

Experiment 03: Kraftbrücken sichtbar machen

einfach vorhanden (1x)

Stand: 27.07.2016 // v16

Phänomen

Mittels spezieller (*optisch aktiver*) Granulatscheiben, die beim Auftreten von Spannungen Farbeffekte zeigen, wird sichtbar, wie Kräfte in einem Granulat über sogenannte *Kraftbrücken* abgeleitet werden.

Einleitung (für Schüler_innen)

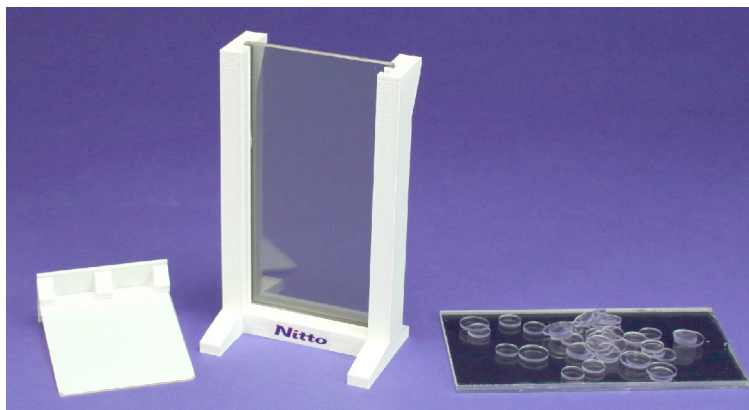
Kräfte in Granulaten (wie z. B. Sand) verteilen sich nicht gleichmäßig, sondern auf bestimmten Wegen. Dies soll in diesem Versuch sichtbar gemacht werden.

Material

- Druckstempel
- weißer Rahmen mit zwei Linearpolarisatoren zwischen Acrylglasfenstern
- Granulatscheiben (Durchmesser 15 mm & 20 mm)

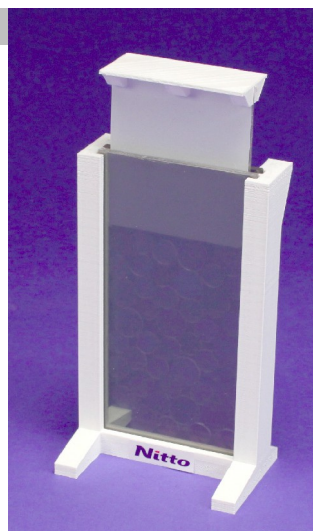
Zusätzlich benötigtes Material

- eine Lichtquelle (z. B. Schreibtischlampe) bzw. ein Overheadprojektor (OHP) / Polylux



Vorbereitung

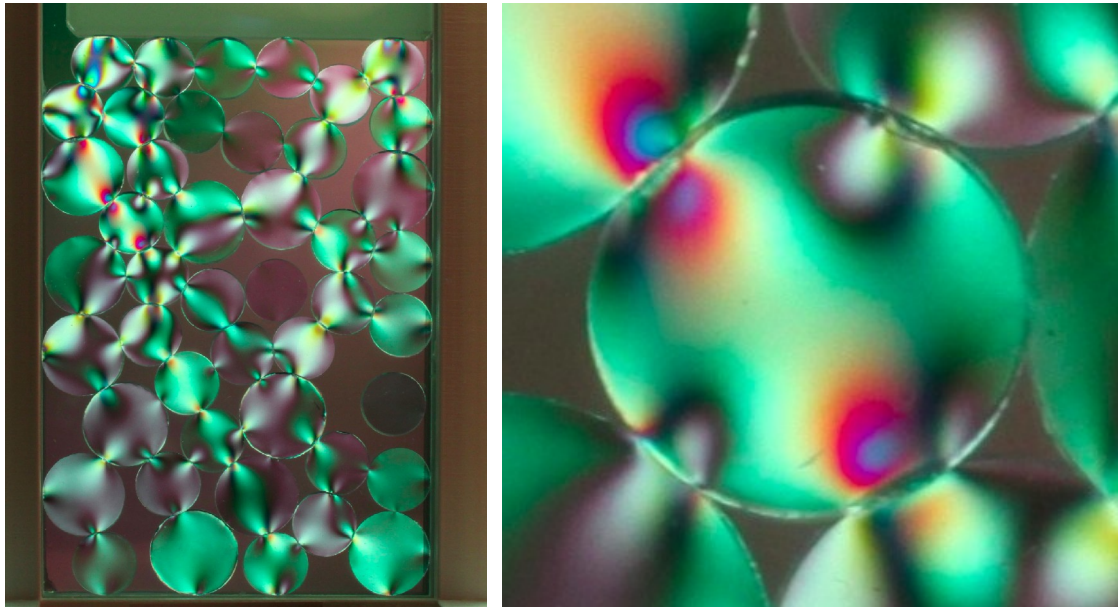
Der Rahmen wird mit den Granulatscheiben befüllt (ca. 4 cm Rand oben leer lassen). Dann wird der Aufbau von hinten durchleuchtet. Alternativ kann der Aufbau auf einen OHP / Polylux gelegt werden. Die Qualität der Bilder kann verbessert werden, indem der Raum abgedunkelt und die freibleibende Fläche am OHP / Polylux abgedeckt wird.



