

Lichtkreuze in Lichtkreisen

Ein vielfach übersehenes Alltagsphänomen aus physikalischer Sicht

Fenster mit Doppel- bzw. Isolierglasscheiben rufen oft ring- und kreuzförmige Reflexe auf gegenüberliegenden Hauswänden hervor. Dieses Phänomen wird durch Fotografien dokumentiert und auf der Grundlage der Theorie elastisch verformter Platten anhand von Computersimulationen physikalisch beschrieben. Anschließend werden mithilfe eines leicht herzustellenden Plexiglasmodells einer Doppelglas-

scheibe einfache Experimente dargestellt, dokumentiert und mit den Ergebnissen von Simulationen verglichen. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den realen und berechneten Reflexen.

*Noch viel wunderbarer als der einfache Spiegel
ist der durchsichtige Spiegel, zum Beispiel ein Fenster.*

CHRISTIAN MORGENSTERN

1 Einleitung

Fenster haben den Status eines rein funktionalen Elements eines Wohngebäudes lange hinter sich gelassen. Als architektonisches Gestaltungsmittel bringen sie auch ästhetische Absichten zum Ausdruck, wobei die Form des Rahmens und die Art der Verglasung eine wesentliche Rolle spielen.

Eher nicht beabsichtigt sind dabei jene Phänomene, die durch Wechselwirkungen zwischen Licht und Glas beim Durchgang des Lichts durch die Scheiben in der einen oder anderen Richtung hervorgerufen werden. Das oft verwirrende visuelle »Lichtspiel« beim Blick auf und/oder durch ein Fenster ist jedem bekannt: Je nach den Lichtverhältnissen vor und hinter der Scheibe kann man hindurchsehen, ohne gesehen zu werden. Oder das Fenster wird zum Spiegel der erhellten Außenwelt. Dabei kommt es bei doppelt verglasten Scheiben zu Überlagerungen zweier Spiegelbilder, von denen das eine oft deutlich vergrößert und das andere verkleinert ist (Abb. 1). Bei Änderung des Blickwinkels beobachtet man, dass sich die Spiegelbilder gegeneinander verschieben und manchmal um ein fiktives Zentrum rotieren. Die Ursache für diese Phänomene liegt in der Krümmung der beiden Scheiben begründet, die sich ähnlich wie Hohl- und Wölbspiegel verhalten.

Ein anderes nicht weniger eindrucksvolles Phänomen des gegeneinander gekrümmten Spiegelpaares sind »Lichtbilder«, die an jedem sonnigen Tag auf Häuserwände, Straßen, Fahrzeuge und andere »Leinwände« – man möchte meinen: unübersehbar – projiziert werden (Abb. 2–4). Interessanterweise geben fast alle Menschen an, die auf den Fotos gezeigten Lichtkreuze in Lichtkreisen in Wirklichkeit noch nie gesehen zu haben. Manche halten das Phänomen für eine Täuschung oder für eine künstlerische Installation. Man bekommt dadurch eindrucksvoll bestätigt, dass es nicht genügt, wenn die Netzhäute unserer Augen belichtet werden, es muss auch jemand dahinter stehen, der die Lichteindrücke als das und das zu »sehen« vermag. Neben der Absicht, einmal mehr auf dieses Phänomen aufmerksam zu machen, geht es uns im Folgenden vor allem darum, über die qualitative physikalische Beschreibung [1] hinausgehend, einige Anregungen für



Abb. 1. Die Verformung der Doppelscheiben lässt sich oft an entsprechend verformten Spiegelbildern erkennen.



Abb. 2. Eine Gruppe von Lichtkreuzen. Wie kommt es zu der Anordnung?



Abb. 3. Die Lichtkreuze benachbarter Fenster haben meist eine ähnliche Form.



Abb. 4. Bei kleinen Scheiben (Sprossenfenster) bleibt von den Reflexen oft nur ein Lichtkreis übrig.

quantitative Abschätzungen und experimentelle Untersuchungen zu geben.

2 Reflexionen doppelt verglaster Scheiben

Wie wir an anderer Stelle ausgeführt haben [1], kommen die in den Abbildungen gezeigten Reflexe an Häuserwänden dadurch zustande, dass das Sonnenlicht an beiden Scheiben eines mit Isolierglas ausgestatteten Fensters teilweise reflektiert wird (Abb. 5). Auf diese Weise wird unter geeigneten Bedingungen an der gegenüberliegenden Häuserwand ein charakteristisches Lichtkreuz abgebildet, das von einem mehr oder weniger deutlichen Lichtkreis eingerahmt wird (gut zu sehen in Abbildungen 2 und 3).

