

Ein irritierend rotierender Globus

Christian Ucke und Hans Joachim Schlichting

Ein auf einem feststehenden Dreibein befindlicher Globus dreht sich lautlos und scheinbar ohne äußere Energiezufuhr. Dahinter steckt eine ingeniöse Kombination von High-tech Materialien und Geräten mit bekannten mechanischen und optischen Effekten, die sich erst nach und nach erschließt.

In einem Europäischen Patent [1] steht in einer für Patente typischen Diktion zu dem in Abbildung 1 sichtbaren Globus:

Eigenangetriebene, mobile, im Wesentlichen stationäre Struktur, welche aufweist: einen sich drehenden Körper, der einen in sich abgeschlossenen Antriebsmechanismus umschließt, der von Energie angetrieben ist, die von elektromagnetischen Strahlungen herrührt, wobei der Mechanismus ein magnetisiertes, Gegendrehmoment produzierendes Element aufweist, das festgelegt ist durch und ausgerichtet ist entlang die/der Richtung eines umliegenden Energiefelds, welches das Erdmagnetfeld aufweist.

Sieht man den sich drehenden Globus in der Realität, erschließt sich einem zumindest teilweise der erste Teil der Beschreibung. Dennoch ist es bei bloßer Betrachtung unverständlich, wie sich die Erdkugel auf dem fest stehenden Dreibein drehen kann. Nimmt man die Kugel in die Hand, hat man sofort ein erstes Aha-Erlebnis: Die Kugel mit der politischen Weltkarte dreht sich weiter und man spürt keinerlei Bewegung in der Hand. Dreht man dann die in der Hand gehaltene Kugel, bleibt der Nordpol immer oben. Offenbar befindet sich eine innere, frei bewegliche Kugel in einer äußeren, transparenten Kugel, die man fest umfassen und drehen kann.

Mit dieser ersten Schlussfolgerung beginnen wir im Folgenden eine Untersuchung eines Systems, in das wir nicht direkt hineinschauen können, ohne es zu zerstören. Wir müssen gewissermaßen non invasiv vorgehen. Dadurch wird der Reiz der Untersuchung aber eher noch erhöht, weil wir – insbesondere optische – Methoden anwenden, die es erlauben den inneren Aufbau des Globus zu erschließen. Den Link zu einem freien Video mit dem in Abbildung 1 wiedergegebenen MOVA-Globus finden sie am Ende des Artikels.



Abb. 1: Der MOVA-Globus (Ø 11,5cm) dreht sich in bei einer Beleuchtungsstärke von 1000lx etwa in 25s einmal herum – von oben auf den Nordpol blickend entgegen dem Uhrzeigersinn.

Lagerung der inneren Kugel

Es gibt schon lange ein kleines Spielzeug ohne viel high-tech. Der amerikanische Erfinder des MOVA-Globus, William W. French, sagt in einem erklärenden Video [2] auch, dass er durch dieses Spielzeug eine Anregung für seinen Globus erhalten hat. In einer transparenten Plexiglas-Kugel befindet sich eine Flüssigkeit (Petroleum) und in dieser schwimmt eine zweite Kugel in Gestalt eines Auges (Abbildung 2; Schlitterauge, glide eye ball). Faszinierend ist, dass das Auge immer nach oben schaut, wenn man das Spielzeug über eine Ebene rollen lässt. Da der Schwerpunkt der inneren Kugel unter ihrem Mittelpunkt liegt, schwimmt die Kugel immer mit derselben Seite nach oben. Die mittlere Dichte der inneren Kugel ist etwa gleich groß wie die Dichte der Flüssigkeit.



