



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL' INFORMAZIONE**

**TESI DI LAUREA IN  
INGEGNERIA BIOMEDICA**

(Laurea triennale DM 509/99)

**SISTEMA NULL LENS BASATO SULL' OTTICA  
ADATTIVA PER TESTARE LE LENTI  
OFTALMICHE**

*Relatore: Dott. Maria Guglielmina Pelizzo*

*Correlatore: Dott. Stefano Bonora*

*Correlatore: Dott. Vania Da Deppo*

*Laureando: Antonio Ambrosin*

ANNO ACCADEMICO 2009-2010

# Indice

<b>INDICE</b> .....	<b>2</b>
<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>3</b>
<b>CAPITOLO 1</b> .....	<b>4</b>
1.1 L'OCCHIO.....	4
1.1.1 <i>Anatomia generale</i> .....	4
Retina.....	5
Coni e Bastoncelli .....	5
1.1.2 <i>Analisi ottica e formazione dell'immagine</i> .....	5
1.1.3 <i>Difetti del meccanismo di formazione delle immagini</i> .....	6
Presbiopia.....	6
Strabismo.....	6
Miopia.....	7
Ipermetropia .....	7
Astigmatismo .....	7
1.2 LENTI .....	8
1.3 ABERRAZIONI .....	12
1.3.1 <i>Aberrazione sferica</i> .....	14
1.3.2 <i>Astigmatismo</i> .....	14
1.3.3 <i>Curvatura di campo e power error</i> .....	15
1.4 LENTI OFTALMICHE .....	17
1.4.1 <i>Lenti sferiche</i> .....	17
1.4.2 <i>Lenti cilindriche e sfero-cilindriche</i> .....	21
1.4.3 <i>Lenti toriche</i> .....	24
<b>CAPITOLO 2</b> .....	<b>26</b>
2.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA .....	26
2.2 SIMULAZIONE TRAMITE SOFTWARE .....	29
2.2.1 <i>Simulazione A</i> .....	33
2.2.2 <i>Simulazione B</i> .....	35
<b>CAPITOLO 3</b> .....	<b>39</b>
3.1 ESPERIMENTO E MESSA SU BANCO.....	39
<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>44</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>47</b>

# Introduzione

Questo progetto si prefigge come obiettivo la realizzazione di un sistema per testare le lenti oftalmiche. Queste lenti sono utilizzate per correggere i difetti visivi: pertanto devono essere costruite in modo tale da garantire una visione ottimale al portatore. Da qui l'utilità di sviluppare questo argomento, ancora moderno, visto il numero ingente di persone che portano gli occhiali.

Il metodo null lens correlato all'ottica adattiva permette non solo di valutare la qualità di una lente ma anche di fornire i dati per la ricostruzione del fronte d'onda, necessaria per poter dare una descrizione qualitativa e quantitativa dei difetti.

Il primo capitolo dà una panoramica sull'occhio, sulla sua anatomia e sul suo funzionamento, descrive i difetti visivi più comuni correggibili attraverso l'applicazione di lenti opportune. Tratta la teoria che sta dietro le lenti proponendo alcune formule provenienti dall'ottica geometrica e dando alcune definizioni importanti. Partendo dall'enunciato di Fermat, fondamento teorico dell'ottica geometrica, approfondisce le principali aberrazioni ed estende l'argomentazione sulle lenti oftalmiche descrivendone morfologia, prestazioni e applicazioni.

Il secondo capitolo tratta del sistema ottico da realizzare, del metodo null lens con l'ausilio dell'ottica adattiva, delle simulazioni fatte attraverso dati e grafici.

Nel terzo viene descritta la simulazione che ha dato i risultati migliori, visti i vincoli di sistema, e la sua concreta realizzazione su banco ottico.

Infine vengono fatte alcune considerazioni sul metodo e sui risultati ottenuti.

# Capitolo 1

## 1.1 L'occhio

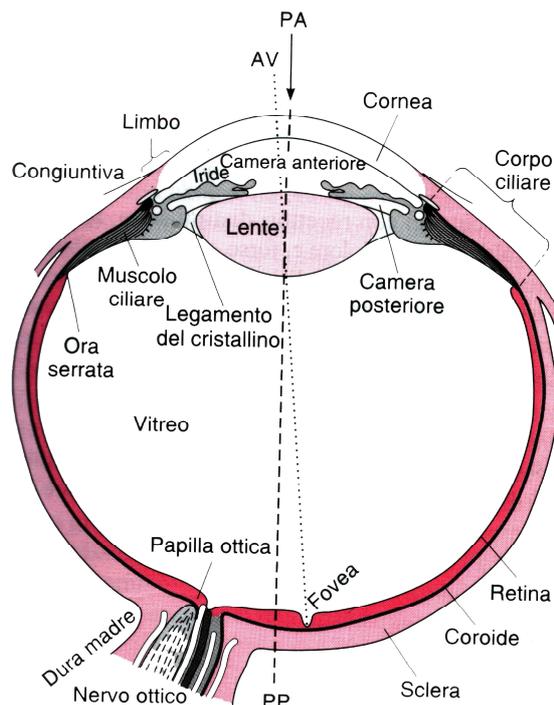
L'occhio è un complesso organo di senso, derivato per evoluzione dalle macchie fotosensibili sulla superficie del corpo degli invertebrati; è responsabile della visione. Verranno fatte alcune considerazioni anatomiche prima di una trattazione più "dal punto di vista ottico".

### 1.1.1 Anatomia generale

Le principali strutture dell'occhio sono riportate in figura. La *sclera* è lo strato protettivo esterno del globo oculare, modificata nella parte anteriore per formare la *cornea* trasparente dalla quale i raggi luminosi entrano nell'occhio. All'interno della sclera si trova la *coroide* che contiene molti vasi sanguigni che nutrono le strutture del globo. I due terzi posteriori della coroide costituiscono la *retina*, tessuto nervoso che contiene le cellule recettrici.

Il *cristallino* è una lente trasparente mantenuta in posizione da un legamento circolare detto legamento del cristallino connesso al corpo ciliare, il bordo ispessito della coroide, contenente fibre muscolari circolari e longitudinali. Davanti alla lente vi è l'*iride*, una struttura opaca e pigmentata che delimita la pupilla. L'iride contiene fibre muscolari circolari che restringono la pupilla e fibre muscolari radiali che la dilatano consentendole di far variare la quantità di luce entrante fino a 5 volte.

Lo spazio compreso tra il cristallino e la retina è riempito da una sostanza gelatinosa e incolore detta umor vitreo. L'umor acqueo è una sostanza trasparente che riempie la camera anteriore dell'occhio con la funzione di nutrire la cornea e il cristallino.



## Retina

La *retina* è uno strato di tessuto nervoso che contiene i coni e i bastoncelli che sono i fotorecettori. L'informazione ricevuta da questi attraversa più strati di cellule nervose di vario tipo e viene trasportata al cervello attraverso il *nervo ottico* fuoriuscente dal bulbo oculare attraverso la papilla o disco ottico, zona cieca perché priva di fotorecettori.

Al polo posteriore dell'occhio si trova una piccola area detta macula lutea all'interno della quale si trova la *fovea centrale*, porzione della retina meno spessa priva di bastoncelli ma ricca di coni: è il punto dove l'acuità visiva è massima.

## Coni e Bastoncelli

I bastoncelli sono circa 120 milioni per occhio: sono sensibilissimi alla luce e sono i recettori per la visione notturna.

I coni sono circa 6 milioni per occhio: hanno un'acuità visiva molto più grande, sono responsabili della visione a luce intensa e di quella a colori. Infatti esistono 3 differenti tipi di coni ciascuno contenente un fotopigmento con sensibilità massima a lunghezze d'onda di 440nm (blu), 535nm (verde), 665nm (rosso).

Su tutta la retina prevale il numero dei bastoncelli su quello dei coni eccetto che nella fovea.

L'intervallo di spettro a cui è sensibile l'occhio varia da 390nm a 780nm.

### *1.1.2 Analisi ottica e formazione dell'immagine*

Vengono elencati alcuni dati rilevanti dal punto di vista ottico:

#### INDICI DI RIFRAZIONE

Aria	1,000294
Film lacrimale	1,34
Cornea	1,376
Acqueo e Vitreo	1,336
Cristallino	1,4085
Complessivo	1,479

#### RAGGI DI CURVATURA (in mm)

	riposo	accomodazione
<u>cornea</u>		
Superficie anteriore	7,8	
Superficie posteriore	6,8	
<u>cristallino</u>		
Superficie anteriore	10	5,33
Superficie posteriore	-6	-5,33

#### POTERI DIOTTRICI

<u>cornea</u>	
Film lacrimale	43,553
Superficie anteriore	4,615
Totale sup.ant.	48,168

Superficie posteriore	-5,8	
Potere diottrico totale	42,67	
<u>crystallino</u>		
Potere diottrico totale	19,1883	33,77

#### CARATTERISTICHE COMPLESSIVE DEL DIOTTRO OCULARE

Potere diottrico	61,478	76
I distanza focale	16,2	13,161
II distanza focale	24	19,46

Il complesso del diottro oculare può esser pensato come un sistema di lenti con una front focal length di 16.2 mm davanti all'occhio, una back focal length di 24 mm sulla retina. Definita la diottria come il reciproco della distanza focale espressa in metri, un occhio normale a riposo ha +61,478 diottrie e quindi  $f = 16,2$  mm.

Affinché un oggetto sia messo a fuoco la sua immagine deve cadere sulla retina. In un occhio normale ( *emmetrope* ), quando il muscolo ciliare è rilasciato e i legamenti sono tesi, un oggetto posto all'infinito, che nella pratica vuol dire posto oltre i 6 m, viene focalizzato sulla retina: quando ciò avviene si dice che l'oggetto si trova sul *punto lontano*.

Se l'oggetto si trova entro i 6 m la sua immagine cadrebbe dietro la retina e non verrebbe perciò messa a fuoco. Perciò il muscolo ciliare si contrae, i legamenti vengono rilasciati e il cristallino assume una forma più convessa, aumentando così il suo potere diottrico e permettendo la messa a fuoco dell'oggetto. Questo processo si chiama *accomodazione*.

Vi è un limite all'aumento della curvatura e pertanto i raggi luminosi provenienti da oggetti vicinissimi non possono essere messi a fuoco: il punto più vicino che può essere messo a fuoco mediante accomodazione si chiama *punto prossimo della visione* e in media è a 25 cm dall'occhio (da 7 cm per un giovane fino a 100 cm per un anziano).

### 1.1.3 Difetti del meccanismo di formazione delle immagini

I difetti più comuni sono: la presbiopia, lo strabismo, la miopia, l'ipermetropia e l'astigmatismo.

#### Presbiopia

Difetto visivo che si aggrava con l'età dovuto in gran parte all'irrigidimento del cristallino. Questo influisce sull'accomodazione che perde efficacia. Le conseguenze per il soggetto affetto sono la diminuzione del grado di cui può essere aumentata la curvatura della lente e quindi la mancata messa a fuoco di oggetti vicini.

La presbiopia può esser corretta con delle lenti positive che aumentano il potere diottrico dell'occhio accorciando la distanza focale.

