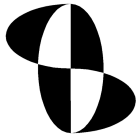


DISPENSE DI

PROGETTAZIONE OTTICA
PROGETTAZIONE DI STRUMENTI OTTICI

Cap.3 – PROGETTAZIONE OTTICA

Ing. Fabrizio Liberati



Cap. 3 PROGETTAZIONE OTTICA

3.1 Progettazione ottica

Scopo della progettazione ottica è quello di dimensionare il sistema ottico in base ai requisiti dell'apparato di cui fa parte, definendone la geometria e i materiali di cui sono costituite sia le parti ottiche che quelle meccaniche, le posizioni relative, le tolleranze, le modalità di assemblaggio e di collaudo, le attrezzature, tenendo conto delle tecnologie e dei costi di realizzazione in funzione delle quantità da produrre e da chi le produce. Come si vede, non si tratta soltanto di limitare le aberrazioni, che anzi in qualche caso possono addirittura tornare utili.

Nella progettazione di un sistema ottico si possono riconoscere alcune fasi, che vediamo di seguito.

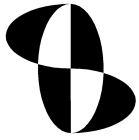
3.2 Fasi della progettazione ottica

Specificazione di un sistema ottico

Normalmente l'utilizzatore non è in grado di descrivere con sufficiente dettaglio i requisiti del sistema ottico di cui necessita, e spesso fa fatica a comprendere quali sono le indicazioni essenziali. Il progettista deve estrarre da solo la maggior parte di queste informazioni dopo aver ben compreso le esigenze del committente o le necessità dell'intero apparato.

Alcune di queste indicazioni sono:

- Tipo di applicazione
- Lunghezza focale
- Apertura o Luminosità o F#
- Dimensione dell'oggetto (o campo di vista)
- Dimensione dell'immagine (o ingrandimento)
- Distanza oggetto-immagine
- Risoluzione
- Distorsione ammissibile
- Banda spettrale di funzionamento
- Trasparenza ammissibile
- Dimensioni e massa del sistema ottico
- Disegni di interfacce meccaniche alle quali vincolarsi
- Ingombri e spazi da lasciare liberi
- Vincoli meccanici
- Ambiente di utilizzo (temperatura, pressione, umidità, esposizione al sole o a fonti di calore, gradienti termici, presenza di radiazioni di entità notevole)
- Prove ambientali da superare (vibrazioni, urti, sabbia, ambienti acidi o altro)
- Utente finale
- Sicurezza di uso
- Quantità
- Normativa
- Costo



Scelta dello schema

In base ai requisiti e grazie all'esperienza del progettista, viene scelto lo schema ottico iniziale che dovrebbe soddisfare le esigenze. In qualche caso si può decidere direttamente di utilizzare un obiettivo commerciale, ma il più delle volte, proprio per via delle peculiarità dei requisiti, che come si è visto coprono moltissimi aspetti, occorre progettarne uno apposito.

Il progettista conosce quali sono i vantaggi e i limiti degli schemi classici; nel prossimo paragrafo vedremo i sistemi ottici più noti ed i loro campi di utilizzabilità.

Adattamento ed ottimizzazione del sistema ottico

Una volta scelto lo schema ottico di partenza, occorre adattarlo ai requisiti specifici. Per fare questo, si fa ricorso ad appositi *programmi di calcolo*.

Il programma di calcolo tratta il sistema ottico come una serie di superfici: ogni superficie, normalmente sferica, separa due mezzi a diverso indice di rifrazione, ha la sua curvatura e dista dalla successiva un certo spazio. In questo modo il programma può effettuare tracciamenti di raggi, reali o parassiali, calcolare distanze focali, coefficienti aberrazionali ed effettuare altre utili operazioni. Il tracciamento di un raggio attraverso un sistema ottico è un'operazione reiterata che consiste nel calcolo dell'angolo di incidenza e dell'angolo di rifrazione su una data superficie (*rifrazione*) e nel trasferimento alla superficie successiva (*trasferimento*). Nel caso in cui nel sistema ottico siano presenti degli specchi, la rifrazione è sostituita dalla riflessione.

Una sequenza tipica delle operazioni che portano dallo schema iniziale a quello definitivo è la seguente: si effettua una scalatura al valore necessario per la focale; poi si cambiano l'apertura ed il campo di vista; infine si esegue l'*ottimizzazione*.

L'ottimizzazione del sistema ottico è la modifica dei parametri costruttivi atta a ottenere il massimo delle prestazioni per una certa applicazione. Per ottimizzare un sistema ottico occorre comunicare al programma di calcolo che cosa si può cambiare e che cosa si vuole ottenere: da una parte si definiscono le *variabili* (curvature, separazioni, spessori, indici di rifrazione, dispersioni o altro), dall'altra si costruisce la *funzione di merito*, che, assegnando un peso a ciascun difetto ritenuto significativo ai fini della riuscita del sistema ottico (aberrazione, scostamento dai valori parassiali desiderati, ingombro o altro), attribuisce ad ogni configurazione un punteggio; ogni modifica dei valori dalle variabili che riduce il valore totale della funzione di merito viene applicato in maniera reiterata, facendo crescere le prestazioni del sistema.

