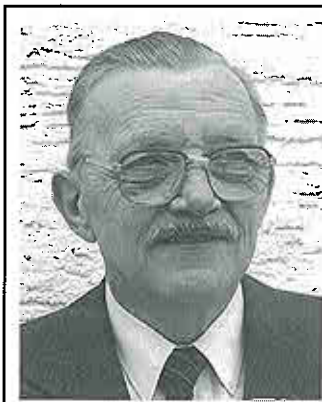




P-Belag: Verbesserte
Abbildung bei Ferngläsern durch
phasenkorrigierte Dachprismen

Adolf Weyrauch
Dr. Bernd Dörband

Sonderdruck aus Deutsche Optikerzeitung,
Heidelberg, Nr. 4/1988



Adolf Weyrauch,
Aalen



Dr. Bernd Dörband,
Aalen

P-Belag: Verbesserte Abbildung bei Ferngläsern durch phasenkorrigierte Dachprismen

1. Einleitung

Zur Bildumkehr in Ferngläsern werden heute vielfach Dachprismen verwendet. Dachprismen haben gegenüber den traditionell verwendeten Porroprismen den Vorteil, daß sie schlanke, kompakte Bauweisen erlauben. Ferngläser dieser Art sind deshalb im allgemeinen leichter und handlicher als ihre mit Porroprismen ausgestatteten Vorgänger.

Wie steht es jedoch mit der Abbildungsqualität? Gibt es grundsätzliche Bildunterschiede zwischen Dach- und Porrosystemen?

Vom Standpunkt der Strahlenoptik aus gesehen lautet die Antwort eindeutig „nein“. Und doch hat das Licht – zum Ärger des Optikkonstruktors – eine Besonderheit zu bieten: es besitzt Wellencharakter, der bei der Totalreflexion voll zur Geltung kommt.

Beim Dachprisma wirken die durch die Dachkante getrennten Pupillenhälften unterschiedlich auf die Lichtwelle. Dadurch wird die Abbildungsqualität verschlechtert. Werden auf die Dachflächen spezielle Schichten – im Hause Carl Zeiss P-Belag genannt – aufgedampft, so ist auch beim Dachprisma die Lichtwelle über die Pupille hinweg gleichmäßig. Gegenüber einem Porrosystem besteht dann kein qualitativer Unterschied.

Im folgenden sind einige Ursachen, die zur Bildverschlechterung führen, genannt. Die Wirkungsweise von Dachprismen und deren wellenoptische Effekte werden erklärt. Die Bildverbesserung durch den P-Belag wird anhand von Beispielen demonstriert.

2. Einflüsse auf die Abbildungsqualität

Bei der optischen Abbildung kommt es bekanntlich darauf an, daß die von einem Objektpunkt ausgehenden Strahlen vom optischen Instrument so umgelenkt werden, daß sie möglichst gut wieder zu einem Bildpunkt vereinigt werden.

Leider bringt uns die Realität in Form der Brechungsgesetze in arge Schwierigkeiten, wenn es darum geht, ausgedehnte Objekte mit einer einzelnen Linse exakt scharf abzubilden. Die auftretenden Abbildungsfehler bewirken eine mehr oder weniger unvollkommene Strahlenvereinigung. Lichtpunkte werden dadurch nicht mehr als Punkte, sondern als kleine „Lichtscheibchen“ abgebildet (Abb. 1).

Wenn sich die Lichtscheibchen von zwei eng benachbarten Objektpunkten zu sehr überlappen, können sie nicht mehr als getrennt wahrgenommen werden. Feine Objektstrukturen gehen dadurch verloren; man sagt, die Auflösung wird geringer.

Um die Abbildungsfehler zu beseitigen bzw. soweit herabzusetzen, daß die verbleibende Bildverschlechterung vom Auge nicht mehr wahrgenommen wird, müssen optische Systeme aus mehreren Linsen zusammengesetzt werden.

Grundvoraussetzungen für ein Fernglas hoher Bildqualität sind deshalb mehrlinsige Objektive und Okulare. Dabei ist nicht die Anzahl der Linsen allein entscheidend, sondern ihr bildfehlerkorrigierendes Zusammenwirken.

