

Einfluss spiegelnder Planflächen auf die Abbildungsleistung optischer Systeme

Eckhard Langenbach, Carsten Rosenblad

FISBA AG, St. Gallen

<mailto:eckhard.langenbach@fisba.com>

Bei der Reflexion an Planflächen wird die Phase der reflektierten Welle geändert, wobei die Phasenänderung vom Einfallswinkel, der Polarisierung und von der Wellenlänge abhängen kann. Der z. T. erhebliche Einfluss auf die Abbildungsleistung wird häufig bei der Optikrechnung und bei der Systemprüfung vernachlässigt. Beispiele solcher Bildfehler und ihrer Korrektur werden vorgestellt.

1 Einleitung

Spiegelungen an planen Flächen werden häufig benutzt, um Strahlengänge zu falten oder um mit Strahlteilern Strahlbündel zu trennen oder zusammenzuführen. Die Spiegelungen lassen die Abstände und Winkel zwischen den Strahlen unverändert, und sie haben in der geometrischen Optik keinen Einfluss auf die Abbildungsleistung. Deshalb werden bei der Berechnung und bei der Prüfung gefaltete und gestreckte optische Systeme oft als gleichwertig angesehen.

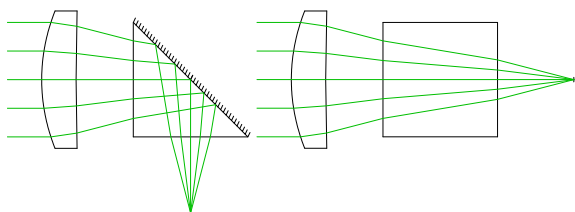


Abbildung 1 Gefalteter und gestreckter Strahlengang

Eine genauere, wellenoptische Betrachtung zeigt aber, dass bei der Reflexion Phasenänderungen auftreten, die von der Polarisationsrichtung, der Wellenlänge und dem Einfallswinkel abhängen. In den folgenden Abschnitten werden optische Komponenten vorgestellt, bei denen die Phasenänderung der an Planflächen reflektierten Lichtwellen zu einer Beeinträchtigung der Abbildungsleistung führen, und es werden Möglichkeiten vorgestellt, wie dies vermieden werden kann.

2 Beispiele

2.1 Totalreflexion

Wegen des einfachen Aufbaus ohne Beschichtung und der spektral breitbandigen, verlustfreien Verwendbarkeit werden häufig totalreflektierende Prismen zur Strahlableitung verwendet. Bei der Reflexion entstehen aber winkel- und polarisationsabhängige Phasenänderungen, die sich mit den Fresnel-Formeln berechnen lassen. Für die Spiege-

lung an einer Grenzfläche zwischen Glas mit $n = 1.5168$ und Luft mit $n' = 1$ zeigt die Abbildung 2 diese Phasenfunktionen für parallel und senkrecht polarisiertes Licht. Bis zum Grenzwinkel 41.2° wird das Licht nur teilweise reflektiert. Beim Brewster-Winkel 33.4° gibt es für parallel polarisiertes Licht eine Richtungsänderung des elektrischen Feldes verbunden mit einem Nulldurchgang der Amplitude und einem Phasensprung von 180° . Ab 41.2° wird das Licht total reflektiert, wobei sich ab diesem Grenzwinkel bis zum streifenden Lichteinfall die Phase stetig um 180° ändert, was einer winkelabhängigen Wellenfrontdeformation von $\lambda/2$ entspricht. Da diese Phasenänderung für die beiden Polarisationsrichtungen unterschiedlich verläuft, ändert sich bei der Totalreflexion die Polarisation des reflektierten Lichts.

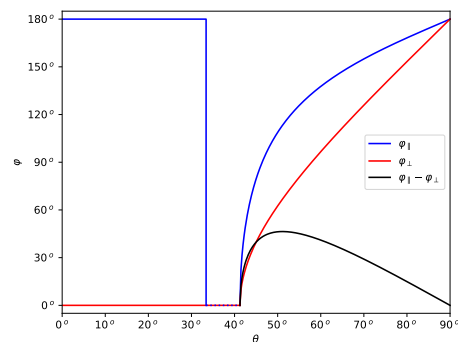


Abbildung 2 Winkel- und Polarisationsabhängigkeit der Phasenänderung bei der Totalreflexion

Bei Dachkantprismen wirkt sich dies besonders stark auf die Abbildungsleistung aus, weil Strahlen eines Strahlbündels, die in unterschiedlicher Reihenfolge auf die Spiegelflächen treffen, verschieden polarisiert werden. Abbildung 3¹ zeigt die Polarisation eines Strahlbündels nach der Reflexion in einem Dachkantprisma und die Kontrastübertragungsfunktion MTF, die in der Richtung senkrecht zur Dachkante erheblich einbricht.

Vermeiden lässt sich dieser Bildgüteverlust, indem man die Spiegelflächen mit einer dielektrischen Be-

¹Quelle der Prismenzeichnung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Amici-Prisma>

schichtung versteht, die das Phasenverhalten einer idealen Metallschicht bewirkt. Die Reflexion bleibt verlustfrei, und das Ausgangsstrahlbündel ist einheitlich polarisiert. Die MTF wird dann bei der Reflexion nicht mehr reduziert. Solche Beschichtungen werden z. B. in den Umkehrsystemen hochwertiger Feldstecher seit mehreren Jahrzehnten eingesetzt.