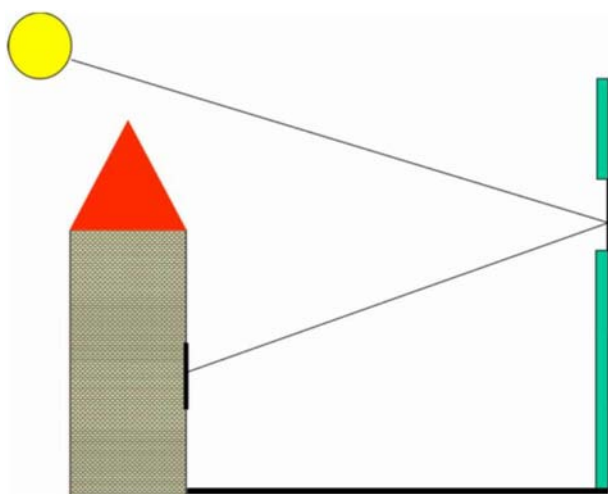


Abb. 5. Konstellation von Fenster, Häuserfront und Sonne zur Entstehung eines Reflexes.

Die Form der Reflexe gibt zu erkennen, dass die Scheiben gekrümmt sein müssen und je nach der Krümmung das reflektierte Licht fokussieren und defokussieren. Bezogen auf die Richtung des einfallenden Lichts ist stets die eine Scheibe konvex und die andere konkav gekrümmt, gleichgültig ob die Scheiben nach außen oder nach innen gewölbt sind. Aus geometrischen Gründen weisen die Scheiben die stärkste Krümmung senkrecht zu den Diagonalen auf (siehe unten). Grob gesehen sammelt die Scheibe mit der konkaven Diagonalkrümmung das Licht in zwei sich kreuzenden Brennpunkten, während die Scheibe mit der konvexen Diagonalkrümmung das Licht über die Begrenzung des Reflexes der unverformten Scheibe hinaus reflektiert, das sich dort zu einer oft kreisförmigen bzw. ovalen Figur überlagert.

3 Die Scheibe als Hohl- oder Wölbspiegel

Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, zeigt sich die Deformation der beiden Scheiben unter günstigen Lichtverhältnissen in der Überlagerung zweier Spiegelbilder der Umgebung, die sich bei der Bewegung des Beobachters in charakteristischer Weise gegeneinander verschieben. Dadurch wird bereits ein grober Eindruck über Art und Maß der Krümmung der Scheiben vermittelt. Genauerem Aufschluss kann man sich dadurch verschaffen, dass man die Scheiben aus einer Entfernung von ein bis zwei Metern mit einer Punktlichtquelle (z. B. einer Taschenlampe mit Laserdiode) abtastet. Dazu führt man den Lichtstrahl in parallelen Zeilen über die Scheiben. Man beobachtet, dass i. A. sowohl die Länge als auch die Richtung einer gedachten Verbindungslinie zwischen dem punktförmigen Reflex an der vorderen und dem an der hinteren Scheibe (der sich ändernden Neigung der Scheiben entsprechend) variieren und eine Art Liniendiagramm des Neigungsprofils ergeben.

Bei einer normal deformierten Isolierglasscheibe sind die Verbindungslinien stets zum Mittelpunkt der Scheibe hin orientiert und werden bei Annäherung an den Mittelpunkt immer kürzer. Die Zuordnung der Reflexe zu den Scheiben lässt sich aus der Nähe aufgrund ihrer unterschiedlichen Intensität leicht beurteilen. Man kann aber auch mit der Hand gegen eine der Scheiben drücken und an der Bewegung einer der Reflexe die Zuordnung zur Scheibe erkennen. Dadurch kann man u. a. feststellen, welche der Scheiben nach innen und welche nach außen gekrümmt ist. Bei diesen Untersuchungen wird man auch schwache Reflexe höherer Ordnung bemerken, die in diesem Zusammenhang jedoch keine Rolle spielen.

Das auf diese Weise ermittelte Strichdiagramm bestätigt auch die eingangs geäußerte Vermutung, dass sich beim »Überqueren« der Diagonalen der Richtungssinn der Scheibenneigung besonders stark ändert und für die beobachtete starke Fokussierung bzw. Defokussierung des reflektierten Lichts in der Umgebung der Diagonalen verantwortlich ist.