Über die mit rein geometrischer Strahlenoptik berechenbaren Abbildungsfehler hinaus gibt es Effekte, die nur durch den Wellencharakter des Lichts zu erklären sind.

Bildet man mit einem bildfehlerfreien optischen System einen Stern ab, so erhält man ein von konzentrischen Ringen

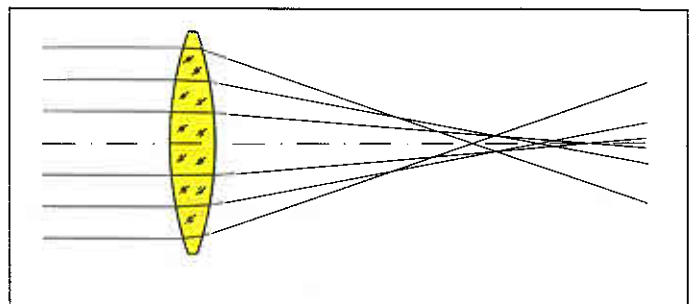


Abb. 1 Beispiel für Abbildungsfehler: Öffnungsfehler an der Einzellinse

abnehmender Helligkeit umgebenes Lichtscheibchen (Abb. 2), dessen Durchmesser größer ist, als er nach den geometrischen Abbildungsgesetzen sein müßte. Ändert man den freien Durchmesser (die Pupille) des Abbildungssystems, so ändert sich auch der Durchmesser des Lichtflecks und der Ringe. Dieser Effekt ist durch die Beugung der Lichtwelle an der begrenzenden Öffnung, der Pupille, zu erklären. Ähnlich wie die Wellen auf einer Wasseroberfläche an den Kanten eines Hindernisses umgelenkt (abgelenkt) werden, so werden auch Lichtwellen an Berandungen von ihrer ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt. Je größer dabei die begrenzende Öffnung ist, desto kleiner sind die Beugungserscheinungen im Bild.

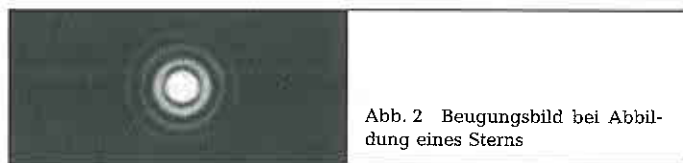


Abb. 2 Beugungsbild bei Abbildung eines Sterns

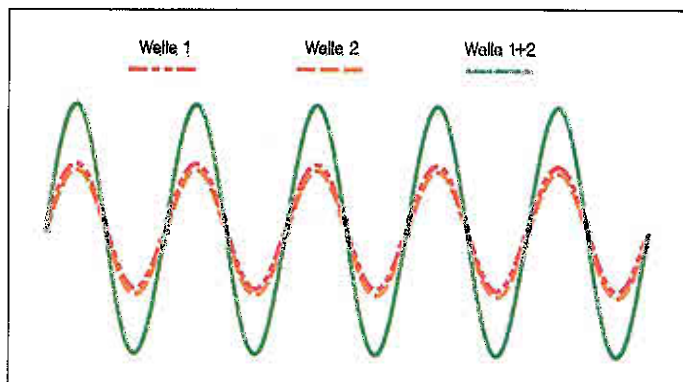


Abb. 3a Lichtverstärkung durch Interferenz

Nun kann man, aus verständlichen Gründen, die Öffnungen von optischen Geräten nicht beliebig groß machen. Dies ist auch nicht nötig, denn das Auge selbst hat ja eine Auflösungsgrenze, bedingt unter anderem durch die Netzhautstruktur, den Pupillendurchmesser und die Abbildungsfehler der Optik des Auges. Diese Auflösungsgrenze beträgt, von individuellen Schwankungen abgesehen, eine Winkelminute. Dazu muß die Augenpupille mindestens 2 mm weit geöffnet sein, da sonst die größer werdenden Beugungserscheinungen die Auflösung herabsetzen.

Beim Dämmerungs- und Nachtsehen öffnet sich die Augenpupille bekanntlich auf 6 bis 8 mm, dennoch erreicht man keine gesteigerte Auflösung, denn erstens schaltet das Auge von „Zapfen-“ auf „Stäbchensehen“ um, und zweitens werden die geometrischen Abbildungsfehler der Augenlinse bei geöffneter Pupille größer.

