

## Text: Tolga Ergin vom Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

### Grundidee der Teppich-Tarnkappe

Ein flacher Spiegel reflektiert wunderbar das Licht, man kann sich selbst und alle Objekte unverzerrt darin erkennen. Würde man jedoch unter dem Spiegel ein Objekt verstecken, wäre das einem Beobachter sofort klar, da das Spiegelbild verzerrt werden würde (ähnlich einem Zerrspiegel in einem Spiegelkabinett). Die Täuschung würde auffliegen. Baut man nun die Tarnkappe über die Bodenwelle/Beule, so sieht der Beobachter wieder einen flachen Spiegel und würde nicht auf die Idee kommen, dass jemand etwas unter dem Spiegel versteckt hat – die Beule und das darunter versteckte Objekt sind unsichtbar.

### Der Aufbau der „Teppich-Tarnkappe“

Der Film („Rotating cloak“) zeigt schematisch den Aufbau der Tarnkappe. Bei der Herstellung wird auf einem Glas-Substrat die Tarnkappe geschrieben, sie besteht aus kleinen Polymer-Stäben (ca. 100nm breit, also der 10-millionste Teil eines Meters, mit einem Abstand von 350nm) und Luft. Die Stäbe sind gestapelt, ähnlich einem Holzstapel. Daher der Name „woodpile photonic crystal“, es ist also ein photonischer Kristall in Holzstapelanordnung. Die Stäbe werden aber nicht „von Hand“ gestapelt, sondern sie werden direkt an Ort und Stelle mit der Technik des „direkten Laserschreibens“ erzeugt. Dabei wird ein Photolack mit einem stark fokussierten Laser polymerisiert (erhärtert). Bei der anschließenden Entwicklung wird der nicht belichtete Lack entfernt, übrig bleibt die geschriebene Struktur (siehe angehängter Film „DLW“). Zum Schluss wird noch ein dünner Polymer-„Teppich“ oben auf die Tarnkappe geschrieben, dieser Teppich enthält die Beule/Delle, die es unsichtbar zu machen gilt. Am Ende wird alles mit Gold beschichtet, um den Teppich zu einem Spiegel zu machen. Über der Beule erkennt man in der Tarnkappe mehr Stäbe als im Rest der Struktur, und neben der Beule sind nahe des Teppichs kleine Hohlräume. Über diese Änderung des Verhältnisses aus Polymer und Luft wird der lokale Brechungsindex gesteuert. Dieser muss nämlich variieren, um den Tarnkappeneffekt zu erzeugen und die Beule flach erscheinen zu lassen. Nur Polymer erzeugt den Brechungsindex des Polymers (ca. 1,5), nur Luft erzeugt den Brechungsindex von Luft (1) und alle Werte dazwischen können über das Mischverhältnis der beiden Materialien eingestellt werden. Genau diese Mischung zweier Materialien macht ein sogenanntes „Metamaterial“ aus, also ein künstlich geschaffenes Komposit-Material mit optischen Eigenschaften, die in der Natur nicht vorkommen. Damit dieses Metamaterial funktioniert, muss die Strukturierung (in diesem Fall der Abstand der Stäbe) kleiner sein als die Wellenlänge, mit der man die Struktur betrachtet (im Falle des sichtbaren Spektrums reichen die Wellenlängen von ca. 380-750nm). Die Herstellung solch winziger Strukturen kratzt heute schon an den physikalisch machbaren Grenzen und nur durch „Tricks“ können die Limitierungen durch die Naturgesetze „umgangen“ werden.

### Größe und Proportionen

Das benötigte Intervall aus Brechungsindizes (bei uns 1 bis 1,5) wird aus der Transformations-Optik berechnet und ist gegeben durch das Verhältnis aus Breite zu Höhe der zu versteckenden Beule. Interessant hierbei ist die Tatsache, dass die Maxwell'schen Gleichungen (die das Verhalten von

elektromagnetischen Wellen, also auch Licht, bestimmen) skalierbar sind. Das bedeutet, dass sie nicht auf eine bestimmte Größenskala beschränkt sind. Dies wiederum bedeutet, dass man die Teppich-Tarnkappe im Prinzip beliebig groß bauen kann, und auch die Beule würde mitwachsen (wobei sie das Breite-Höhe-Verhältnis beibehalten würde), bis man schließlich einen Baum unter der Beule verstecken könnte. Auch die Tarnkappe würde von ihren **äußeren** Abmessungen einfach mitwachsen. Extrem wichtig ist dabei aber, dass die Größe der Substrukturierung (also die Stäbe) **nicht** mitwachsen darf, wenn man weiterhin bei der gleichen Wellenlänge schauen will (siehe Erklärung Metamaterial). Prinzipiell kann man auch die Beule höher machen und gleich breit lassen. Das erhöht aber wie oben erwähnt die Anforderungen an das zugängliche Brechungsindex-Intervall, sprich: man benötigt andere Materialien als das Polymer, das wir verwenden.

