickford HCN	520	53	55	55	59	0,49	12,8
EOTec FG	420	79	86	86	86	0,18	20
Fiberguide SFS	495	79	88	81	77	0,18	20
Heraeus (220 µm)	350	75	79	79	79	0,18	20
Hund	430	77	81	81	81	0,23	19,3
Quartz & Silice AS	550	53	57	57	56	0,46	20
Quartz & Silice PCS	535	61	64	62	62	0,38	15,7

tätsüberhöhungen (hot spots) zur Zerstörung führen. Zu beachten ist, dass bei Excimerlasern die statistische Puls-zu-Puls-Schwankung der Energie lokal 5 – 10% beträgt. Einmal aufgetretene Defekte in der Oberfläche sind Ausgangspunkt für weitere Zerstörung. Häufiger entstehen die Defekte und Zerstörung am Übergang vom Kern (core) zum Mantel (cladding), trotz der dort nur geringen Strahlintensität. Spannungen aufgrund der unterschiedlichen Materialzusammensetzung können hierfür der Grund sein. Teilweise wurde ein Abplatzen des Claddings beobachtet, was auch auf die mangelnde Verbindung des dotierten und undotierten Glases schliessen lässt. Ein nachträglich beispielsweise durch Glühen oder Ionenaustausch angeregter Diffusionsprozess zwischen Kern- und Mantelmaterial könnte einerseits extreme Spannungen abbauen und würde andererseits die Verbindung zwischen den Materialien erhöhen.

Wahrscheinlich aufgrund der Dotierung des Mantelmaterials im OVD (outside vapor deposition)- und VAD (vapor axial deposition)-Verfahren erniedrigt sich die Zerstörsschwelle dort gegenüber dem hochreinen Quarzmaterial im Kern, weshalb die Bestrahlung des Mantels zu vermeiden ist. Dieser Effekt ist weniger auf den Ziehprozess als auf das Vorform-Material zurückzuführen, wie Untersuchungen bei 248 nm an bulk-Proben zeigen, die aus Vorformen präpariert wurden. Demnach ist es bezüglich der optischen Zerstörung des Materials an der Einkopplfläche oder im Volumen günstiger, dotierungsfreies, möglichst reines Quarzmaterial zu verwenden, da die Dotierung zur Defektbildung beitragen kann. Die Zerstörsschwelle sinkt durch die übliche Fluordotierung im Mantel um 20%. Auch der Gehalt an OH-Ionen, die in synthetischem Quarz zur Unterdrückung intrinsischer Defekte gerade bei UV-Fasern eingesetzt werden, führt zur Senkung der Zerstörsschwelle ($\lambda = 248$ nm):

OH-armes Material (< 5 ppm): 7,2 J/cm²
OH-reiches Material (1000 ppm): 5,1 J/cm²

Ein Vergleich der Zerstörsschwellen unterschiedlicher Fasern macht deutlich, dass zu kürzeren Wellenlängen hin (vor allem 193 nm) der Einfluss des Ziehprozesses immer grösser wird, denn abgesehen von Mitsubishi (Diaguide) und Quartz & Silice verwenden alle hier aufgeführten Faserhersteller Ausgangsmaterial

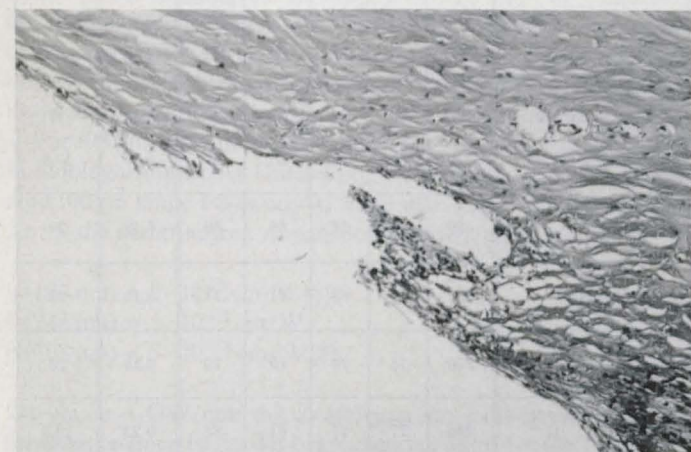


Abb. 5 Histologischer Schnitt des Auges im Bereich des Kammerwinkels: Die vordere Hälfte des Trabekelwerks ist ablatiert; es wurde eine Verbindung zwischen der Vorderkammer und dem Schlemmschen Kanal geschaffen.