Für Ferngläser wäre demnach zu fordern, daß ihre Austrittspupillen einen Mindestdurchmesser von 2 mm aufweisen, anderenfalls würde die theoretische Fernglasaufklärung die des Auges unterschreiten.

Wir hatten zuvor festgestellt, daß zu der perfekten Abbildung eines Punktes die Zusammenführung der Strahlen in einen gemeinsamen Bildpunkt gehört. Betrachten wir die Lichtausbreitung als Wellenbewegung und ordnen den Strahlen einzelne Wellenzüge zu, so können wir die entstehende Helligkeit im Bildpunkt als Überlagerung aller aufeinander-treffenden Wellenzüge ansehen.

Überlagern sich zwei Wellenzüge derart, daß ihre Wellenberge aufeinanderfallen, so erhöht sich die resultierende Amplitude – das Licht wird verstärkt (Abb. 3 a). Treffen jedoch die Wellenberge mit den Wellentälern zusammen, so heben sich die Amplituden auf – es entsteht Dunkelheit (Abb. 3 b). Diese gegenseitige Beeinflussung wird Interferenz genannt.

Wir ersehen daraus, daß es bei der Strahlenvereinigung darauf ankommt, daß die Wellenberge der Lichtwellen im Bildpunkt gleichzeitig eintreffen. Nur dann ergibt sich maximale Helligkeit. Der Fachmann spricht vom „phasengleichen“ im Gegensatz zum „phasenverschobenen“ Eintreffen der Lichtwellen.

Fassen wir zusammen: Die Bildqualität von optischen Instrumenten wird herabgesetzt durch

- eine unvollkommene geometrische Strahlenvereinigung,
- die Beugung der Lichtwellen an der begrenzenden Öffnung,
- phasenverschobenes Eintreffen von Lichtwellen im Bildpunkt.

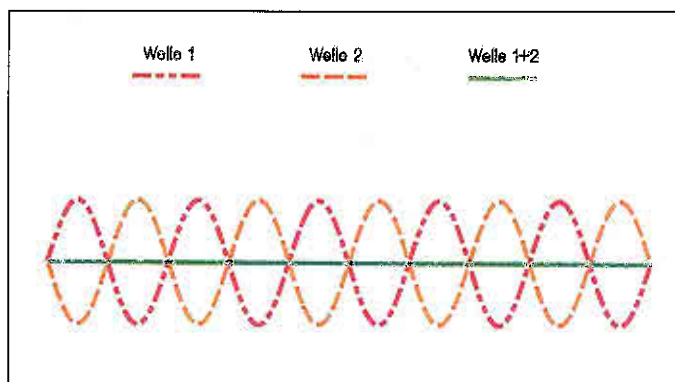


Abb. 3b Lichtauslöschung durch Interferenz

Im nächsten Abschnitt wollen wir uns mit den Dachprismen und ihrem Einfluß auf die Bildqualität beschäftigen.

3. Abbildungseigenschaften von Dachprismen

Die Mannigfaltigkeit der Bauformen von Dachprismen zur Bildumkehr ist groß. Praktisch durchgesetzt haben sich die Geradsichtprismen, bei denen ein achsparalleler Strahl keine winkelmäßige Ablenkung erfährt und nur wenig oder gar nicht seitlich versetzt wird.

Abb. 4 zeigt beispielhaft zwei Typen von geradsichtigen Dachprismensystemen, die aus zwei Einzelprismen bestehen: Das System nach Abbe-König und jenes nach Pechan.

Ersteres bewirkt vier Reflexionen durch Totalreflexion. Dies ist gleichzeitig die geringstmögliche Anzahl von Reflexionen, denn mindestens zwei werden zur Seitenvertauschung, zwei weitere zur Höhenvertauschung benötigt.

Das Pechan-System bewirkt mit seinen sechs Reflexionen eine größere Strahlenaufwicklung und erlaubt dadurch besonders kompakte Bauformen.