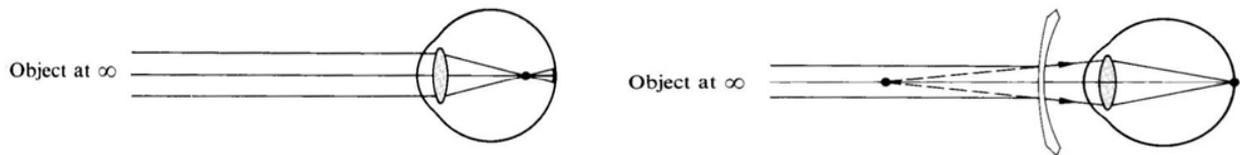
#### Strabismo

Difetto visivo causato dalla prolungata convergenza degli assi visivi dovuta all'accomodazione.

## Miopia

Difetto visivo dovuto ad una deformazione del globo oculare che è più lungo di quello di un occhio emmetrope. In una persona affetta da miopia l'immagine di un oggetto 'posto all' infinito' cade alla stessa distanza di quella di un occhio emmetrope, poiché il difetto è del globo e non del cristallino ( raro ), solo che, essendo il globo deformato, questa distanza non è sufficiente a raggiungere la retina. Una persona miope perciò 'non vede bene da lontano' visto che non riesce a focalizzare gli oggetti lontani; il suo punto lontano, che in un occhio normale è posto all'infinito e cioè oltre i 6 m come già spiegato, si troverà entro i 6 m. Un occhio miope perciò comincerà ad accomodare oggetti che si trovano entro la distanza del proprio punto lontano, cioè accomoderà più 'tardi': questo gli permette di focalizzare oggetti anche molto vicini e quindi di avere un punto prossimo più vicino all'occhio, sotto i 25 cm; ecco perché una persona miope vede meglio 'da vicino' rispetto a una persona normale.

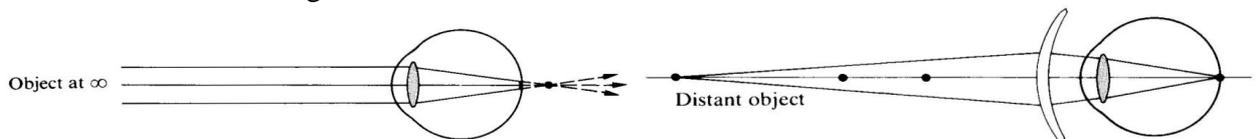
Per correggere la miopia si usano lenti negative che diminuiscono il potere diottrico garantendo una distanza focale maggiore di modo che l'immagine di un oggetto all'infinito cada sulla retina.



## Ipermetropia

Difetto visivo dovuto ad una deformazione del globo oculare che è più corto di quello di un occhio emmetrope. In una persona affetta da ipermetropia l'immagine di un oggetto 'posto all' infinito' cade alla stessa distanza di quella di un occhio emmetrope, poiché il difetto è del globo e non del cristallino ( raro ), solo che, essendo il globo deformato, questa distanza è maggiore rispetto a quella della retina. In questo caso l'occhio sarà costretto ad accomodare per mettere a fuoco l'immagine. Dovendo accomodare prima, un occhio ipermetrope avrà dunque un punto prossimo più distante, sopra i 25 cm, sopraggiungendo prima il limite di deformazione. Ecco perché una persona ipermetrope ci 'vede bene da lontano' (meglio di una persona normale) e non 'da vicino'.

Per correggere l'ipermetropia si usano lenti positive che aumentano il potere diottrico dell'occhio accorciando la distanza focale: gli oggetti distanti verranno visti a fuoco, permettendo all'occhio di accomodare al momento giusto.



## Astigmatismo

Difetto visivo dovuto alla mancata uniformità della curvatura della cornea che provoca una differenza di rifrangenza tra un meridiano e un altro: vi sono dunque due linee di focalizzazione sulla retina che causano una visione sfocata ad ogni distanza.

Se i due meridiani sono ortogonali la correzione è semplice altrimenti risulta più complessa: si può ricorrere all'uso di lenti sfero-cilindriche o alla chirurgia laser.

## 1.2 Lenti

Nel capitolo precedente si è visto come l'utilizzo di lenti positive o negative possa correggere i difetti visivi. Ma che cos'è una lente? Una lente è un sistema ottico consistente in due o più superfici rifrangenti almeno una delle quali è curva.

Viene definita *lente semplice* quella composta da un solo elemento e cioè quella che ha solo due superfici rifrangenti; in caso contrario si chiama *lente composta*.

Una lente inoltre sarà sottile o spessa a seconda che il suo spessore sia trascurabile o meno.

E' opportuno inoltre tenere a memoria la seguente convenzione:

- la luce viaggia da sinistra a destra;
- altezze sopra l'asse ottico sono positive e sotto di esso sono negative;
- distanze a destra di un punto di riferimento (di solito il centro ottico) sono positive, a sinistra sono negative;
- un raggio di curvatura è positivo se il centro della curvatura si trova a destra della superficie;
- gli angoli sono positivi se si ruota in senso orario;

Dalla teoria dei diottri sferici si può ricavare, applicando semplicemente le leggi dell'ottica geometrica e seguendo la convenzione sopra citata, una formula che mette in relazione un oggetto con la sua immagine attraverso la lente.

Tale formula è la seguente:

$$\frac{n_m}{s_i} - \frac{n_m}{s_o} = (n_l - n_m) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{n_l d}{s_i(s_i - d)}$$

Dove :  $s_o$  è la distanza dell'oggetto;

$s_i$  è la distanza dell'immagine;

$n_l$  è l'indice di rifrazione della lente;

$n_m$  è l'indice di rifrazione del mezzo in cui la lente è immersa;

$R_1$  è il raggio di curvatura della prima superficie (provenendo da sinistra) ;

$R_2$  è il raggio di curvatura della seconda superficie (provenendo da sinistra) ;

$d$  è lo spessore della lente.

Considerando una lente immersa in aria ( $n_m=1$ ) la formula si semplifica in:

$$\frac{1}{s_i} - \frac{1}{s_o} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{n_l d}{s_i(s_i - d)}$$

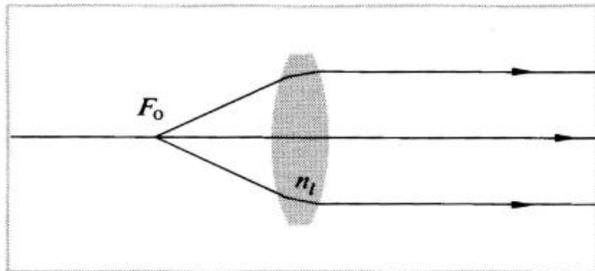
Un'ulteriore semplificazione la si ottiene se si considera una lente sottile:

$$\frac{1}{s_i} - \frac{1}{s_o} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

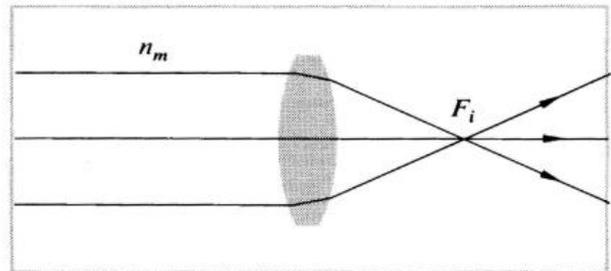
Quest'ultima formula è chiamata *formula dei costruttori di lenti*.

Ponendo un oggetto all'infinito una lente (b) si dice *positiva* o *convergente* se i raggi convergono in un unico punto chiamato fuoco immagine o *focale* della lente la cui distanza dal centro della lente stessa sarà positiva, secondo convenzione.

Data una lente positiva (a) esiste un punto nello spazio oggetto detto *fuoco oggetto* dal quale divergono i raggi che, attraversata la lente, risultano paralleli all'asse proiettando l'immagine all'infinito: la distanza di questo punto è negativa, secondo convenzione.



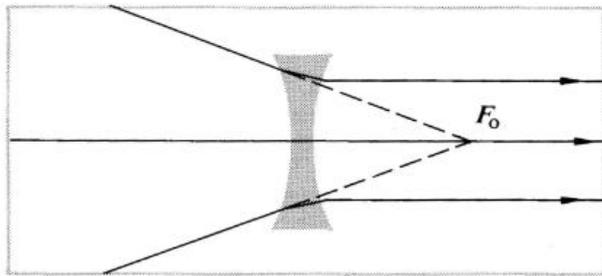
(a)



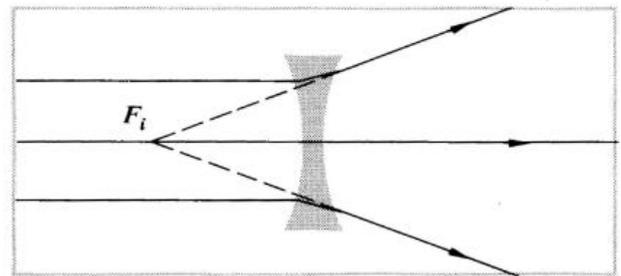
(b)

Ponendo un oggetto all'infinito una lente (e) si dice *negativa* o *divergente* se i prolungamenti dei raggi convergono in un unico punto chiamato fuoco immagine o *focale* della lente la cui distanza dal centro della lente stessa sarà negativa, secondo convenzione.

Data una lente negativa (d) esiste un punto nello spazio immagine detto *fuoco oggetto* nel quale convergono i prolungamenti dei raggi che, attraversata la lente, risultano paralleli all'asse proiettando l'immagine all'infinito: la distanza di questo punto è positiva, secondo convenzione.



(d)



(e)

In sintesi con un oggetto all'infinito ho che:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_i} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

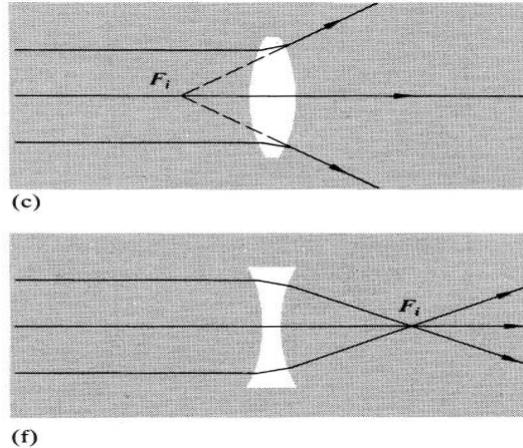
Con  $f > 0$  la lente è positiva;  
 $f < 0$  la lente è negativa.

Con ciò si può scrivere che:

$$\frac{1}{s_i} - \frac{1}{s_o} = \frac{1}{f}$$

detta *formula di Gauss* per le lenti sottili.

Si possono definire lenti positive e negative nel modo sopra citato facendo però attenzione al fatto che l'indice della lente sia maggiore di quello del mezzo in cui è immersa. In caso contrario le lenti definite positive in quelle condizioni diverrebbero negative e viceversa.



Un altro parametro importante è il *potere diottrico*: è il reciproco della distanza focale espressa in metri e si misura in diottrie [ m<sup>-1</sup>].

$$D = \frac{1}{f}$$

Per coerenza se una lente è positiva avrà potere diottrico positivo, se negativa lo avrà negativo.

Viene descritto ora un sistema composto che per semplicità sarà formato da due lenti. Posto un oggetto a monte del sistema la sua immagine attraverso la prima lente sarà l'oggetto per la seconda lente; applicando le leggi dell'ottica geometrica con la convenzione scelta si può calcolare l'immagine dell'oggetto attraverso il sistema completo. Posto un oggetto all'infinito la distanza della sua immagine dall'ultima superficie ottica si chiama *back focal length*:

$$b.f.l. = \frac{f_2(d - f_1)}{d - (f_1 + f_2)}$$

Con  $f_1$  focale della prima lente;  
 $f_2$  focale della seconda lente;  
 $d$  distanza tra le due lenti.