Die gewölbten Scheiben sehen ähnlich aus, wie es die in Abbildung 6 dargestellten Lautsprecherabdeckun-



Abb. 6. Die Form dieser Lautsprecherabdeckungen entspricht in übertriebenem Maße der Form einer Isolierscheibe mit nach innen gewölbten Scheiben. Hier wird das Höhenlinienbild der Krümmung mithilfe eines Moiré-Phänomens sichtbar.

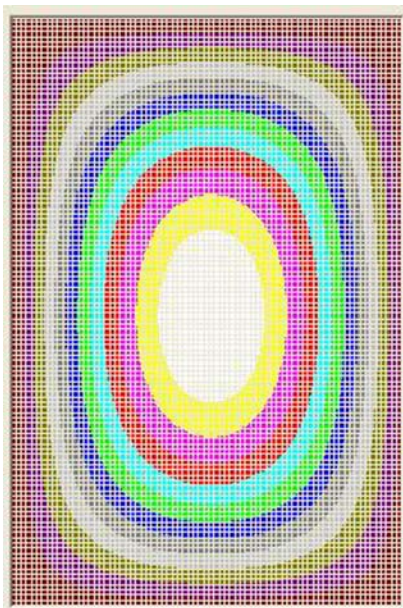


Abb. 7. Höhenlinienbild einer durchgebogenen Scheibe aufgrund einer Computersimulation. Jede Farbe kennzeichnet einen bestimmten Höhenbereich.

gen in übertriebenem Maße zeigen. Aufgrund der quadratischen Textur des teilweise durchsichtigen Gewebes kann man sich übrigens aufgrund des Moiréeffektes eine unmittelbare Anschauung des Höhenlinienbildes der Wölbung der Lautsprecherabdeckung verschaffen. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die gewölbten Scheiben aufgrund einer Computersimulation (siehe Abb. 7) (siehe weiter unten). Die qualitative Übereinstimmung der Höhenlinienprofile ist frappierend. Legt man die Abdeckungen umgekehrt übereinander, so erhält man ein ähnliches Bild für nach außen gekrümmte Scheiben.

Bei der Ausleuchtung der gesamten Scheibe durch das Sonnenlicht kommt es zu Reflexionen von der Form der an den gegenüberliegenden Hauswänden beobachteten Lichtkreuze in Lichtkreisen. Für den Fall, dass der Abstand zwischen Scheibe und Hauswand in etwa der Brennweite¹ der gewölbten Scheiben ent-

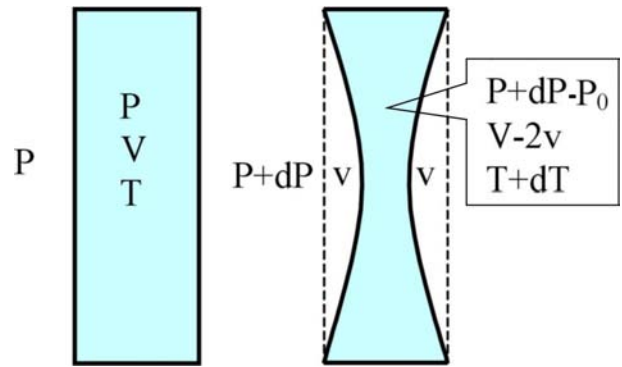


Abb. 8. Querschnitt durch eine unverformte und verformte Doppelglasscheibe

spricht, hat man es mit scharfen Brennpunkten zu tun (Abb. 2, 3 und 9). Anderenfalls fallen die Reflexe mehr oder weniger verwaschen aus (Abb. 10 und 11).

4 Die Doppelglasscheibe als thermodynamisches System

Die Ursache für die Krümmung der beiden Scheiben ist im Verhalten des eingeschlossenen Zwischenraumes zu suchen. Dieser Raum vom Volumen V ist vor allem aus Gründen der Wärmedämmung (Isolierglas [2]) mit einem Gas, meist trockene Luft, gefüllt. Da die Scheiben in aller Regel in Druckkontakt mit der Außenwelt hergestellt werden, sind zum Zeitpunkt der luftdichten Verklebung der Scheiben Innen- und Außendruck gleich und damit die beiden Scheiben zu diesem Zeitpunkt eben. Die Doppelglasscheibe ist demnach ein geschlossenes System, dessen Gasmenge bei der Herstellung ein für alle Mal festgelegt ist. Sie kann nur Energie mit der Außenwelt austauschen.