### Transformations-Optik

Die Transformations-Optik ist eng mit dem Grundgedanken der allgemeinen Relativitätstheorie (ART) verwandt und bedient sich auch der gleichen Mathematik. In der ART wird die Raumzeit durch die Anwesenheit von schweren Körpern (Planete, Sterne, schwarze Löcher) verzerrt und gekrümmt. Das hat unter anderem auch zur Folge, dass Licht nicht mehr „geradeaus“ läuft, sondern gebogen wird (das Phänomen der „Einsteinringe“ ist vielleicht bekannt, siehe evtl. Bilder auf <http://de.wikipedia.org/wiki/Einsteinring>). Man kann nun den Verlauf des Lichts „vorherbestimmen“, indem man den Raum mathematisch transformiert. Da wir aber den Raum nicht tatsächlich im Labor krümmen können, bietet die Transformations-Optik die Lösung: Sie verknüpft eine Krümmung des (leeren) Raums mit den optischen Eigenschaften eines Materials im flachen Raum. Das Metamaterial „täuscht“ also eine Krümmung des Raumes vor, das Licht läuft auf der vorberechneten (im Prinzip beliebig geformten) Strecke. Im Falle der Teppich-Tarnkappe wird das Licht so gelenkt und „gebogen“, dass die Strahlen die Tarnkappe verlassen, als wären sie auf einen flachen Spiegel getroffen und nicht auf die Beule.

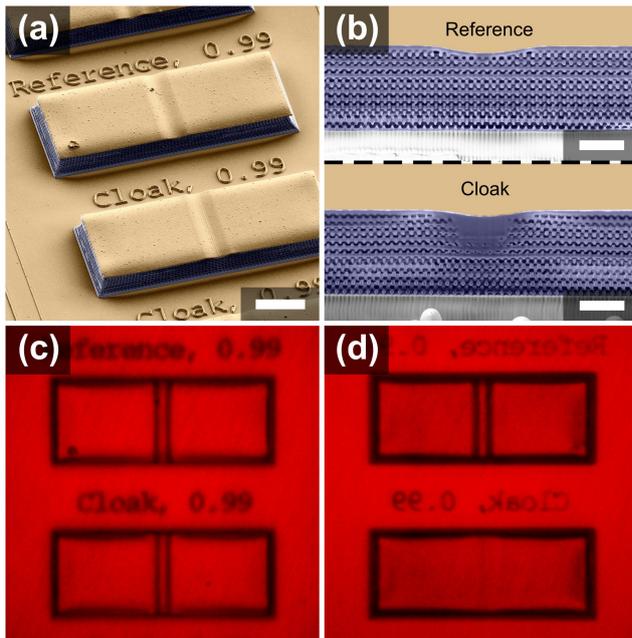


Bild „Cloak“

- (a) Das Bild zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme der Tarnkappe (unten) und einer Referenzstruktur (oben). Die Referenz dient zum Vergleich der getarnten Beule mit einer ungetarnten Beule.
- (b) Die Referenz und die Tarnkappe wurden aufgeschnitten, um ins Innere blicken zu können. Man sieht schön das lokal veränderte Mischverhältnis aus Polymer und Luft bei der Tarnkappe.
- (c) Beide Strukturen werden von der Luftseite aus betrachtet, man schaut also „von oben“ auf die Delle. Da beide Beulen/Dellen nominell identisch sind, erkennt man auch bei beiden den typischen dunklen Doppelstreifen, sozusagen den „Fingerabdruck“ der Beule.
- (d) Wird die Struktur umgedreht, blickt man nun durch das Glas-Substrat und durch die Tarnkappe auf die Beule. Im Falle der Tarnkappe ist von der Beule nichts mehr zu sehen – der Spiegel erscheint flach.