La distanza tra la prima superficie ottica e il fuoco oggetto si chiama *front focal length*:

$$f.f.l. = \frac{f_1(d - f_2)}{(f_1 + f_2) - d}$$

Se  $d = f_1 + f_2$  allora le lenti si definiscono confocali e si ha che fasci entranti paralleli escono paralleli. Se  $d = 0$  le due lenti si dicono a contatto perciò:

$$f.f.l. = -b.f.l. = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2}$$

E' facile vedere in tal caso come:

$$\frac{1}{f_{tot}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad \text{e cioè} \quad D_{tot} = D_1 + D_2$$

( con N lenti a contatto la sommatoria si estende a tutte le N componenti.)

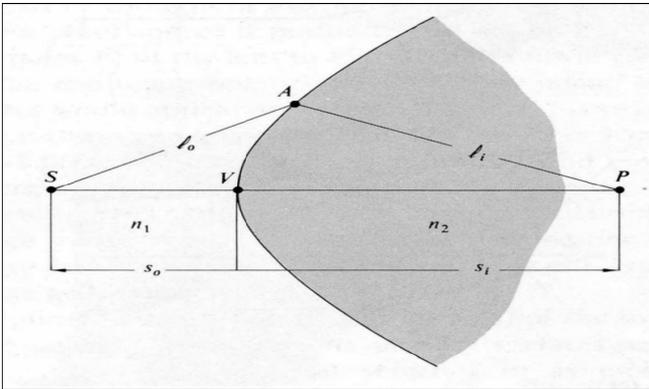
### 1.3 Aberrazioni

L'ottica geometrica si basa sul principio di Fermat: definiti due punti P e Q, la luce che parte da P raggiunge Q percorrendo il cammino minimo dal punto di vista temporale.

Da questo teorema si ricavano facilmente le leggi di Cartesio e di Snell che regolano il ray tracing in un sistema.

Si supponga di avere due mezzi separati da una superficie curva: tracciato un asse orizzontale su di esso si prenda una sorgente puntiforme S a distanza  $s_o$  nel primo mezzo (di indice  $n_1$ ) e un punto P a distanza  $s_i$  nel secondo mezzo (di indice  $n_2 > n_1$ ) tale che tutti i raggi uscenti da S, una volta rifratti, convergano su P e cioè tale che per ogni raggio uscente da S valga il principio di Fermat:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{n_1 s_o}{c} + \frac{n_2 s_i}{c} = \frac{n_1 l_o}{c} + \frac{n_2 l_i}{c} = \frac{1}{c} \sum_j n_j l_j$$



Si definisce cammino ottico o *optical path length*:

$$OPL = \sum_j n_j l_j$$

E quindi:

$$\frac{\partial(OPL)}{\partial s} = 0$$

Affinché si realizzino le condizioni su scritte, la superficie risulterà essere un ovale detto *ovale di Cartesio*. P verrà chiamata immagine perfetta o *Gaussiana* di S.

Come applicare tutto questo a una lente?

Prima di procedere è opportuno dare delle definizioni aggiuntive.

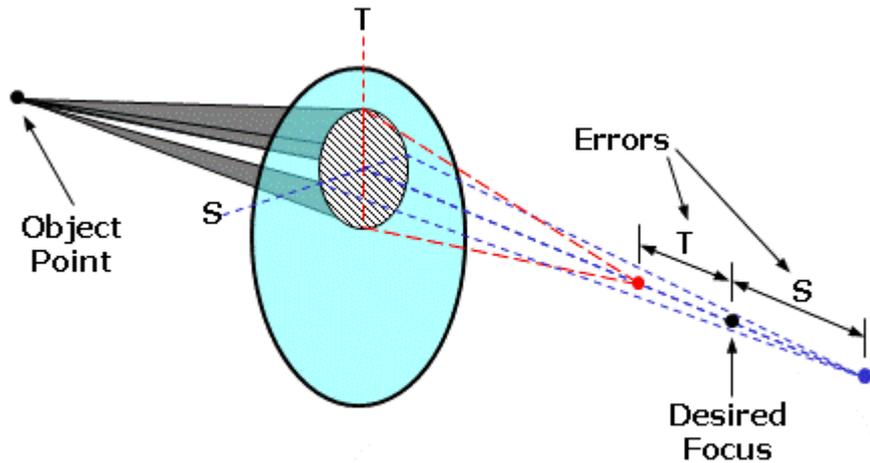
Si definisce *apertura stop* l'oggetto che limita la quantità di raggi entranti nel sistema.

Si definisce *pupilla d'ingresso* l'immagine dell'apertura stop vista da un punto oggetto assiale attraverso gli elementi ottici che precedono l'apertura stop stesso: se non vi sono elementi tra l'oggetto e lo "stop", quest'ultimo è la pupilla d'ingresso a tutti gli effetti.

Si definisce *pupilla d'uscita* l'immagine dell'apertura stop vista da un punto oggetto assiale sul piano immagine attraverso gli elementi ottici presenti: se non vi sono elementi tra lo "stop" e il piano immagine, il primo è pupilla d'uscita a tutti gli effetti.

Si definisce *chief ray* il raggio che parte da un punto oggetto fuori asse e passa per il centro dell'apertura stop (e perciò anche della pupilla d'ingresso e d'uscita.)

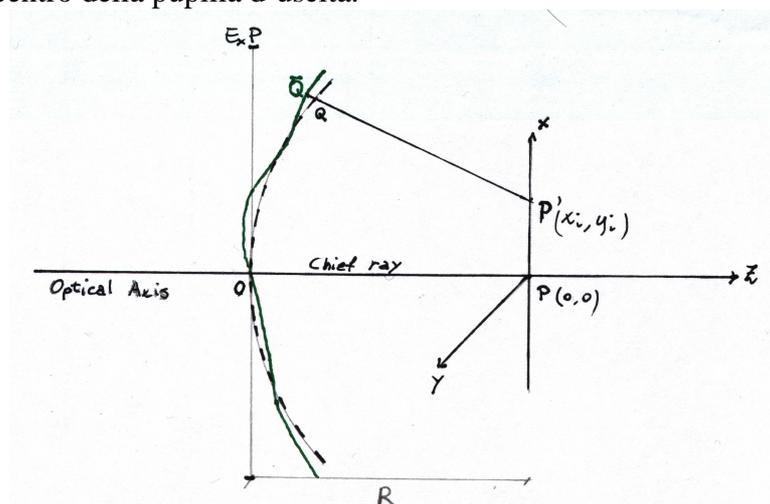
E' opportuno anche dare una definizione di piani tangenziale e sagittale: la figura esprime bene il concetto allegandovi quello dei relativi errori.



Tangential (T) and Sagittal (S) Errors in Power

Ora si supponga di avere un sistema formato da una lente convergente ( scelta di questo tipo per semplicità): la superficie di separazione è sferica e in quanto tale approssima l'ovale solo nella zona *parassiale* cioè solo per un cono di raggi con una piccola apertura. Perciò solo in questa condizione varrà il principio di Fermat: se si considera un'apertura maggiore il principio sarà violato e i raggi non convergeranno più in un unico punto come invece accadeva in precedenza. In questo caso si parla di *aberrazione*.

Tenendosi in zona parassiale e considerando S, P e le loro distanze come nel primo esempio, "puntando" in P con un raggio  $R = s_i$  si può disegnare il fronte d'onda gaussiano o *reference sphere* che passerà per O, centro della pupilla d'uscita.



Il fronte d'onda reale si discosterà da quello gaussiano tanto quanto più sarà *aberrato*. Preso un raggio da S, *non parassiale*, intersecherà il fronte d'onda reale in  $\bar{Q}$  e quello gaussiano in Q e il piano immagine in P'.

La differenza di cammino ottico  $n\bar{Q}Q$  si ripercuote sul piano immagine nel segmento PP': definita la funzione  $W(x,y)$  che rappresenta le differenze di cammino ottico per ogni raggio rispetto al chief ray ossia l'aberrazione del fronte d'onda, P'' di coordinate  $(x_i, y_i)$  si ottiene così:

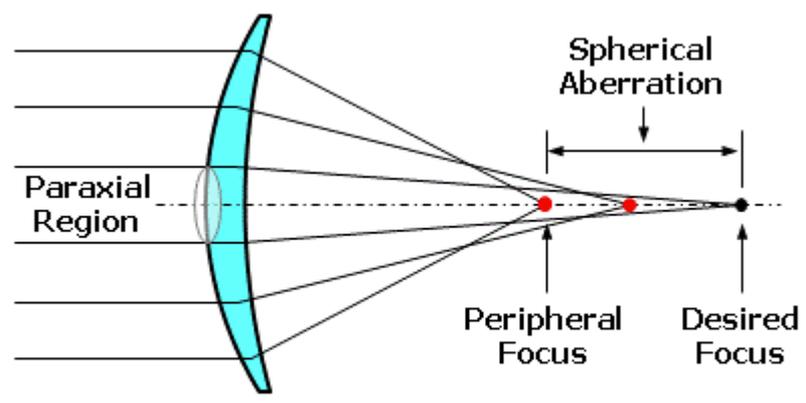
$$(x_i, y_i) = \frac{R}{n} \left( \frac{\partial W}{\partial x}, \frac{\partial W}{\partial y} \right)$$

Il segmento PP' è chiamato *aberrazione geometrica trasversale del raggio*: le sue componenti sono  $(x_i, y_i)$ . Analogamente il discorso fatto vale per punti fuori asse ricordandosi di tenere come riferimento il chief ray.

Vengono trattate ora concretamente alcuni tipi di aberrazioni.

### 1.3.1 Aberrazione sferica

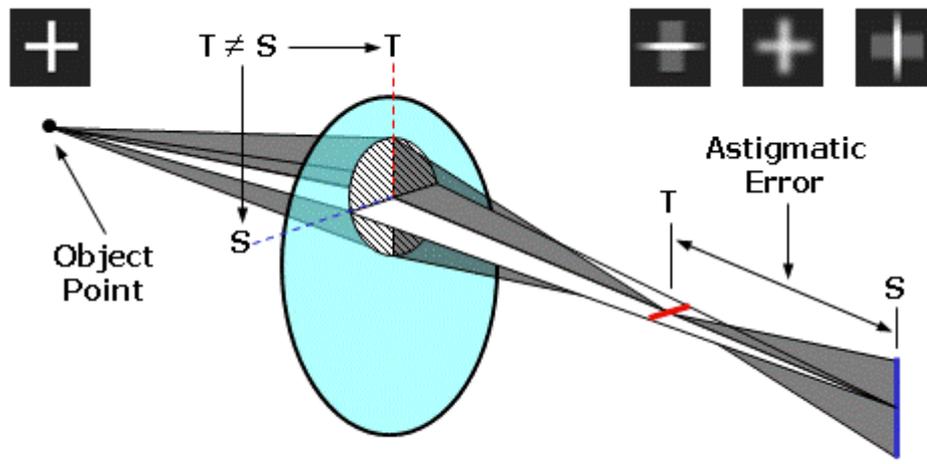
L'*aberrazione sferica* è un difetto assosimmetrico per cui la focale varia con l'apertura. E' l'unica aberrazione di cui soffre una sorgente in asse. L'immagine la rappresenta per un oggetto posto all'infinito.