Experiment 03: Kraftbrücken sichtbar machen

Durchführung

Der Druckstempel wird in den Zwischenraum des Rahmens geschoben und dann per Hand belastet. Es wird sichtbar, wie sich die Kräfte zwischen den Granulatscheiben verteilen. Je stärker die Granulatscheiben gedrückt werden, umso enger wird das sichtbare Farbspektrum.



Steigende Belastung (zeilenweise)



Experiment 03: Kraftbrücken sichtbar machen

Mögliche Arbeitsaufträge

- Beobachtung der Ausbildung von Kraftbrücken, der Verteilung der Kräfte im Granulat und der Ableitung der Kräfte an die Wände:** Wie verändern sich die Kraftbrücken, wenn bei diesem Versuch schrittweise die Kraft, die auf den Schieber wirkt, erhöht wird? Brechen sie zusammen oder halten sie stand? Der Versuch sollte mehrfach wiederholt werden, um zufällige Einflüsse zu verringern.
- Breite der Kammer variieren:** Wie ändert sich das Verhalten und der Kraftanteil, der den Boden erreicht, wenn der Raum geschmälert wird? Dies kann erzielt werden, indem ein Zollstock (ggf. kurze Stücke abschneiden/-brechen) neben das Granulat in den Rahmen geschoben wird. Vorher sollten etwaige Metallkanten entfernt werden, ansonsten entstehen Kratzer im Acrylglas. Mit einem Zollstockabschnitt kann dann auch von oben gezielt auf das Granulat gedrückt werden.

Hinweise

Damit die PVC-Granulatscheiben nicht am Acrylglasfenster kleben, kann auf diese dünn Silikonöl aufgetragen werden. Für diese Schicht reicht eine kleine Menge Silikonöl (wenige Milliliter) aus dem *Experiment 12: Rayleigh-Bénard-Konvektion – Wabenmuster*. Das Silikonöl kann z. B. mit einem Tuch aus der Flasche entnommen werden, nachdem sich die Pigmente abgesetzt haben.

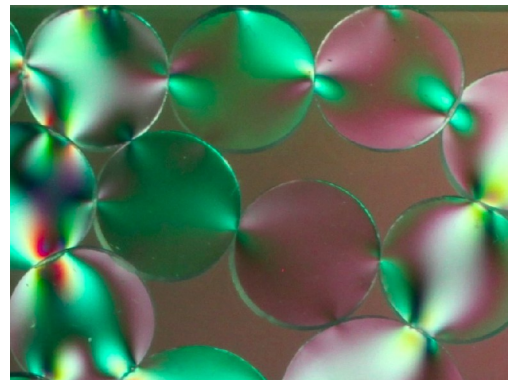
Nach Lagerung können die **PVC-Granulatscheiben** stark an dem Plexiglasfenster **haften**. Für den Versuch sollten sie vorher einmal gelöst werden – entweder durch Herausnehmen oder durch starkes Drücken.

Um den **Druckstempel zu fixieren und dosiert drücken** zu können, kann der gesamte Aufbau in eine Schraubzwinde eingespannt werden.

Zu wenige Kraftbrücken können durch eine ungünstige Lage der Granulatscheiben entstehen, z. B. wenn Ketten direkt übereinander liegen. Das lässt sich verändern, indem das Frontfenster herausgezogen wird und das Granulat neu sortiert wird. Eine Anordnung in Form einer *dichtesten Kugelpackung* hat sich im Experiment als vorteilhaft erwiesen.