Abb. 2: Augenkugel (\varnothing 4cm)

Allerdings berührt die innere Kugel die äußere Kugel immer an irgendeiner Stelle von innen. Es ist grundsätzlich nicht möglich, ein Objekt ohne weitere Hilfsmittel stabil innerhalb einer homogenen Flüssigkeit mit konstanter Temperatur schweben zu lassen, d.h. nicht an der Oberfläche und nicht auf dem Boden aufliegend. Das bekannte Galileo-Thermometer ist ein Beispiel [3]. Kleinste Temperaturänderungen bewirken unterschiedliche Dichteänderungen von innerer Augenkugel und Flüssigkeit und damit ein Absinken oder Hochschwimmen. Allerdings ist die Gleitreibung aufgrund dieser Berührung so gering, dass die Beweglichkeit kaum eingeschränkt wird.

Es gibt jedoch eine Möglichkeit, ein stabiles Schweben eines Körpers dadurch zu erreichen, indem man ihn auf die Grenzschicht zwischen zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte platziert, wobei die mittlere Dichte des Körpers gerade zwischen den Dichten beider Flüssigkeiten liegt. Die untere Flüssigkeit hat eine größere Dichte als die obere Flüssigkeit.

Und genau diese Möglichkeit ist beim MOVA-Globus realisiert (Abbildung 3). Im unteren Teil der äußeren Kugel befindet sich eine transparente, dichtere Flüssigkeit, darüber eine weniger dichte, transparente Flüssigkeit. Gemäß dem Patent [4] handelt es sich um spezielle Fluorcarbon- und Hydrocarbon-Flüssigkeiten mit Dichten von $1,69\text{g/cm}^3$ bzw. $0,75\text{g/cm}^3$. Die mittlere Dichte der Innenkugel liegt mit $0,81\text{g/cm}^3$ dazwischen. Durch eine kleine Veränderung der mittleren Dichte der Innenkugel kann man erreichen, dass die Kugel etwas höher oder tiefer schwebt, jedenfalls aber nicht unten oder oben anstößt. Die nur schwach sichtbare Grenze zwischen beiden Flüssigkeiten ist im unteren Bereich der Kugel zu erkennen.

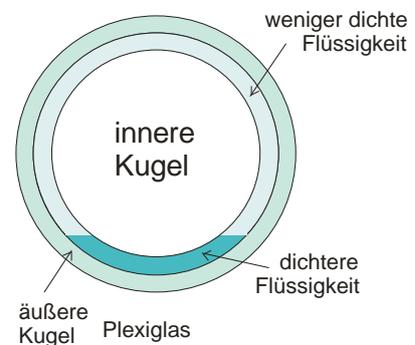


Abb. 3: Lagerung der Innenkugel beim MOVA-Globus (nicht maßstabsgerecht).

Tatsächlich schwebt die Innenkugel nicht exakt zentrisch in der äußeren Kugel, wie sich leicht mit einer optischen Untersuchungsmethode verifizieren lässt (siehe Optische Eigenschaften). Für eine zentrische Lagerung wären eine extrem genaue Abstimmung der Dichten und zudem noch eine Temperaturstabilisierung erforderlich.

Die beiden nicht mischbaren Flüssigkeiten müssen darüber hinaus vergleichbare thermische Ausdehnungskoeffizienten wie die Materialien der äußeren und inneren Kugel aufweisen, da andernfalls Temperaturänderungen zu einem Anstoßen der inneren an die äußere Kugel oder sogar zu einem Bruch der Konstruktion führen könnten. Gemäß dem beiliegenden User Manual sollte man das Gerät nicht Temperaturen unter 5°C (40°F) und über 38°C (100°F) aussetzen. Da die beiden Flüssigkeiten eine geringe Viskosität aufweisen, wird mit dieser Konstruktion der in den Flüssigkeiten schwebenden inneren Kugel eine sehr geringe Reibung zwischen den beiden Kugeln erzielt. Das ist wichtig für einen möglichst leistungsarmen Antrieb der inneren Kugel.

Optische Eigenschaften

Überraschend ist es, dass man die transparente, äußere Kugelschale praktisch nicht sieht. Man hat das Gefühl, die politische Weltkarte bzw. die alter-nativen Designs befinden sich außen auf der Oberfläche der äußeren Kugel. Das macht einen wesentlichen Reiz des Globus aus.