Spherical Aberration of Peripheral Light Rays

### 1.3.2 Astigmatismo

Dato un punto oggetto fuori asse il cono di raggi da esso proveniente inciderà asimmetricamente il sistema ottico causando l'aberrazione di *astigmatismo*: la proiezione dei raggi nei piani tangenziale e sagittale sarà differente e di conseguenza anche le focali in questi piani differiranno.



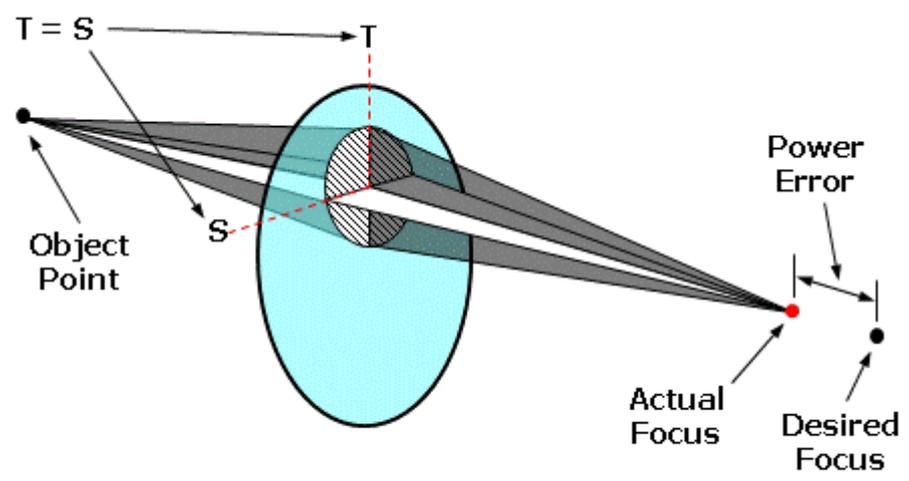
Oblique Refraction Creating Astigmatic Error

Analiticamente:

Errore Astigmatico = Errore tangenziale – Errore sagittale.

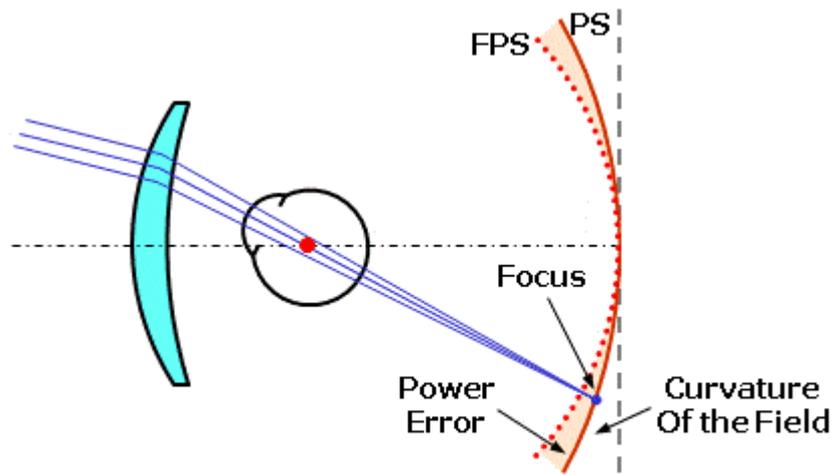
1.3.3 Curvatura di campo e power error

In un sistema ottico solo in zona parassiale e cioè per aperture infinitesime il piano immagine è effettivamente un piano. Per aperture finite il piano immagine risulterà una superficie curva detta *superficie di Petzval*. Quest' aberrazione provocherà un errore di focalizzazione detto *power error*.



Oblique Refraction Creating Power Error

Applicando questo concetto in campo oftalmico è bene fare delle precisazioni.  
Si osservi l'immagine seguente.



Power Error and Curvature of the Field

FPS sta per Far-Point Sphere e rappresenta la superficie sulla quale l'occhio umano focalizza un oggetto oltre il punto lontano: per un occhio emmetrope questa superficie coincide con la retina (l'immagine rappresenta un occhio ipermetrope).

Spesso la FPS ha un raggio di curvatura minore rispetto alla PS ( Petzval Surface) e ciò porterà a un *power error* che si aggiunge a quello dovuto alla curvatura di campo.

## 1.4 Lenti oftalmiche

Le lenti utilizzate per la correzione dei difetti visivi sono chiamate *lenti oftalmiche*. Ne esistono di vari tipi a seconda della loro forma e del loro scopo applicativo: sferiche, cilindriche e sfero-cilindriche, toriche.

### 1.4.1 Lenti sferiche

Le lenti sferiche sono in genere lenti semplici, composte perciò da sole due superfici. Ogni superficie ha un suo potere diottrico così definito:

$$D = \frac{n' - n}{r}$$

Dove  $n'$  è l'indice di rifrazione del mezzo nel quale la luce sta entrando e  $n$  è l'indice di rifrazione del mezzo da cui la luce sta uscendo;  $r$  è il raggio di curvatura.

Supposto di avere una lente immersa in aria:

$$D_1 = \frac{n - 1}{r_1} \quad D_2 = \frac{1 - n}{r_2}$$

Per ottenere il potere diottrico totale della lente basterà fare la somma:

$$D = D_1 + D_2$$

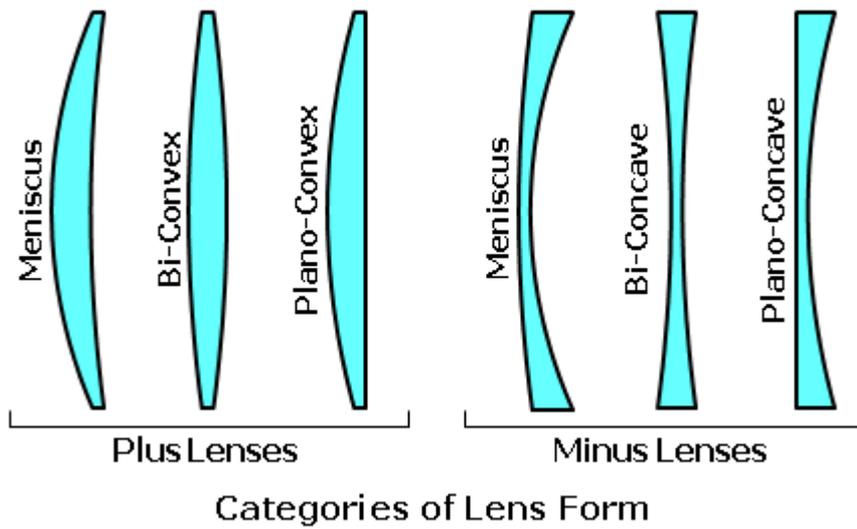
Se si volesse una lente con un potere diottrico  $D = +8.00$  DS (Diottrie Sferiche) si potrebbe ottenerla in più modi:

1) $D_1 = +4.00$ DS	$D_2 = +4.00$ DS	$D_{tot} = D_1 + D_2 = +8.00$ DS	equi convessa
2) $D_1 = +6.00$ DS	$D_2 = +2.00$ DS	$D_{tot} = D_1 + D_2 = +8.00$ DS	biconvessa
3) $D_1 = +8.00$ DS	$D_2 = 0$	$D_{tot} = D_1 + D_2 = +8.00$ DS	piano convessa
4) $D_1 = +10.00$ DS	$D_2 = -2.00$ DS	$D_{tot} = D_1 + D_2 = +8.00$ DS	menisco
5) $D_1 = +12.00$ DS	$D_2 = -4.00$ DS	$D_{tot} = D_1 + D_2 = +8.00$ DS	menisco
6) $D_1 = +14.00$ DS	$D_2 = -6.00$ DS	$D_{tot} = D_1 + D_2 = +8.00$ DS	menisco
7) $D_1 = +16.00$ DS	$D_2 = -8.00$ DS	$D_{tot} = D_1 + D_2 = +8.00$ DS	menisco

La superficie con potere diottrico *in modulo* più basso è definita come *curva di base o base curve*. Quando la curva di base ha  $D = \pm 1.25$  DS la lente si dice *periscopica*.

Analogamente se si volesse una lente con potere diottrico  $D = -5.00$  DS:

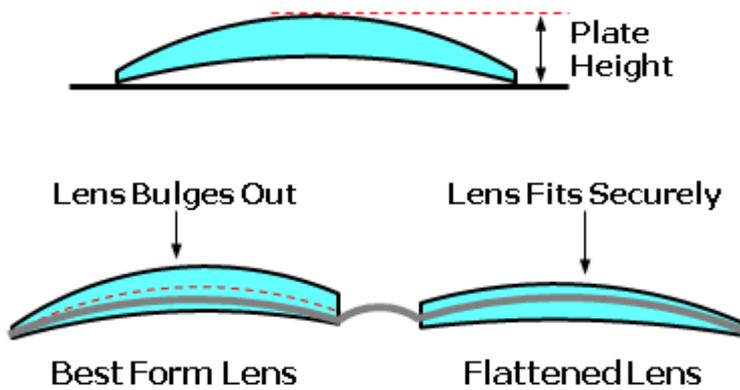
1) $D_1 = -2.50$ DS	$D_2 = -2.50$ DS	$D_{tot} = D_1 + D_2 = -5.00$ DS	equi concava
2) $D_1 = -2.00$ DS	$D_2 = -3.00$ DS	$D_{tot} = D_1 + D_2 = -5.00$ DS	biconvessa
3) $D_1 = 0.00$ DS	$D_2 = -5.00$ DS	$D_{tot} = D_1 + D_2 = -5.00$ DS	pianoconvessa
4) $D_1 = +1.25$ DS	$D_2 = -6.25$ DS	$D_{tot} = D_1 + D_2 = -5.00$ DS	menisco
5) $D_1 = +6.00$ DS	$D_2 = -11.00$ DS	$D_{tot} = D_1 + D_2 = -5.00$ DS	menisco



La combinazione che minimizza le aberrazioni è chiamata *best form* e di solito consiste in un menisco.

I menischi differiscono per la loro curva di base: quali sono i criteri di selezione?

Un *criterio* è sicuramente *estetico*: l'immagine successiva definisce alcuni parametri estetici.



**Plate Height and Frame Retention**

Si osservi questa tabella dove si considerano menischi  $D = +4.00$  ma con differenti curve di base. (70 mm di diametro, 1 mm di spessore minimo ai bordi, resina plastica)

+4.00 D Lenses			
Base Curve	Center	Plate	Weight
-10.00 D Base	6.9 mm	15.3 mm	21.7 g
-8.00 D Base	6.3 mm	11.7 mm	19.5 g
-6.00 D Base	6.0 mm	8.7 mm	18.3 g
-4.00 D Base	5.9 mm	6.0 mm	17.7 g

Si può osservare come “riducendo la curva di base” si riducano spessore dal centro, peso e plate height.

In quest'altra tabella si considerano menischi con  $D = -4.00$ , sempre con differenti curve di base. (70 mm di diametro, 2 mm di spessore minimo ai bordi, resina plastica)

-4.00 D Lenses			
Base Curve	Edge	Plate	Weight
6.00 D Base	8.7 mm	16.4 mm	25.4 g
4.00 D Base	7.8 mm	12.8 mm	24.0 g
2.00 D Base	7.3 mm	9.7 mm	23.2 g
0.00 D Base	7.0 mm	7.0 mm	22.8 g

Anche qui si può notare come “diminuendo la base curve” diminuisca lo spessore ai bordi, il peso e la plate height.