Una volta ottimizzato, occorre analizzare se il sistema ottico è in grado di garantire un comportamento adeguato alle applicazioni, riferendosi non soltanto alle prestazioni nominali del sistema ottico, ma soprattutto sia a quelle nelle condizioni ambientali richieste, sia alle criticità di costruzione, ossia alle tolleranze.

Analisi del sistema ottico

Il primo passo dell'analisi consiste nel verificare le prestazioni del sistema da un punto di vista prettamente ottico. Dato per scontato che i parametri parassiali derivanti dal progetto siano quelli corretti (ingrandimento, distanza focale, eccetera),

occorre controllare la risoluzione, la posizione dell'immagine, la distorsione o altre caratteristiche. I moderni programmi di progettazione ottica sono in grado di effettuare queste operazioni in tempo reale, potendo calcolare rapidamente un numero enorme di rifrazioni e trasferimenti.

Gli strumenti di analisi più comuni messi a disposizione del progettista dai programmi di calcolo ottico sono lo *spot diagram*, la *distribuzione di energia radiale*, l'*analisi dei raggi*, l'*OTF* e l'*MTF geometrica e diffrazionale*.

Lo spot diagram è la macchia causata dall'intersezione sul piano focale di un elevato numero di raggi incidenti sulla pupilla di ingresso al sistema ottico ed è perciò una misura delle aberrazioni trasversali. Questo contiene le informazioni per valutare la risoluzione del sistema ottico, analogamente a quanto detto a proposito del criterio di Rayleigh.

La distribuzione di energia radiale (*radial energy distribution*) è la misura della percentuale di energia contenuta entro un cerchio di dato raggio sul piano focale di un sistema ottico rispetto a quella che è passata attraverso la pupilla di ingresso. In figura 3.1 sono mostrati esempi di entrambi questi tipi di analisi.

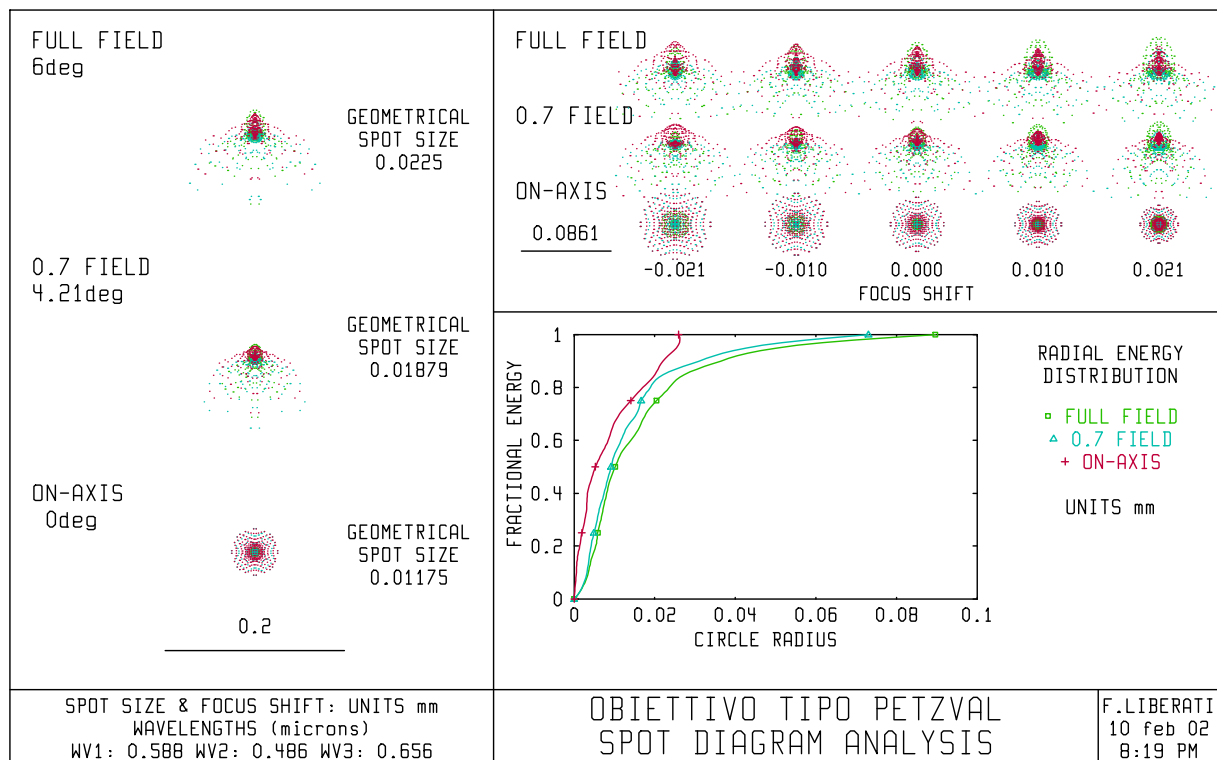


figura 3.1

L'analisi dei raggi (*ray intercept curve*) misura sul piano focale la distanza del punto di intersezione di ogni raggio dal raggio principale in funzione dell'altezza di incidenza sulla pupilla di ingresso. Oltre a fornire una misura delle aberrazioni trasversali, l'analisi della ray intercept curve permette di capire quali sono le aberrazioni che limitano le prestazioni del sistema ottico: interpretando correttamente

tali curve è possibile apportare le modifiche necessarie alla correzione delle aberrazioni.