Blickt man auf den Rand der äußeren Kugel, wird das vom Inneren der Kugel kommende Licht zum Auge des Betrachters hin gebrochen. Dem Auge erscheint unmittelbar die innere Kugel auf der Oberfläche der äußeren Kugel (Abbildung 4). Mit einer Brechzahl von $n_2 = 1,49$ für Plexiglas ergibt sich für den Winkel $\gamma \sim 138^\circ$, das ist das 180° -Komplement zum Winkel für die Totalreflexion beim Plexiglas ($\Theta_c = 42,2^\circ$).

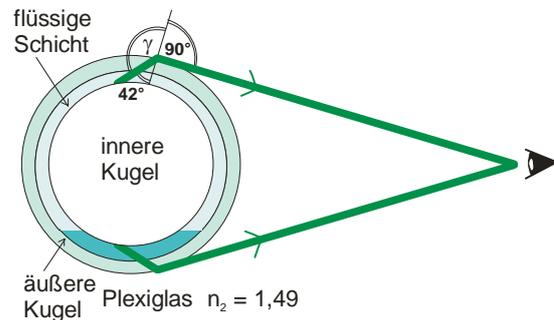


Abb. 4: Lichtbrechung am Rand der Kugel (nicht maßstabsgerecht; die Winkel stimmen aber).

Leuchtet man mit einem grünem Laser ungefähr senkrecht auf die Oberfläche, erscheint um den hellen Auftreffpunkt des Laserstrahls auf der inneren Kugel ein dunkler Kreis, umgeben von einem hellen Rand, dessen Helligkeit weiter nach außen schnell abnimmt (Abbildung 5 und Infokasten: Totalreflektion mit einem Laser).

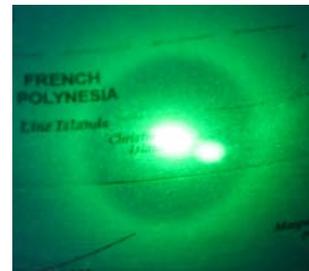


Abb. 5 Totalreflektion mit einem Laser. Der kleinere, helle Punkt ist der Auftreffpunkt des Laserstrahls auf die äußere Plexiglaskugel.

Dieser Effekt wurde als Teetassenlichtmustereffekt beschrieben [5]. Der durch die Plexiglasschicht der äußeren Kugel und durch die Flüssigkeitsschicht auf die Oberfläche der inneren Kugel auftreffende Laserstrahl wird diffus in alle Richtungen reflektiert. Einige der Strahlen können aus dem Medium austreten und man sieht den auftreffenden Strahl als – sehr hellen – Lichtpunkt. Überschreitet ein reflektierter Strahl jedoch den Grenzwinkel der Totalreflektion, bleibt das Licht innerhalb der Schicht, beim MOVA-Globus innerhalb der Doppelschicht aus Plexiglas und Flüssigkeit gefangen, und trifft wieder auf die innere Oberfläche auf. Es gibt also einen kreisförmigen Bereich um den Auftreffpunkt, in dem kein Licht auf die Oberfläche kommt. Dieser Bereich erscheint als dunkler Kreis.

Dadurch wird unmittelbar ein Vergleich der Dicke der Flüssigkeitsschicht des MOVA-Globus an verschiedenen Stellen nahegelegt und damit eine Beurteilung, wie gut zentrisch die innere Kugel schwebt. Erscheint der Durchmesser nämlich größer, so verweist das auf eine größere Dicke der Flüssigkeitsschicht. Bei diesen Feststellungen haben wir die Dicke der äußeren Plexiglaskugel stillschweigend als konstant vorausgesetzt.

Darüber hinaus ermöglicht der Effekt eine Sichtbarmachung der unterschiedlichen Brechzahlen der zwei in der Kugel vorhandenen Flüssigkeiten. Der Durchmesser des dunklen Kreises in der Umgebung des Südpols ist größer als in der Region unmittelbar oberhalb der dichteren Flüssigkeit. Das deutet auf eine kleinere Brechzahl der hier befindlichen Flüssigkeit hin [5].