vom gleichen Produzenten (Heraeus Quarzglas, Hanau). Der deutliche Unterschied der Zerstörsschwellen von 193 nm und 248 nm gegenüber den Werten bei der Wellenlänge $\lambda = 308$ nm ist darauf zurückzuführen, dass mit einer Photonenenergie über 5 eV verstärkt auch Bindungen im Quarzmaterial aufgebrochen werden [17]. Hervorzuheben sind schliesslich die vielversprechenden Eigenschaften des Plastik-Claddings bei der Quartz & Silice PCS-Faser. Die Zerstörsschwelle bei 248 nm übertrifft die der meisten anderen Quartz-Quarz-Fasern; für die beiden anderen Wellenlängen sind die Eigenschaften jedoch eher schlecht. Sehr ungünstig ist auch das Langzeittransmissionsverhalten der PCS-Faser für das kurzwellige UV.

Für 193 nm (ArF) liegen in der Literatur bisher noch keine Werte für die Zerstörsschwelle von Quarzfasern vor. Der – wegen der uneinheitlichen Definition der Zerstörsschwelle zweifelhafte – Vergleich bei der Wellenlänge 248 nm (KrF) zeigt, dass wir die Einkopplungsbedingungen optimieren konnten; zuverlässige Werte anderer Gruppen liegen zwischen 4 und 6 J/cm² [1, 9, 22–24].

Aufgrund der grossen Anwendungsmöglichkeiten der Quarzfasern in der Medizin beschränken sich die meisten Arbeiten auf 308 nm (XeCl). Für Pulslängen von ca. 30 ns sind Werte von 30 J/cm² typisch [1, 6, 9, 21, 25]. Eine Verbesserung hinsichtlich der Zerstörung der Fasern würde die Verlängerung der Laserpulse bringen. Versuche bei 28 ns, 60 ns und 300 ns Pulsdauer eines XeCl-Excimerlaser bestätigen die Zunahme der Zerstörsschwelle mit $\sqrt{\Delta\tau}$ [2, 7, 25]. Leider sind Langpuls-Excimerlaser noch nicht mit den gewohnten Spezifikationen (zeitliches und räumliches Profil, Stabilität, Gaslebensdauer, Leistung) verfügbar.

7. Medizinische Anwendungen

Die Anwendungen der UV-transparenten Quarzfasern für die Transmission von Excimerlaserpulsen liegt heute fast ausschliesslich im medizinischen Bereich. Aufgrund der vermuteten mutagenen Nebeneffekte bei 248 nm und den beschriebenen Faserproblemen konzentriert man sich auf die Verwendung der XeCl-Wellenlänge ($\lambda = 308$ nm). Am weitesten verbreitet ist die Laser-Angioplastie, wo im peripheren Bereich Faserbündel und Fasern bis 600 μ m Durchmesser eingesetzt werden, um Gefässverschlüsse wieder zu öffnen. Im koronaren Bereich verwendet man Katheter mit bis zu 30 ringförmig um einen Führungsdraht angeordnete 100 μ m-Fasern. Probleme bereitet hier vor allem die Einkopplung des häufig sehr inhomogenen Laserstrahls in das Faserbündel, so dass oft nur 10 mJ übertragen werden können, was für die Ablation harter Kalk-Plaques nicht ausreicht.

In der Ophthalmologie verspricht die Behandlung des Glaukoms durch die Eröffnung des Schlemmschen Kanals ein grosses Anwendungspotential des fasergeführten Excimerlasers. Der Laserstrahl wird über eine 200 μ m-Quarzfasern durch die vordere Augenkammer geführt und ablatiert das Trabekelwerk vor dem natürlichen Abflusskanal (Abb. 5); erwartet wird eine langfristige Verringerung des Abflusswiderstandes [26].

Ein entscheidender Schritt für die Excimerlaser-Chirurgie gelang durch den Einsatz von der Taperfasern [27] d.h. Quarzfasern mit konischem Einkoppelstück [4]. Die Übertragung von Energien bis zu 250 mJ durch eine 1000 μ m-Faser erlaubt das effiziente Schneiden und Bohren von Knochen und Knorpel. Mit etwa 17 J/cm² Energiedichte am Ende (d. h. 50 mJ durch eine 600 μ m-Faser) konnten Ablationsraten von durchschnittlich 2 μ m/Laserpuls am harten Knochen und ein Vielfaches am Knorpel (Menis-

kus) erzielt werden, ohne dass eine thermische Schädigung des Gewebes zu sehen ist, wenn der Eingriff im feuchten Medium stattfindet (Abb. 6).

