

Grundlagen der Spannungsoptik

von Dr. Andreas Reichert und Henning Katte, ilis gmbh, Erlangen (www.ilis.de)

Die Festigkeit und Verarbeitbarkeit von Glas- und Kunststoffprodukten wird stark von mechanischen Spannungen beeinflusst, die produktionsbedingt (z.B. beim Spritzguss oder Extrudieren von Kunststoffen) oder durch Probleme im Entspannungsprozess (z.B. beim Tempern von Glas) entstehen können. Darüber hinaus haben Spannungen Einfluss auf die optischen Eigenschaften, was in bestimmten Anwendungen (z.B. Glas- oder Kunststofflinsen für Polarisationsoptiken) unerwünscht ist. Die produktionsbegleitende schnelle und genaue Messung von Restspannungen ist daher eine unbedingte Voraussetzung zur Steuerung der entscheidenden Prozessparameter und damit ein wesentlicher Faktor für die Optimierung der Qualität. Dieser Artikel gibt eine anschauliche Einführung in die physikalischen Grundlagen der optischen Spannungsmessung.

Spannungen in festen Körpern

Mechanische Spannungen führen zu Verformungen der Materialstruktur. Wenn man beispielsweise eine Luftpolsterfolie mit den Händen wie einen Expander auseinanderzieht, sieht man, dass der Abstand der Blasen in Zugrichtung zunimmt. Dieser Effekt tritt auch bei kompakten Körpern aus Glas oder Kunststoff auf, allerdings auf mikroskopischer Ebene.

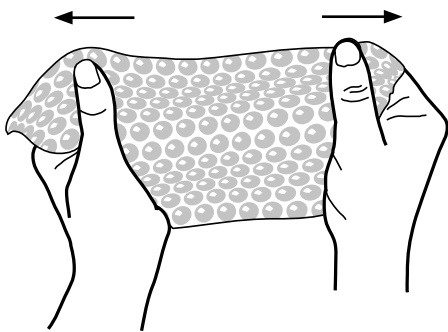


Bild 1: Deformation einer Luftpolsterfolie unter Zugspannung. Der Blasenabstand vergrößert sich in Zugrichtung.

Welche Auswirkungen haben nun derartige Änderungen der Mikrostruktur auf die Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie und damit auf die optischen Eigenschaften des Materials?

Lichtausbreitung

Trifft Licht auf ein Atom, so wird dessen Elektronenhülle durch das elektromagnetische Feld des Lichtes zum Schwingen angeregt. Die Schwingung führt wiederum zum Abstrahlen von Licht.

Dieser Vorgang kann mit einem Staf-

ellauf verglichen werden. Ein Läufer erreicht den nächsten Läufer, er gibt das Staffelholz an diesen weiter, der wiederum läuft weiter usw. Die Geschwindigkeit des Staffelholzes würde sich bei einem 400 m-Staffellauf verringern, wenn man die Anzahl der Läufer bei gleicher Streckenlänge erhöhen würde und annimmt, dass es bei jeder Übergabe zu einer Verzögerung kommt.

Ebenso führt bei lichtdurchlässigen Materialien eine höhere Teilchenzahl pro Strecke zu einer Verringerung der Lichtgeschwindigkeit, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts hängt von der Teilchendichte ab.

Lichtbrechung

Die *Brechzahl* (oder *Brechungsindex*) ist ein Maß für die Lichtgeschwindigkeit im jeweiligen Medium. Je größer die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v des Lichts im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum ist, desto kleiner ist die Brechzahl n :

$$n = c/v$$

Da bei Dehnung die Entfernung der Moleküle zueinander größer wird und sich damit die Lichtgeschwindigkeit im Medium erhöht, muss die Brechzahl in Zugrichtung also abnehmen.

Nun wird klar, dass sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts in Zugrichtung und senkrecht dazu unterscheidet, also auch die Brechzahl in verschiedenen Richtungen variiert. Man sagt, dass ein Material *doppelbrechend* ist.

Es gibt Materialien, die auch ohne das Vorhandensein von mechanischen Spannungen doppelbrechend sind, zum Beispiel viele Kristalle.

Andere Materialien wie z.B. Glas sind hingegen optisch *isotrop*, d.h. im entspannten Zustand ist die Brechzahl in jeder Raumrichtung gleich. Diese Materialien werden doppelbrechend, wenn sie unter Spannung stehen.

Man kann also Spannungen in diesen Materialien messen, indem man die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts für die verschiedenen Richtungen bestimmt. Die dabei auftretenden Differenzen sind ein direktes Maß für die Doppelbrechung und damit für die Spannung.

Bei der Messung macht man sich den Einfluss der Spannungsdoppelbrechung auf *linear polarisiertes Licht* zu Nutze. Doch was genau ist polarisiertes Licht?