Die bei der Polarisation entstehenden **unterschiedlichen Ausgangsfarben der PVC-Granulatscheiben** rühren daher, dass der Kunststoff bei der Produktion gezogen wurde und die Granulatscheiben dadurch eine 'aufgeprägte' molekulare Ausrichtung haben, die in spannungsoptischen Versuchen sichtbar wird.

Weitere Versuche zur Spannungsoptik lassen sich mit diesem Aufbau problemlos durchführen (z. B. Belastung von Brücken, Bauteilen, Astformen, ...), indem weiteres PVC dazu gekauft wird. Die Granulatscheiben sind Stücke eines 2 mm dicken PVC-Streifenvorhangs (auch bekannt als Lamellenvorhang), der meist in Industriehallen eingesetzt wird. Online können wenige Meter (bei 20 cm Breite) bereits für ca. 10,- Euro inkl. Versand bestellt werden (vgl. Materialliste). Das Material lässt sich problemlos mit einer Schere zuschneiden.



Experiment 03: Kraftbrücken sichtbar machen

Zusammenhang mit:

- *Experiment 01: Sandtürme bauen*
- *Experiment 02: Wasserbrücken*
- *Experiment 06: Feststeckender Holzstab*
- *Experiment 07: Stockender Sand*

Fachlicher Hintergrund

Kräfte im Granulat werden nicht, wie in einer Flüssigkeit oder einem Gas, in alle Richtungen verteilt oder wie in einem Festkörper in Richtung der Krafteinwirkung weitergeleitet. Im Granulat werden die Kräfte vorrangig in den obersten Schichten zu den Seiten hin abgeleitet – durch die *Kraftbrücken*. Besonders interessant ist, dass selbst bei starker Belastung ein Großteil der Kräfte nicht den Boden erreicht. Es bildet sich ein Netzwerk aus *Kraftbrücken*. Dies ist auch der Grund, dass die Sandburg aus *Experiment 01: Sandtürme bauen* mit Gewebeeinlage so stabil ist.

Um die Entstehung der Farben bei diesem Phänomen in den Grundzügen zu verstehen, müssen drei Dinge bekannt sein:

1.) Licht kann als elektromagnetische Welle (em-Welle) beschrieben werden. Diese hat eine Ausbreitungsrichtung (die Richtung, in die das Licht sich fortbewegt) und zusätzlich gibt es eine Schwingungsrichtung der em-Welle, die rechtwinklig zur Ausbreitungsrichtung steht. Angenommen die em-Welle breitet sich nach vorne aus (Ausbreitungsrichtung), dann kann sie nach oben / unten bzw. nach links / rechts schwingen (Schwingungsrichtung) oder auch in eine beliebige Überlagerung daraus (z. B. oben links nach unten rechts).

2.) Es gibt Folien, die Licht einer bestimmten Schwingungsrichtung filtern, aber dafür die andere Schwingungsrichtung durchlassen – sie werden (lineare) Polarisationsfilter, kurz Polfilter, genannt. Das machen sie (vereinfacht gesagt), weil sie elektromagnetisch schwingfähige Teilchen besitzen, die allerdings nur in eine Richtung schwingen können. Hat eine em-Welle (= Licht) diese Schwingungsrichtung, dann wird dieser Anteil herausgefiltert. Dies geschieht indem die Teilchen in dieser Richtung die Schwingung aufnehmen und in dem Polfilter die Energie des Lichts so letztendlich in Wärme umgewandelt wird. Licht mit einer rechtwinkligen Richtung zur Schwingungsrichtung dieser Teilchen kann ungehindert an diesen Teilchen vorbei und wird durch den Filter durchgelassen.

3.) Viele durchsichtige Stoffe können die Polarisationsrichtung des Lichts verändern, das durch sie hindurch geht. Wie stark sie das machen, hängt einerseits von der Lichtfarbe (entspricht der Wellenlänge des Lichts = em-Welle) und andererseits von der mechanischen Belastung des Stoffes ab.