Die Variation des äußeren Luftdrucks aufgrund eines Ortswechsel zwischen verschiedenen Höhen, sowie wetterbedingte Luftdruck- und Temperaturänderungen führen dazu, dass sich der Druck des eingeschlossenen Gases entsprechend verändert: Die beiden Scheiben werden infolgedessen mehr oder weniger stark entgegengesetzt zueinander gekrümmt werden: Der Innendruck wird durch die äußeren Luftdruckschwankungen dp und die Druckdifferenz zwischen der Außen- und Innenseite der gewölbten Scheibe P_0 bestimmt, die Temperatur T ändert sich wie die Temperatur der Umgebung um dT und das Volumen des verkleinerten oder vergrößerten Zwischenraums nimmt um $2v$ zu oder ab (siehe Abb. 8).

Um einen Eindruck von der Größenordnung der Druckschwankung zu erhalten, betrachte man beispielsweise in München produziertes und in Münster eingebautes Isolierglas. Allein aufgrund der Höhendifferenz von 460 m bei sonst gleichen Wetterbedingungen steigt der Druck um 5800 Pa. Wetterbedingte Luftdruckschwankungen können Druckunterschiede

¹ Unter Brennweite wird hier die Brennweite der Parabel verstanden, die optimal in die diagonalen »Furchen« der verformten Scheiben eingepasst werden kann (siehe weiter unten).

von bis zu 3000 Pa hervorrufen. Kommt beides zusammen und zusätzlich noch eine Windlast hinzu, so wird deutlich, welchen Biegebelastungen das Isolierglas ausgesetzt sein kann. (Dieser Aspekt kann Anlass zu interessanten thermodynamischen und mechanischen Untersuchungen sein [3].)

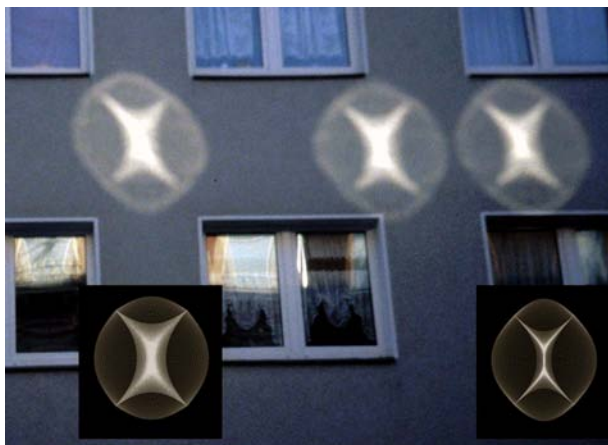


Abb. 9. Lichtkreuze mit eingeblendetem berechnetem Reflex. Rechts ist außerdem der Reflex für eine scharfe Abbildung dargestellt.

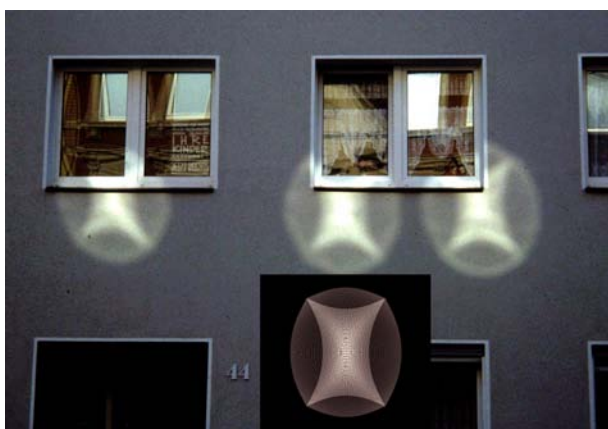


Abb. 10. Lichtkreuze derselben Fenster wie in Abbildung 9 etwa zur selben Uhrzeit aufgenommen. Der Luftdruck war an diesem Tage etwas niedriger.

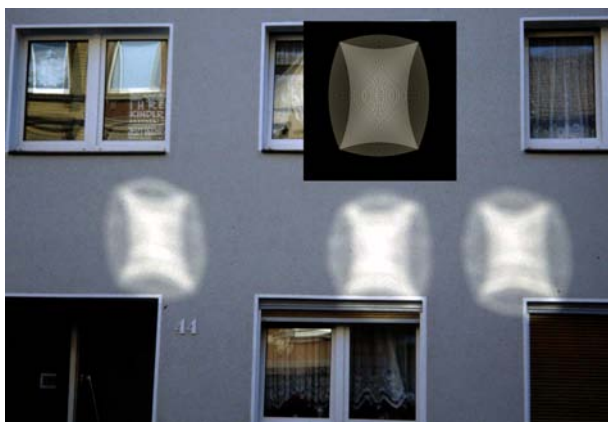


Abb. 11. Lichtkreuze derselben Fenster wie in Abbildung 9. Der Luftdruck war noch niedriger und näherte sich dem Innendruck der Scheiben.

