

Von **Jearl Walker**

Materialversagen unter mechanischer Belastung ist häufig die Ursache dafür, daß technische Anlagen vorzeitig untauglich werden oder daß sich gar folgenschwere Unfälle ereignen. Nicht immer lassen sich die Grenzen der Belastbarkeit etwa von Bauten, Anlagenkomponenten oder Maschinen ermitteln, indem man Materialproben oder Prototypen bis zur Zerstörung prüft. Dann helfen oft Untersuchungen von Modellen weiter.

Zu diesem Verfahren gehört die optische Spannungsanalyse an einem durchsichtigen Kunststoffmodell. Man simuliert dabei die in Wirklichkeit zu erwartende Belastung. Stärke und Verteilung von Zug- und Druckspannungen werden dann als farbige Muster sichtbar.

Vor kurzem hat mir Frank R. Seufert aus Cleveland (Ohio) seine Sammlung spannungsoptischer Aufnahmen gezeigt, die er mit der in Bild 1 skizzierten Anordnung gemacht hat. Zwei Beispiele davon zeigt Bild 2. Am Verlauf der farbigen Linien in diesen Farbaufnahmen kann der Fachmann bruchgefährdete Stellen leicht erkennen.

Und so wird's gemacht

Mit seinen dekorativen Farbbildern will Seufert herausfinden, wie sich bestimmte Belastungen bei einzelnen Werkstücken auswirken. Dazu fertigt er zunächst ein Modell aus Epoxid- oder Polyesterharz oder auch aus Plexiglas an; ist das Objekt sehr groß, wird das Modell maßstabsgerecht verkleinert. Seufert beschränkt sich dabei auf etwa drei Millimeter dicke, ebene Modelle, die einer „Scheibe“ des Bauteils entsprechen. Sie werden in einen Holzrahmen montiert, so daß sich spannungsoptische Aufnahmen von Modellen unterschiedlicher Größe und Form mit einer Art Standard-Anordnung machen lassen (Bild 1).

Die angreifenden Kräfte simuliert Seufert an seinen Modellen mit Gummibändern, Gewichten und vor allem mit Stellschrauben, mit denen sich die Stärke der Belastung besonders genau einstellen läßt. Das Modell wird mit einer 200-Watt-Lampe diffus beleuchtet, und zwar mit polarisiertem Licht. Dafür sind zwischen Lampe und Modell eine Mattscheibe und ein Polarisator montiert. Mit

einem zweiten Polarisationsfilter ist die einäugige Kleinbild-Spiegelreflexkamera bestückt, mit der Seufert seine Modelle aufnimmt. Seufert verwendet ein lichtstarkes Teleobjektiv mit einem größten einstellbaren Öffnungsverhältnis (Lichtstärke) von 1 : 2,5 und 135 Millimetern Brennweite auf einem etwa 30 Millimeter breiten Zwischenring. Als Abschirmung gegen Streulicht dient eine lange konische Pappröhre. Schließlich verwendet Seufert noch ein leichtes Blaufilter (KB 15 oder 80A), um die Farbtemperatur der Lampe an den Tageslichtfilm anzupassen. Die Kamera ist mit einem Stativoberteil auf der Grundplatte der gesamten Anordnung befestigt.

Vor der Aufnahme stellt Seufert die Durchlaßrichtung des Polarisators zwischen Lampe und Modell auf 45 Grad gegenüber der Senkrechten und schaltet die Lampe ein. Dann beobachtet er das Modell durch den Sucher der Kamera und dreht das zweite Polarisationsfilter am Objektiv, bis ein deutliches und aussagekräftiges Farbmuster sichtbar wird. Während der Belichtung wird zusätzlich ein Elektronenblitz ausgelöst, um die

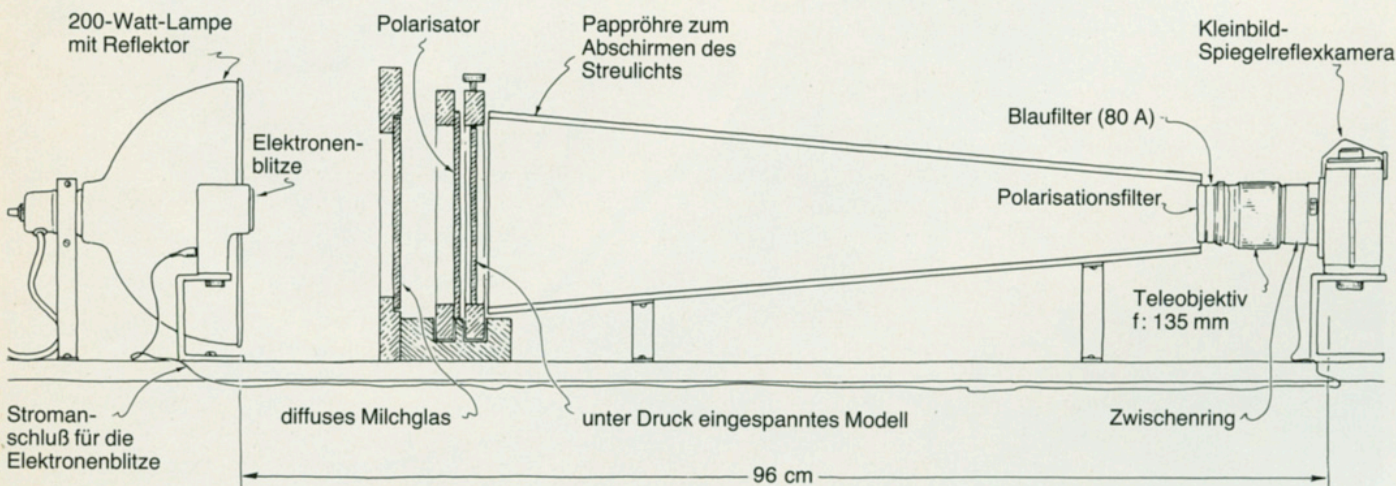


Bild 1: Frank R. Seuferts Versuchsanordnung für spannungsoptische Aufnahmen.

