

Spielwiese

Räumliche Porträts in Glas

CHRISTIAN UCKE | HANS-JOACHIM SCHLICHTING

Leistungsstarke Laser gravieren das Bild von Objekten dreidimensional in Glas. So sind realistisch wirkende Porträts möglich, von denen nicht nur ein ästhetischer Reiz ausgeht, sondern auch das Erstaunen darüber, wie wohl das Porträt in den soliden Glasblock hineinkopiert worden ist. Außerdem bietet die Rückansicht des Porträts den verblüffenden Hohlmaskeneffekt.

Angenehm schwer liegt der 500 Gramm gewichtige und $5 \times 5 \times 8 \text{ cm}^3$ große Block aus hochtransparentem Kristallglas mit dem Porträt von Einstein in der Hand (Abbildung 1). Die Dreidimensionalität des im Inneren des Glasblocks befindlichen Porträts erschließt sich beim Hin- und Herdrehen. Der Kopf ist jedoch nur von vorne vollständig modelliert, während er von hinten eine Hohlmaske darstellt. Bei genauerer Inspektion erkennt man, dass sich das Porträt aus glitzernden Einzelpunkten zusammensetzt, wie es auch in der modernen Drucktechnik der Fall ist. Das dreidimensionale Porträt von Einstein ist genau aus 277 643 Punkten zusammengesetzt [1].

Derartige Porträts werden mit Lasern ins massive Glas hinein graviert. Diese Technik geht auf die Entdeckung von Schäden im Inneren von Linsen in den 1960er-Jahren zurück. Sie entstanden bei der Fokussierung von Festkörperlaser durch Strahlrückkopplung (Laser induced damages). Dieser im Grunde unerwünschte Effekt wurde dann aber in den 1980er- und 1990er Jahren in Russland und den USA systematisch untersucht und führte zur Anmeldung von Patenten bei der Anwendung für die Glasinnengravur (SubSurface Laser Engraving, SSLE, und Laser Induced Damage Imaging, LIDI).

Anfangs war noch ein erheblicher Aufwand nötig, um derartige Gravuren zu realisieren. In den letzten Jahren sind die Geräte jedoch derart kompakt und preisgünstig geworden, dass man heute zu verhältnismäßig geringen Kos-

ten und in wenigen Minuten ein Porträt von sich selbst oder von geeigneten Objekten anfertigen lassen kann. Dazu werden die Personen oder die Objekte mit einer digitalen 3D-Kamera aufgenommen und die Daten über ein Programm zur Steuerung des Gravurlasers (beispielsweise Nd-YAG) verwendet. Es gibt sogar das Angebot, ein zweidimensionales Foto einzuschicken, aus dem ein spezieller Algorithmus ein dreidimensionales, lasergraviertes Porträt erzeugt. Dies kann allerdings nur Durchschnittskopfformen angepasst werden, denn mit einem zweidimensionalen Bild kann man kein echtes 3D-Bild erzeugen.

Der physikalische Hintergrund der Lasergravur ist die nichtlineare Lichtabsorption. Im Falle einer linearen Absorption führt eine Verdoppelung der eingestrahnten Energie auch zu einer Verdoppelung der absorbierten Energie. Nichtlineare Absorption liegt dann vor, wenn die Lichtintensität so hoch ist, dass zwei oder mehr Photonen nahezu gleichzeitig vom Atom absorbiert werden können und somit ein höher liegendes Energieniveau erreicht werden kann. Dann ergibt sich ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen eingestrahelter und absorbierte Energie. Die relative Absorption steigt mit zunehmender Energiedichte stark an. Ein Objekt, das für kleine Lichtintensitäten ganz transparent ist, kann für hohe Intensitäten stark absorbierend werden.

Der in das Glas hinein fokussierte Laserstrahlpuls mit einer Leistung von etwa 1 W und einer maximalen Energie von etwa 1 mJ pro Puls konzentriert sich auf einen wenige Mikrometer großen Bereich. Die Oberfläche des Glases muss deshalb plan, hoch poliert und das Glas schlieren-, blasen- und spannungsfrei sein. Andernfalls entsteht kein optimaler Fokus und das Glas kann zerspringen. Häufig wird in Deutschland für Laserinnengravuren aus China importiertes Glas der Sorte BK9 (Borkronglas) mit einer Brechzahl von $n_d = 1,5163$ ($\lambda_d = 589 \text{ nm}$) verwendet. In den USA wird auch Plexiglas eingesetzt.