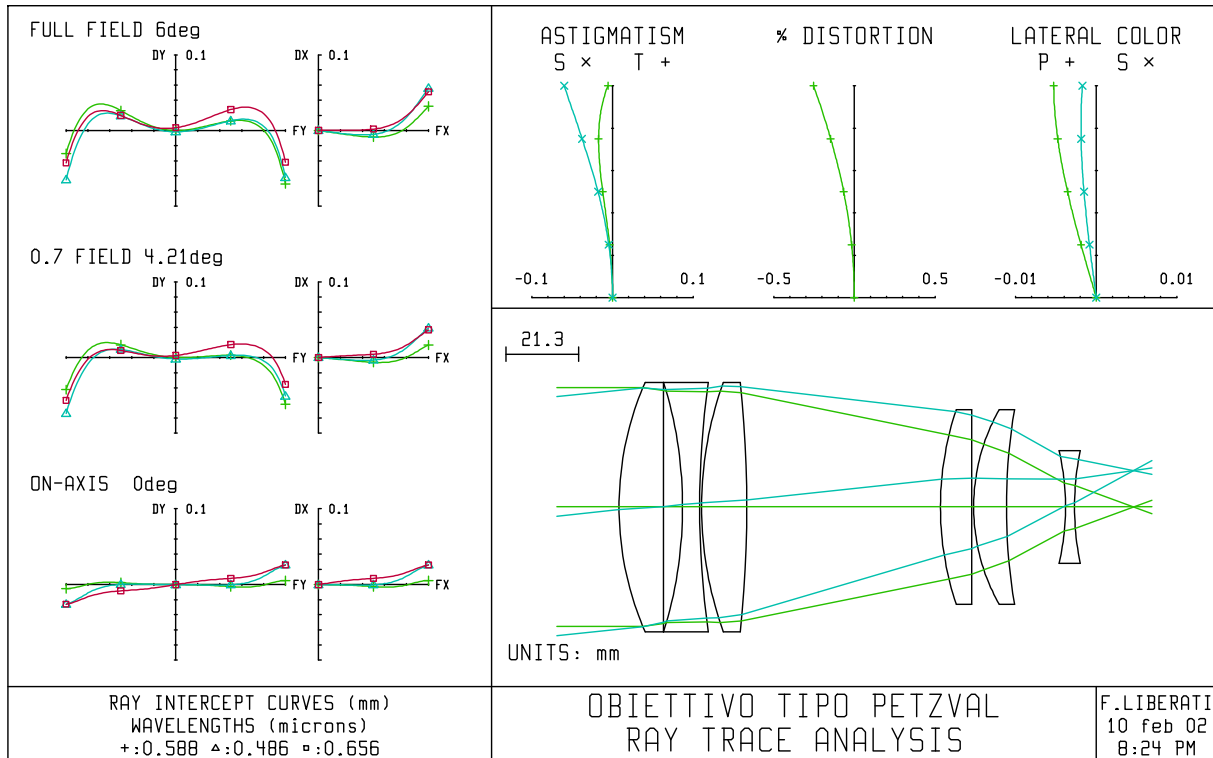


figura 3.2

La figura 3.2 mostra un esempio della ray intercept curve e riporta pure, in funzione del campo di vista, l'andamento della curvatura di campo tangenziale e sagittale e della distorsione.

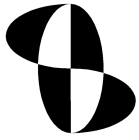
La figura 3.3 riporta gli andamenti tipici della ray intercept curve per sistemi ottici affetti da aberrazioni.

Anche l'OTF e l'MTF possono essere calcolate e visualizzate dai moderni programmi di progettazione ottica; la figura 3.4 ne mostra un esempio.

Oltre alle prestazioni ottiche inerenti la "qualità" dell'immagine, occorre considerare anche la *trasparenza*, che si può in qualche modo considerare intensità e quindi "quantità" dell'immagine. Il problema non si presenta di solito nel caso di sistemi ottici funzionanti nella banda visibile, ove i materiali disponibili sono molti, di caratteristiche ottiche spesso eccellenti e costi appropriati.

Nel caso di sistemi ottici funzionanti nell'ultravioletto o nell'infrarosso, la trasparenza può diventare un fattore pregiudicante ed il costo dei materiali e dei trattamenti superficiali un elemento da considerare con attenzione.

Se il risultato dell'analisi ottica non è positivo perché, ad esempio, la risoluzione non è sufficiente o per altri motivi, si può tornare ad ottimizzare ulteriormente o, dopo vari tentativi, a cambiare lo schema ottico di partenza.