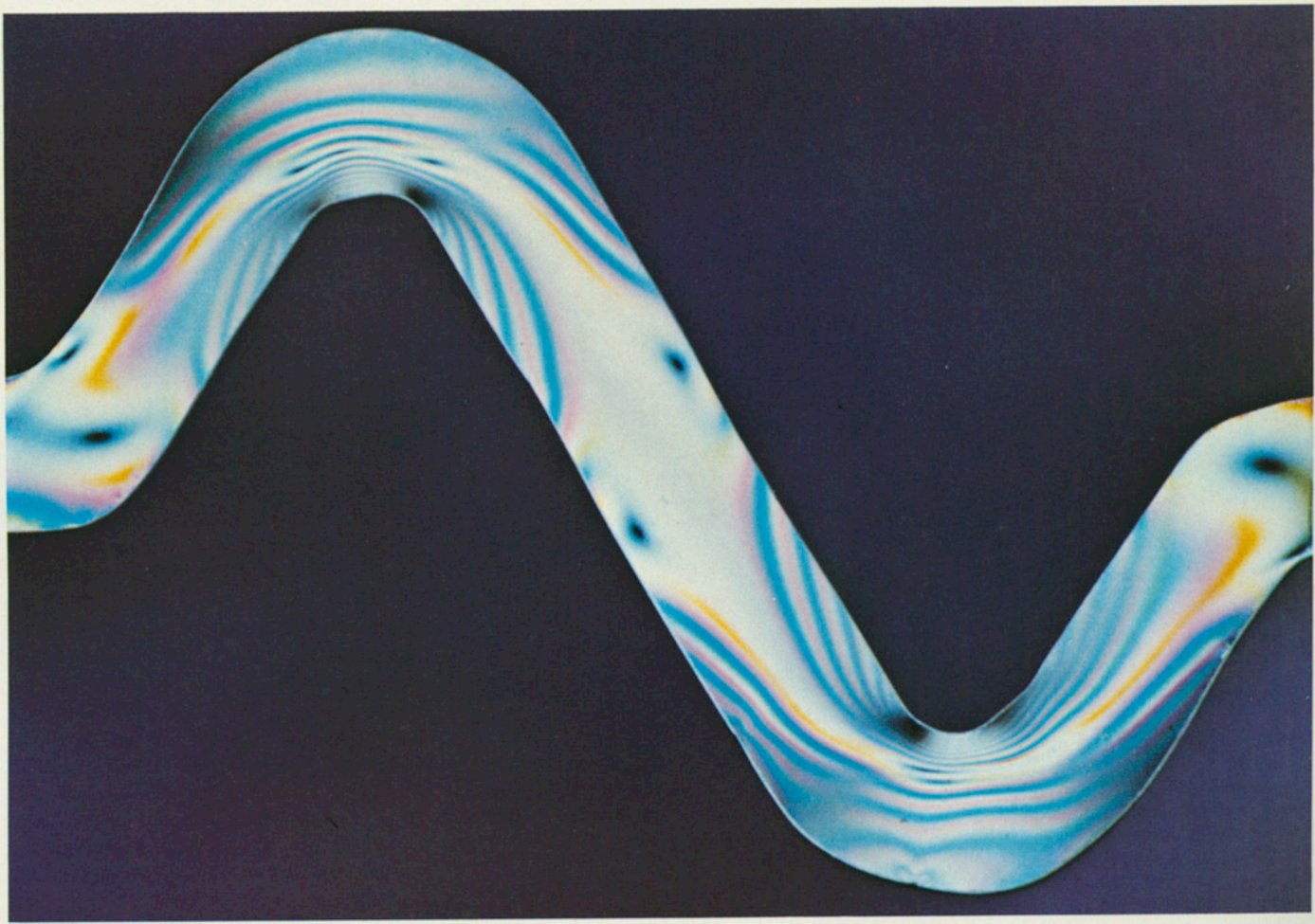
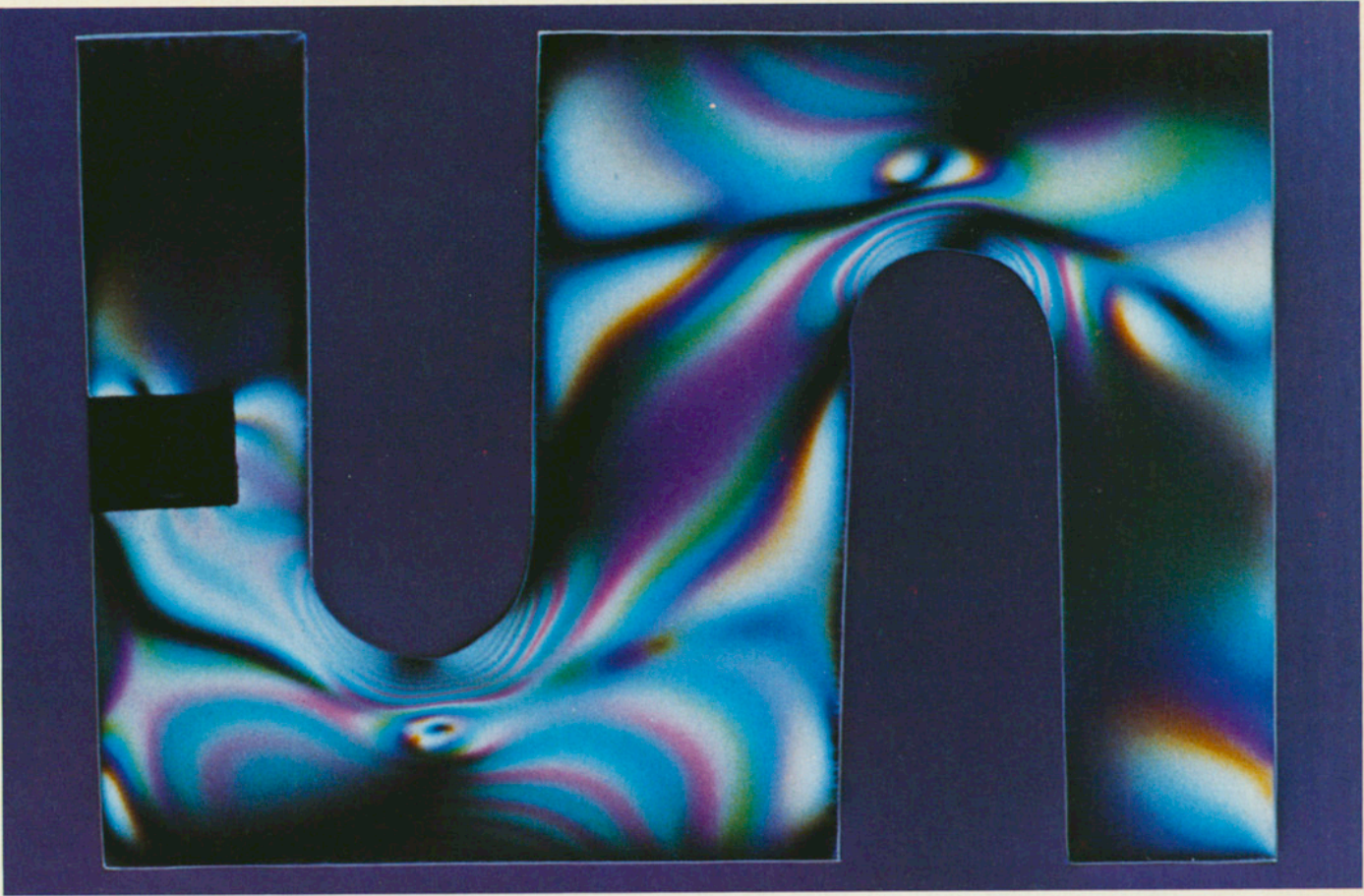


Bild 2: Zwei Aufnahmen von Seufert.