Aufbau der inneren Kugel

Das eigentliche Geheimnis steckt auf und in der inneren Kugel. Da wir aus Kostengründen zunächst keinen MOVA-Globus zerstören wollten, beziehen wir uns hier auf ein Video und das Patent des Erfinders [2, 4] sowie eine Röntgenaufnahme.

Die Oberfläche der inneren Kugel ist teildurchlässig gestaltet, so dass Licht durchdringen kann (Abbildung 6). Etwa 10% kommt durch. Das Innere der Kugel sieht man nicht, wenn man von außen auf die Oberfläche blickt, da das relativ dunkle Innere gegen die beleuchtete Oberfläche einen sehr starken Kontrast aufweist.

Ein in der inneren Kugel im unteren Bereich befestigter Motor wird von Solarzellen angetrieben. Durch diese Lage unten liegt der Schwerpunkt der inneren Kugel unterhalb des Mittelpunkts. Würde die Achse des Motors nicht irgendwie festgehalten, würde sich bei Lichteinfall nur die Motorachse drehen. Hier ist jedoch an der Achse des Motors nahe am Nordpol ein länglicher, horizontal magnetisierter Magnet befestigt, der sich am Erdmagnetfeld ausrichten und ‚festhalten‘ kann. Das ist das „magnetisierte, Gegendrehmoment produzierende Element“ aus der Patentbeschreibung. Behält dieser Kompassmagnet seine Position bei, dreht sich die innere Kugel mit dem Motor. Wir haben es hier also mit einer ans Fantastische grenzenden Technik zu tun, mit Hilfe des Erdmagnetfeldes einen Gegenstand im Raum zu fixieren.

Der tatsächliche Aufbau eines MOVA-Globus und insbesondere der inneren Kugel lässt sich aus einer Röntgenaufnahme erschließen (Abbildung 7). Die Schichtdicke der äußeren Plexiglasskugel ergibt sich zu 3 mm. Die Dicke der Flüssigkeitsschicht ist etwas ungleichmäßig und schwankt zwischen 3 und 5 mm. Im unteren Teil erkennt man deutlich die Schicht mit der dichteren Flüssigkeit.

Das schwarze Rechteck im oberen Teil ist der Kompassmagnet. Die Solarzellen liegen in der Mitte der inneren Kugel, wo sie eine maximale Größe erreichen können. Darunter liegt der Motor. Bei dieser Anordnung kommt es auf das optimale Zusammenspiel aller Komponenten an. Der Kompassmagnet kann keinem großen Drehmoment widerstehen, deswegen muss der Anlaufwiderstand und Reibungswiderstand der inneren Kugel gegen die äußere Kugel so klein wie möglich sein. Das wird durch die Flüssigkeitslagerung der inneren Kugel gewährleistet. Der Motor benötigt im Extremfall die sehr kleine Leistung von einem Mikrowatt (10^{-6} W; Angabe des Herstellers).

Da die Solarzellen waagrecht in der inneren Kugel liegen, reagiert der MOVA-Globus besser auf Licht, das von oben kommt bzw. seitlich schräg einfällt. Er dreht sich dann schon bei einer Beleuchtungsstärke von etwa 100 lx und kann für eine Umdrehung an die 60 s brauchen. Bei bedecktem Himmel im Freien misst man ohne weiteres Beleuchtungsstärken von 20.000 lx, der Globus vollführt dann in weniger als 20 s eine Umdrehung. Direkter Sonnenstrahlung soll man das Gerät allerdings nicht aussetzen.