Linear polarisiertes Licht

Man stelle sich ein Gitter aus Kugeln vor, die untereinander flexibel mit Federn verbunden sind (Bild 2).

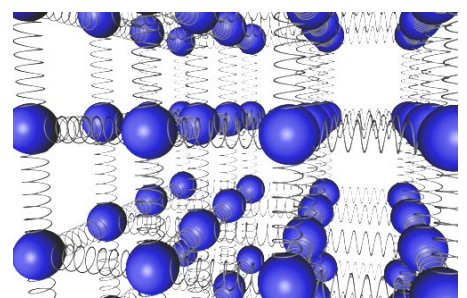


Bild 2: Anschauungsmodell für einen Festkörper.

Lenkt man eine Kugel in diesem Gitter nach links aus und lässt sie los, schwingt diese Kugel abwechselnd nach rechts und links. Jedoch nur kurz; ihre nächsten Nachbarn fangen ebenfalls an nach rechts und links zu schwingen. Diese Schwingung setzt sich schnell im Gitter fort, während die ursprünglich ausgelenkte Kugel zur Ruhe kommt. Für Auslenkungen nach oben und unten kann man ein analoges Verhalten beobachten. Dies ist ein anschauliches Modell für die Auswirkung des elektromagnetischen Feldes des Lichts auf einen festen Körper.

Schwingt das elektrische Feld nur in einer Ebene, so spricht man von *linear polarisiertem* Licht. In diesem Modell bedeutet das, dass die Kugeln nur nach rechts und links bzw. oben und unten schwingen.

Optischer Gangunterschied

Lenkt man eine Kugel diagonal aus, so kann man das als eine Überlagerung einer waagerechten und einer senkrecht polarisierten Lichtwelle ansehen, d.h. man erhält eine Welle mit vertikaler Auslenkung (Bild 3) und eine zweite dazu senkrechte Welle (Bild 4).

Wenn sich diese beiden Wellen gleich schnell ausbreiten, trifft immer ein Wellenberg der waagerechten Welle auf einen Wellenberg der horizontalen Welle. Die Addition der Auslenkungen ergibt die ursprüngliche diagonale Welle (Bild 5).

Ist der Abstand der Kugeln im Kugelmodell in der Vertikalen anders als in der Horizontalen, wie es bei doppelbrechenden Materialien der Fall ist, breitet sich das Licht in horizontaler Richtung mit anderer Geschwindigkeit aus als in vertikaler Richtung. Dadurch kommt es zu einer Verzögerung zwischen den beiden Wellen. Diese Verzögerung wird als *optischer Gangunterschied* (engl. *optical retardation*) bezeichnet und in der Einheit Nanometer gemessen.

Zirkular und elliptisch polarisiertes Licht

Wenn der Gangunterschied gerade so groß ist, dass ein Wellenberg der

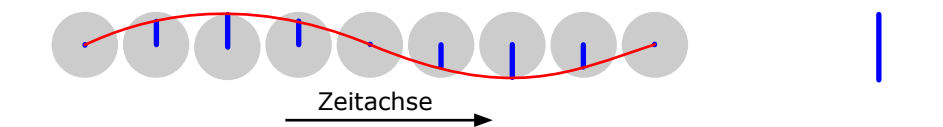


Bild 3: Eine Welle, deren Auslenkung zwischen oben und unten wechselt. Die Kreise zeigen von links ausgehend die zeitliche Entwicklung.

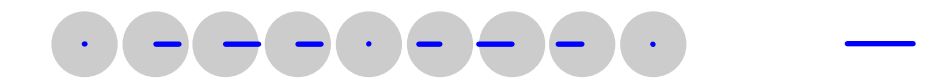


Bild 4: Eine Welle, deren Auslenkung zwischen rechts und links wechselt.

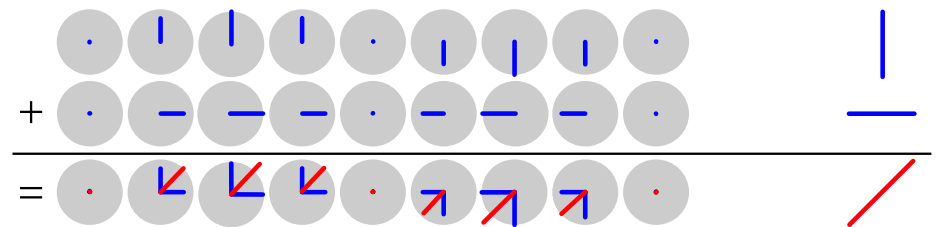


Bild 5: Wellenberge der waagerechten Welle treffen auf einen Wellenberg der horizontalen Welle. Die Addition der Auslenkungen ergibt eine diagonale Welle (rot). Die Auslenkungen liegen also in der diagonalen Ebene, man hat immer noch lineare Polarisation.