Die hier genannten Dachprismensysteme wirken strahlenoptisch wie eine dicke Planplatte, die senkrecht zur optischen Achse des Fernglases steht. Die Dachkante muß besonders scharf ausgebildet sein, wenn sie unsichtbar bleiben soll, und der Dachwinkel von 90° muß auf wenige Bogensekunden genau gefertigt sein, damit keine Doppelbilder entstehen.

Ein ungenau gefertigtes Prisma führt in jedem Fall zu einer unvollkommenen geometrischen Strahlenvereinigung – die Abbildungsqualität wird herabgesetzt.

Nun zum Verhalten der Lichtwellen am Dachprisma, wobei wir davon ausgehen, daß das Prisma geometrisch perfekt gefertigt und einwandfreies Glasmaterial verwendet wurde.

Die internen Strahlenumlenkungen der hier genannten Dachprismen basieren auf Totalreflexion an den Glas-Luft-Grenzflächen (Ausnahme: verspiegelte Fläche am Pechan-Prisma). Bei der Totalreflexion geschieht mit dem Licht etwas Unerwartetes: Die Lichtwellen, die parallel zur Einfallsebene schwingen, sind gegenüber den senkrecht zur Einfallsebene

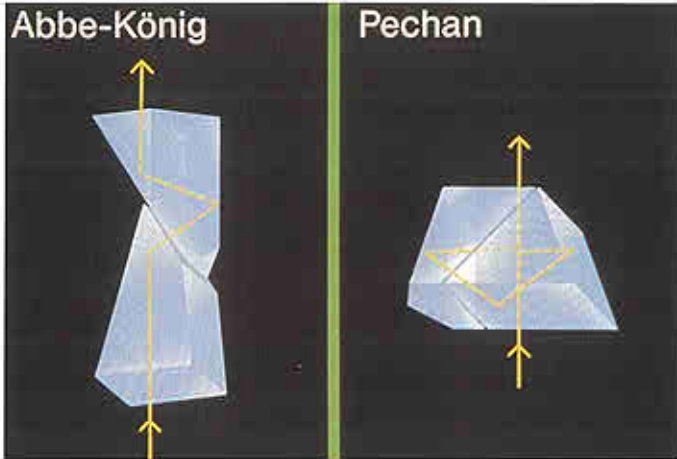


Abb. 4a Dachprisma nach Abbe-König Abb. 4b Dachprisma nach Pechan

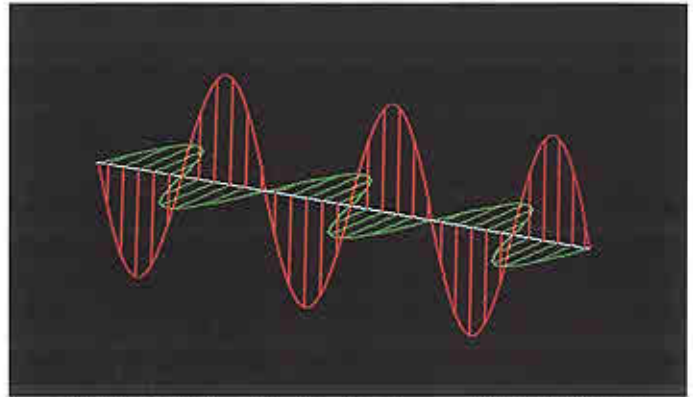


Abb. 5a Parallel und senkrecht schwingende Lichtwelle vor der Totalreflexion

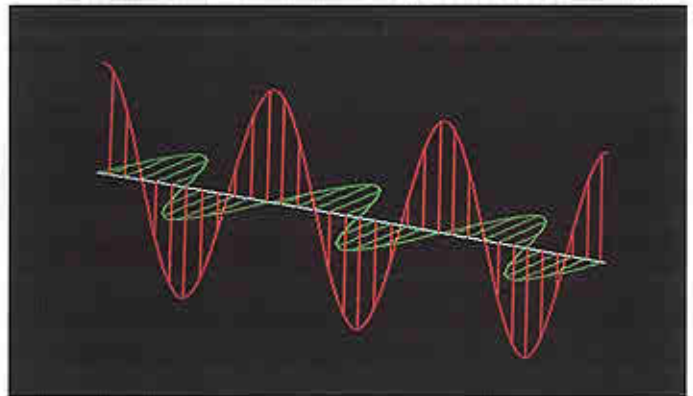


Abb. 5b Parallel und senkrecht schwingende Lichtwelle nach der Totalreflexion



Abb. 6a Lichtverteilung im Bild eines leuchtenden Punktes bei Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge zwischen den Pupillenhälften