Zusammengefasst passiert das Folgende: Weißes Licht, das unterschiedliche Wellenlängen (= Lichtfarben) und unterschiedliche Polarisationsrichtungen hat, trifft auf den ersten linearen Polarisator. Dadurch wird nur eine einzige Polarisationsrichtung durchgelassen, aber alle Wellenlängen (= Lichtfarben). Dieses linear polarisierte Licht trifft auf den Stoff, der die Polarisationsrichtung verändert und verändert somit die Polarisationsrichtung des Lichts. Dies ist unterschiedlich je nach Wellenlänge (= Lichtfarbe) des Lichts, für manche Wellenlängen stärker und für manche schwächer. Dieses veränderte Licht trifft nun auf den zweiten Polarisator, der jetzt nur noch einen bestimmten Lichtanteil durchlässt, wodurch Farben entstehen. Dadurch bleibt ein buntes Bild übrig, das Aufschluss darüber gibt, welchen Belastungen der durchsichtige Stoff ausgesetzt ist.

Experiment 03: Kraftbrücken sichtbar machen

Alltagsbezug / Anwendungen / Kontexte

Silos – Das Ableiten der Kräfte zu den Seiten ist auch ein Grund dafür, dass z. B. Silos für Schüttgüter stabil gebaut werden müssen und zwar an den Seiten, da die Gewichtskraft des Schüttgutes zu einem sehr großen Teil an die Wände abgeleitet wird. Falls die Wände nicht ausreichend stabil sind oder der Silo durch zu dichtes bzw. zu viel Schüttgut überlastet wird, zerbersten die Wände und der gesamte Silo wird instabil und stürzt ein.

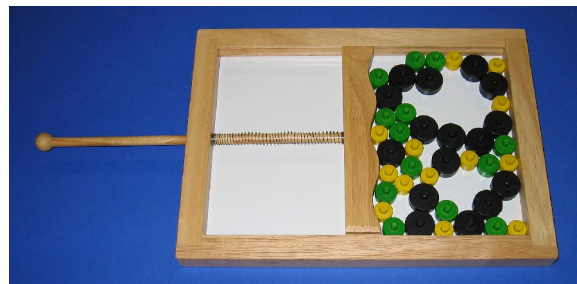


Quelle: www.phy.duke.edu/~bob/
– abgerufen 04.07.16

Laufen auf Sand ist aufgrund der Kraftbrücken möglich, unabhängig davon, ob der Sand trocken ist (wie in der Wüste), feucht (wie am Strand) oder sogar nass (wie am Meeresboden).

Die Wasserbrücken (vgl. *Experiment 01: Sandtürme bauen* und *Experiment 02: Wasserbrücken*) spielen nur in dem Fall des feuchten Bodens eine Rolle, aber die dadurch erzeugten Haltekräfte sind nicht ausreichend um z. B. einen Menschen zu tragen. Dies schaffen aber die Kraftbrücken.

Schiebe-Mikado ist ein Spiel, das sich diesen physikalischen Umstand zu Nutze macht. Mehrere Scheiben liegen auf einer Platte und es wird von einer Seite mit einem gefederten Schieber Druck auf diese Scheiben ausgeübt. Die Spieler versuchen nun abwechselnd Scheiben aus dem Spiel zu entnehmen, ohne dass sich der Schieber bewegt.



Trichter – Die Ausbildung von Kraftbrücken erklärt auch, warum Granulate in Trichtern oder Röhren verstopfen können. Ist der Trichter erst verstopft hilft es wenig von oben nachzudrücken, weil die Kraftbrücken solche Belastungen gut aufnehmen können. Hilfreicher ist es die Kraftbrücken-ausbildung zu stören, indem z. B. seitlich an den Trichter geklopft wird.



Materialprüfung ist eine Anwendung dieses Verfahrens zur Darstellung von Kräften in Körpern, genannt Spannungsoptik. Entweder die zu überprüfenden Gegenstände sind bereits aus Acryl und können so optisch überprüft werden, ob sie spannungsfrei sind (ansonsten würden sich Verfärbungen zeigen). Oder der zu prüfende Gegenstand wird in Acryl nachgebaut und kann dann untersucht werden. Allerdings werden heutzutage dazu eher Computersimulationen genutzt.

Rahmenlehrplanbezug

Polarisation des Lichts / Wellenoptik – geeignet als praktische Anwendung, wenn das Thema Polarisation in der Optik behandelt wird.