Die große Leistungsdichte im Laserfokus von bis zu 10^{10} W/cm^2 führt innerhalb von kürzester Zeit

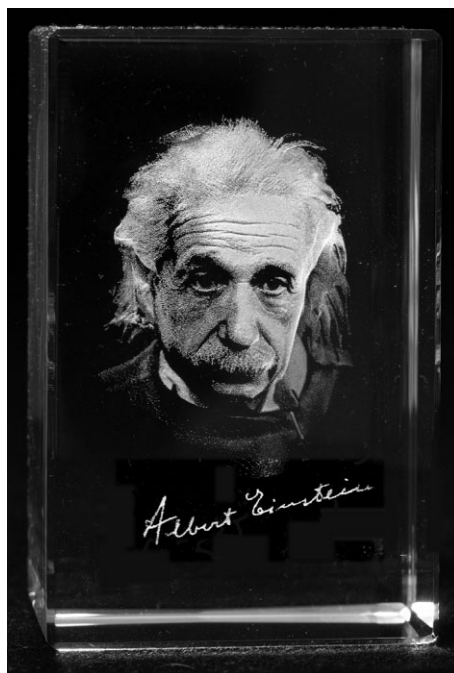
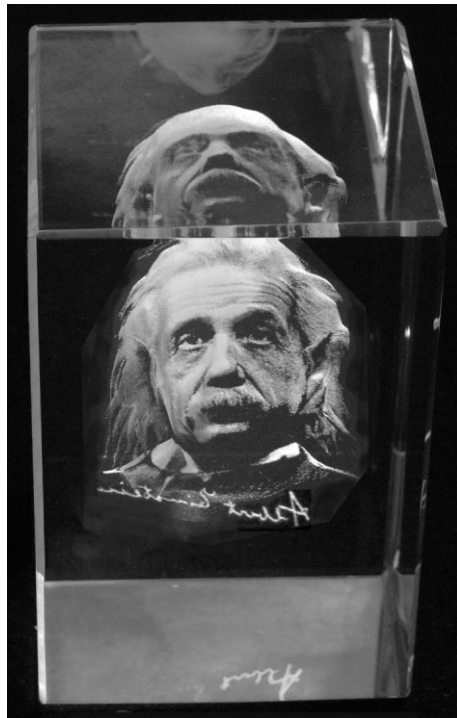


Abb. 1 Einsteins Porträt, dreidimensional in Glas graviert.

zu einem enormen Temperaturanstieg bis zu 20 000 °C. Dieser bewirkt, dass das Glas schmilzt und intransparent wird. Diesen Vorgang nennt man Devitrifikation oder Entglasung. Winzige Risse gehen von diesem Punkt aus, an denen das Licht gestreut wird. In Abhängigkeit von der eingestrahnten Energie kann die Größe der eingravierten Streuzentren im Sinne der gewünschten Abbildung von etwa 50 µm bis 150 µm variiert werden. In Abbildung 2 links ist ein Makrofoto eines so entstandenen Punktes zu sehen. Die Punkte dürfen im Übrigen nicht zu dicht aneinander gereiht werden, da sonst Spannungen im Material auftreten, welche die Bruchgefahr erhöhen (Abbildung 2 rechts).

Das Porträt im Glasblock ist nicht nur von vorne, sondern auch von hinten interessant. Wenn man nämlich aus einiger Entfernung oder bei einäugiger Betrachtung in die konkave Hinterseite des Portraits blickt, scheint sich das hohle Gesicht umzustülpen und die vertraute erhabene Gestalt anzunehmen. Bereits dieser Effekt ist erstaunlich. Er erinnert an die visuellen Inversionen, wie sie beispielsweise zu beobachten sind, wenn man das Foto eines Berges auf den Kopf stellt. Berge scheinen zu Tälern und Täler zu Bergen zu werden. Genau genommen handelt sich aber nur um eine Projektion des Hohlkopfes auf die Ebene. Wir sehen fortan das Portrait wie eine Fotografie flächenhaft. Von einer Fotografie eines Gesichts, das auf den Betrachter schaut weiß man, dass dies auch noch der Fall ist, wenn man seine Position verändert: Das Gesicht scheint uns mit dem Blick zu verfolgen. Das fällt uns nicht weiter auf, weil wir uns daran gewöhnt haben.