Erste Versuche eines Einsatzes des Excimerlasers in der Zahnmedizin zeigten die Notwendigkeit, für die Kariesbehandlung die Wellenlängen 193 nm oder 248 nm zu verwenden, um akzeptable Ablationsraten am Dentin erzielen zu können. Excimerlaser bei 308 nm sind jedoch für Wurzelbehandlungen zu verwenden, wobei der Excimerlaser mittels einer 600 µm-Faser zur Reinigung des Wurzelkanals dient [28].

8. Ausblick

Mit Blick auf eine intensive Nutzung der Möglichkeit, Excimerlaser durch optische Fasern zu leiten, ist es einerseits nötig, die Qualität der Quarzfasern auf hohem Niveau zu stabilisieren. Andererseits muss dem Anwender ein problemgerechtes Beurteilungskriterium der Leistungsfähigkeit der Fasern und ihrer Tauglichkeit für seine spezielle Verwendung an die Hand gegeben werden. Dies würde zu Vergleichbarkeit und Sicherheit auf dem Gebiet der UV-transparenten Quarzfasern führen, was sowohl dem Anwender als auch dem Hersteller dient. Schliesslich würden dem Excimerlaser neue Einsatzmöglichkeiten eröffnet werden.

Literatur

- [1] L. Prause, P. Hering; Lichtleiter für gepulste Laser: Transmissionsverhalten, Dämpfung und Zerstörschwelle, *Laser und Optoelektronik* 19 (1), 25 (1987); hierzu die Leserbriefe, *Laser und Optoelektronik* 19 (4), 402 (1987)
- [2] P. Hering; Neues über optische Fasern für gepulste Laser, *Laser und Optoelektronik* 20 (5), 48 (1988)
- [3] *Laser und Optoelektronik* 20, Heft 4 (1988)
- [4] K.O. Greulich, H. Hitzler, N. Leclerc, J. Wolfrum, K.F. Klein; Transport von leistungsstarken UV-Laserpulsen durch Lichtleiter mit variablem Querschnitt (Taper), *Laser und Optoelektronik* 20 (4), 58 (1988)
- [5] D.J. Gallant, M. Law, B. Pond; Effect of cleaning on the optical absorption of calcium fluoride and fused silica at 351 nm, *Natl. Bur. Stand. (U.S.) Spec. Publ.* 724, 159 (1988)
- [6] H. Kar, J. Helfmann, K. Dörschel, G. Müller, H. Ringelhan, B. Schaldach; Optimization of the coupling of excimer laser radiation (308 nm) into Q-Q fibres ranging from 200 – 600 µm core diameter, *SPIE* 1067, 223 (1989)
- [7] U. Sowada, H.J. Kahlert, D. Basting; Excimerlaser-Strahlung durch Quarzfasern, *Laser und Optoelektronik* 20 (4), 32 (1988)
- [8] R.K. Brimacombe, R.S. Taylor, K.E. Leopold; Dependence of the nonlinear transmission properties of fused silica fibers on excimer laser wavelength, *J. Appl. Phys.* 66, 4035 (1989)
- [9] R.S. Taylor, K.E. Leopold, R.K. Brimacombe, S. Mihailov; Dependence of the damage and transmission properties of fused silica fibers on the excimer laser wavelength, *Appl. Optics* 27, 3124 (1988)
- [10] U. Kubo, Y. Hashishin, K. Okada; UV-Beam guide for medical excimer lasers, *SPIE* 1067, 204 (1989)
- [11] G. Müller, H. Kar, K. Dörschel, H. Ringelhan; Transmission of short pulsed high power UV laser radiation through fibres depending on pulse length, intensity and long term behaviour, *SPIE* 906, 231 (1988)
- [12] H. Hitzler, N. Leclerc, K.-H. Klein, K.-O. Greulich, J. Wolfrum; Optical fiber transmission of excimer laser pulses, *SPIE* 1023, 249 (1988)
- [13] P. Kaiser; Drawing-induced coloration in vitreous silica fibers, *J. Opt. Soc. Am.* 64, 475 (1974)