OPTO SERVICE srl

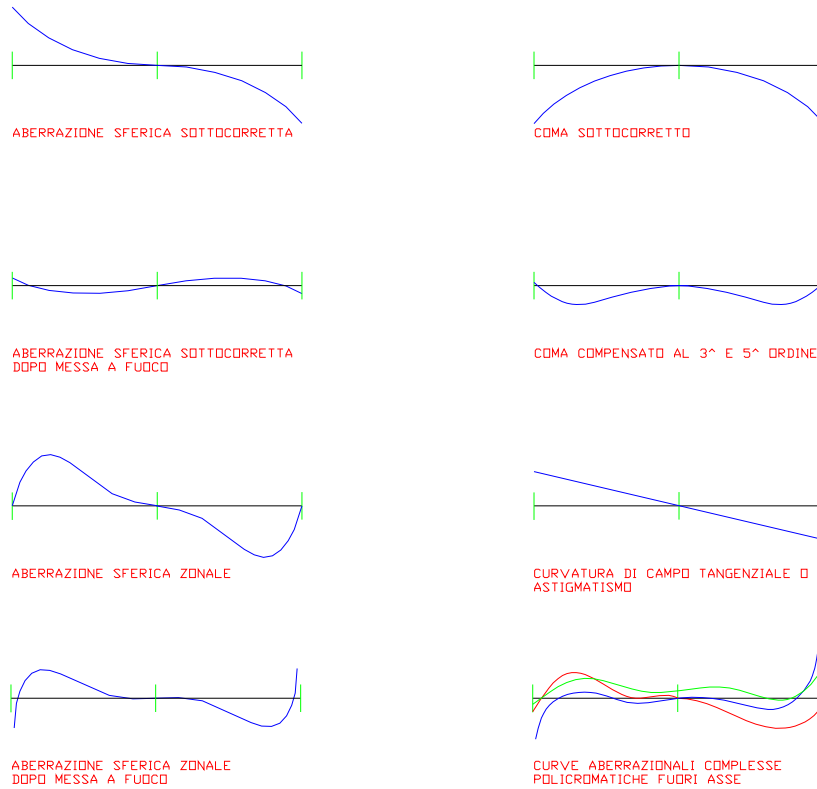


figura 3.3

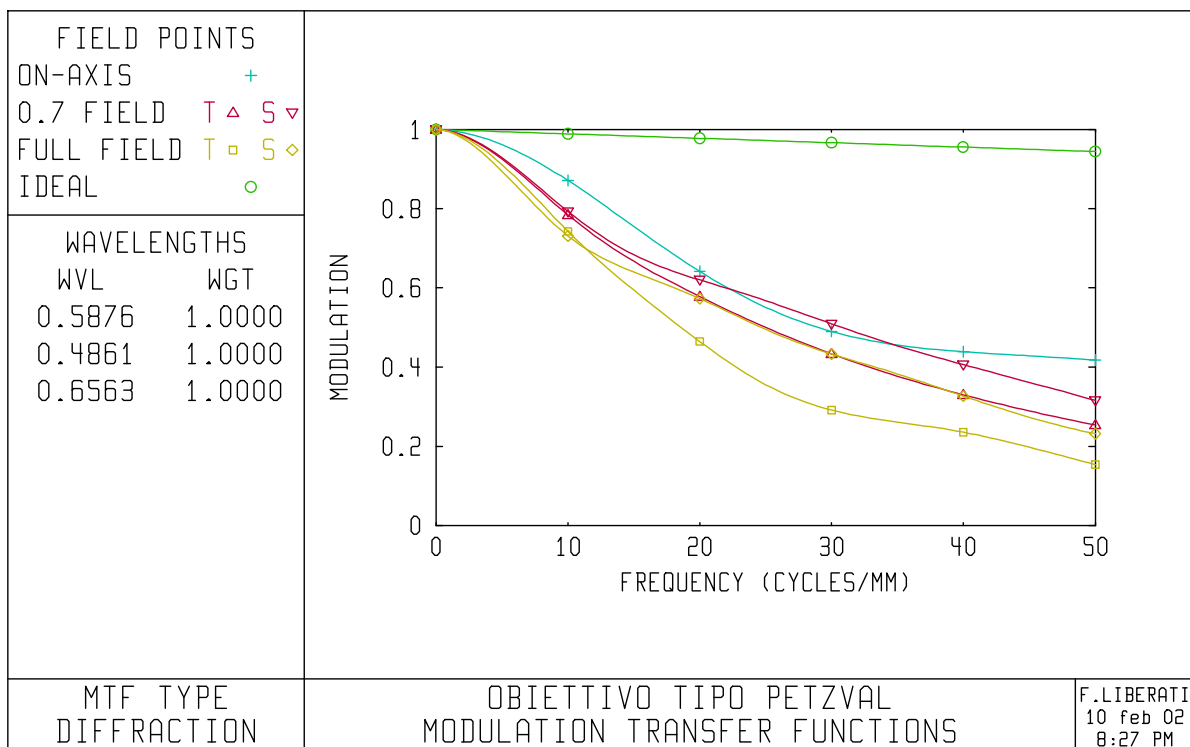
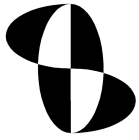


