

# Kapitel 6

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit berichtet über Untersuchungen zur Ablation mit ultrakurzen Laserpulsen an dielektrischen Materialien. In vergleichenden Messungen wurden dabei ein mit Kupferionen dotiertes Phosphatglas und dessen transparentes Grundmaterial sowie ein Silikatglas betrachtet. Der dafür eingerichtete Zerstörmeßplatz ermöglicht die kontrollierte Variation der entsprechenden Laserparameter. Als Strahlquelle dient ein kommerziell erhältliches Ti:Saphir-Lasersystem, das Pulse mit einer Dauer von 30 fs und einer Energie von 600  $\mu\text{J}$  bei einer Folgefrequenz von 1 kHz bereitstellt.

Die Ablation von transparenten dielektrischen Materialien mit Femtosekunden-Laserpulsen wird allgemein dadurch erklärt, daß Valenzband-Elektronen durch Mehrphotonen- und Avalanche-Ionisation in das Leitungsband angeregt werden. Die so erzeugten freien Ladungsträger absorbieren auch solche Photonen linear, deren Energie kleiner als die Bandlücke ist. Als Kriterium für die Zerstörung des Materials wird dabei eine kritische LB-Elektronendichte angesehen, bei der die Probe hochabsorbierend wird. Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, daß dieses Modell auch auf die Ablation von Gläsern anwendbar ist, deren lineare Absorption für die Laserwellenlänge durch gezielte Dotierung erhöht ist.

Bei der Bestrahlung mit 30-fs-Laserpulsen konnte in den transparenten Gläsern bereits unterhalb der Zerstörschwelle die Bildung von Farbzentren registriert werden. Diese Materialveränderungen wurden als lokalisierte Elektronen und Elektronfehlstellen identifiziert. Sie führten zu einer Erhöhung der Absorption im ultravioletten bis sichtbaren Spektralbereich. Die laserinduzierten Defekte zeigen ein Rekombinationsverhalten, das dem einer diffusionslimitierten Reaktion zweier Komponenten gleicht. Im Ionen-dotierten Filterglas konnte unter identischen Bestrahlungsbedingungen keine Änderung der Kleinsignal-Transmission festgestellt werden. Dies läßt sich dadurch erklären, daß die Konzentration entsprechender Precursor-Strukturen für die Farbzentren durch die zur Dotierung genutzten Kupferionen reduziert ist.

Die Bildung von Farbzentren kann den Aufbau mechanischer Spannungen verursachen, durch den sich der Inkubationseffekt beschreiben läßt. Dieser ist in jeder der Glasproben feststellbar, wobei sich die ermittelten Inkubationskoeffizienten kaum voneinander unterscheiden.

Für 30-fs-Laserpulse wurden in allen drei Gläsern nahezu identische Ablationsschwellen gemessen. Dabei läßt sich kein Einfluß der erhöhten linearen Absorption des dotierten Filterglases oder durch die unterschiedliche chemische Zusammensetzung und höhere Schmelztemperatur des Silikatglases finden. Bei allen drei Proben ist jeweils ein Mehrphotonen-

Prozeß dritter Ordnung notwendig, um die Bandlücke des Glasmaterials zu überwinden. Zur näheren Untersuchung des Einflusses der Bandlücke auf die laserinduzierte Ablation wurden die Zerstörschwellen von fünf verschiedenen Dielektrika mit unterschiedlichen Bandlücken-Energien bestimmt. Diese Proben lagen jeweils als Einzelschichten gleicher optischer Dicke auf analogen Substraten vor. Dabei zeigte sich sowohl für Einzel- wie für Mehrpulsbestrahlung jeweils eine höhere Schwellfluenz bei größerer Bandlücke. Die gemessenen Zerstörschwellen von Materialien mit verschiedenem „band gap“ aber gleicher Ordnung für die Mehrphotonen-Ionisation — wie es bei den Glasproben der Fall ist — unterscheiden sich allerdings nur unwesentlich. Diese Ergebnisse unterstreichen den dominierenden Einfluß der nichtlinearen Absorption auf die Ablation mit 30-fs-Laserpulsen. Ein bisher in der Literatur unberücksichtigter Aspekt bei der Ablation mit ultrakurzen Laserpulsen ist die Abhängigkeit der Zerstörschwelle von der Strahlgröße. Diese wurde an allen drei Festkörperproben festgestellt. Dabei bleibt die Schwellfluenz jeweils bis zu einem Strahlradius von etwa  $100\ \mu\text{m}$  konstant. Bei Überschreiten dieses Wertes reduziert sich die Ablationsschwelle mit steigendem Strahlquerschnitt und strebt gegen ein Minimum. Gleichzeitig nimmt die Inkubation im transparenten Phosphatglas mit steigender Strahlgröße ab. Dieses Verhalten konnte unter der Annahme zufällig auf der Oberfläche verteilter Absorptionszentren mit geringer Zerstörschwelle modelliert werden. Die Wahrscheinlichkeit, einen solchen Defekt mit einer Fluenz größer als dessen Ablationsschwelle zu bestrahlen, bestimmt dabei die Schwellfluenz der Probe. Die ermittelten Defektabstände betragen jeweils etwa  $500\ \mu\text{m}$ .

Hinsichtlich der Materialstrukturierung wurde festgestellt, daß die Ablationstiefe im Absorberfilter nach oben begrenzt ist. Wegen der Energieverluste an den Rändern sowie durch Redeposition von Material nimmt die Ablationsrate ab, wenn die Kratertiefe den Lochradius übersteigt. Für entsprechend kleine Ablationstiefen wird ein linearer Anstieg mit der Pulszahl beobachtet. Die mittlere Ablationsrate in diesem Bereich zeigt eine Proportionalität zum Logarithmus der Fluenz. Dieses Verhalten läßt sich aus der mittleren Eindringtiefe bei linearer Absorption der Laserstrahlung ableiten. Bei Änderung der Repetitionsrate im Bereich von  $1 - 1000\ \text{Hz}$  zeigte sich keine Beeinflussung der laserinduzierten Ablation. Durch Spülung der Oberfläche mit einem konstanten Stickstoff-Strom wurde eine Erhöhung der Ablationsrate erreicht.

An allen drei Gläsern war ein Anstieg der Schwellfluenzen bei Verlängerung der Pulsdauer meßbar. Dies ist auf die Reduzierung der Mehrphotonen-Ionisation bei gleicher Fluenz zurückzuführen. Ab einer Pulsdauer von etwa  $150\ \text{fs}$  machen sich bei der Einzelpulszerstörung im Filterglas die lineare Absorption und im transparenten Phosphatglas die Bildung von Defekten bemerkbar. Beide Prozesse führen zu einer geringeren Schwelle als durch das Zusammenwirken von Mehrphotonen- und Avalanche-Ionisation erwartet wird. Die hier gezeigten Untersuchungen zur Strahlungsfestigkeit zeigen, daß die lineare Absorption bei der Anwendung von 30-fs-Laserpulsen nur eine untergeordnete Rolle für die laserinduzierte Zerstörung spielt. Das dotierte Filterglas zeigte ebenso hohe Ablationsschwellen wie sein undotiertes Grundmaterial, sodaß dem Einsatz für den Augenschutz hinsichtlich der Beständigkeit gegenüber der genutzten Laserstrahlung keine weiteren Einschränkungen erwachsen.