

# 1 Einleitung

Die Lasertechnik wird seit etlichen Jahrzehnten zum Materialabtrag und zur Strukturierung eingesetzt. Schon bald nach der Realisierung des ersten Lasers 1960 wurden auch seine Vorzüge bei der Mikromaterialbearbeitung entdeckt. Gepulste Laserstrahlung läßt sich räumlich und zeitlich konzentrieren, was in großen Intensitäten resultiert. Heute wird der Laser zum Schneiden, Bohren, Strukturieren, Schweißen und Löten eingesetzt. Hierbei nutzt man die berührungslose Arbeitsweise, die eine Präzision bis in den sub-Mikrometerbereich gestattet.

Geht man von einem Gaußschen Strahlprofil eines Laserstrahls aus, so befindet sich in ihm eine Vielzahl unterschiedlicher Energiedichten, auch Fluenzen genannt. Anfänglich beschränkten sich die Studien der Laser-Materialbearbeitung überwiegend auf den zum Abtrag führenden Fluenzbereich, der oberhalb einer Abtragsschwelle liegt. Die Morphologie der Bearbeitungsergebnisse wurde phänomenologisch betrachtet. Erst in neuerer Zeit findet auch ein Energiedichtebereich Beachtung, in dem noch keine Verdampfung, sondern nur eine Modifikation des Materials im kondensierten Zustand einsetzt. Deshalb ist dieser physiko-chemisch modifizierte Bereich bislang weitgehend unerforscht geblieben. Er ist aber bei der in der Materialbearbeitung meist verwendeten repetierenden Bestrahlung extrem wichtig. In diesem Energiedichtefenster wird bei wiederholten Laserpulsen die Substratoberfläche grundsätzlich beeinflußt und damit die Laser-Material-Wechselwirkung analysierbar. Phänomene wie Oxidation, Amorphisierung, Metallisierung oder die sogenannte Inkubation zeigen sich in diesem Fluenzbereich. An Einkomponentensystemen sind bereits diese Reaktionen zu beobachten, bei Mehrkomponentensystemen besteht zusätzlich die Möglichkeit des präferentiellen Abtrages nur eines Bestandteils.

Die chemischen Veränderungen werden mithilfe von herkömmlichen Oberflächen-Analyseverfahren detektiert. Dabei wird ein Vergleich von unbehandelter und Laser-behandelter Stelle vorgenommen. Im Idealfall läßt sich so der Reaktionsweg und damit der Mechanismus erschließen.

Vergleiche von Analyseergebnissen „Vorher“/„Nachher“ kennzeichnen auch die Anlage dieser Arbeit. Die Studie nutzt zwei methodische Ansätze: Zum einen werden die Auswirkungen der Laser-Material-Wechselwirkung in zwei Pulsdauerbereichen verglichen, zum anderen werden unterschiedliche Materialklassen einander gegenübergestellt.

Bei den zwei Zeitregimen handelt es sich um den Nanosekunden- und den Femtosekundenbereich. Das Nanosekunden-Lasersystem liefert sogenannte „kurze“ Pulse um  $\tau = 10$  ns im ultravioletten Spektralbereich  $\lambda = 266$  nm; das Femtosekunden-Lasersystem mit „ultrakurzen“ Pulsen um  $\tau = 130$  fs arbeitet im infraroten Spektrum  $\lambda = 800$  nm. Ihrer verschiedenen Pulsdauer und damit bei gleicher Energie unterschiedlichen Intensität korrespondieren generell deutliche Unterschiede im Bearbeitungsergebnis und den bestimmbareren Parametern des Modifikations- und Abtragsprozesses. Die Verkürzung der Pulsdauer in den Femtosekundenbereich resultiert in einem deterministischeren Materialabtrag und einer höheren Bearbeitungsqualität.

Es werden ein thermisches Spezialglas (Barium-Alumo-Borosilikatglas) und drei nichttoxische Keramiken (Aluminiumnitrid, Siliziumcarbid und eine Kompositverbindung aus SiC-TiC-TiB<sub>2</sub>) untersucht. Diese technischen Materialien sollen präzise mit dem Laser strukturiert werden. Da für eine industrielle Anwendung möglichst einfache Prozeßschritte erstrebenswert sind, erfolgt die Bearbeitung an Luft. Ziel ist ein verbessertes Verständnis der chemischen und physikalischen Abläufe. Dazu wurden Oberflächenanalysen durchgeführt.

Die Gliederung der Arbeit zeigt folgende Struktur:

Kapitel 2 referiert die grundlegenden chemischen und optischen Eigenschaften der Materialien und die theoretischen Fundamente der Laser-Material-Wechselwirkung, wobei die prinzipiellen Unterschiede zwischen kurzen (Nanosekunden-) und ultrakurzen (Femtosekunden-) Laserpulsen akzentuiert werden.

Kapitel 3 beschreibt zunächst den experimentellen Ansatz, insbesondere die speziellen Aspekte der verwendeten Materialien. Außerdem werden beide Lasersysteme beschrieben und charakterisiert. Im zweiten Teil werden die diagnostischen Methoden vorgestellt und zwar zum einen Verfahren zur Bestimmung der Metrik laser-erzeugter Kavitäten (Lichtmikroskopie, Rasterelektronen- und Rasterkraftmikroskopie) und zum anderen Verfahren zur Detektion von physikalisch-chemischen Oberflächenmodifikationen (Photoelektronenspektroskopie, Nanoindenter, Elektronenspinresonanz, Mikro-Ramanspektroskopie und Röntgendiffraktometrie).

In Kapitel 4 werden die Bearbeitungsergebnisse, differenziert nach den verschiedenen Materialklassen, vorgestellt. Zunächst werden phänomenologische Ergebnisse dokumentiert, anschließend die Analytik. Zum Abschluß werden die Ergebnisse materialübergreifend diskutiert.

Um auch einen Anwendungsbezug zu geben, wird in Kapitel 5 eine mögliche Applikation eines Laser-bearbeiteten Glases dargestellt. Hintergrund ist die Zielsetzung, teure kristalline Substrate durch laserstrukturierte, kostengünstige Gläser zu ersetzen. Die Klärung dieser Fragen war ein Thema im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Abtragen mit Laserphotonen – Präzise Bearbeitung von Glas- und Verbundwerkstoffoberflächen“.

Die Laser-Arbeiten sowie die lichtmikroskopischen, rasterkraftmikroskopischen und röntgendiffraktometrischen Untersuchungen wurden unter der Projektbetreuung von PD Dr. W. Kautek im Laboratorium „Dünnschichttechnologien“ an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin durchgeführt. Eine Reihe wichtiger Arbeitsschritte waren nur dank der großzügigen und effizienten Kooperation anderer Laboratorien im selben Institut realisierbar: Herstellung der Sinterkeramiken (R. Yarim), Rasterelektronenmikroskopie (B. Strauß), Photoelektronenspektroskopie (D. Treu), Elektronenspinresonanz (Dr. M. Nofz) und Mikro-Ramanspektroskopie (Dr. K.-W. Brzezinka). Nanoindenter-Arbeiten wurden zusammen mit der Technischen Fachhochschule Wildau (R. Ries) angefertigt. Die Glasproben wurden vom BMBF-Partner Schott Jenaer Glas GmbH, die AlN-Keramiken von CeramTec AG bezogen.