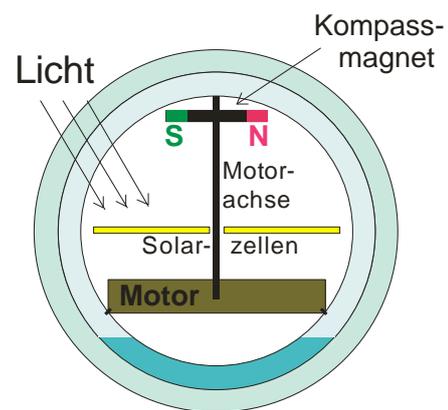


Abb. 6: Motor mit Solarzellen (nicht maßstabsgerecht)

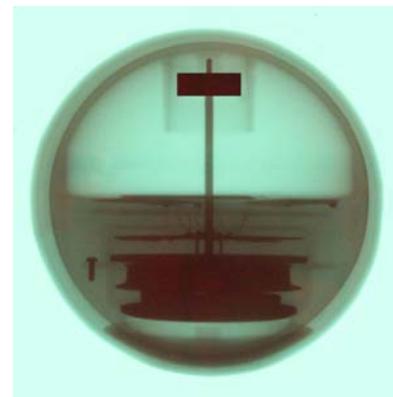


Abb. 7: Röntgenbild eines MOVA-Globus.

Während die bisherigen Untersuchungen eine Kombination aus Black-Box-Methode und einer zerstörungsfreien „Durchleuchtung“ mit Röntgenstrahlen darstellen, erkunden wir im Folgenden das Innere eines kugelförmigen MOVA-Globus direkt (Abbildung 8). Dazu wurde die transparente, äußere Plexiglaskugel ohne größeren Aufwand aufgesägt und abgenommen. Die Flüssigkeiten zwischen äußerer und innerer Kugel wurden vorher mit einer Spritze abgesaugt.



Abb. 8: Blick ins Innere der inneren Kugel eines MOVA-Globus.

Die Oberfläche der inneren Kugel wurde auf einem Großkreis vorsichtig angeritzt, wobei sich eine mit der Karte bedruckte Folie ablösen lässt. Dadurch wird der Blick auf das Innere frei (Abbildung 8). Der zylindrische Kompassmagnet oben inklusive der zum Motor führenden Achse ist deutlich zu erkennen. Eine zylindrische Plexiglashülle schützt ihn und die Achse vor möglichen Transportschäden. Drei Solarzellen mit Zuleitungen zum Motor sind sichtbar. Die untere Hälfte der Kugel ist mit einer klaren und elektrisch nichtleitenden Flüssigkeit gefüllt, die die Solarzellen gerade bedeckt. Damit lässt sich das Gewicht dieser Kugel sehr genau einstellen, so dass sie präzise zwischen den beiden in der äußeren Kugel befindlichen Flüssigkeiten schwebt. Den Rand dieser Flüssigkeit kann man an der inneren Kugelfläche ausmachen. Sie ist auch im Röntgenbild zu sehen. Der Motor befindet sich komplett eingekapselt unterhalb der Solarzellen.

Setzt man die so befreite, innere Kugel in ein wassergefülltes Behältnis, schwimmt sie darin und taucht etwa zu zwei Dritteln ein. Es ist ein hübscher Effekt, dass die Kugel – insbesondere mit wieder aufgesetzter, bedruckter Folie - bei geeigneter Beleuchtung dann anfängt im Wasser zu rotieren (siehe link zum video am Ende). Dabei braucht es geraume Zeit, bis sich eine stabile Rotation einstellt. Die Solarzellen drehen den Motor sofort an, der Kompassmagnet wird zunächst mit angedreht bis er sich stabil im Erdmagnetfeld ausrichtet.

Magnetische Experimente

Der Kompassmagnet liegt etwa 2cm unterhalb des Nordpols und verursacht direkt an der Oberfläche des Globus beim Nordpol ein Magnetfeld von etwa 2 mT (milli Tesla). Bis zu 10 mT ergeben sich einige Zentimeter weiter, wenn man gerade einem Pol des Kompassmagneten nahe kommt. Da sollte man besser nicht mit seinem Smartphone messen.