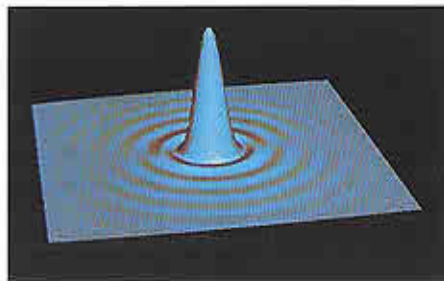


Abb. 6b Lichtverteilung im Bild eines leuchtenden Punktes ohne Phasenverschiebung zwischen den Pupillenhälften

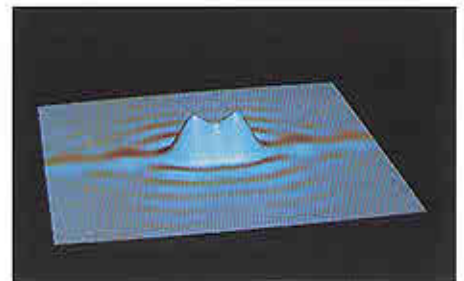


Abb. 6c Aus 6a und 6b gemischte Lichtverteilung, wie sie beim Dachprisma auftritt

schwingenden phasenverzögert (Abb. 5). Der Fachmann spricht von „elliptisch polarisiertem“ Licht, das durch die Totalreflexion entsteht.

Beim Dachprisma wird das einfallende Strahlenbündel in zwei Hälften geteilt. Beide Hälften unterscheiden sich durch die Reihenfolge, in der sie die Dachflächen passieren, aber auch in der Art ihrer erworbenen Phasenverschiebung. Etwa 70% der Lichtwellen einer Hälfte sind gegenüber denen der anderen Hälfte um eine halbe Wellenlänge phasenverschoben.

Da bei der Beobachtung durch das Auge beide Teilbündel wieder zusammengesetzt werden, tritt durch Interferenz eine weitgehende Auslöschung im geometrischen Bildpunkt auf. Das Licht verschwindet jedoch nicht einfach, sondern findet sich seitlich vom geometrischen Bildpunkt wieder. Abb. 6 a zeigt die Lichtverteilung im Bild eines leuchtenden Punktes, wenn Phasenverschiebungen von einer halben Wellenlänge zwischen den Teilbündeln vorliegen.

Abb. 6 b zeigt den Fall für Phasengleichheit der Teilbündel.



Abb. 7 Sternaufnahme durch ein Fernglas mit Dachprisma

Die im Normalfall entstehende Lichtverteilung ist etwa ein 7:3-Gemisch aus beiden Spezialfällen. Sie ist in Abb. 6 c angegeben und entspricht der in Abb. 7 gezeigten Aufnahme eines Sterns durch ein Fernglas mit Dachprisma.

Wie wirkt sich dieser wellenoptische Dachprismeneffekt bei der Betrachtung von natürlichen Objekten aus?

Zunächst einmal kann man sich jedes Objekt aus vielen winzigen mehr oder weniger leuchtenden Pünktchen zusammengesetzt vorstellen. Jedes Pünktchen erfährt eine „Verschmierung“ in der oben angegebenen Weise. Bei sehr hellen Punkten in dunkler Nachbarschaft zeigt sich eine Art „Strahl“ in der Richtung senkrecht zur Dachkante. Diese Überstrahlung führt zur Kontrastminderung in der Umgebung.

Die Auflösung des Fernglases ist für horizontal und vertikal laufende Strukturen unterschiedlich. Am Beispiel eines sogenannten „Siemenssterns“ ist dies besonders ersichtlich (Abb. 8 a). Dabei sind die Speichen in vertikaler Richtung an jeder Stelle aufgelöst. Die Speichen in horizontaler Richtung (parallel zur Dachkante) werden nach innen zu immer unschärfer, bis der Kontrast ganz verschwunden ist. Noch weiter einwärts werden plötzlich dunkle Streifen hell und helle Streifen dunkel wiedergegeben. In diesem Fall spricht der Fachmann man von einer Pseudoauflösung, das Bild entspricht nicht mehr dem Objekt.