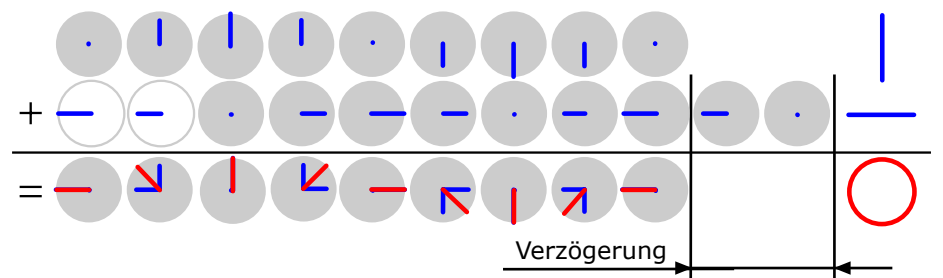


Bild 6: Trifft ein Wellenberg der waagerechten Welle auf einen Nulldurchgang der horizontalen Welle, spricht man von zirkular polarisiertem Licht.

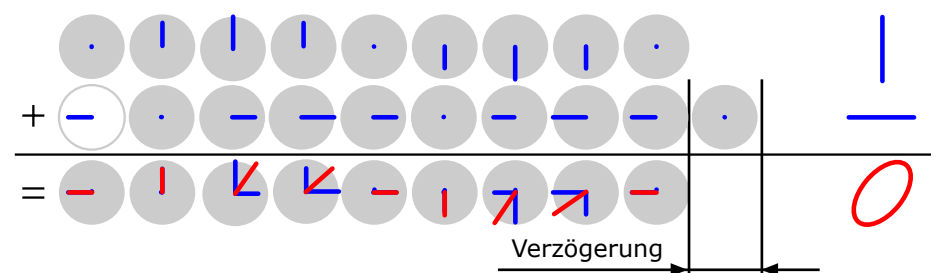


Bild 7: Ist die Verschiebung kleiner als ein Viertel der Wellenlänge, so erhält man keinen Kreis, sondern eine Ellipse. Man spricht dann von elliptisch polarisiertem Licht.

vertikalen Welle auf einen Nulldurchgang der horizontalen Welle trifft, erhält man einen Sonderfall: Bei Betrachtung der Lichtwelle in Ausbreitungsrichtung beschreibt diese einen Kreis. Der Gangunterschied beträgt dann genau ein Viertel der Wellenlänge λ und man spricht von *zirkular polarisiertem Licht* (Bilder 6 und 8).

Im allgemeinen Fall ist der Gangunterschied aber ungleich einem Vier-

tel der Wellenlänge und man erhält keinen Kreis, sondern eine Ellipse. Man spricht dann von *elliptisch polarisiertem Licht* (Bild 7).

Linear polarisiertes Licht verlässt ein doppelbrechendes Material also als Überlagerung von zwei aufeinander senkrecht stehenden Lichtwellen mit unterschiedlichen Phasenlage und ist daher im allgemeinen Fall elliptisch polarisiert.

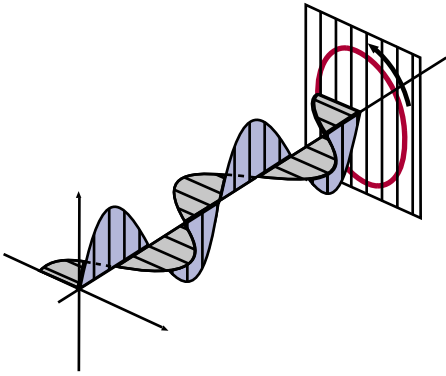


Bild 8: Trifft ein Wellenberg der horizontalen Welle auf einen Nulldurchgang der vertikalen Welle, spricht man von zirkular polarisiertem Licht.

Die Elliptizität des austretenden Lichts, also das Verhältnis zwischen kurzer und langer Ellipsen-Halbachse, ist dabei ein Maß für die Spannungsdoppelbrechung und somit auch für die Spannung im Material.

Betrachtet man eine doppelbrechende Probe durch einen Polarisator, dessen Polarisations Ebene in einem Winkel von 90° zur ursprünglichen Polarisationsrichtung angeordnet ist, sieht man helle Bereiche im ansonsten schwarzen Sichtfeld, deren Intensität proportional zur Elliptizität des Lichts ist.

Aus der Intensität der Aufhellung lässt sich also bereits auf den Grad der Spannungsdoppelbrechung schließen. Zur quantitativen Bestimmung der Doppelbrechung ist es jedoch sinnvoll, das elliptisch polarisierte Licht zunächst mit Hilfe einer *Viertelwellenplatte* in linear polarisiertes Licht zurück zu verwandeln.