Un altro criterio è quello riguardante le *prestazioni ottiche*: le base curves vengono scelte per garantire un ampio campo di vista incorrotto dalle aberrazioni.

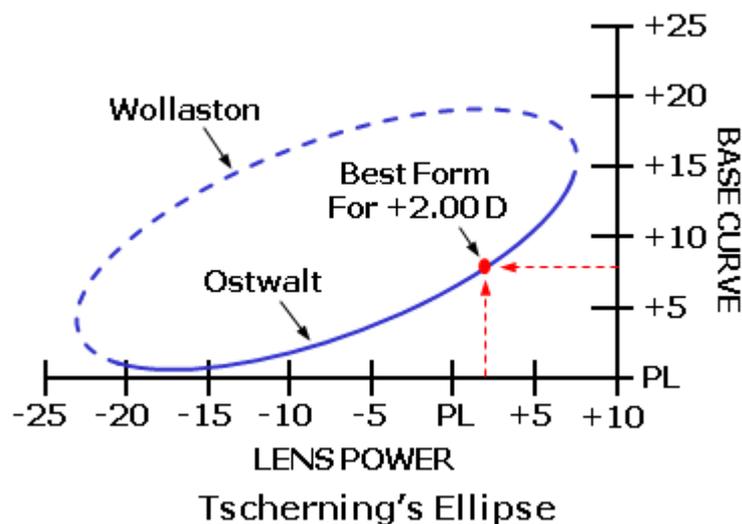
Nel 1804 W. Wollaston creò una serie di lenti le cui superfici erano scelte in modo tale da compensare l'astigmatismo tramite *neutralizzazione*: in pratica la tecnica consiste nell'eliminare l'astigmatismo prodotto dalla superficie anteriore con quello della superficie posteriore. Questa serie di lenti venne chiamata “*periscopica*” perché garantiva una buona visione periferica.

Erano lenti, però, poco adatte ad essere montate su occhiali: nel 1898 F. Ostwalt riuscì a sviluppare una serie più elegante.

Fondamentale e non facile perciò sembra esser il compromesso tra estetica e prestazioni ottiche.

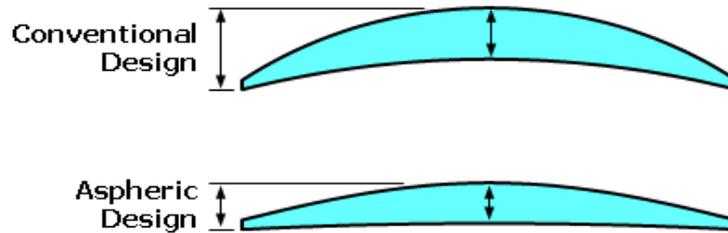
Nel 1904 M. Tscherning dimostrò matematicamente che esistono due best form a seconda della base curve e del potere diottrico della lente: una più spessa e l'altra più sottile.

L'ellisse di Tscherning è il luogo dei punti del piano che mostra graficamente queste due possibili soluzioni per ogni potere diottrico.



Osservando il grafico si deduce che lenti esteticamente migliori spesso sono inferiori riguardo le prestazioni ottiche e viceversa. Sopra un potere diottrico di +7.50 DS le aberrazioni non possono

essere eliminate se non utilizzando *lenti asferiche* che grazie al loro design permettono di raggiungere un buon compromesso tra estetica e prestazioni ottiche.



### Conventional Versus Aspheric Lens Designs

In conclusione la tabella qui sotto mette a confronto i tre tipi di lenti fin'ora descritti: best form, flattened (ottenute usando una flatter base curve), asferiche.

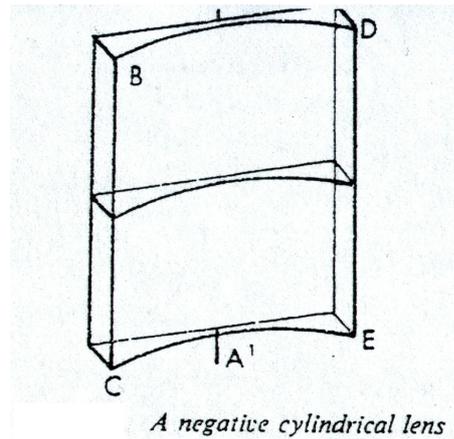
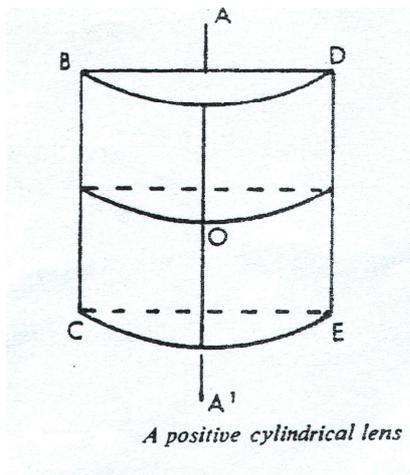
Comparison of Lens Designs for +4.00 D			
	Best Form	Flattened	Aspheric
Front Curve	10.00 D	6.00 D	6.00 D
Center Thickness	6.9 mm	5.9 mm	5.0 mm
Weight	21.7 g	17.7 g	14.6 g
Plate Height	15.3 mm	6.0 mm	5.1 mm
Obl. Astigmatism	0.07 D	0.98 D	0.07 D

( 70mm di diametro, 1mm minimo di spessore ai bordi, resina plastica)

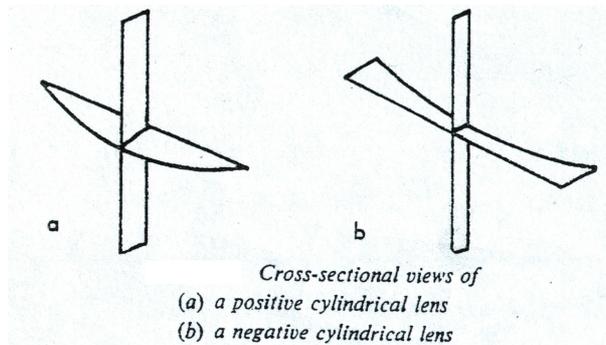
### 1.4.2 Lenti cilindriche e sfero-cilindriche

E' stato detto che l'astigmatismo può esser corretto con l'uso di lenti cilindriche e sfero-cilindriche: descrivere la morfologia di queste lenti aiuterà a capirne il perché.

Una lente cilindrica è composta da due superfici: in genere una è piana e l'altra è concava oppure convessa. Nel primo caso la lente è positiva, nel secondo negativa.

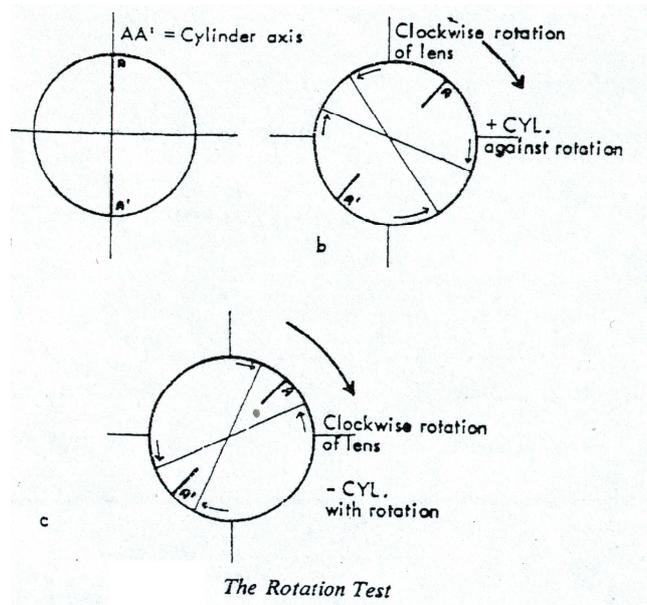


Per ogni lente cilindrica si può definire un asse geometrico chiamato *axis meridian* (nelle figure precedenti AA') e un asse ortogonale al precedente detto *power meridian* (nelle figure precedenti BD o CE). Lungo il primo la lente non ha potere diottrico, lungo il secondo sì.



Questo può essere verificato facilmente tramite il *transverse test*: consiste nel disegnare due assi cartesiani e far sovrapporre quello verticale con l'*axis meridian* della lente. A questo punto muovendo in verticale la lente non si noterà alcun effetto mentre muovendola in orizzontale si noterà un movimento apparente della "croce cartesiana".

Con il *rotation test* si può capire se una lente sia positiva o negativa: disegnati i due assi e sovrapposto quello verticale con l'*axis meridian*, ruotando la lente in senso orario, se è positiva, si vedrà ruotare l'asse cartesiano verticale in senso antiorario; se la lente è negativa l'asse verticale ruoterà in senso orario anch'esso.



Il potere diottrico può essere calcolato sommando quelli delle due superfici: una, poiché piana, avrà potere nullo, l'altra positivo se convessa e negativo se concava; vale sempre e comunque la già nota formula:

$$D_1 = \frac{n-1}{r_1} \quad D_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad D = D_1 + D_2 = \frac{n-1}{r}$$

Convenzione vuole che per distinguere le diottrie sferiche da quelle cilindriche si usi scrivere DC (Diottria Cilindrica) dopo il numero che quantifica il valore.

Altra convenzione vuole che si indichi l'angolazione dell'axis meridian: la scrittura +4.00DC x90° indica che la lente cilindrica è positiva, ha l'axis a 90° (verticale) e potere di +4.00 sul power meridian (situato sulla linea di 0°, cioè orizzontale).

Da qui si intuisce come il potere diottrico sia nullo su un meridiano e aumenti progressivamente fino a raggiungere il massimo valore sul meridiano ortogonale. Ne consegue che una sorgente puntiforme verrà "immaginata" con una linea.

Ecco alcune equivalenze interessanti:

- 1) Date due lenti cilindriche +2.00 DCx90° e +3.00DCx90° sono equivalenti a una lente cilindrica +5.00DCx90°.
- 2) Date due lenti cilindriche +2.00DCx90° e -2.00DCx90° si neutralizzano.
- 3) Date due lenti cilindriche +2.00DCx90° e +2.00DCx0° sono equivalenti a una lente sferica +2.00DS.
- 4) In base alle proprietà precedenti una lente cilindrica

$$+2.00DCx90^\circ = +2.00DCx90^\circ * +2.00DCx0^\circ * -2.00DCx0^\circ \quad (* \text{ significa composta con})$$

ma anche

$$+2.00DCx90^\circ * +2.00DCx0^\circ = +2.00DS$$

e quindi

$$+2.00DCx90^\circ = +2.00DS / +2.00DCx0^\circ$$

si rimpiazza perciò una lente cilindrica con una sfero-cilindrica

5) Date due lenti cilindriche diverse  $+2.00DCx90^\circ$  e  $+4.00DCx0^\circ$

$$+2.00DCx90^\circ * +4.00DCx0^\circ = +2.00DCx90^\circ * +2.00DCx0^\circ * +2.00DCx0^\circ$$

$$+2.00DCx90^\circ * +4.00DCx0^\circ = +2.00DS / +2.00DCx0^\circ$$

ma anche

$$+2.00DCx90^\circ * +4.00DCx0^\circ = +4.00DCx90^\circ * -2.00DCx90^\circ * +4.00DCx0^\circ$$

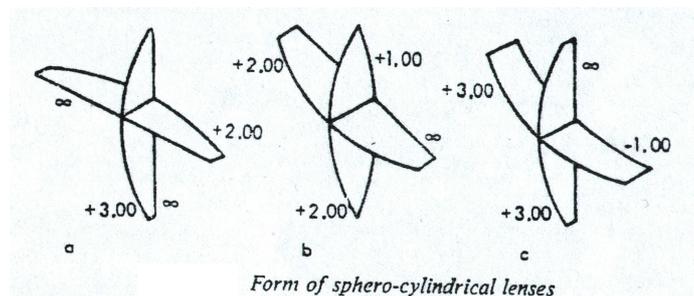
$$+2.00DCx90^\circ * +4.00DCx0^\circ = +4.00DS / -2.00DCx90^\circ$$

quindi anche in questo caso si rimpiazzano due lenti cilindriche diverse con due possibili lenti sfero-cilindriche.