Die Zone der starken Verunschärfung kann entweder durch

beseitigt alle wellenoptisch bedingten Nachteile, die ein Dachprisma von Haus aus mit sich bringt. Die Auflösungen senkrecht und parallel zur Dachkante sind gleich. Bereiche der Pseudoauflösung werden vermieden (Abb. 9).

Die Lichtverteilung im Bild eines leuchtenden Punktes entspricht der Abb. 6 b. Die „Strahleneffekte“ bei der Betrachtung von hell leuchtenden punktförmigen Objekten treten nicht mehr auf. Das Bild erscheint dem geübten Beobachter auf Anhieb schärfer und kontrastreicher, insbesondere wenn kontrastreiche Objekte betrachtet werden. Längere Beobachtungen können ermüdungsfreier durchgeführt werden, da nicht strukturabhängig akkommodiert werden muß.

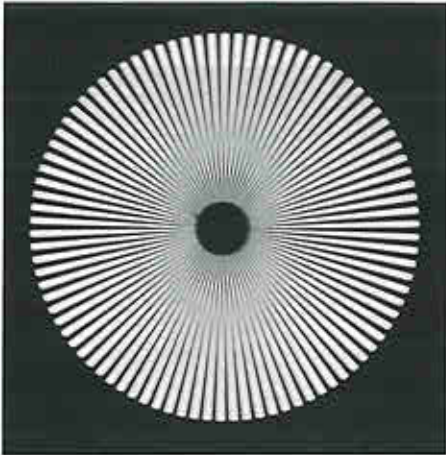


Abb. 8a Aufnahme eines Siemenssterns durch ein Fernglas mit Dachprisma bei Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge zwischen den Pupillenhälften

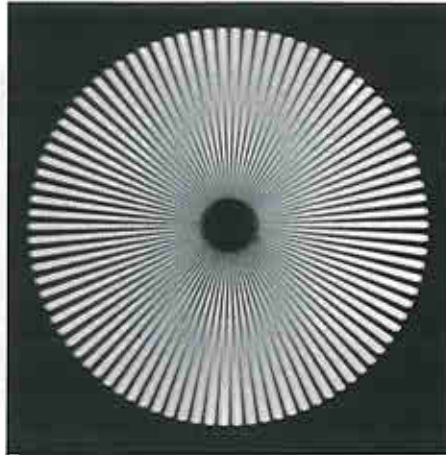


Abb. 8b Aufnahme eines Siemenssterns durch ein um 0,5 dpt defokussiertes Fernglas mit Dachprisma bei Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge zwischen den Pupillenhälften

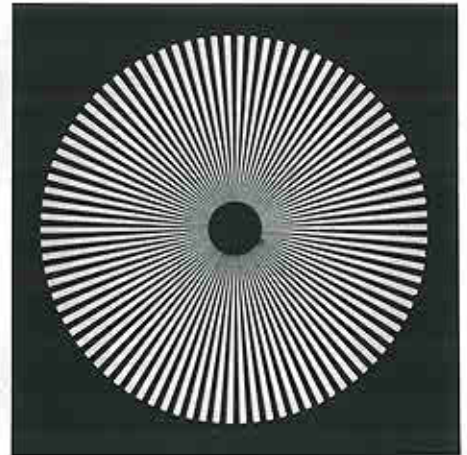


Abb. 9 Aufnahme eines Siemenssterns durch ein Fernglas mit phasenkorrigiertem Dachprisma

Änderung der Dioptrieneinstellung oder durch Akkommodation des Beobachterauges in gewissen Grenzen nach außen verlegt werden, jedoch geht das auf Kosten der weiter außen gelegenen Bereiche. Abb. 8 b gibt ein Beispiel für eine Defokussierung um 0,5 dpt.

