

## ■ Doppelt oder gar nicht sehen

Die geschickte Anordnung zweier doppelbrechender Kalkspatkristalle funktioniert als optische „Tarnkappe“.

**D**oppelbrechende Materialien führen im Allgemeinen dazu, dass der Beobachter die Dinge durch sie hindurch doppelt sieht. Durch geschicktes Aneinanderfügen zweier geeignet geformter doppelbrechender Kristalle ist es aber auch möglich, Dinge zum Verschwinden zu bringen. Basierend auf einem entsprechenden theoretischen Vorschlag [1] gelang es zwei Forscherteams unabhängig voneinander kürzlich, eine makroskopische optische Tarnkappe zu erzeugen [2, 3].

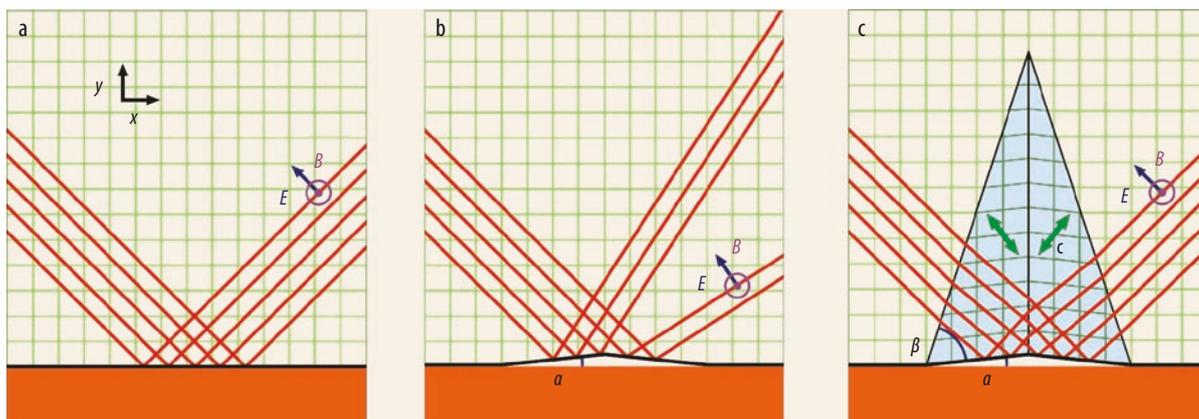
Beide Teams bedienen sich der Konzepte der Transformationsoptik [4]. Diese erlaubt es, gedachte Verzerrungen des Raums (also Koordinatentransformationen) durch Verteilungen optischer Eigenschaften darzustellen. Das lässt sich anhand einer Spiegelfläche illustrieren. Ist sie völlig eben (Abb. 1a), dann lenkt sie einen einfallenden Lichtstrahl auf die bekannte Weise ab. Die Ablenkung fällt anders aus, wenn der Lichtstrahl auf eine kleine „Bodenwelle“ im Spiegel trifft (Abb. 1b). Dadurch verkürzt sich die Laufzeit des Lichts entlang der  $y$ -Achse. Die Bodenwelle lässt sich auch durch eine gedachte Koordinatentransformation erzeugen, bei der die  $y$ -Koordinaten in

einem bestimmten Bereich gemäß  $y \rightarrow y'(x,y) = a|x| + by$  mit einem Faktor  $b < 1$  gestaucht sind. Um die Laufzeitveränderung rückgängig und damit die Bodenwelle unsichtbar zu machen, ist es nötig, die Lichtgeschwindigkeit entlang  $y$  im gestauchten Bereich entsprechend der Koordinatentransformation zu verlangsamen (Abb. 1c). Dafür muss die optische Brechzahl  $n$  gegenüber der Ausgangssituation wachsen (für  $a = 0$  wie  $n \rightarrow n/b$ ). Die  $x$ -Achse kann hingegen gemäß  $x \rightarrow x'(x,y) = x$  unverändert bleiben. Dadurch ergibt sich für die Propagation in  $x$ -Richtung eine kleinere Brechzahl als in  $y$ -Richtung. Die zwei Hauptachsen dieser Richtungsabhängigkeit fallen jedoch durch die Verzerrung des Koordinatensystems nicht mit den Koordinatenachsen zusammen.

Die den Hauptachsen zugehörigen Brechzahlen  $n_o$  und  $n_a$  lassen sich durch gewöhnliche doppelbrechende Kristalle für ordentliche („o“) und außerordentliche („a“) Polarisation des Lichts erzielen. Beide Arbeitsgruppen verwenden dafür Kalkspat [2, 3]. Weiterhin zeigen die kristallographischen  $c$ -Achsen im linken bzw. rechten blauen Dreieck in Abb. 1c in unterschiedliche Richtungen. Zwei

unterschiedlich orientierte Kalkspatkristalle müssen also in der Mitte aneinandergefügt werden. Die Umgebung des Experiments ist mit einem Material aufgefüllt, dessen Brechungsindex zwischen  $n_o$  und  $n_a$  liegt. Für p-polarisiertes Licht, bei dem der elektrische Feldvektor in der Einfallsebene liegt, wird die dreieckige Erhöhung im verspiegelten „Fußboden“ somit unsichtbar gemacht in dem Sinne, dass ein Beobachter diesen als einen flachen und somit unverdächtigen Metallspiegel wahrnimmt.