figura 3.4

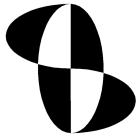


L'ultima generazione di programmi per ottica permette di praticare quella che viene chiamata *ottimizzazione globale*: mentre l'ottimizzazione descritta sopra consiste nel confrontare sulla base di funzioni di merito sistemi ottici ottenuti con modifiche relativamente piccole tra loro, l'ottimizzazione globale consente di cambiare in maniera automatica completamente schema alla ricerca del minimo assoluto della funzione di merito. Mi risulta che comunque la maggior parte dei progettisti rifiuti di utilizzare questo strumento, anche perché sottrae una delle fasi più creative della progettazione.

Una volta trovato un sistema che soddisfa i requisiti ottici, occorre verificarne il comportamento nell'ambiente in cui è destinato. Per alcuni ambienti sono previste normative specifiche (militari, spaziali, aeronautiche) con diversi livelli di severità. Alcune di queste comportano l'impossibilità di utilizzare alcuni materiali, e pertanto condizionano il progetto sin dall'inizio, mentre altre comportano degli accorgimenti che possono essere adottati nella fase di affinamento.

Una delle verifiche più importanti riguarda l'escursione termica cui il sistema può essere soggetto. In primo luogo deve essere salvaguardata l'integrità del sistema entro i limiti estremi dati dalla *temperatura di immagazzinamento* ed eventualmente resistere alla prova di *shock termico*. In secondo luogo ne deve essere garantita la corretta funzionalità nei limiti di *temperatura operativa*, che normalmente sono interni ai precedenti. Il superamento delle prove dipende da come è stato congegnato l'accoppiamento con la meccanica di supporto. La situazione migliore per garantire l'integrità del sistema ottico sarebbe quella di utilizzare materiali con coefficienti di dilatazione termica vicini a quelli del vetro, che varia tra 6 e $9 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. *Acciaio* e *titanio* vengono in qualche caso preferiti per questo motivo, ma più spesso si utilizzano *leghe di alluminio* per il minore peso e costo e la più facile lavorabilità. In ogni caso va verificata la *dilatazione* (o la *contrazione*) *termica differenziale* per evitare che il vetro subisca deformazioni o rottura, lasciando opportuni laschi tra i componenti ottici ed i sostegni meccanici. Questi potrebbero in qualche caso pregiudicare il corretto funzionamento del sistema ottico, e comunque condizionare il calcolo delle tolleranze. Per quanto riguarda invece la corretta funzionalità del sistema ottico entro i limiti di temperatura operativa, in qualche caso questa può comportare soltanto la correzione della messa a fuoco durante il funzionamento dello strumento (*shift termico*), senza peggioramento delle prestazioni. Contrariamente a quello che si potrebbe pensare, questo rimedio non sempre è consentito anche nei sistemi ottici dotati di regolazione di messa a fuoco, e non solo per gli eventuali limiti della corsa prevista, ma perché a volte il sistema ha un feedback sulla posizione dell'oggetto che risulterebbe alterato. Va sottolineato che il fatto di utilizzare per la struttura meccanica materiali con coefficiente di dilatazione termica prossima a quella del vetro non evita il problema dello shift termico in quanto il contributo principale allo spostamento dell'immagine è dovuto alle variazioni degli indici di rifrazioni con la temperatura e non alle dilatazioni termiche.

Uno dei rimedi più eleganti, economici ed efficaci per il recupero della corretta posizione del piano focale è la *compensazione passiva*. Questa consiste nell'utilizzare per il sostegno meccanico di un elemento ottico o di un gruppo un materiale con un coefficiente di dilatazione termica molto diverso dal resto della



struttura. Avendolo opportunamente dimensionato ed ancorato al resto della struttura, il componente si riposiziona automaticamente al variare della temperatura in modo da recuperare la messa a fuoco dell'intero sistema. La figura 3.5 riporta un esempio di compensazione passiva.