Ein geübter Beobachter wird bei der Betrachtung bestimmter Feinheiten die Zone des verschwindenden Kontrastes durch Akkommodation verlagern. Er ist demnach ständig bemüht, einen dem jeweiligen Objekt angepaßten Kompromiß zu finden. Eine längere Beobachtungsdauer wirkt ermüdend, und die Konzentration auf das Objekt läßt nach.

Bei Ferngläsern mit großen Austrittspupillen gelingt es gelegentlich, sich an dem bildverschlechternden Phaseneffekt vorbeizumogeln. Bei guter Beleuchtung kann der Beobachter seine nunmehr kleine Augenpupille exzentrisch zur Fernglaspupille, also in eine Pupillenhälfte legen. Somit bemerkt er nichts von dem kontrastverschlechternden Einfluß der anderen Pupillenhälfte. Allerdings ist ein Fernglas für eine derartige Benutzung nicht ausgelegt, geschweige denn optimiert.

4. Wirkung des P-Belags

Bei Carl Zeiss werden Dachflächen von Umkehrsystemen mit Mehrfachbeschichtungen versehen, um die Phasenverschiebungen der beiden Teilbündel zu vermeiden. Das Beschichtungsverfahren ist dem der Entspiegelungsschichten sehr ähnlich. Wegen ihrer phasenkorrigierenden Wirkung wird die Beschichtung kurz „P-Belag“ genannt. Der P-Belag

5. Wie sind Ferngläser mit P-Belag von anderen zu unterscheiden?

Eine vergleichende Testtafelbeobachtung mit beschichteten und unbeschichteten Referenz-Ferngläsern würde zwar die Zweifel beseitigen, ist aber für den Augenoptiker, der sich keine Referenzgläser in die Schublade legen will, keine praktikable Lösung.

Mit Hilfe von zwei Polarisationsfiltern und ein wenig Übung läßt sich der Test auf folgende Weise durchführen:

Zwei Polarisatoren, deren Achsen (Durchlaßrichtung, Sperrichtung) deutlich gekennzeichnet sind, ordnet man in einem genügend großen Abstand zueinander an, damit noch ein Fernglas dazwischenpaßt. Als Testlicht eignet sich grün gefiltertes Lampen- oder Tageslicht. In gekreuzter Stellung lassen die Polarisatoren kein Testlicht, in paralleler Stellung den größten Teil des Testlichts durch.

Bringt man ein Fernglas mit der Dachkante parallel zu einer der Polarisationsachsen in den Strahlengang, so kann man unterscheiden:

- **Fernglas ohne P-Belag:** Die Fernglaspupille erscheint zwischen gekreuzten Polarisatoren heller als zwischen parallelen Polarisatoren (Abb. 10 a, 10 b).

- **Fernglas mit P-Belag:** Die Fernglaspupille erscheint zwischen gekreuzten Polarisatoren dunkler als zwischen parallelen Polarisatoren (Abb. 10 c, 10 d).

Wichtig ist – dies sei noch einmal ausdrücklich betont –, daß eine Polarisationsachse und die Dachkante parallel ausgerichtet sind, da sonst keine eindeutige Aussage gemacht werden kann.



Abb. 10a Fernglas ohne P-Belag zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren mit der Dachkante parallel zur Polarisatorachse



Abb. 10b Fernglas ohne P-Belag zwischen zwei parallelen Polarisatoren mit der Dachkante parallel zur Polarisatorachse



Abb. 10c Fernglas mit P-Belag zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren mit der Dachkante parallel zur Polarisatorachse



Abb. 10d Fernglas mit P-Belag zwischen zwei parallelen Polarisatoren mit der Dachkante parallel zur Polarisatorachse

6. Zusammenfassung

Die Dachprismen der Ferngläser von Carl Zeiss sind mit einer Mehrfachbeschichtung – dem sogenannten P-Belag – versehen. Der P-Belag korrigiert die wellenoptischen Effekte der Phasenverschiebung zwischen den beiden durch die Dachkante getrennten Lichtbündelhälften. Dadurch wird die Auflösung gesteigert und der Kontrast bei feinen Strukturen

verbessert. Längere Beobachtungen können ermüdungsfreier durchgeführt werden.

Anschrift der Autoren:

Adolf Weyrauch/, Dr. Bernd Dörband,
Postfach 1865, 7080 Aalen.