5 Quantitative Zugänge mithilfe von Computersimulationen

Wie stark die beiden Scheiben des Isolierglases im konkreten Fall durchgebogen werden, hängt von der Luftdruckdifferenz P_0 zwischen innen und außen, von den Abmessungen und den Elastizitätseigenschaften der Scheibe ab. Für die Durchbiegung (den Durchhang) einer allseitig eingespannten Scheibe gibt es eine in den Ingenieurwissenschaften vertraute analytische Formel (siehe Gl. 1 im Anhang). Sie wird für konkrete Bedingungen mithilfe eines Computerprogramms ausgewertet. In Abbildung 7 ist ein mit diesem Programm erstelltes Höhenlinienbild einer durchgebogenen Scheibe abgebildet, in dem Bereiche gleicher Höhe mit derselben Farbe markiert sind. Dadurch wird die typische Form der Durchbiegung erkennbar.

Da die Durchbiegung maßgeblich durch die Druckdifferenz P_0 zwischen innen und außen bestimmt ist, benötigt man ein praktikables Verfahren, P_0 zu ermitteln. Dazu nutzen wir die Tatsache aus, dass der Abstand, in dem die im Bereich der Diagonalrinne reflektierten Lichtstrahlen fokussiert werden, (d. h. die Brennweite f des gekrümmten »Spiegels«) durch die Krümmung des Querschnitts der Diagonalrinne bestimmt ist. Geht man nämlich davon aus, dass die Krümmung, die zu einem scharfen Reflex führt, durch eine Parabel angenähert werden kann, so verfügt man über eine Beziehung zwischen Krümmung und Brennweite f . Denn für die Parabelgleichung $y = a x^2$ ($2a > 0$ ist die Krümmung der Parabel an der Stelle $x_0 = 0$) beträgt die Brennweite¹: $f = 1/(4a)$.

In einem speziellen Programmteil werden nunmehr die Grafen der mit einem geschätzten Wert für P_0 ermittelten Krümmungskurve und der Parabelkurve übereinander gelegt. Anschließend wird der Wert für P_0 schrittweise so lange variiert, bis die beiden Grafen im Bereich des Minimums optimal zur Deckung kommen. Auf diese Weise kommt man näherungsweise zu dem unter den gegebenen Bedingungen maßgeblichen Durchhang der Scheibe, dessen Kenntnis eine Voraussetzung dafür ist, dass man das Reflexionsmuster berechnen kann.

Mithilfe des durch das Höhenlinienprofil bestimmten Durchhangs der Scheiben werden anschließend die Reflexe berechnet, die sich in gegebenem Abstand formen. Dazu wird aus der Flächennormale (Einfallslot) der gekrümmten Scheibe am Ort des Flächenelements (x, y) mithilfe des Reflexionsgesetzes für alle (x, y) der durchgebogenen Scheiben berechnet, in welche Richtung der in (x, y) auftreffende Lichtstrahl reflektiert wird. Die Gesamtheit der an den beiden Scheiben reflektierten Lichtstrahlen führen in einem gegebenen Abstand zu dem entsprechenden Reflexmuster, indem die ursprünglich schwarze Fläche umso heller eingefärbt wird, je mehr Lichtstrahlen zur Überlagerung kommen.

¹ Wenn man das Phänomen in der Mittelstufe durchnimmt, könnte der Zusammenhang zwischen Brennweite und Krümmung einer Parabel selbst Gegenstand des Unterrichts sein. Dabei wäre es beispielsweise interessant zu beweisen, dass alle parallel einfallenden Lichtstrahlen durch den Brennpunkt gehen.

Wenn man keine *scharfen* Reflexe vorfindet, weil für den gegebenen Abstand zur gegenüberliegenden Häuserwand keine passenden Luftdruckunterschiede auftreten, besteht die Möglichkeit im Programm die Luftdruckunterschiede so lange zu variieren, bis bei der gegebenen Entfernung zwischen den Häuserwänden – soweit sich das qualitativ einschätzen lässt – die (unscharfe) Form des beobachteten (fotografierten) mit der des berechneten Reflexes übereinstimmt.