Farbwiedergabe auf den Bildern zu verbessern. Seufert verwendet Fuji-Negativfilme mit 100 ASA (21 DIN). Mit Umkehrfilmen bekommen Sie aber ebenfalls gute Aufnahmen.

Mechanische Spannungen ...

Das Prinzip der Spannungsoptik läßt sich in einem Satz zusammenfassen: Durch mechanische Spannungen werden Kunststoffe und Gläser doppelbrechend. Die Folge ist, daß sich der Polarisationszustand des einfallenden Lichts im Kunststoffmodell verändert, und zwar nicht einheitlich, sondern je nach Spannung mehr oder weniger stark. Die Unterschiede lassen sich allerdings nicht ohne weiteres nachweisen, weil die meisten Lichtquellen kein polarisiertes Licht abstrahlen und weil weder unser Auge noch Filmemulsionen auf den Polarisationszustand reagieren. Deshalb braucht man zwei Polarisationsfilter: eines, um das Licht zu polarisieren, und ein weiteres, um die Polarisationsänderung – und die darin verschlüsselte Information über die Spannungen im Modell – zu analysieren.

Die mechanischen Spannungen, die in einem Festkörper wirken, sind in Bild 3 an einem quadratischen Ausschnitt aus der Modellscheibe dargestellt: Druck- und Zugspannungen entstehen durch Kräfte, die senkrecht zu den Seiten des Quadrats wirken; parallel zu diesen Seiten können zudem noch Scherkräfte wirken. Im folgenden wollen wir uns der Einfachheit halber die Orientierung des quadratischen Ausschnitts so denken, daß nur noch in Richtung der beiden Hauptspannungsachsen Kräfte auftreten; das hat den Vorteil, daß man keine Scherkräfte mehr zu berücksichtigen braucht. Denn es ist gerade die Orientierung der Hauptspannungsachsen, was sich an spannungsoptischen Aufnahmen ablesen läßt.

... sichtbar in polarisiertem Licht

Um zu verstehen, warum das so ist, müssen wir uns zunächst etwas genauer mit den Eigenschaften des polarisierten Lichts befassen. Seit den Arbeiten von James Clerk Maxwell wissen wir, daß Licht eine Welle mit einer elektrischen und einer magnetischen Komponente ist. Elektromagnetische Wellen wie das Licht unterscheiden sich von mechanischen Wellen wie Wasser- oder Schallwellen darin, daß sie keinen materiellen Träger brauchen, um sich auszubreiten. Licht kann sich also auch im Vakuum fortpflanzen; denn seine Welleneigenschaften beruhen nicht auf Schwingungen von materiellen Teilchen, sondern auf Schwingungen des elektrischen und magnetischen Feldes.

Den Polarisationszustand des Lichts kann man an der elektrischen Komponente ablesen, genauer, am Verhalten des Vektors für die elektrische Feldstärke. Wie jeder Vektor hat auch die elektrische Feldstärke eine Richtung und einen Betrag: Der Betrag ist ein Maß für die Stärke der Kraft, die das elektrische Feld auf ein geladenes Teilchen ausübt; und die Orientierung des Vektors zeigt, in welche Richtung diese Kraft wirkt. Bei dem schwingenden elektrischen Feld in einem Lichtstrahl ändert sich der Feldvektor nicht nur zwischen verschiedenen Raumpunkten, sondern er unterliegt auch zeitlichen Schwankungen (Bild 4).

Um diese zeitlichen Veränderungen bei einer Lichtquelle zu demonstrieren, soll ein Raumpunkt herausgegriffen werden. Angenommen, man macht einen „Schnappschuß“ von der Welle, und zwar zu einem Zeitpunkt, an dem die elektrische Feldstärke an dem betrachteten Raumpunkt maximal und senkrecht nach oben gerichtet ist; das heißt, ein positives Ion oder ein anderes positiv geladenes Teilchen würde also in diesem Moment dort eine verhältnismäßig starke Kraft nach oben „spüren“. An den benachbarten Raumpunkten des gleichen Strahls zeigen auch die anderen Vektoren nach oben, aber ihre Beträge variieren (gemäß einer Sinusfunktion).

Natürlich schieben sich die Wellenberge innerhalb des Strahls mit Lichtgeschwindigkeit vorwärts – und das heißt, an jedem festen Raumpunkt ändern sich periodisch Richtung und Stärke des elektrischen Feldes. Bei unserem Raumpunkt zeigt der Vektor auf einer etwas späteren Momentaufnahme bereits nach unten, wenngleich er seine volle Länge noch nicht erreicht hat. Die (nach unten gerichtete) Kraft auf ein positives Teilchen an diesem Punkt ist also jetzt schwächer.

Wenn die Lichtwelle über den Punkt hinwegläuft, ändert der Vektor der elektrischen Feldstärke periodisch seinen Betrag und seine Richtung. Lassen Sie sich von dem Bild, bei dem die Vektoren wie die Dornen an einem Rosenstiel aus dem Strahl ragen, also nicht irreführen: Die Vektoren des elektrischen Feldes sind nichts Materielles, sondern fiktive Feldgrößen, die freilich eine anschauliche Vorstellung von einer Lichtwelle vermitteln können.

Besonders nützlich sind die Feldvektoren, wenn man die Polarisations-eigenschaften einer Lichtwelle verstehen will. Bei den beiden Momentaufnahmen in Bild 4 liegen alle Vektoren in einer Ebene, eine Regelmäßigkeit, die nur in Ausnahmefällen bei Lichtwellen anzutreffen ist – dann nämlich, wenn das Licht polarisiert ist. Glühlampen, Blitzlampen und die meisten anderen Lichtquellen emittieren unpolarisiertes Licht. Um all diese Vektoren

auf eine gemeinsame Schwingungsebene der elektrischen Feldstärke zu beschränken und die Lichtwelle zu polarisieren, bedarf es eines physikalischen Kunstgriffs.

Wenn man Licht durch ein Polarisationsfilter schickt, das nur Anteile mit einer bestimmten Schwingungsrichtung durchläßt, wird dieses Licht linear polarisiert. Die Vektoren der elektrischen Feldstärken sind dann auf eine bestimmte Raumrichtung fixiert. Fällt diese Richtung beispielsweise mit der Senkrechten zusammen, so wollen wir von vertikal polarisiertem Licht sprechen.

Polarisationsfilter arbeiten nach einem Ausleseprinzip. Bei polarisierenden Folien aus Kunststoff wirken lange, kettenförmige Makromoleküle, die durch Verstrecken parallel ausgerichtet wurden, gleichsam als Lichtschlucker: Von der einfallenden Welle wird der parallel zur Kettenrichtung schwingende Anteil absorbiert. Nur die vertikal dazu schwingende Komponente der einfallenden Lichtwelle kann die Folie passieren.