Neu ist hierbei gegenüber früheren Arbeiten, dass sich auf diese Weise makroskopische optische Tarnkappen verwirklichen lassen – und das sogar im sichtbaren Spektralbereich (Abb. 2). Unter dem dreieckigen Boden lassen sich Objekte mit einer Höhe von bis zu zwei Millimeter verstecken. Gleichwohl ist damit der „heilige Gral“ der Transformationsoptik, nämlich makroskopische, dreidimensionale, polarisationsunabhängige und spektral breitbandige Tarnkappen im Sichtbaren, noch nicht gefunden. Die konstruierten Tarnkappen sind zwar erstmals makroskopisch, also Tausende von Lichtwellenlängen groß, in anderer Hinsicht aber ein Rückschritt



**Abb. 1** Von links einfallende parallele Lichtstrahlen (rot) werden von einem flachen spiegelnden Boden (a) bzw. von einer dreieckigen Erhöhung im Boden ohne (b) und mit (c) optischer Tarnkappe reflektiert. Aneinandergefügte unterschiedlich orientierte doppelbrechende

Kalkspatkristalle ( $c$ -Achsen, grün) machen die dreieckige Erhöhung unsichtbar. Unter diesem „Teppich“ lassen sich dann Gegenstände verstecken. Beim Design dieser Struktur kommt die Transformationsoptik zum Einsatz. Das Netz von grünen Linien illustriert die zugrunde-

liegende Koordinatentransformation, welche die  $x$ -Koordinaten unverändert lässt, die  $y$ -Koordinaten aber staucht. Mit doppelbrechenden Kristallen lässt sich ein zur Transformation äquivalenter Effekt bewirken, wenn auch nur für die p-Polarisation des Lichts.



**Abb. 2** Eine kleine Bodenwelle in einem Schriftband lässt sich mit zwei doppelbrechenden Kristallen unsichtbar machen, allerdings nur für geeignet polari-

siertes Licht (links). Bei allen anderen Polarisierungen verrät sich die Erhebung durch den verzerrten Schriftzug (rechts).

gegenüber früheren Ansätzen [5]. So funktionieren sie nur für p-Polarisation des einfallenden Lichts, nicht aber für s-Polarisation, bei der die optische Brechzahl für Propagation des Lichts in  $x$ - und in  $y$ -Richtung in **Abb. 1** identisch ist. Ein Betrachter muss also eine Polarisationsbrille aufsetzen und darf den Kopf nicht drehen. Zudem funktioniert der Tarnkappeneffekt nur für Lichtstrahlen in der  $xy$ -Ebene vollständig. Es handelt sich also – wie die Autoren auch einräumen – um eine effektiv zweidimensionale Tarnkappe. Von der Seite darf man also auch nicht hinschauen. Schließlich legt das Verhältnis zwischen ordentlicher und außerordentlicher optischer Brechzahl ( $n_o = 1,66$  bzw.  $n_a = 1,49$ ) im Kalkspatkristall die relative Raumverzerrung fest, also den Winkel  $\beta$  für ein gegebenes  $\alpha$  (vgl. **Abb. 1c**). Vielleicht sind aber schon bald auf andere Weise polarisationsunabhängige dreidimensionale optische Tarnkappen im Sichtbaren für flexibler wählbare „Bodenwellen“ möglich.

Die Transformationsoptik ist letztlich eine neue Herangehensweise an das Design komplexer optischer Systeme. Tarnkappen sind ein eindrucksvolles Beispiel für die Mächtigkeit dieses Zugangs, weil man sie noch vor wenigen Jahren gemeinhin für unmöglich hielt. Die beiden neuen Arbeiten illustrieren, dass solche neuen Herangehensweisen manchmal auch ganz einfache experimentelle Umsetzungen inspirieren können. Vielleicht wird das „Unmögliche“

von gestern so schon bald zu einem leicht durchführbaren Demonstrationsversuch im Physik-Unterricht in der Schule. Es ist jedoch fraglich, ob selbst eine „perfekte“ optische Tarnkappe ernsthafte Anwender fände. Schließlich kann man wegen der Reziprozität nicht nur nicht „hineinsehen“, sondern auch nicht „heraussehen“. Man stünde also unter seiner Tarnkappe buchstäblich im Dunkeln. Die Transformationsoptik wird wohl eher über das Design ausgefeilter Linsensysteme oder Polarisationsoptiken ihre Anwendungen finden. Vielversprechende Ansätze hierzu gibt es bereits.

**Jonathan Müller, Tolga Ergin, Nicolas Stenger und Martin Wegener**

- [1] Y. Luo et al., IEEE Trans. Ant. Prop. **57**, 3926 (2009)
- [2] B. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 033901 (2011)
- [3] X. Chen et al., Nature Commun. **2**, 176 (2011)
- [4] M. Wegener et al., Physics Today **63** (10), 32 (2010)
- [5] T. Ergin et al., Science **328**, 337 (2010)

**Jonathan Müller, Tolga Ergin, Dr. Nicolas Stenger und Prof. Dr. Martin Wegener,** Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 76128 Karlsruhe