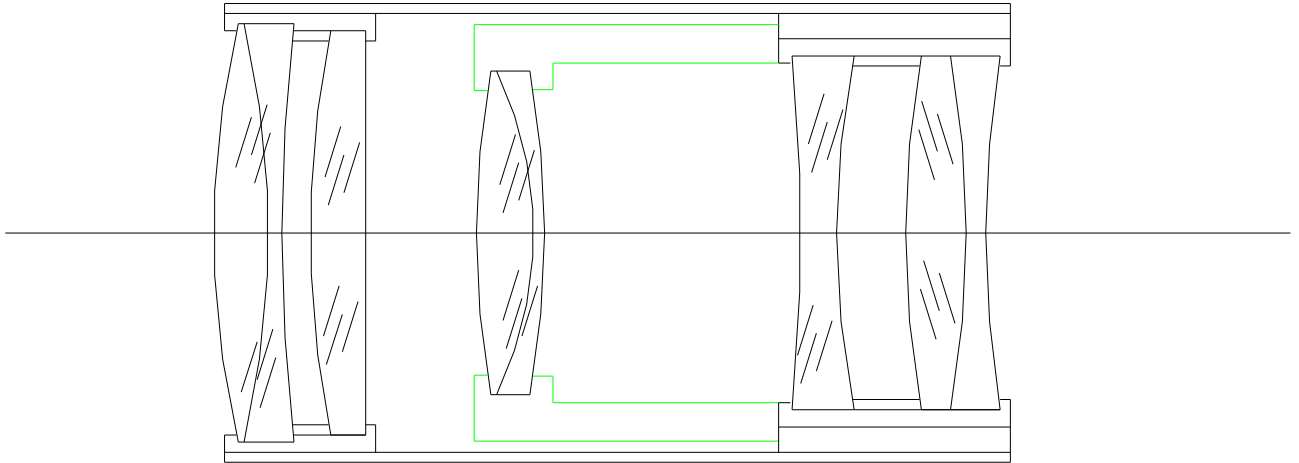


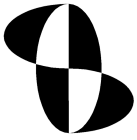
figura 3.5

Calcolo delle tolleranze

Per stabilire le tolleranze di un sistema ottico occorre valutare le prestazioni ottiche quando i parametri variano leggermente per necessità costruttive, simulando in tal modo il cambiamento delle caratteristiche dei componenti dovuto alle tolleranze.

Così come i componenti elettrici o meccanici, anche quelli ottici per poter essere realizzabili e a costi congrui hanno bisogno di tolleranze costruttive, possibilmente larghe. Le tolleranze possono riguardare parametri sotto il controllo dell'officina ottica, come le forme delle superfici o il centraggio delle lenti, gli angoli dei prismi o il parallelismo di lamine piane, o propri del materiale come indice di rifrazione e dispersione. Anche se le tolleranze dell'indice di rifrazione e della dispersione garantite dai principali produttori di vetro sono molto strette e quindi normalmente accettabili, in qualche caso gli scostamenti dai valori nominali potrebbero rivelarsi inammissibili e rendere il progetto inutilizzabile o costringere a verifiche e collaudi di tipo particolare o a regolazioni molto costose.

Ci sono diversi modi per stabilire le tolleranze di fabbricazione: metodi basati su approcci *statistici*, sulla combinazione di variazioni che provoca per le prestazioni il caso peggiore (*worst case*) o altri ancora; in ogni caso le tolleranze da stabilire riguardano anche i componenti meccanici che sostengono o separano quelli ottici. Gli approcci di tipo statistico sono più utilizzati quando l'obiettivo progettato è destinato ad essere prodotto in grande serie. Quello che occorre fare è stabilire per ogni parametro costruttivo che viene scritto sul disegno accanto al valore nominale



un valore di tolleranza, avendo in mente le possibilità offerte dalle tecnologie di lavorazione che, sebbene immutate da decenni e pressoché artigianali, nel caso dei componenti ottici danno risultati eccellenti.

Per stabilire le tolleranze, il progettista deve accettare un peggioramento delle prestazioni, di solito molto lieve, mettendo a disposizione un budget di errori da distribuire tra tutti i parametri costituenti il sistema ottico. Come regola generale, allo scopo di ridurre i costi e gli scarti, il progettista tenderà ad assegnare ai parametri più critici tolleranze più strette, mentre a quelli di più difficile realizzazione tolleranze più larghe. Per limitare gli effetti degli errori, può scegliere di imporre delle regolazioni o, più raramente, dei controlli intermedi durante la fase di assemblaggio. Una tipica regolazione quasi sempre prevista è la *messa a fuoco*: quasi tutte le tolleranze di costruzione comportano uno spostamento dell'immagine che, se l'effetto globale ricade nei limiti previsti, viene completamente compensata dalla messa a fuoco finale. Altre regolazioni possono essere gli *allineamenti intermedi* o il *centraggio* di lenti, singole o gruppi.

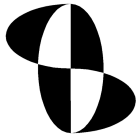
I programmi di calcolo anche in questo caso vengono in aiuto del progettista simulando l'effetto delle variazioni, ad esempio in termini di aumento della figura di merito, e delle regolazioni da emulare. In base alle proprie conoscenze sulle tecnologie di lavorazione ottica e meccanica, il progettista deve stabilire le regolazioni ed i limiti entro cui i diversi parametri possono variare senza provocare eccessivi aumenti dei costi di produzione. Per esperienza egli riesce a riconoscere i punti e gli elementi critici di un sistema ottico in base alla forma delle lenti, alla loro posizione o alla funzione che esse svolgono, e possibilmente evitarli già in fase di progetto. Nel caso di lenti di campo o vicine alla posizione dell'immagine, ad esempio, non potranno essere tollerati graffi, buchi inclusioni o altri difetti di tipo localizzato. Allo stesso modo occorre evitare l'utilizzo di vetri facilmente ossidabili o macchiabili, che dovrebbero essere usati solo nelle applicazioni in cui sono indispensabili e con particolari precauzioni, tipo quella di conservarle per poco tempo sotto vuoto o di depositare il coating immediatamente dopo la lavorazione.