Bild 5 zeigt die Wirkung eines Polarisationsfilters schematisch für eine unpolarisierte Lichtwelle, bei der die elektrische Feldstärke nur für zwei Richtungen angedeutet ist: senkrecht und waagrecht. Die Makromoleküle des Filters sind waagrecht orientiert, so daß schließlich senkrecht polarisiertes Licht entsteht. Vielleicht sollte ich an dieser Stelle anmerken, daß man bei handelsüblichen Folien nicht die Orientierung der Moleküle angibt, sondern stattdessen die Schwingungs- oder Polarisationsrichtung des durchgelassenen Lichts.

Was geschieht, wenn ein vertikal polarisierter Lichtstrahl auf ein zweites Polarisationsfilter trifft? Sofern die Durchlaßrichtung dieses zweiten Filters ebenfalls senkrecht und damit parallel zur Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts steht, wird der Strahl nahezu vollständig durchgelassen; stehen die beiden Polarisationsrichtungen dagegen senkrecht zueinander, wie in Bild 5, so wird das Licht vollständig absorbiert.

Licht bewegt sich in der Luft mit einer Geschwindigkeit von nahezu 300 000 Kilometer pro Sekunde. Tritt es dann in ein festes transparentes Medium wie eine Folie oder eine Glasscheibe ein, wird es merklich langsamer, weil die Wechselwirkungen mit Molekülen es verzögern. Trifft die Lichtwelle nämlich auf ein Molekül, so wird sie zunächst einmal absorbiert und erst nach einer gewissen – wenn auch kurzen – Zeitspanne sozusagen wieder weitergestrahlt. Nur zwischen den Molekülen kann sich das Licht mit Maximalgeschwindigkeit wie im Vakuum ausbreiten; aber durch den „Stop and Go“-Verkehr kommt es im Festkörper insgesamt wesentlich langsamer voran. Diese Abnahme der (mittleren) Lichtgeschwin-

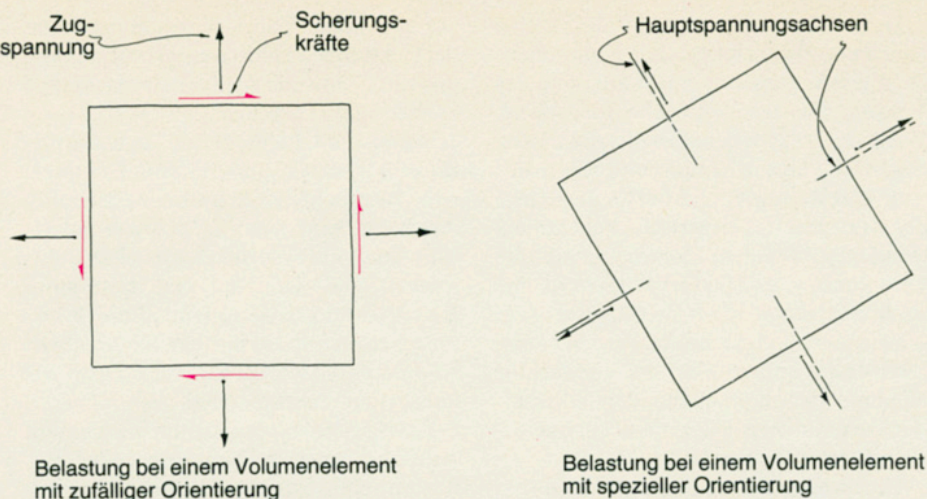


Bild 3: Hauptspannungen und Scherung bei einem Volumenelement.

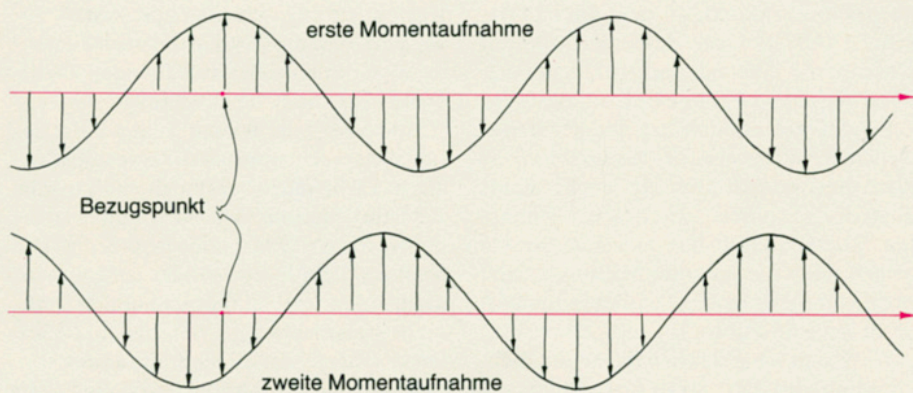


Bild 4: Momentaufnahmen der elektrischen Feldvektoren bei einem Lichtstrahl.

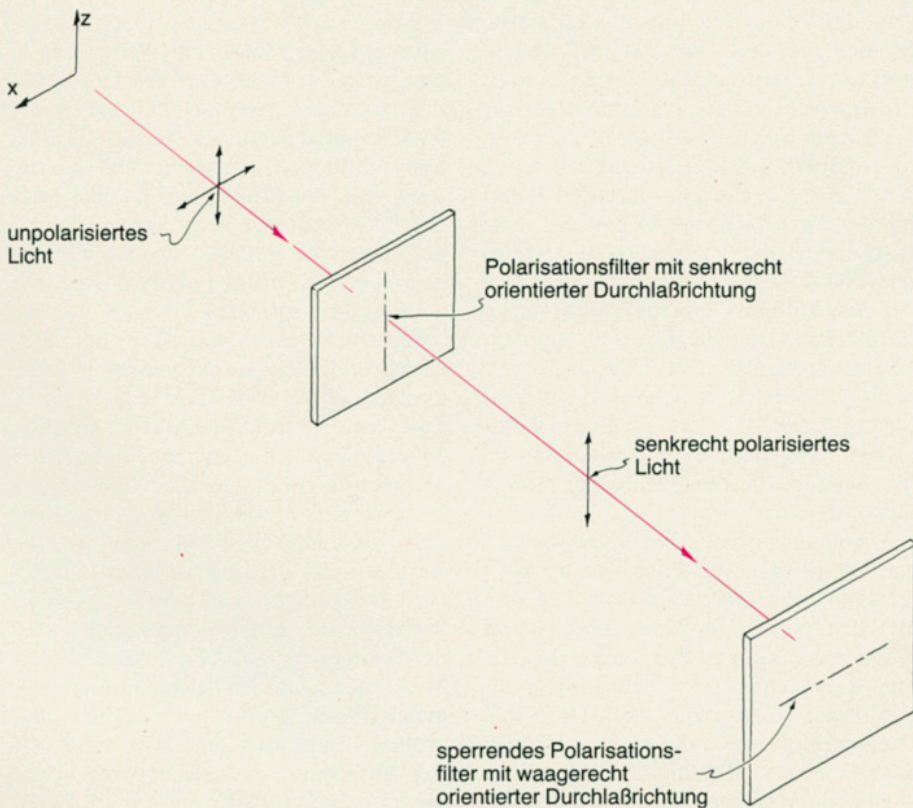


Bild 5: Gekreuzte Polarisationsfilter als „Lichtsperr“.