(Schwere-)Druck in Festkörpern und Flüssigkeiten – Mit diesem Experiment lässt sich verbildlichen, wie sich der Druck in Körpern verteilt, wenn anstelle des Granulats ein Festkörper (transparent und quetschbar) eingelegt wird. Dies ermöglicht einen qualitativen Vergleich.

Kraft(-wirkung) – Mit dem Experiment kann das Wirken von Kräften sichtbar gemacht werden, was gerade für die Einführung von Kräften sehr hilfreich sein kann.

Experiment 03: Kraftbrücken sichtbar machen

Kräftezerlegung – Die Verfärbungen unter Kraffteinwirkung, die im Experiment zu sehen sind, zeigen direkt eine Kraftzerlegung an, die sich selbst immer weiter verästelt.

Belastbarkeit von Knochen – In Verbindung mit dem Fach Biologie kann die Belastbarkeit von Knochen (oder anderen Strukturen) untersucht werden, die im Modell aus PVC-Platten gefertigt werden können (sogar von den Schüler_innen selbst).

Reibung – Ebenso lassen sich Experimente zur Reibung thematisieren, weil die Wirkungen der Reibungskräfte sich an den Kontaktstellen genauer untersuchen lassen und zusätzlich die wirkenden Kräfte visualisiert werden.

Lagerungshinweise / Instandhaltung

Der Rahmen ist aus PLA (Polylactide, >95% Maisstärke) 3D-gedruckt und nicht UV-beständig. Er sollte daher vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt gelagert werden.

Weiteres Material auf: www.niliphex.de

Video *Experiment Kraftbrücken sichtbar machen – Grains de Bâtisseurs / chap 5 / exp n°4 "les grains photoélastiques"* (frz., Dauer 1:27)

<https://www.youtube.com/watch?v=2JN4GMcaYmE>

(letzter Zugriff: 28.04.2016); ShortLink: <http://v.gd/dr6z8n>



Video *Experiment Kraftbrücken unterbrechen – Grains de Bâtisseurs / chap 5 / exp n°1 "l'arc de billes"* (frz., Dauer 1:05)

<https://www.youtube.com/watch?v=jmWDFNFBpuw>

(letzter Zugriff: 28.04.2016); ShortLink: <http://v.gd/cRkAeP>



Fachwissenschaftlicher Artikel *Kraftnetzwerke und Elastizität in Schüttgut-Silos – Wambough, J. F.; Hartley, R. R.; Behringer, R. P. (2008): Force networks and elasticity in granular silos* (engl., 12 Seiten)

<http://arxiv.org/abs/0801.3387>

(letzter Zugriff: 28.04.2016); ShortLink: <https://v.gd/jFHCB8>



Zeitungsartikel *Fünf Tote nach Silo Kollaps – Zadock, A. (2015): Five killed after silo collapses. In: Daily Nation* (engl., 2 Seiten)

<http://www.nation.co.ke/news/Five-killed-after-silo-collapses/-/1056/2983392/-/qk9vl8z/-/>

(letzter Zugriff: 28.04.2016); ShortLink: <http://v.gd/s4SFpY>



Artikel *Ursachen für das Platzen von Silos – Schlichting, H. J. (2013): Platzende Silos* (dt., 1 Seite)

http://www.pro-physik.de/details/phiuznews/4938511/Platzende_Silos.html

(letzter Zugriff: 30.05.2016); ShortLink: <https://v.gd/BRk5cl>



Bachelorarbeit *Wissenschaftliche Untersuchung zum Thema – Bleimling, T. (2011): Experimente zu Granulaten mit photoelastischem Effekt. Bachelorarbeit, Freie Universität Berlin.* (dt., 55 Seiten)

=> Zu finden auf www.niliphex.de

Mit Unterstützung von

Nitto

GEFÖRDERT VON

GESAMTMETALL
Die Arbeitgeberverbände der Metall- und Elektro-Industrie

think
INO
Die Initiative für
Ingenieurwachstums

sdw
Stiftung der Deutschen Wirtschaft
Wir stiften Chancen!

Entwickelt von Joachim S. Haupt und der

Didaktik der Physik
AG Nordmeier

Freie Universität  Berlin

Lizenz der Inhalte von NiliPhEx:



– CC0 1.0 – gemeinfrei / bedingungslos



www.niliphex.de

Komplette, editierbare Dokumentation und weitere Materialien

6 / 6