Viertelwellenplatte

Eine Viertelwellenplatte besteht aus doppelbrechendem Material, z.B. Quarzkristall. Der Unterschied zwischen den Brechzahlen ist gerade so groß, dass die horizontal polarisierte Welle gegenüber der vertikal polarisierten Welle um eine viertel Wellenlänge verzögert wird. Der Gangunterschied der beiden Wellen beträgt also $\lambda/4$, weshalb die Viertelwellenplatte auch $\lambda/4$ -Platte genannt wird.

Bei Viertelwellenplatten spricht man von einer schnellen und einer langsamen Achse. Licht, das parallel zur

schnellen Achse polarisiert ist, bewegt sich schneller als das Licht mit senkrecht dazu orientierter Polarisation. Linear polarisiertes Licht, dessen Polarisationsrichtung in einem Winkel von 45° zwischen der schnellen und der langsamen Achse liegt, wird von der Viertelwellenplatte in zirkular polarisiertes Licht umgewandelt und umgekehrt.

Spannungsmessung

Bild 9 zeigt den grundlegenden Aufbau eines *Polarimeters* zur Messung der Spannungsdoppelbrechung nach Sénarmont. Die Viertelwellenplatte wird hier so angeordnet, dass deren optische Achsen parallel zur Polarisationsrichtung des eingestrahlichten Lichts orientiert sind.

Elliptisch polarisiertes Licht, das aus der Probe austritt, wird also wieder in linear polarisiertes Licht umgewandelt, allerdings mit einer anderen Polarisationsrichtung. Die Differenz zur ursprünglichen Polarisationsrichtung wird *Polarisationswinkel* genannt. Der Polarisationswinkel beschreibt die Elliptizität des aus der Probe austretenden Lichts, ist also ein Maß für die Doppelbrechung und damit für die Spannung im Material.

Die Bestimmung des Polarisationswinkels erfolgt mit einem *Analysator*, einem zweiten, drehbaren Polarisator, der in Grundstellung zum ersten Polarisator gekreuzt ist.

Verspannte Bereiche der Probe erscheinen als Aufhellungen im ansonsten schwarzen Sichtfeld. Der Analysator wird nun solange gedreht, bis an der betrachteten Stelle ein Intensitätsminimum erreicht ist. Der Drehwinkel des Analysators ist dann gleich dem Polarisationswinkel.

Aus dem Polarisationswinkel α lässt sich gemäß der Gleichung

$$R = \alpha \cdot \lambda / 180^\circ$$

der optische Gangunterschied R in nm berechnen, der ein Maß für die Spannung ist.

Literatur:

- [1] Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III Optik, Bergmann, Schaefer. De Gruyter, 1987
- [2] Einführung in die Kristallographie, Kleber. VEB Verlag Technik, 1983
- [3] Physik, Gerthsen, Kneser, Vogel. Springer Verlag, 1986

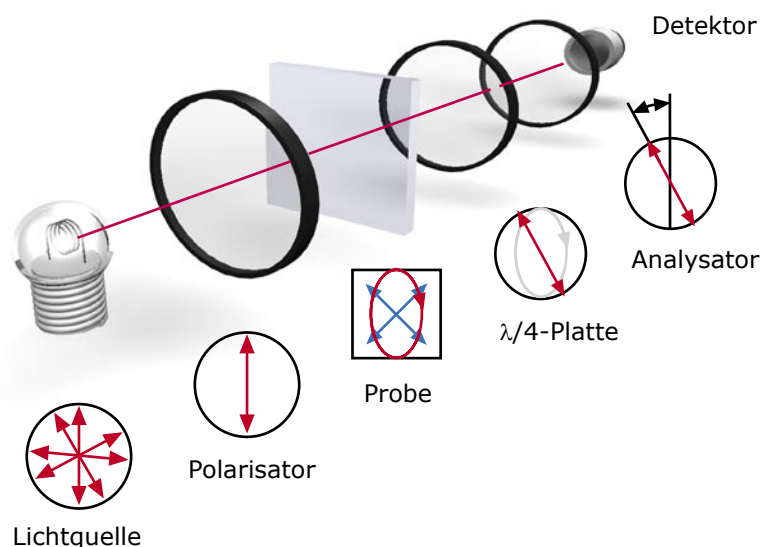


Bild 9: Aufbau eines Polarimeters zur Messung der Spannungsdoppelbrechung. Der Polarisator lässt nur den linear polarisierten Anteil des einfallenden Lichts durch. Doppelbrechung in der Probe führt zu elliptisch polarisiertem Licht. Mit Hilfe einer Viertelwellenplatte wird aus dem elliptisch polarisierten Licht wieder linear polarisiertes Licht. Der Polarisationswinkel kann mit einem drehbaren Analysator bestimmt und daraus der optische Gangunterschied berechnet werden.