digkeit in Glas oder Kristallen gegenüber der in Luft hat man bereits gemessen, lange bevor man etwas über die Moleküle in einem Festkörper wußte. Ein Maß dafür liefert der Brechungsindex, denn er entspricht gerade dem Faktor, um den sich die Lichtgeschwindigkeit beim Übergang in einen durchsichtigen Festkörper verringert. In einem Glas mit Brechzahl $n = 1,6$ reduziert sich die Lichtgeschwindigkeit also etwas stärker als in einem anderen Glas mit $n = 1,5$. Freilich sind die Unterschiede in den Laufzeiten unvorstellbar gering, denn auch in diesen Gläsern erreicht das Licht immer noch eine Geschwindigkeit von etwa 2×10^8 Meter pro Sekunde.

Doppelbrechung: Spannungen in Brechzahlen gemessen

Im Jahr 1816 entdeckte David Brewster, daß mechanische Spannungen die Brechzahl eines durchsichtigen Körpers beeinflussen und die Brechzahl umgekehrt als Indikator für Spannungen im Material dienen kann. Brewster setzte eine senkrecht aufgestellte Glasplatte einer Druckbelastung aus und durchstrahlte sie mit polarisiertem Licht. Dabei stellte er fest, daß sich die Brechzahl innerhalb der Platte von Punkt zu Punkt änderte, wobei die jeweiligen Werte außerdem auch von der Polarisationsrichtung des einfallenden Lichtes abhingen.

Stellen Sie sich dazu eine Glasplatte vor, die in einen Rahmen eingespannt ist und von oben und unten unter Druck gesetzt wird. Die Hauptspannungsachsen liegen also vertikal und – weil sich die Platte in Querrichtung dehnt – horizontal. Bei vertikal polarisiertem Licht, das durch die Platte tritt, ergibt sich eine etwas kleinere Brechzahl und eine entsprechend höhere Lichtgeschwindigkeit als bei horizontal polarisiertem Licht. Die Beziehungen kehren sich genau um, wenn man die Platte durch Zugkräfte beansprucht. Unterschiedliche Brechzahlen für verschiedene Polarisationsrichtungen des Lichts bedeuten aber nichts anderes, als daß die mechanischen Spannungen eine Doppelbrechung hervorrufen.

Wie man aus dieser Doppelbrechung Rückschlüsse auf die mechanischen Spannungen in einer solchen Platte ziehen kann, wollen wir an einfachen Beispielen erläutern. Angenommen, eine quadratische Platte aus durchsichtigem Kunststoff wird – wie bei Brewsters Experiment – in vertikaler Richtung gleichmäßig zusammengepreßt, so daß die beiden Hauptspannungen vertikal und horizontal orientiert sind. Welche Veränderungen polarisiertes Licht beim Durchgang durch die gestauchte Platte erfährt, hängt nun davon ab, ob die ursprüngliche Polarisations-

tionsrichtung mit einer Hauptspannungsrichtung zusammenfällt. Für eine parallele Orientierung kann man leicht sorgen, indem man die Durchlaßrichtung des Polarisators zwischen Lichtquelle und Platte in die Senkrechte dreht. Mit einem zweiten Polarisator hinter der Platte, bei dem die Durchlaßrichtung waagrecht orientiert ist, läßt sich dann der Polarisationszustand des dort eintreffenden Lichts analysieren (Bild 6).

Das senkrecht polarisierte Licht durchquert die Kunststoffplatte mit der Geschwindigkeit, die sich aus den jeweiligen mechanischen Spannungen und den damit verbundenen Brechzahlen ergibt. Auch hinter der Platte bleibt das Licht senkrecht polarisiert und wird vom „gekreuzten“ Polarisationsfilter, dem Analysator, daher nicht durchgelassen (Bild 5). Einem Beobachter hinter dem Analysator erscheint die Platte also dunkel. Auch wenn die Platte mit waagrecht polarisiertem Licht durchstrahlt wird, würde der gekreuzte Analysator (mit nunmehr senkrechter Durchlaßrichtung) kein Licht durchlassen.

Man kann nun Polarisator und Analysator um den gleichen Winkel in gleicher Richtung drehen – sagen wir um 45 Grad. Die Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts ist dann also um 45 Grad gegen die Senkrechte gedreht. Man kann sich dieses polarisierte Licht als Überlagerung zweier ebenfalls linear polarisierter Komponenten vorstellen, deren Polarisationsrichtungen mit den beiden Hauptspannungsachsen übereinstimmen. Diese beiden Komponenten der polarisierten Welle breiten sich im Kunststoff mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus, weil die entsprechenden Brechzahlen – die sogenannten Hauptbrechzahlen – verschieden sind.

Hinter der Platte überlagern sich die unterschiedlich gebrochenen Komponenten wieder zu einer Lichtwelle, deren Polarisation allerdings in aller Regel eine neue Richtung hat. Um zu verstehen, wie sich die Polarisationsrichtung innerhalb der doppelbrechenden Kunststoffplatte ändert, müssen wir die Verschiebungen der Wellenlänge betrachten – der Einfachheit halber wollen wir zunächst einmal annehmen, das einfallende Licht habe nur eine Wellenlänge, sei also vollkommen monochromatisch.

Wenn Licht einer bestimmten Wellenlänge von Luft in ein optisch dichteres Medium wie Kunststoff übergeht, verkürzt sich die Wellenlänge. Je größer der Brechungsindex ist, um so stärker reduziert sich die Wellenlänge. Da die Hauptbrechzahlen (die Brechzahlen für die Hauptspannungsrichtungen) in der Kunststoffplatte verschieden sind, hängt die Verschiebung der Wellenlänge von der Polarisationsrichtung ab.

Wenn das einfallende Licht senkrecht polarisiert ist, verkürzt sich die Wellenlänge beim Eintritt in die Platte um einen Faktor, der durch die senkrechte Hauptbrechzahl gegeben ist – und ganz analog muß man bei waagrecht polarisiertem Licht die Wellenlänge durch die waagrechte Hauptbrechzahl dividieren.