Legt man auf den Nordpol eine übliche, längliche ferromagnetische Büroklammer (Abbildung 9), richtet sie sich sofort in der Richtung des Kompassmagneten aus. Dreht man die Büroklammer mit der Hand vorsichtig um 90° entgegen dem Uhrzeigersinn, bewegt man den Kompassmagnet darunter mit. Das geht sehr leicht, womit man gleichzeitig zeigt, wie gering das Drehmoment ist, dem der Kompassmagnet widerstehen kann und wie leichtgängig der Globus gelagert sein muss, um dennoch am Erdmagnetfeld fixiert werden zu können. Die innere Kugel kann man auf diese Weise etwas beschleunigen. Umgekehrt kann man die innere Kugel bis zum Stillstand abbremsen oder sogar die Drehrichtung kurzzeitig umkehren, wenn man die Büroklammer gefühlvoll im Uhrzeigersinn dreht.

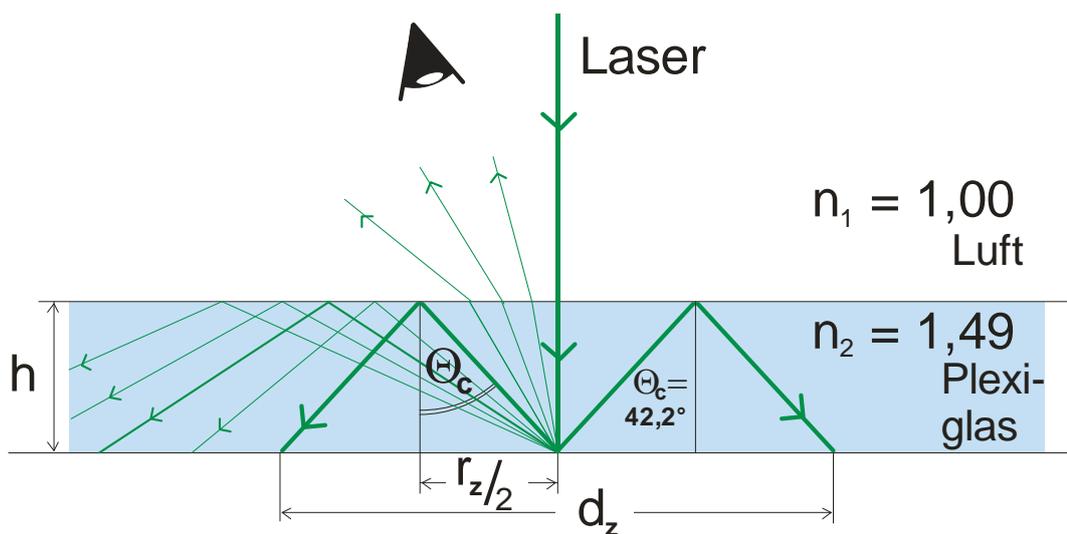


Abb. 9: Mit einer Büroklammer auf dem Nordpol lassen sich einige Experimente durchführen.

Das Drehen der Büroklammer und damit des Kompassmagneten hat allerdings Folgen. Lässt man die verdrehte Büroklammer auf dem Nordpol liegen, versucht der sich der Kompassmagnet an der Büroklammer und am Erdmagnetfeld auszurichten. Da die Büroklammer jedoch sehr leicht ist und nur eine geringe Reibung auf der Plexiglasoberfläche aufweist, dreht der Kompassmagnet die Büroklammer mit. Es gibt in der Folge ein Wechselspiel zwischen Ausrichtung des Kompassmagneten und der sich ja weiter drehenden Motorachse. Das führt erst nach einer gewissen Zeit zu einer gleichmäßig normalen Drehung. Ähnliches passiert, wenn man die Büroklammer nach dem Auflegen und Drehen wieder wegnimmt.

Transportiert man den Globus aus einer dunklen Umgebung in eine relativ helle Umgebung, muss sich der Kompassmagnet wie normalerweise bei jedem Ortswechsel auch neu ausrichten. Zur gleichen Zeit dreht der Motor aber relativ schnell los. Das kann dazu führen, dass der Motor den Kompassmagneten mitdreht und der Globus sich zunächst nicht dreht bzw. eine ganze Weile braucht, bis er seine reguläre, gleichmäßige Drehung erreicht.