Wenn man sich relativ zur flächenhaft gewordenen Hohlmaske bewegt, hat man jedoch das deutliche Gefühl, dass das Gesicht in Bewegung gerät und uns aktiv zu verfolgen scheint. Das lässt sich mit einem geometrischen Ef-



fekt begründen, wonach der Blick des Hohlgesichtes dem Betrachter tatsächlich vorseilt, was bei einem Foto nicht der Fall ist [2, 3].

Durch Brechung und Totalreflexion an den Oberflächen des Glasprismas ergeben sich je nach Blickwinkel die von dem Blick ins Aquarium bekannten Effekte. Sie kommen hier als zusätzliche Ansichten des Porträts zum Ausdruck. Obwohl diese Phänomene mit Hilfe der geometrischen Optik erklärt werden können, fordern sie aufgrund des komplexen Zusammenspiels der unterschiedlichen Darstellungen des Einsteinschen Portraits immer wieder die physikalische Intuition heraus. So wird beispielsweise in Abbildung 3 das Porträt von Einstein zum einen von der hohlen Rückseite aus gezeigt. In der zweidimensionalen Abbildung erscheint es gänzlich

normal. Es ist jedoch spiegelverkehrt im Vergleich mit Abbildung 1, wie deutlich an der Unterschrift ersichtlich ist. Erkennbar ist zum anderen eine durch Brechung an der oberen Fläche entstehende, zusätzliche Ansicht von Einstein von unten her.

Die bisherige Technik erlaubt nur Schwarz-Weiß-Darstellungen. Farbinnegravuren wären natürlich noch realistischer. Dies scheint in absehbarer Zukunft tatsächlich möglich zu werden. Experimentiert wird unter anderem mit Farbzentren im Material und mit spektraler Zerlegung des weißen Lichts durch Beugung an den Mikropunkten [4].

Zusammenfassung

Nichtlineare optische Effekte ermöglichen räumliche Gravuren im Innern eines massiven Glasblocks. Dessen Anblick zeigt außerdem die von Aquarien her bekannten Vervielfältigungen mit und ohne Seitenverkehrungen des Portraits. Schließlich lassen sich durch einen Blick von hinten die faszinierenden Phänomene des Hohlmaskeneffektes untersuchen.

Stichworte

Nichtlineare optische Effekte, Innengravur, Hohlmaske.

Literatur und Internet

- [1] www.contento-shop.de/shop
- [2] K. Hinsch, *Physik in unserer Zeit* **2005**, 36(3), 124.
- [3] H.-J. Schlichting, *Naturwissenschaften im Unterricht/Physik/Chemie* **1987**, 35(6), 35.
- [4] I. Troitski, in: J. Gregory et al. (Hrsg.) *Laser Induced Images in Optical Materials*, Proc. SPIE **2004**, 5273(6), 192.

Abb. 3 Ansicht auf die hohle Seite Rückseite des Einstein-Porträts.

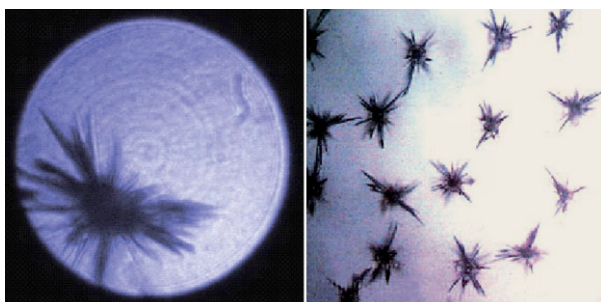


Abb. 2 Links: Einzelner Mikroriss im Glas, rechts mehrere Einzelpunkte (Foto: www.glassystem.de).

Autoren

Christian Ucke und Hans-Joachim Schlichting sind die Begründer der Reihe Spielwiese.

Anschriften

Dr. Christian Ucke,
Rofanstraße 14B,
81825 München.
Ucke@mytum.de

Prof. Dr. Hans-Joachim
Schlichting, *Didaktik
der Physik*, Universität
Münster,
48149 Münster.
Schlichting@uni-
muenster.de