Ma a cosa servono le lenti sfero-cilindriche?

Se una persona è affetta da astigmatismo solo su un asse basterà applicare una lente cilindrica in modo tale da sovrapporre l' "asse difettoso" con il power meridian della lente stessa.

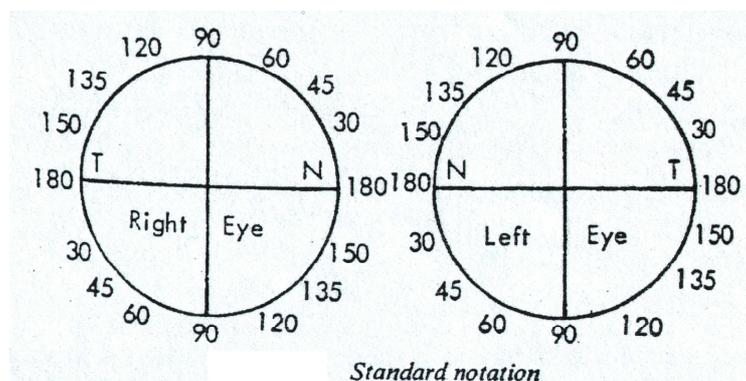
Se l'astigmatismo affligge entrambi gli assi bisognerà comporre due lenti cilindriche e cioè, per le proprietà su scritte, usare una lente sfero-cilindrica .



Il posizionamento di una lente avviene secondo una specifica notazione in uso chiamata notazione TABO (Technischer Ausschuss für Brillen-optik): definisce la gradazione angolare degli occhi.

T = Temporal

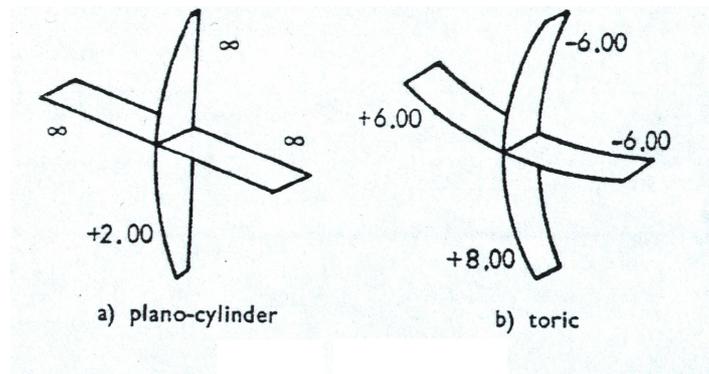
N = Nasal



### 1.4.3 Lenti toriche

Si è visto come da una lente piano convessa si possa passare ad un menisco equivalente ottenendo un miglioramento estetico e ottico.

Procedendo in maniera analoga, si consideri una lente cilindrica +2.00DC x 90°. La definizione di lente cilindrica vuole che una faccia sia piana e l'altra, in questo caso, convessa: il power meridian darà il potere di +2.00. Si supponga di piegare la faccia piana dorsale di -6.00: sulla sezione verticale mantengo il +2.00 combinando un +8.00 e un -6.00: di conseguenza la sezione orizzontale, per aver complessivamente potere diottrico nullo, dovrà aggiungere un +6.00 alla superficie frontale.

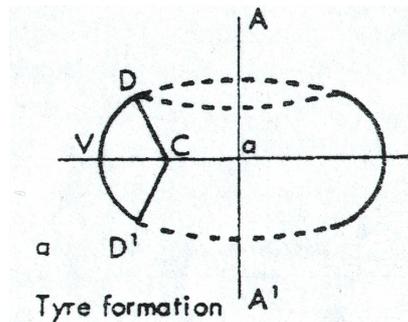


Si ottiene una lente equivalente nella quale la superficie -6.00DC/+8.00 DC è toroidale e quindi la lente è torica.

Una superficie toroidale è composta perciò da due superfici: quella con potere diottrico minore in modulo è chiamata *base curve* e l'altra è chiamata *cross curve*.

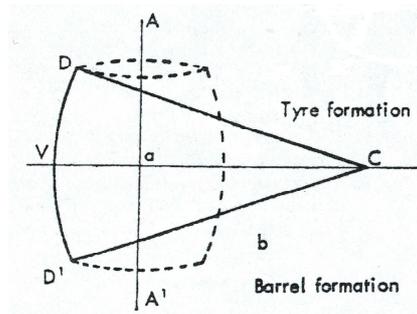
Esistono tre tipi di superfici toroidali:

- *Tyre formation*



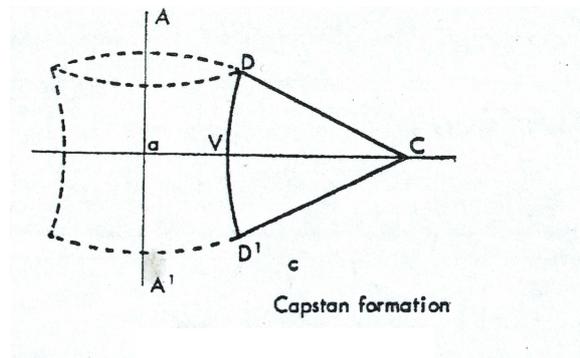
$$CV = r_c \quad \text{e} \quad aV = r_b$$

- *Barrel formation*



$$aV = r_c \quad e \quad CV = r_b$$

- *Capstan formation*



$$aV = r_b \quad e \quad CV = r_c$$

Secondo convenzione la lente descritta nell'esempio precedente si indica con questa scrittura:

$$\frac{-6.00DCx0^{\circ}/+8.00DCx0^{\circ}}{-6.00DS}$$

Al numeratore si scrive la front surface, al denominatore la back surface; in genere, quando ci sono più poteri diottrici, si scrive prima la base curve .

$$\frac{\text{Base curve/Cross curve}}{\text{Sphere curve}}$$

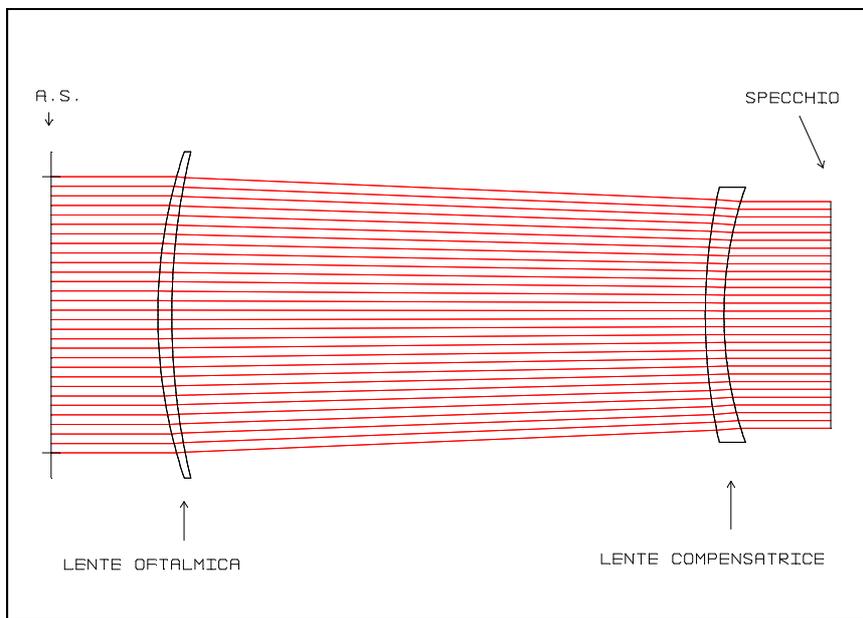
# Capitolo 2

## 2.1 Descrizione del sistema

L'idea di base della costruzione del sistema ottico è quella di un approccio, come dice il titolo della tesi, attraverso il metodo “ *null lens* “ coadiuvato dall'*ottica adattiva*.

In pratica, scelta una lente oftalmica, si pongono in successione, a distanze opportune, una lente detta *compensatrice* e uno *specchio adattivo* inizialmente piano e indeformato.

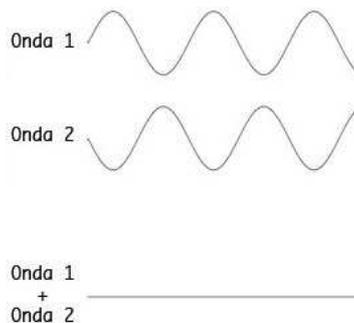
E' importante per l'ottenimento di risultati accettabili che le due lenti costituiscano insieme un *sistema afocale*: in questo modo un fascio collimato entrante sarà collimato anche in uscita.



Suddetto fascio, attraversate le due lenti, viene riflesso dallo specchio e ripercorre, almeno in teoria, lo stesso cammino ottico, riattraversando le lenti.

A questo punto viene fatto un *interferogramma* tra il fascio sorgente e quello riflesso e lo si valuta.

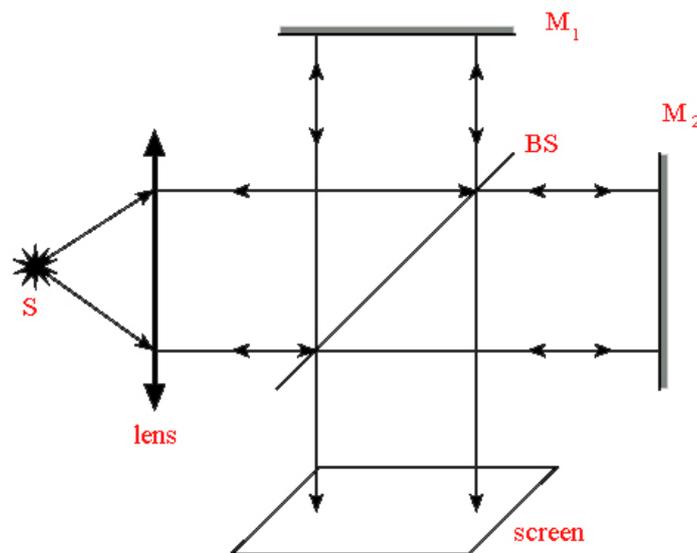
Se due raggi, uno del fascio sorgente ed il suo corrispondente del fascio riflesso, giungono sul piano d'osservazione con lo stesso OPL, vista l'opposizione di fase dovuta alla riflessione, daranno interferenza distruttiva: estendendo il concetto ad ogni raggio, l'interferogramma sarà nullo.



Se invece l'OPL non è lo stesso avremo un'interferenza costruttiva e compariranno delle frange circolari a formare la figura di interferenza.



Si utilizza un interferometro di Twyman-Green che si differenzia da quello di Michelson nell'illuminazione: mentre il secondo funziona con una sorgente estesa di luce, il primo funziona con una sorgente puntiforme monocromatica posta sul fuoco di una lente che serve per generare un fascio con fronti d'onda paralleli.