Infokasten: Totalreflektion mit einem Laserstrahl



Trifft ein Laserstrahl senkrecht auf eine Schicht (Plexiglas, Wasser oder Ähnliches) und wird direkt an der Unterseite der Schicht diffus zurück reflektiert, verlässt ein Teil der Strahlen diese Schicht wieder. Man sieht den Auftreffpunkt des Laserstrahls. Ein anderer Teil der reflektierten Strahlen kommt jedoch wegen Totalreflexion an der Oberfläche nicht aus der Schicht heraus und wird sichtbar auf die untere Fläche auf-treffen.

Von oben betrachtet ergibt sich dadurch ein heller Fleck in der Mitte einer dunklen Kreisfläche, die wieder-um von einer Randfläche mit nach außen abnehmender Helligkeit umgeben ist.

Der Winkel der Totalreflexion Θ_c bei Plexiglas beträgt

$$\Theta_c = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) = \arcsin\left(\frac{1,00}{1,49}\right) = 42,2^\circ$$

Aus der Geometrie des Dreiecks beim Laserstrahl ergibt sich

$$\tan \Theta_c = \frac{r_z/2}{h}$$

Und damit

$$d_z = 4 \cdot h \cdot \tan \Theta_c$$

Eine Schichtdicke von $h = 5$ mm ergibt einen Durchmesser des dunklen Kreises von $d_z = 18,1$ mm. Derartige Werte sind auf dem Mova-Globus zu beobachten.

In Wirklichkeit ist die Situation noch etwas komplizierter. Beim Globus gibt es zwei Schichten mit unterschiedlicher Brechzahl. Die Brechzahl der im oberen Teil des Globus befindlichen Hydrocarbonflüssigkeit beträgt $n = 1,43$ und liegt damit relativ nahe an der Brechzahl des Plexiglasses. Die Brechzahl der im unteren Teil befindlichen Fluorcarbonflüssigkeit beträgt $n = 1,25$.

Außerdem ist die Schicht des Globus gekrümmt. Das macht jedoch bei einem Globusdurchmesser von 11,43 cm kaum etwas aus.

Literatur:

- [1] Selbstdrehende sphärische Anzeigevorrichtung, Europäisches Patent EP 1224649 B1
- [2] **Mova Globe origins and operation**, www.youtube.com/watch?v=OypJajrHslg
- [3] 'Das Galileo Thermometer' in: Ucke, C., Schlichting, H.J.: Spiel, Physik und Spaß, Weinheim 2011
- [4] FRICTIONLESS SELF-POWERED MOVING DISPLAY, Patent Number: US 6,952,151 B2, Oct. 2005
- [5] 'Verräterische Muster in der Teetasse' in: Schlichting, H. J., Ucke, C.: Spielerische Physik, Weinheim 2016

Das Video finden Sie unter „Supporting Information“ auf <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.201701469/suppinfo>

Und

<http://www.ucke.de/christian/physik/ftp/lectures/MOVA-globus.m4v>

*) Alle Messungen und Größenangaben beziehen sich auf einen kugelförmigen MOVA-Globus mit einem Außendurchmesser von 11,43cm.

Zusammenfassung

Ein auf einem feststehenden Dreibein befindlicher Globus dreht sich lautlos und scheinbar ohne äußere Energiezufuhr. Im Inneren einer transparenten, äußeren Plexiglashohlkugel befindet sich eine schwebend zwischen zwei Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte gelagerte Kugel. Durch den Kartenaufdruck dieser Kugel kommt etwa 10% des einfallenden Lichts hindurch und treibt über Solarzellen einen Motor an. Die Achse des Motors ist an einem Magneten befestigt ist, der sich am Erdmagnetfeld ausrichtet und dadurch fixiert wird.

Anschriften

Dr. Christian Ucke, Rofanstr. 14B, 81825 München

e-mail: ucke@mytum.de

Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Didaktik der Physik, Universität Münster, 48149 Münster

e-mail: schlichting@uni-muenster.de