Vergleicht man die Fotos der beobachteten mit den berechneten (simulierten) Reflexen (siehe die in die Fotografien einmontierten simulierten Reflexe (Abb. 9 bis 11)), so zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Die berechneten Reflexe fallen durchweg etwas graziler aus als die realen Reflexe. Das mag u.a. daran liegen, dass bei Berechnung parallele Lichtstrahlen vorausgesetzt wurden, während die Sonnenstrahlen nicht vollkommen parallel sind.

In den Abbildungen 9 bis 11 sind Reflexe dargestellt, die an verschiedenen Tagen etwa zur selben Zeit fotografiert wurden. Die veränderte Form weist auf die geänderte Druckdifferenz P_0 hin. In der Reihenfolge der Bildnummerierung nimmt P_0 ab. Während in Abbildung 9 ein fast scharfer Reflex zu sehen ist, bei dem der Abstand zwischen Scheibe und gegenüberliegender Wand also in etwa der Brennweite der Scheibe entspricht, nimmt die Schärfe der Reflexe in Abbildung 10 und erst recht in Abbildung 11 deutlich ab. Bei nach außen gewölbten Scheiben und wenig geänderter Temperatur lässt das auf eine Zunahme des äußeren Luftdrucks schließen, durch den die Scheiben stärker zusammengedrückt, die Verformung geringer und die Brennweite größer wird. Die Scheiben stellen so gesehen eine Art Dosenbarometer dar. Mit ein wenig Übertreibung kann man also sagen: Die Fensterreflexe ermöglichen dem geschulten Blick eine Vorhersage des Wetters.

Ob die Scheiben nach innen oder nach außen gewölbt sind, kann man leicht feststellen, wenn man mit der Hand gegen jeweils eine der Scheiben drückt und sich anschaut, welcher der beiden Reflexe sich in welcher Weise verändert.



Abb. 12. Eine zwischen Daumen und Zeigefinger in der Mitte leicht zusammengedrückte CD-Hülle ruft ähnliche Reflexe hervor, wie sie an den Häuserwänden entstehen.

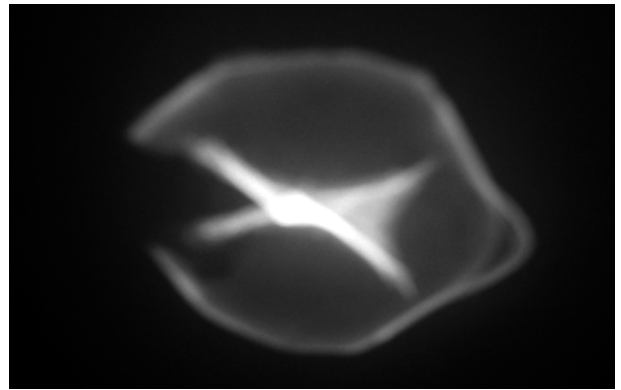


Abb. 13. Reflex der in Abbildung 12 dargestellte CD-Hülle

6 Ein einfaches Modell einer Doppelscheibe

Die Änderung der Reflexe durch leichtes Verbiegen der Scheiben kann man schon mithilfe einer CD-Hülle demonstrieren (Abb. 12). Hält man die nackte Hülle so in das Licht der Sonne (oder einer anderen geeigneten Leuchte), so nehmen die auf eine Wand geworfenen Reflexe in etwa die Form des Lichtkreuzes im Lichtkreis an (Abb. 13), wenn man die Hülle (möglichst in der Mitte) leicht zusammendrückt. Durch unterschiedlich stark ausgeübten Druck kann man wenigstens andeutungsweise alle beobachteten Formen der Fensterreflexe hervorrufen.

Will man die Reflexe etwas perfekter abbilden und vor allem etwas genauer untersuchen, so kann man sich ein einfaches Modell aus Plexiglas herstellen. Dazu klebt man zwei Plexiglasscheiben der gewünschten Größe, die durch einen schmalen Plexiglasstreifen am Rande auf Abstand gebracht werden, luftdicht zusammen. Wir haben gute Erfahrungen gemacht mit Plexiglas der Stärke 3 bis 5 mm und einer Größe von etwa 20 cm x 20 cm. Ein in den Abstandshalter eingebrachter Stutzen, an den man einen passenden Schlauch fixiert, erlaubt es, den Luftdruck und damit die Verformung der elastischen Scheiben in definierter Weise zu verändern (Abb. 14). Außer einiger Sorgfalt beim luftdichten Verkleben der Scheiben, erfordert die Konstruktion keine besonderen Fertigkeiten.