Il fascio incide su un Beam-Splitter ( BS ) che lo divide in due componenti ortogonali: una, quella verticale, incontra lo specchio  $M_1$ , viene riflessa e si dirige verso lo schermo; l'altra, quella orizzontale, incontra lo specchio  $M_2$ , viene riflessa e riportata anch'essa verso lo schermo.

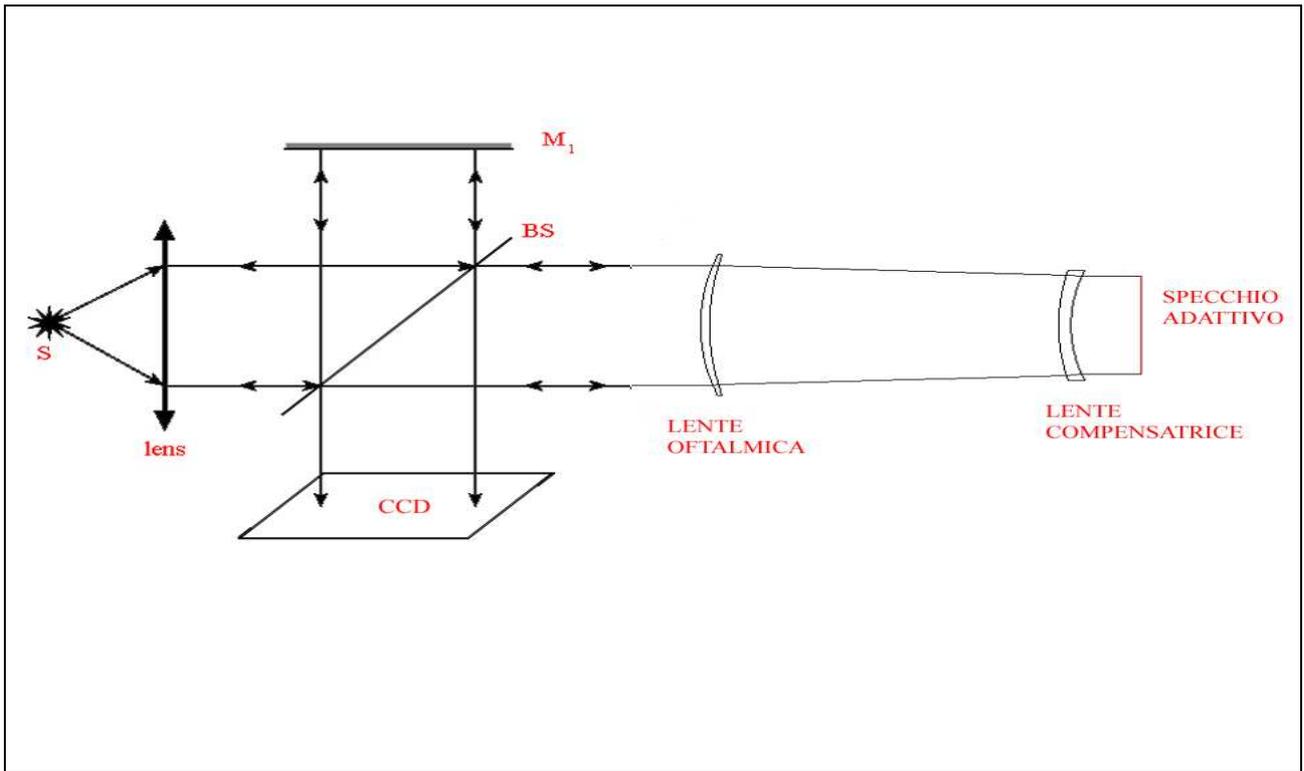
Se i due specchi sono ortogonali e il Beam-Splitter forma un angolo di  $45^\circ$  con le normali di ogni specchio, come nella figura precedente, la figura d'interferenza che si osserva è analoga a quella prodotta da un film sottile d'aria di spessore  $d = d_2 - d_1$ .

Quando  $d = m\lambda/2$  abbiamo interferenza completamente distruttiva; con  $d = (2m+1)\lambda/4$  l'interferenza è completamente costruttiva.

Rispetto a questa configurazione il sistema null lens viene collocato al posto dello specchio  $M_2$  permettendo di effettuare l'interferogramma voluto.

Al posto dello schermo viene posizionato un rivelatore CCD grazie al quale è possibile visualizzare le frange su un monitor.

La figura seguente mostra il sistema nella sua completezza.



Le frange sono perciò un'indicazione della differenza del cammino ottico e della qualità della compensazione: più frange significano una compensazione scadente.

Deformando lo specchio adattivo è possibile migliorare la compensazione fino ad annullare le differenze di cammino residue, qualora non siano eccessivamente grandi.

Si può dire che lo strumento è dotato di una doppia potenzialità di compensazione: una rappresentata dalla lente compensatrice e l'altra dallo specchio adattivo.

Data la seguente relazione tra i fronti d'onda:

$$W_{\text{oftalmica}}(x, y) = W_{\text{compensatrice}}(x, y) + W_{\text{specchio}}(x, y) + \varepsilon$$

è possibile conoscere puntualmente il fronte d'onda della lente oftalmica a meno di un  $\varepsilon$ , essendo noti gli altri due fronti.

Questo  $\varepsilon$  sarà tanto più piccolo quanto più l'interferogramma sarà prossimo ad esser nullo.

Se l'OPD <  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  può esser considerato nullo ed è possibile quantificare con precisione le aberrazioni del fronte d'onda stesso.

## 2.2 Simulazione tramite software

Il sistema è stato simulato con un programma chiamato Zemax.

È un programma atto a modellizzare, analizzare e disegnare un sistema ottico.

Attraverso una barra degli strumenti è possibile visualizzare delle finestre di dialogo tra le quali:

- *Lens Data Editor*: serve per impostare distanze, raggi di curvatura, tipo delle superfici che costituiscono un sistema e per istruire il programma sul percorso che fanno i raggi.
- *System*: serve per impostare i parametri relativi alla sorgente quali lunghezza d'onda, aperture ecc...
- *Catalogs*: contiene liste di cataloghi di vetri, con le loro caratteristiche tecniche, e di ottiche contenenti lenti presenti in commercio di varie focali, dimensioni, tipo.
- *Analysis*: è un menù per la scelta di numerose funzioni con relativi grafici, qualora disponibili: mappaggio dei fronti d'onda, analisi delle aberrazioni, analisi dell'immagine, interferogramma, OPD ecc...
- *Layout*: è una sezione per la ricostruzione 2D, 3D e modello solido del sistema ottico.
- *Optimization*: sezione che consente di ottimizzare una funzione di merito grazie ad un algoritmo basato sul metodo dei minimi quadrati; agisce su variabili definite dall'utente che possono essere i parametri stessi del sistema ottico scritti nel lens data editor. La funzione di merito è fornita di una lista di parametri aggiuntivi che la rendono personalizzabile a seconda delle esigenze.

Vengono riportate a seguire alcune simulazioni significative.

Viene adottata la convenzione spiegata nei capitoli precedenti riguardo ai segni dei raggi di curvatura.

In ogni simulazione:

$\lambda = 632.8 \text{ nm}$

**A.S. (mm) = Diametro lente oftalmica – 10 mm**

**L'A.S. precede di 20 mm la prima lente.**

Il programma nell'eseguire l'interferogramma lavora male con raggi paralleli quindi è stata inserita una *lente parassiale* ( $f = 100\text{mm}$ ) per focalizzare il fascio: **tale lente è solo un artificio**, non compare nella realtà.

La *funzione di merito* utilizzata per ottimizzare alcuni elementi del sistema (distanze, raggi di curvatura ecc...) viene computata sul fronte d'onda, con riferimento al centroide, al fine di minimizzare il PTV (Peak to Valley) attraverso il "pupil integration method" a quadratura gaussiana.

Per ogni simulazione le figure mostrano un layout 3D, un layout 2D, un grafico con l'OPD e il grafico con l'interferogramma.

Sono state fatte simulazioni su queste tre lenti oftalmiche, scelte sferiche per semplicità, delle quali vengono riportate caratteristiche, un'immagine reale ed una virtuale 2D realizzata con Zemax:

## 1) LENTE 1

### Faccia convessa

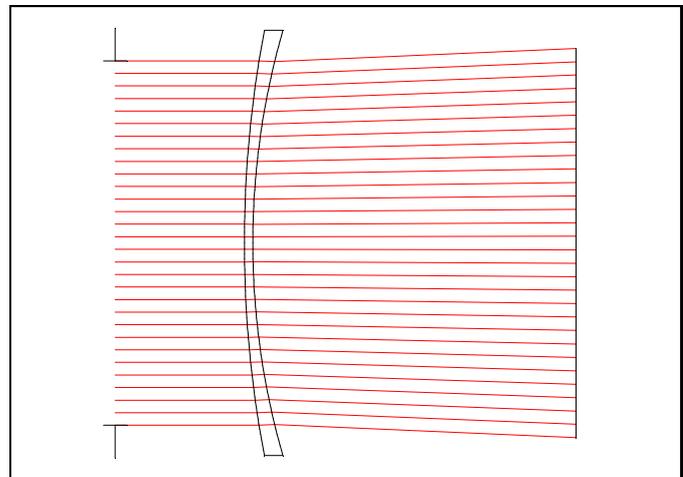
Nominal base (DS)	3.00
Raggio di curvatura (mm)	200.33

### Faccia concava

Nominal base (DS)	4.50
Raggio di curvatura (mm)	133.56

### Generale

Diottrie totali (DS)	-1.50
Spessore al centro (mm)	1.30
Diametro (mm)	70
Nd	1.601
Numero di Abbe	42
Materiale	1.601 hi-index,organic



## 2) LENTE 2

### Faccia convessa

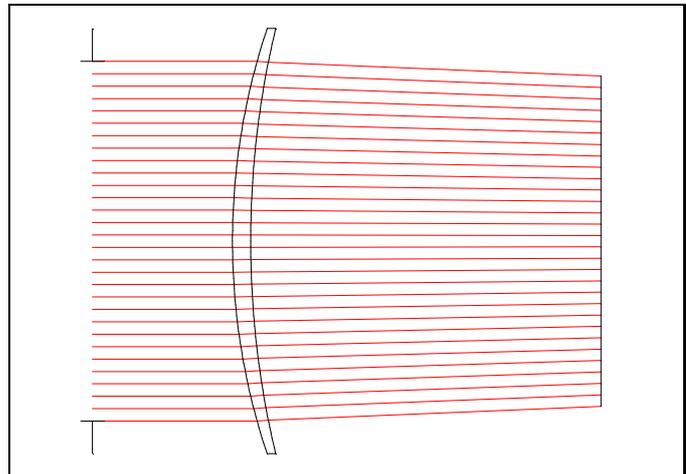
Nominal base (DS)	5.50
Raggio di curvatura (mm)	109.27

### Faccia concava

Nominal base (DS)	4.00
Raggio di curvatura (mm)	150.25

### Generale

Diottrie totali (DS)	+1.50
Spessore al centro (mm)	2.60
Diametro (mm)	65
Nd	1.601
Numero di Abbe	42
Materiale	1.601 hi-index,organic