Bei einem Polarisationswinkel von 45 Grad muß man die Wellenlängen für die beiden Komponenten in Richtung der Hauptspannungsachsen getrennt betrachten. Wegen der Unterschiede in den Wellenlängen durchläuft eine Komponente beim Durchqueren der Kunststoffplatte mehr Schwingungszyklen als die andere. Angenommen, die senkrechte Komponente durchläuft 1000 Schwingungen; dann könnte die waagerechte (etwas kurzwelligere) Komponente vielleicht gerade 1001 Oszillationen schaffen, bevor sie die Platte wieder verläßt. Hinter der Platte sind dann beide Komponenten sozusagen wieder im Gleichschritt, obwohl die eine zwischendurch eine Schwingung mehr vollführt hat.

Wenn man die beiden Komponenten jetzt wieder mathematisch zusammenfügt, so zeigt sich, daß die Vektoren für die elektrische Feldstärke wieder genau so schwingen, wie vor dem Eintritt in die Platte. Die Polarisationsrichtung ist also nach wie vor um 45 Grad gegen die Senkrechte gedreht. Wenn die beiden Polarisationsfilter gekreuzt sind, läßt der Analysator also auch jetzt kein Licht passieren.

Nun kann aber auch der Fall eintreten, daß die kurzwelligere Komponente nur eine halbe Schwingung mehr durchläuft als die langwelligere. Dann wird die Polarisation des Lichts in der Kunststoffplatte um 90 Grad gedreht. Es wird diesmal also von dem gekreuzten Analysator durchgelassen.

Die Polarisationsrichtung kann sich auch um kleinere Winkel drehen, aber dann läßt sich die Lichtwelle nicht mehr durch eine Überlagerung linear polarisierter Komponenten veranschaulichen. Vielmehr rotiert die Schwingungsebene des elektrischen Feldvektors – und damit die Polarisationsrichtung – um die Ausbreitungsrichtung der jeweiligen Komponente. Man spricht dann von elliptisch polarisiertem Licht; sofern der Betrag des rotierenden Vektors der elektrischen Feldstärke konstant bleibt, ist das Licht sogar zirkular polarisiert. Bei elliptisch oder zirkular polarisiertem Licht kann immer ein gewisser Teil den Analysator passieren.

Wir haben nun den entscheidenden Schlüssel, um das, was der Beobachter hinter dem Analysator sieht, mit den mechanischen Spannungen in der Kunststoffplatte zu verknüpfen: Dunkelheit bedeutet meist, daß die Polarisationsrichtung mit einer Hauptspannungsrichtung

übereinstimmt. Im Prinzip kann Dunkelheit natürlich auch dadurch zustande kommen, daß die Lichtwelle nicht parallel zu einer Hauptspannungsrichtung polarisiert ist. Dann kann sich die Polarisationsrichtung durch Doppelbrechung drehen, so daß die Lichtwelle hinter dem Modell senkrecht zur Durchlaßrichtung des Analysators polarisiert ist.

Isoklinen und Isochromaten

Wenn man ein Kunststoffmodell von einem Werkstück bei spannungsoptischen Aufnahmen belastet, haben die Hauptspannungsachsen nicht überall die gleiche Orientierung – im Gegensatz zu der gleichmäßig belasteten Platte, die wir bislang betrachtet haben. Aber auch hier möchte man letztlich anhand der farbigen Linienmuster die Orientierung der Hauptspannungsachsen feststellen.

Da man weiß, daß Dunkelheit bei Kunststoffplatten aus Plexiglas fast ausschließlich durch eine Übereinstimmung zwischen Polarisationsrichtung und einer Hauptspannungsrichtung entsteht, kann man davon ausgehen, daß die Orientierung der Hauptspannungsachsen längs der dunklen Linien einheitlich ist. Man bezeichnet diese Linien daher als Isoklinen, das bedeutet soviel wie „Linien gleicher mechanischer Spannung“ (Bild 7).

Die unterschiedlichen Isoklinen bei einem Plexiglasmodell lassen sich wie folgt kartieren: Man beleuchtet das Modell zunächst mit vertikal polarisiertem Licht und erhält dann als dunkle Linien die Isoklinen mit senkrechter und waagerechter Hauptspannungsachse. (Die Durchlaßrichtung des Analysators muß dabei natürlich waagrecht sein.) Das Muster der dunklen Linien wird anschließend auf Papier übertragen.

Man dreht nun die gekreuzten Polarisationsfilter um einen kleinen Winkel, etwa 10 Grad, und macht eine zweite Aufnahme. Jetzt erhält man die Isoklinen für Hauptspannungsrichtungen, die um 10 Grad gedreht sind. Mit ihnen und weiteren Isoklinen für andere Orientierungen läßt sich die Karte vervollständigen.

Wenn man die Hauptspannungsrichtungen für eine ausreichende Zahl von Punkten der Karte einträgt, kann man auch ungefähr erkennen, wie die Isoklinen für die Polarisationsrichtung parallel zur zweiten, nicht ausgemessenen Hauptspannung verlaufen. Wenn man Punkte auf benachbarten Isoklinen so verbindet, daß die Hauptspannungsrichtungen jeweils tangential zur Verbindungslinie liegen, erhält man ein Isoklinennetz. In gewissem Maße ist das Zeichnen dieser Linien Sache der richtigen Intuition, aber im großen und ganzen kann man sich von einer solchen Karte letztlich doch ein unge-