Lässt man ein intensives Lichtbündel (am besten Sonnenlicht, aber auch das Licht eines Diaprojektors führt zu guten Ergebnissen) auf die Scheibe fallen, so beobachtet man auf einem geeignet aufgestellten Projektionsschirm einen Reflex, der im Falle des Druckgleichgewichts mit der Umgebung die rechteckige Form der Doppelscheibe aufweist. Wenn man mit Hilfe des Schlauches Luft aus der Doppelscheibe herausaugt oder Luft hineinbläst, strukturiert sich der Reflex zu den bekannten Mustern des Lichtkreuzes im Lichtkreis. Die verschiedenen an den Häuserfronten zu verschiedenen Zeiten oder an verschiedenen Orten beobachteten Formen lassen sich auf diese Weise kontinuierlich durchlaufen. Misst man den Abstand zu einem scharfen Reflex, den man mithilfe ei-



Abb. 14. Zwei Plexiglasscheiben auf Abstand zusammengeklebt als Modell einer Doppelglasscheibe. Mit einer Einwegspritze kann in definierter Weise Luft herausgepumpt werden.

nes Fotos fixiert, so kann man – wie oben skizziert – die Form des Reflexes rechnerisch bestimmen und mit dem experimentellen Ergebnis vergleichen (vgl. Abb. 15).

Weitere quantitative Abschätzungen sind denkbar. Beispielsweise könnte man mithilfe der Formel für den Durchhang (Gl. (1) Anhang) die zu bestimmten Reflexformen passenden Volumenänderungen berechnen und mit gemessenen Werten vergleichen. Eine Messung ist auf einfache Weise möglich, wenn man mithilfe einer kalibrierten Einwegspritze das der Scheibe entnommene (bzw. zugeführte – was schwieriger ist!) Luftvolumen bestimmt.

7 Fazit

Fensterreflexe gehören zu jenen optischen Alltagsphänomenen, die gewohnheitsgemäß übersehen werden. Erst die durch den physikalischen Blick erhöhte Aufmerksamkeit eröffnet die Möglichkeit, derartige Selbstverständlichkeiten zu hinterfragen und damit die Aufmerksamkeit auf diese und ähnliche Phänomene zu richten.

Obwohl die physikalischen Voraussetzungen zum qualitativen Verständnis relativ einfach sind, erweisen sich die Fensterreflexe aufgrund des komplexen Zusammenhangs zwischen mechanischen, thermodynamischen und optischen Eigenschaften analytisch nur schwer zugänglich. Eine Alternative bieten Computersimulationen, mit denen sich die Reflexe modellieren und über grafische Visualisierungen eindrucksvoll veranschaulichen lassen.

Durch einfache fast als Freihandversuch durchführbare Experimente mit einem Modellfenster sind die Veränderungen der Reflexmuster aufgrund der Luftdruckvariationen gewissermaßen im Zeitraffer nachzustellen. Darüber hinaus sind unmittelbare Vergleiche der experimentell und der mittels Computersimulationen erzeugten Reflexmuster möglich.

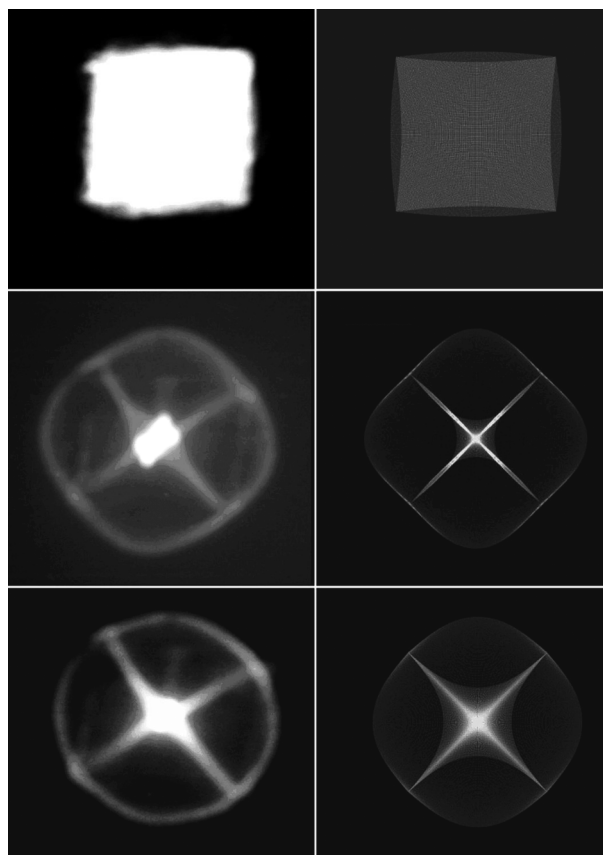


Abb. 15. Fotografierte Reflexe einer quadratischen Plexiglasscheibe (links) und die entsprechenden simulierte Reflexe (rechts) bei jeweils gleichem Abstand von einer Wand und geändertem Innendruck. In der Mitte ist der scharfe Reflex dargestellt. Unten ist der Reflex aufgrund einer unzureichenden Krümmung etwas unscharf. Oben ist so gut wie keine Krümmung vorhanden.