3.3 Schemi ottici più noti

Le figure 3.6 e 3.7 riportano alcuni tra i più noti schemi ottici classici: i *rifrattivi* ed i *riflessivi*, cioè quelli che utilizzano almeno uno specchio dotato di potenza ottica.

In blu sono indicati i raggi marginali, in rosso il raggio principale per il campo di vista estremo ed in verde la dimensione dell'immagine.

In figura 3.8 sono riportati i campi di applicabilità dei diversi schemi. E' ovvio che questa figura non tiene conto di molte informazioni essenziali come la posizione, la focale, la distanza dell'oggetto, gli ingrandimenti: ad esempio gli obiettivi per microscopio non possono essere alternativi a quelli per astronomia!



OPTO SERVICE srl

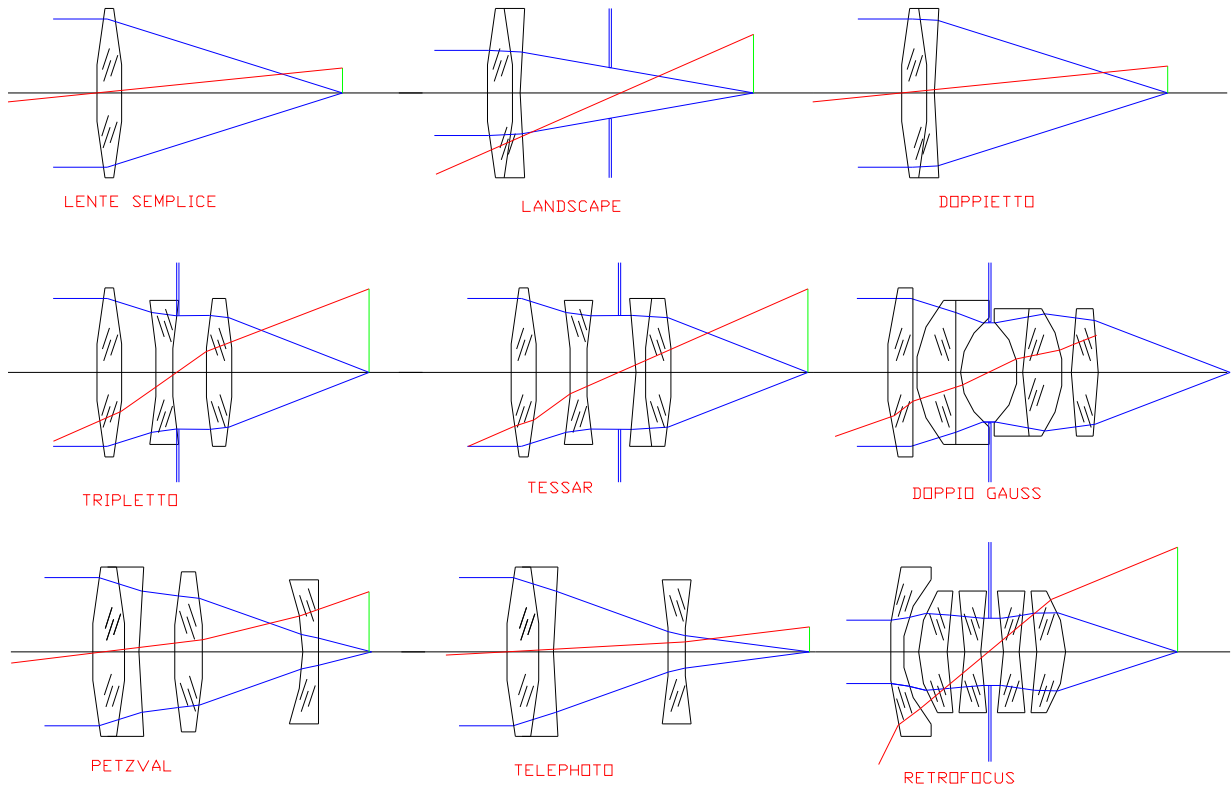


figura 3.6

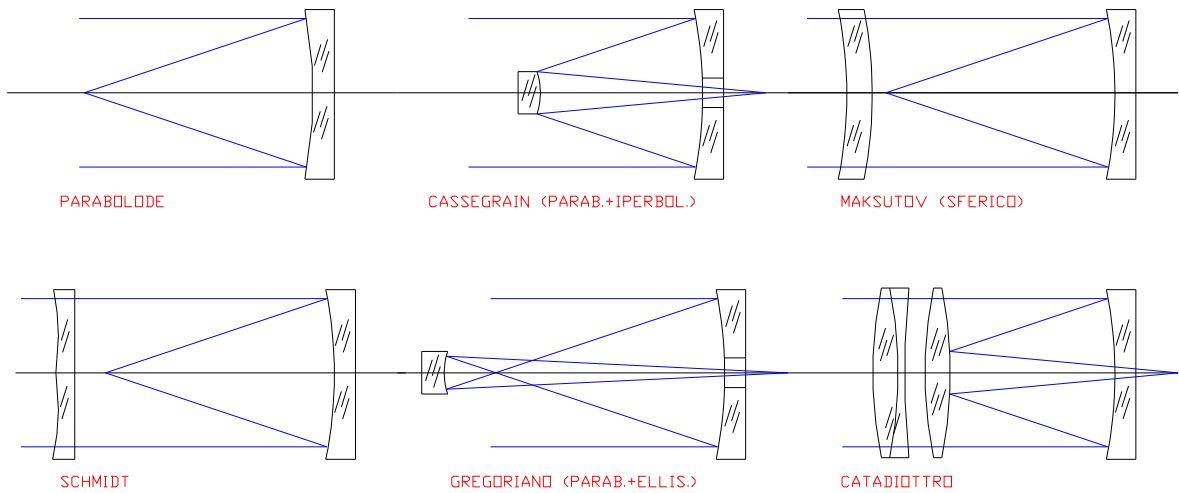
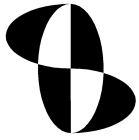


figura 3.7



OPTO SERVICE srl

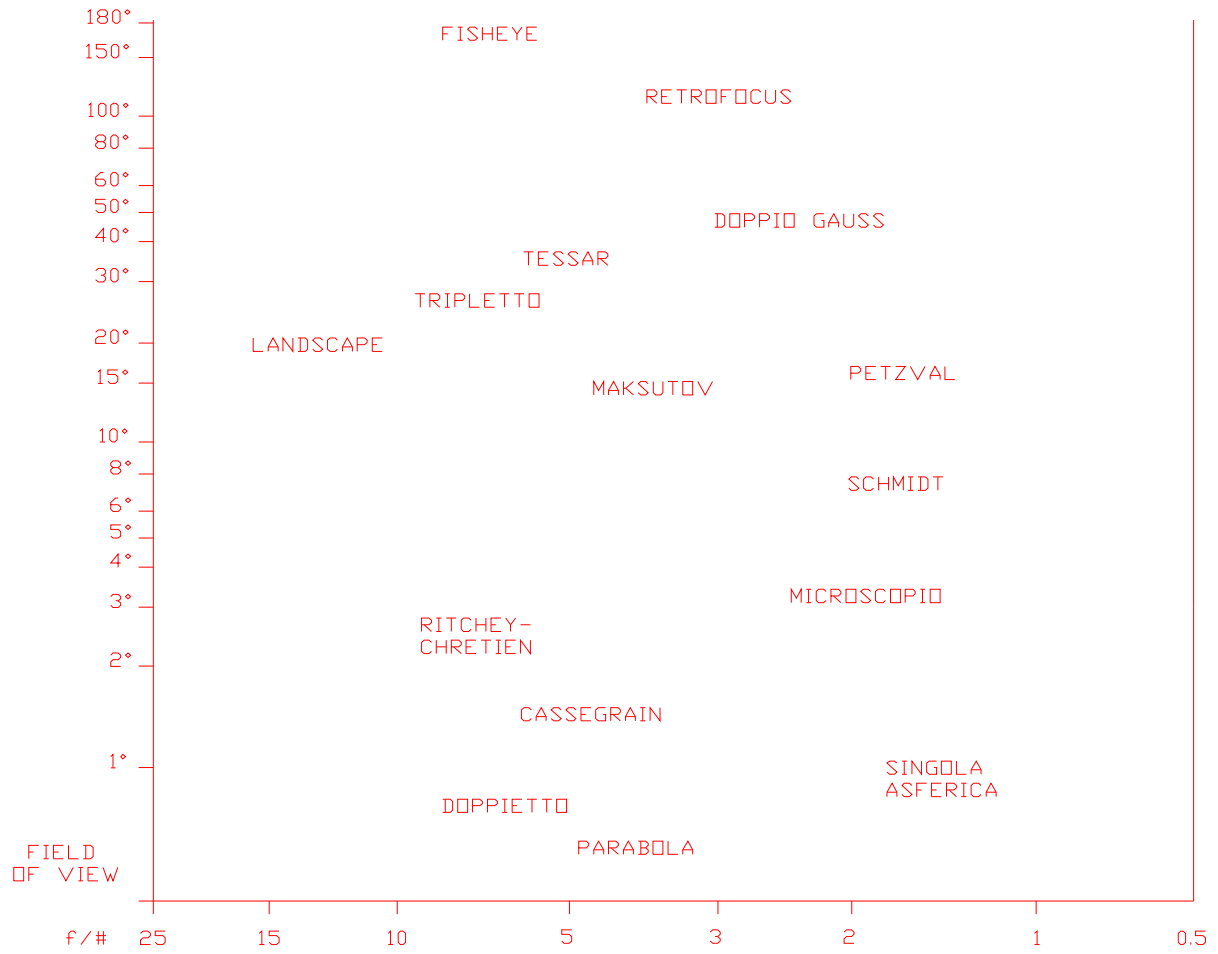


figura 3.8