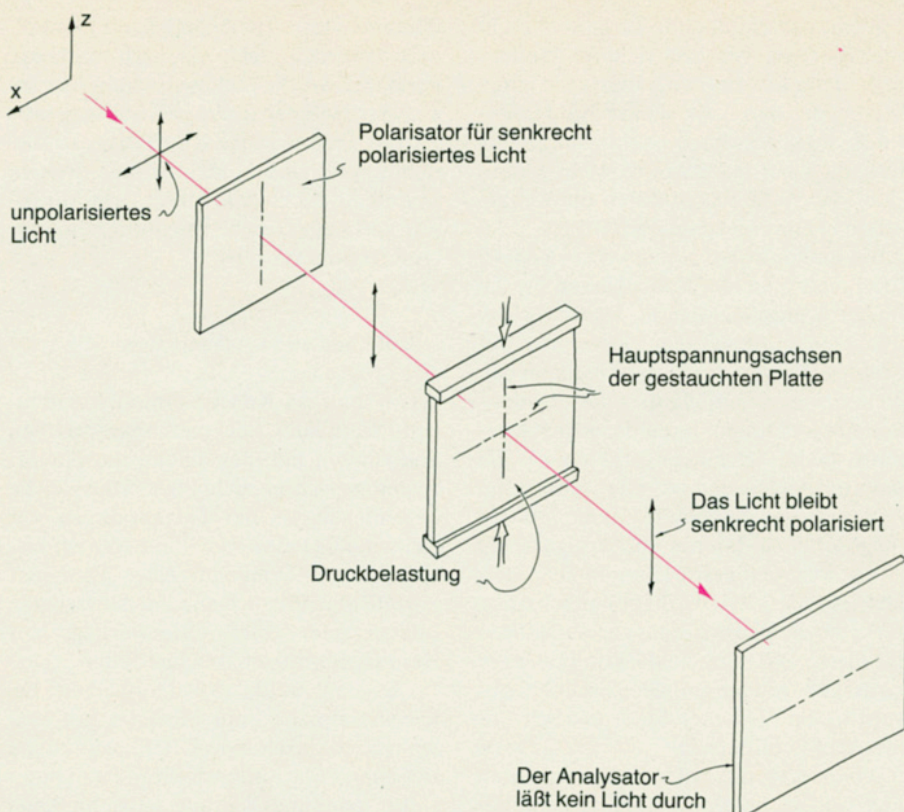


Bild 6: Licht, das parallel zu einer Hauptspannungsachse polarisiert ist, wird vom Analysator absorbiert.

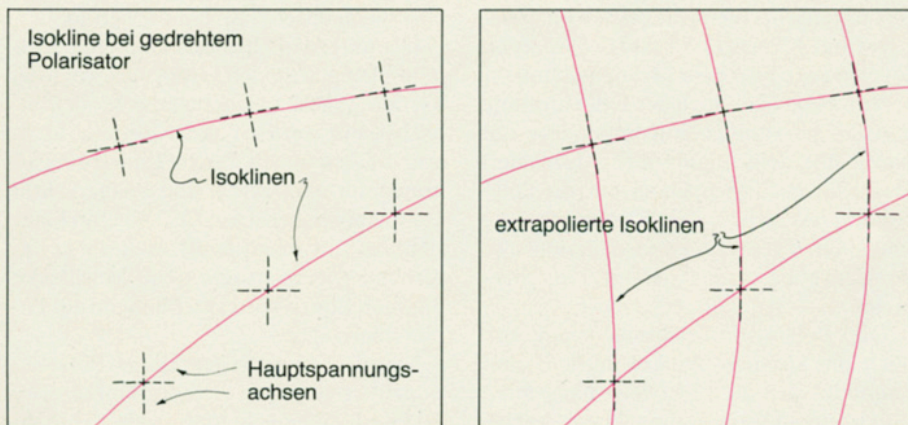


Bild 7: Isoklinen-Karte.

fähres Bild von den Spannungsbelastungen innerhalb des Modells machen.

Die Isoklinen überdecken einen zweiten Typ von dunklen Linien in spannungsoptischen Aufnahmen: die Isochromaten. Sie entstehen, wenn eine einfallende Lichtwelle nicht parallel zu einer Hauptspannungsrichtung polarisiert ist, aber Komponenten in Richtung dieser beiden Achsen besitzt, die schließlich gemeinsam wieder die ursprüngliche Polarisation ergeben. Das tritt besonders häufig bei der Doppelbrechung in Epoxid- oder Polyesterharzen auf, im Gegensatz zum Plexiglas, bei dem praktisch nur Isoklinen zu beobachten sind.

Um die Isochromaten bei einem Kunststoffmodell (aus Epoxid- oder Polyesterharzen) zu Gesicht zu bekommen, muß man die Isoklinen unterdrücken. Man braucht dazu zwei Viertelwellenplatten, die hinter den Polarisator beziehungsweise vor den Analysator gestellt werden müssen (Bild 8).

Eine Viertelwellenplatte beeinflusst den Polarisationszustand einer Lichtwelle ebenso wie die gleichmäßig belastete Glasplatte in Brewsters Experiment. Sie besteht nämlich aus einem doppelbrechenden Kristall mit zwei senkrechten optischen Achsen, so daß sich die entsprechenden Wellenkomponenten im

Kristall mit verschiedenen Geschwindigkeiten ausbreiten. (Die Geschwindigkeitsdifferenz entspricht gerade einem Gangunterschied von einer Viertelwellenlänge.)

Bei der spannungsoptischen Anordnung in Bild 8 ist die „schnelle“ optische Achse der Viertelwellenplatte um 45 Grad gegen die Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts gedreht. Das Licht wird deshalb beim Eintritt in die Viertelwellenplatte zu gleichen Teilen in zwei senkrecht zueinander linear polarisierte Komponenten zerlegt, die sich beim Verlassen der Platte zu einer zirkular polarisierten Welle überlagern. Diese Wirkung läßt sich mit einer zweiten „gekreuzten“ Viertelwellenplatte sofort wieder rückgängig machen: Wenn die optischen Achsen (mit gleicher Hauptbrechzahl) nämlich um 90 Grad gegeneinander gedreht sind, verliert die Komponente, die in der ersten Platte schneller war, in der zweiten wieder ihren Vorsprung. Beide Komponenten des zirkular polarisierten Lichts überlagern sich daher wieder zu linear polarisiertem Licht und werden vom Analysator absorbiert, als seien die Viertelwellenplatten gar nicht vorhanden – jedenfalls dann, wenn keine spannungsbedingte Doppelbrechung im Kunststoffmodell auftritt.

Wozu also der Aufwand? Nun, wenn ein belastetes Modell mit zirkular polarisiertem Licht durchstrahlt wird, fallen die Richtungen von Polarisation und Hauptspannung nicht mehr zusammen; die Isoklinen sind also unterdrückt, und die Isochromaten werden sichtbar.

Die Isochromaten sind über Polarisationsänderungen mit den Hauptspannungen im Kunststoffmodell verknüpft. Die Differenz der Hauptspannungen bestimmt nämlich, wie sich die Polarisation des Lichts an verschiedenen Stellen des Kunststoffmodells ändert, und das heißt, ob die spannungsoptische Aufnahme an der entsprechenden Stelle dunkel erscheint oder nicht. Im Prinzip kann man also anhand der Isochromaten die Spannungen innerhalb des Modells bestimmen.

Farben signalisieren mechanische Spannungen

Es ist jetzt an der Zeit, daß wir das Kunststoffmodell nicht mehr allein mit einfarbigem, sondern auch mit weißem Licht beleuchten. Da der Polarisationszustand des Lichts von den Brechzahlen für die beiden Hauptspannungsrichtungen des Kunststoffs abhängt, ergibt jede Farbe – sprich Wellenlänge des Lichts – ein etwas anderes Isochromatenmuster.