8 Anhang: Zur Berechnung des Durchhangs

Die Durchbiegung bzw. der Durchhang der Scheibe wird durch folgende Funktion beschrieben [4]:

$$D(x, y) = C \cdot P_0 \cdot \frac{a^2 b^2}{c^3} \sum_{m>0} \sum_{n>0} \frac{\sin\left(m\pi \frac{x}{a}\right) \cdot \sin\left(n\pi \frac{y}{b}\right)}{mn \left(m^2 \frac{b}{a} + n^2 \frac{a}{b}\right)^2}, \quad (1)$$

wobei n und m ungerade sind und die einzelnen Elemente durchnummerieren, in die man sich die Scheibe zerlegt denken kann. Dabei stellt

$$C = \frac{192(1 - \sigma^2)}{E\pi^6}$$

einen Materialfaktor dar.

E bezeichnet den Elastizitätsmodul, eine Materialkonstante, die den Quotienten aus der beim Aufbringen einer Belastung erfolgenden Spannung und der dadurch bewirkten Längenänderung der Scheibe darstellt. Die Poissonzahl ist der ebenfalls vom Material

abhängige Proportionalitätsfaktor zwischen Quer- und Längsdehnung der Platte im linearen Elastizitätsbereich. Beide Konstanten sind einschlägigen Tabellenwerken zu entnehmen. Für die Berechnung der Glasscheiben wurden $E = 73 \text{ GPa}$ und $\sigma = 0,23$ [6] und für das Plexiglasmodell $E = 3,3 \text{ GPa}$ und $\sigma = 0,37$ [7] zugrunde gelegt. a , b und c sind Länge, Breite und Dicke der Platte und P_o gibt die Luftdruckdifferenz zwischen innen und außen an.

Ich danke UDO BACKHAUS für wertvolle Diskussionen.

Literatur

- [1] H. JOACHIM SCHLICHTING – VOLKHARD NORDMEIER: Alltägliche Reflexe. – Physik in der Schule **35** (1997) Nr. 5, S. 192–195.
- [2] F. FELDMEIER: Isolierglas – eine physikalische Fundgrube. – Praxis der Naturwissenschaften – Physik **47** (1998) Nr. 4, S. 2–12.
- [3] DAVID J. SMITH: Flexural Stress in Windows During Hurricanes. – The Physics Teacher **38** (Oct. 2000) 400–402.
- [4] W. SWINDELL: Effect of Environmental changes on the Ghosting of Distant Objects in Twin-Glazed Windows. – Applied Optics **11** (1972) No 9, p. 2033–36.
- [5] STEFANIE WENNMACHER: Physikalische Untersuchungen zu Reflexionen und Brechungen an gewölbten Oberflächen mit schulischen Mitteln. – Staatsexamensarbeit an der Universität Münster 2003.
- [6] Das Glasbuch:
http://www.glasmarkt.com/sanco/kapitel_3/sanco_3.pdf
(26.03.04)
- [7] Degussa, Röhm Plexiglas:
http://www.roehm.de/en/plexiglas/_download/download/plexiglas.Par.0004.TRow.0003.TCell.0001.File.tmp/211-1%20PLEXIGLAS%C2%AE%20GS+XT_d.pdf
(26.03.04)

H. JOACHIM SCHLICHTING, Universität Münster, Institut für Didaktik der Physik, Wilhelm-Klemm-Str. 10, 48149 Münster, schlichting@uni-muenster.de, ist Professor für Didaktik der Physik. Die physikalische und fachdidaktische Erschließung von Alltags- und Naturphänomenen gehört zu einem seiner Arbeitsgebiete. Zur Unterstützung der Belange der Didaktik der Physik und der Schulphysik ist er seit Jahren in Gremien der Deutschen Physikalischen Gesellschaft aktiv. Er war u. a. Leiter des Fachverbandes Didaktik der Physik.