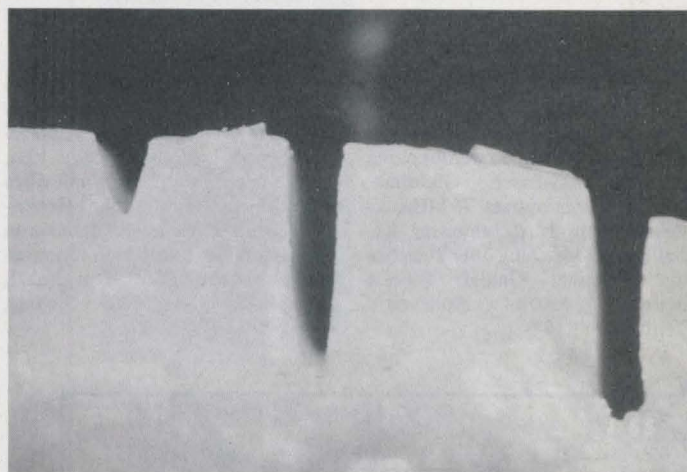


Abb. 6 Schnitte an einem Rinderknochen: Mit einer 600 µm-Faser können ohne Karbonisation Rippenknochen viele Millimeter tief geschnitten werden. Die Ablationsrate bei 17 J/cm² liegt über 2 µm/Puls.

- [14] K. Nagasawa, Y. Hoshi, Y. Ohki; Effect of oxygen content on defect formation in pure-silica core fibers, *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* 26, L-554 (1987)
- [15] R. Tohmon, Y. Yamasaka, Y. Ohki, Y. Hama; Cause of the 5.0 eV absorption band in pure silica glass, *J. Non-Cryst. Solids* 96, 671 (1987)
- [16] H. Imai, K. Arai, H. Imagawa, H. Hosono, Y. Abe; Two types of oxygen-deficient centers in synthetic silica glass, *Phys. Rev. B* 38, 12 772 (1988)
- [17] T.E. Tsai, D.L. Griscom, E.J. Friebele; Defect centers induced by linear and non-linear absorption of UV light in high purity silica, *SPIE* 970, 165 (1988)
- [18] R. Tohmon, H. Mizuno, Y. Ohki, K. Sasagane, K. Nagasawa, Y. Hama; Correlation of the 5.0- and 7.6 eV absorption band in SiO₂ with oxygen vacancy, *Phys. Rev. B* 39, 1337 (1989)
- [19] A.J. Taylor, R.B. Gibson, J.P. Roberts; Two-photon absorption at 248 nm in ultraviolet window materials, *Optics Lett.* 13, 814 (1988)
- [20] P. Simon, H. Gerhardt, S. Szatmari; Intensity dependent loss properties of window materials at 248 nm, *Optics Lett.* 14, 1207 (1989)
- [21] K. Mann, H. Gerhardt; Teststand zur automatisierten Messung von Zerstörschwellen an optischen Komponenten für UV-Laser, *Laser und Optoelektronik* 21 (4), 42 (1989)
- [22] C. Whitehurst, M.R. Dickinson, T.A. King; Ultraviolet pulse transmission in optical fibres, *J. Modern Optics* 35, 371 (1988)
- [23] R. Pini, R. Salimbeni, M. Vannini; Optical fiber transmission of high power excimer laser radiation, *Appl. Optics* 26, 4185 (1987)
- [24] Y. Itoh, K. Kunitomo, M. Obara, T. Fujioka; High-power KrF laser transmission through optical fibers and its application to the triggering of gas switches, *J. Appl. Phys.* 54, 2956 (1983)
- [25] R.S. Taylor, K.E. Leopold, S. Mihailov, R.K. Brimacombe; Damage measurements of fused silica fibers using long optical pulses XeCl lasers, *Optics Commun.* 63, 26 (1987)
- [26] M. Vogel, G. Scheurer, W. Neu, M. Dressel, H. Gerhardt; Die Ablation des Trabekelwerks, *Klin. Monatsbl. der Augenheilkunde* 196 (1990) (im Druck)
- [27] R. Jahn, M. Dressel, H. Fabian, H. Gerhardt, J. Kesper, K.-F. Klein, H.-U. Langendorff, W. Neu, U. Sowada, K.-H. Jungbluth; Excimerlaser und Taperfaser – ein effizientes Instrument für die Ablation von Knochen- und Knorpelgewebe, *Laser in medicine and surgery*, 6 (1990) (im Druck)
- [28] R. Pini, R. Salimbeni, M. Vannini, R. Barone, C. Clauser; Laser Dentistry: A new application of excimer laser in root canal therapy, *Laser in Surgery and Medicine* 9, 352 (1989)