Angenommen, an einer bestimmten Stelle des Modells erzeugen die Kompo-

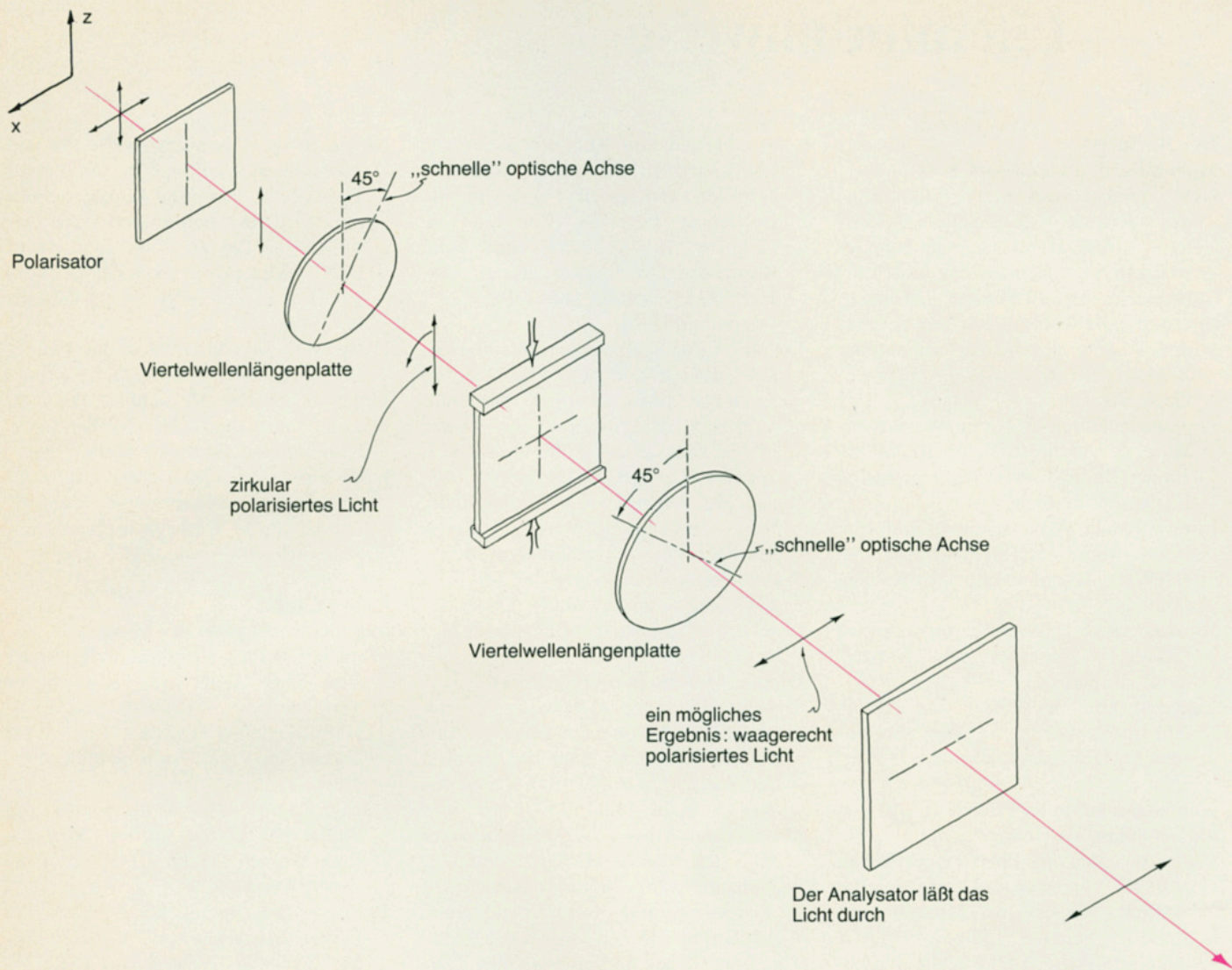


Bild 8: Wie man Isochromaten sichtbar macht und Isoklinen unterdrückt.

nenten in Richtung der Hauptspannungsachsen für eine bestimmte Farbe hinter dem Modell wieder die ursprüngliche Polarisationsrichtung, dann wird diese Farbe vom Analysator absorbiert. Dagegen können die übrigen Farben, bei denen sich die Polarisation geändert hat, passieren und auf der spannungsoptischen Aufnahme eine „Linie gleicher Farbe“ (Isochromate) erzeugen.

Welcher Farbton für einen bestimmten Punkt des Modells aus der Mischung der durchgelassenen Farben resultiert, läßt sich allerdings nur schwer voraussagen. Diese Folge hängt davon ab, wie sich die Polarisation für die einzelnen Farbkomponenten bei der Doppelbrechung im Kunststoffmodell ändert, wobei im Prinzip das gesamte sichtbare Spektrum der Lichtquelle berücksichtigt werden muß. Außerdem spielt es eine Rolle, wie empfindlich der Farbfilm (oder das Auge des Beobachters) auf die verschiedenen Farben anspricht; als weiterer Einflußfaktor wäre zu nennen, daß die Viertelwellen-

platte das Licht streng genommen nur bei einer ganz bestimmten Wellenlänge zirkular polarisiert, und anderes mehr.

Wenn die mechanischen Spannungen in einem Bereich stark zunehmen, wird überdies die Sache selbst noch komplizierter, weil immer mehr Wellenlängen absorbiert werden. Bei sehr hohen Spannungsdifferenzen folgen die Wellenlängenbereiche, in denen Licht absorbiert beziehungsweise durchgelassen wird, so dicht aufeinander, daß die Mischfarben immer heller werden und schließlich ganz nach Weiß hin verschwimmen.

Seufert photographierte bei seinen spannungsoptischen Aufnahmen die Muster, die mechanische Spannungen in einem Kunststoffmodell bei linear polarisiertem Mischlicht erzeugten. In Bild 2 sind daher sowohl schwarze Isoklinen als auch farbige Isochromaten zu sehen. In beiden Photos liegen die Isochromaten dort besonders dicht, wo sich das Modell stark konkav krümmt – in diesen Bereichen sind die Spannungsunterschiede und

damit die Bruchgefahr am größten. Da beide Modelle in den konkaven Gebieten durch die Druckbelastung gestaucht werden, herrschen dort Druckspannungen vor, im Gegensatz zu den konvex gekrümmten Bereichen, die gedehnt werden. In der Umgebung der geraden Kanten des oberen Modells in Bild 2 variieren die Farben am wenigsten – die mechanischen Spannungen sind dort relativ einheitlich, die Belastungen also gering.

Wenn Sie ähnliche Aufnahmen machen wollen, können Sie Polarisatoren und Viertelwellenplatten dafür von Spindler und Hoyer GmbH & Co. in 3400 Göttingen beziehen. Größere Folien bekommen Sie von Firmen, die sich auf den Vertrieb spannungsoptischer Geräte spezialisiert haben, wie etwa die Firma Dr. Heinrich Schneider in 6550 Bad Kreuznach. Wer direkt an Seufert schreiben will, muß seinen Brief adressieren an: 2050 West Boulevard, Cleveland, Ohio 44102, USA.

Aus: *Scientific American*, Juni 1983