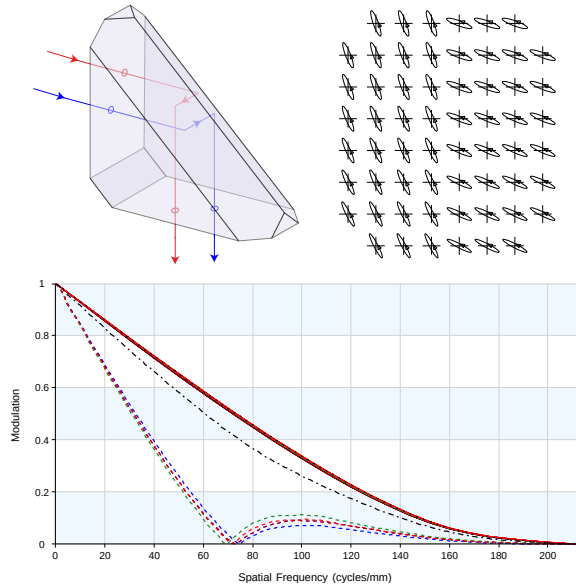


Abbildung 3 Polarisation nach der Reflexion in einem Dachkantprisma und zugehörige MTF

2.2 Interferometer-Strahlteiler

In der Abbildung 4 wird links der Referenz- und rechts der Messstrahlengang eines Twyman-Green-Interferometers dargestellt. Das Licht kommt von links, die Hälfte wird vom Strahlteiler transmittiert und vom Referenzspiegel rechts reflektiert und wird schließlich im Strahlteiler nach unten auf den Detektor gespiegelt. Der Messstrahl wird vom Strahlteiler nach oben zum Prüfling reflektiert und gelangt von dort ohne weitere Ablenkung im Strahlteiler zum Detektor. Beide Strahlen werden von der Teilerschicht einmal durchgelassen, aber sie werden von verschiedenen Seiten an der Teilerschicht reflektiert. Dabei kann die Polarisation der Strahlung unterschiedlich modifiziert werden, und auf dem unten liegenden Detektor werden dann verschieden polarisierte Mess- und Referenzstrahlen überlagert. Dadurch kann der Interferenzkontrast erheblich reduziert werden.

Dieser Kontrastverlust lässt sich vermeiden, wenn man für die Reflexionen von den beiden Seiten nur geringe Unterschiede der Phasendifferenzen von parallel und senkrecht polarisiertem Licht zulässt. Alternativ gibt man einen symmetrischen Aufbau der Teilerschicht vor, denn dann ist das Reflexionsverhalten beider Seiten identisch.

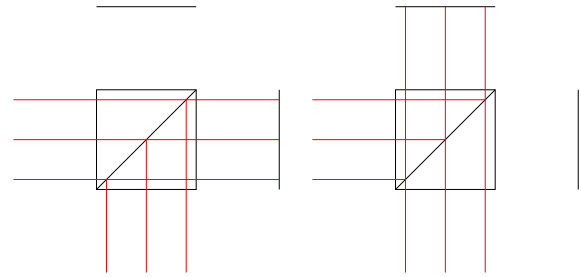


Abbildung 4 Strahlteiler eines Twyman-Green-Interferometers

2.3 Spektraler Strahlteiler

Oft werden breitbandig spiegelnde Strahlteiler so aufgebaut, dass verschiedene spektrale Teilbereiche von unterschiedlichen Teilpaketen des gesamten Schichtsystems reflektiert werden. Dadurch werden verschiedene Farben in unterschiedlicher räumlicher Tiefe im Schichtsystem reflektiert, und bei fokussierenden Systemen entsteht dadurch auch auf der optischen Achse ein Farbquerfehler, der in einer Richtung die MTF merklich absenkt. Abbildung 5 zeigt für eine solche Farbteilerschicht die Linienbildfunktion mit deutlichem Farbquerfehler und die zugehörige MTF. In Abbildung 6 werden die entsprechenden Grafiken einer verbesserten Farbteilerschicht gezeigt, bei der alle Farben ähnlich tief im Schichtsystem reflektiert werden.

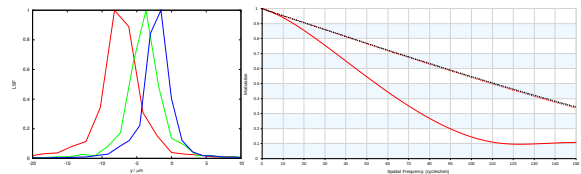


Abbildung 5 Linienbildfunktion und MTF für eine übliche Farbteilerschicht

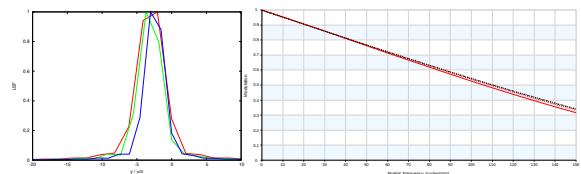


Abbildung 6 Linienbildfunktion und MTF für eine verbesserte Farbteilerschicht

3 Zusammenfassung

Für mehrere Beispiele ist der negative Einfluss von Spiegelungen an Planflächen auf die Abbildungsleistung optischer Systeme aufgezeigt worden. In allen vorgestellten Fällen lässt sich dies durch spezielle, phasenkorrigierende Beschichtungen vermeiden.