### 3) LENTE 3

#### Faccia convessa

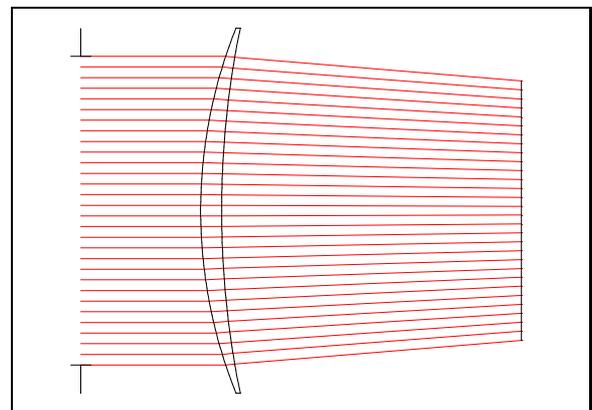
Nominal base (DS)	6.50
Raggio di curvatura (mm)	92.46

#### Faccia concava

Nominal base (DS)	3.50
Raggio di curvatura (mm)	171.72

#### Generale

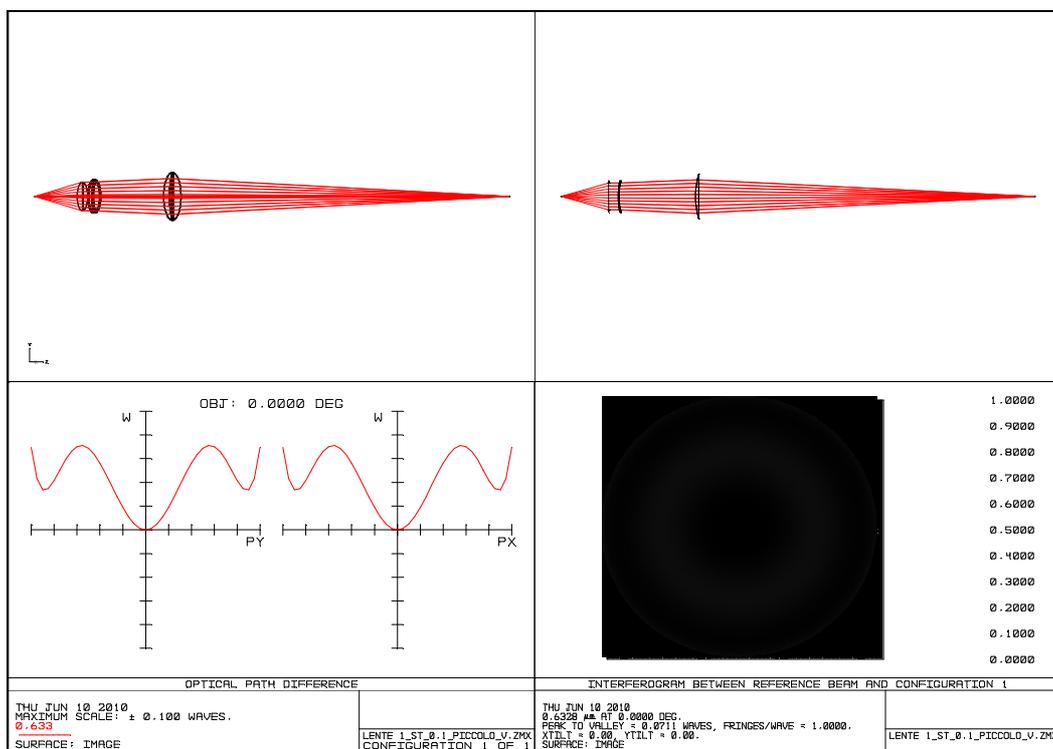
Diottrie totali (DS)	+3.00
Spessore al centro (mm)	3.50
Diametro (mm)	65
Nd	1.601
Numero di Abbe	42
Materiale	1.601 hi-index,organic



## 2.2.1 Simulazione A

E' stato sottolineato come tanto migliore sia la compensazione tanto minore sarà l'“intervento“ dello specchio adattivo. Il programma ha ottimizzato i raggi di curvatura della lente compensatrice, la distanza delle due lenti e la distanza dello specchio. In pratica ha costruito una lente compensatrice su misura. Si può constatare come in questo caso non ci sia bisogno di uno specchio adattivo ma ne basti uno normale. Per questo motivo il costo del sistema scende ma sorgono due inconvenienti: poiché la lente è su misura c'è un costo aggiuntivo, si perde in automatismo e rapidità di test.

### LENTE 1



Parametri lente compensatrice	
R <sub>1</sub> (mm)	192.055837
R <sub>2</sub> (mm)	7280.317427
Spessore (mm)	6.500000
Diametro (mm)	100.000000
Focale (mm)	382.842615
Catalogo : Sigla vetro	SCHOTT : BK7

Parametri sistema	
Distanza lenti (mm)	160.479355
Distanza Specchio (mm)	703.659898
Tipo di superficie dello specchio	STANDARD
Diametro dello specchio (mm)	8.779210*10 <sup>-3</sup>
Raggio di curvatura dello specchio (mm)	INFINITO

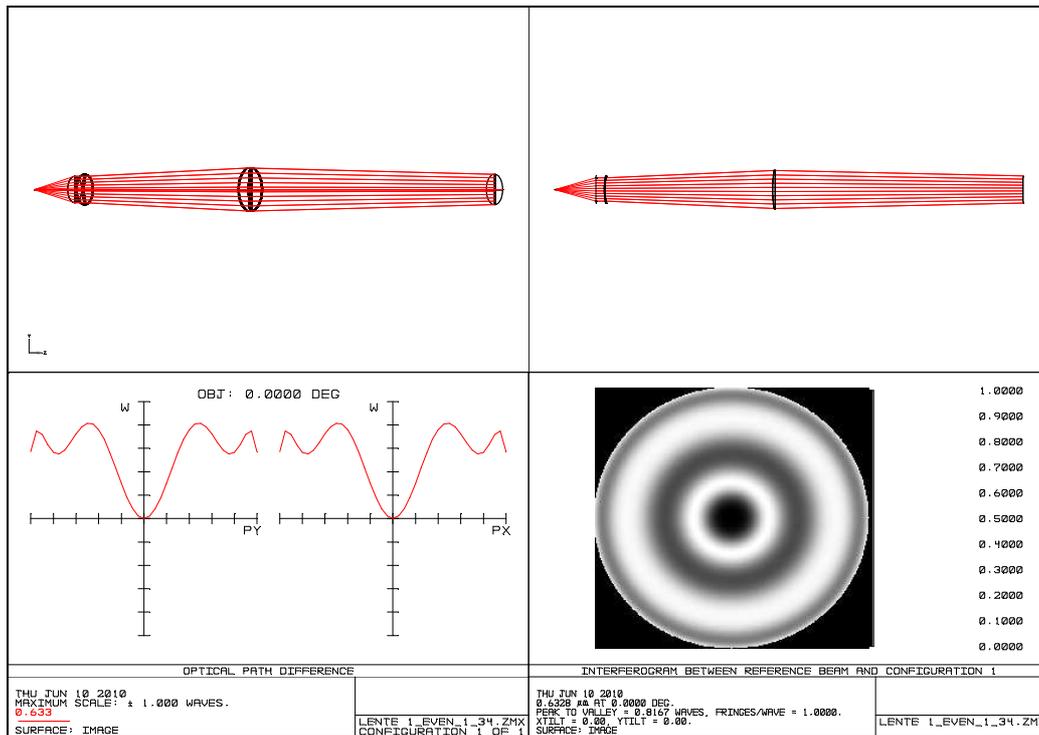
<b>Risultati</b>	
OPD (maximum scale)	$\pm 0.100\lambda$
PTV	$0.0711\lambda$

Il software potrebbe simulare, come sottolineato in precedenza, una lente compensatrice adatta per ogni lente oftalmica da testare. Questo tuttavia non è il senso del sistema, *non si vuole una corrispondenza biunivoca tra lente oftalmica e lente compensatrice*: la condizione ideale sarebbe quella di possedere una batteria di lenti compensatrici con cui si possa effettuare tutti i test necessari. Ecco perché è necessario individuare nei cataloghi le lenti compensatrici: è seguendo questa linea di pensiero che sono state fatte le simulazioni successive.

## 2.2.2 Simulazione B

Il programma ha ottimizzato in prima battuta solo la distanza tra le lenti e la distanza dello specchio; la lente compensatrice è stata scelta tra quelle presenti nei cataloghi del programma. In seconda battuta si è fatto ottimizzare anche lo specchio adattivo.

### LENTE 1

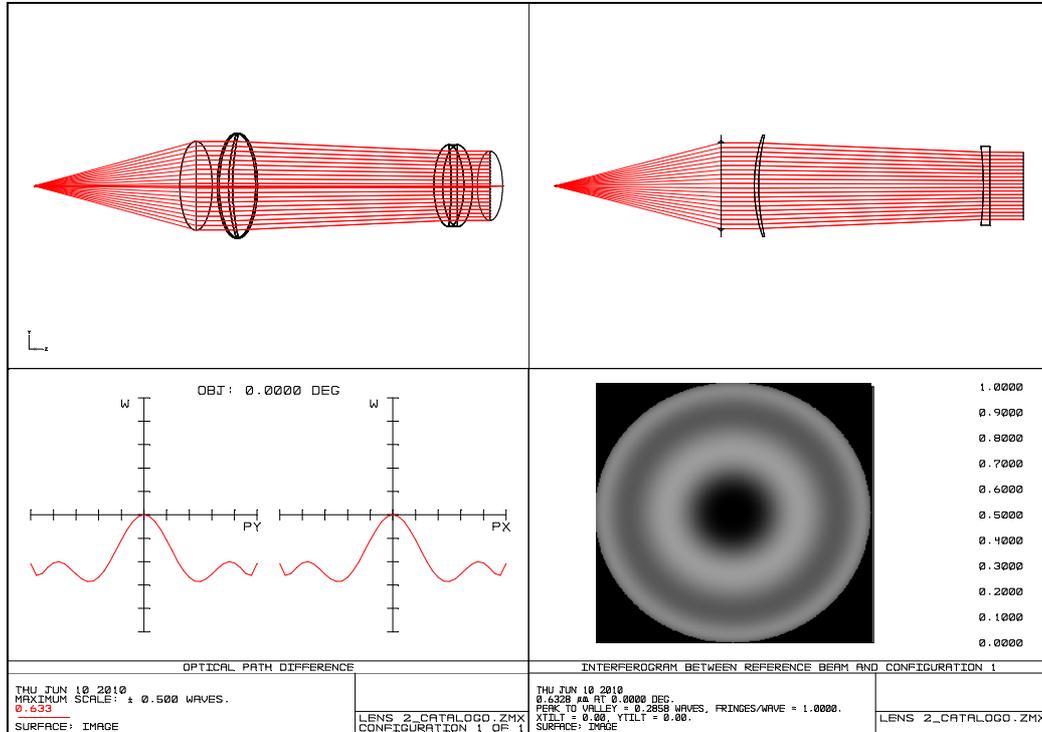


Parametri lente compensatrice	
R <sub>1</sub> (mm)	363.300000
R <sub>2</sub> (mm)	INFINITO
Spessore (mm)	6.500000
Diametro (mm)	100.000000
Focale (mm)	705.314732
Catalogo : Sigla vetro	SCHOTT : BK7
Catalogo : Sigla lente	OPTOSIGMA : 011-4785

Parametri sistema	
Distanza lenti (mm)	406.541451
Distanza Specchio (mm)	600.000000
Tipo di superficie dello specchio	EVEN ASPHERE
Diametro dello specchio (mm)	69.549466
Raggio di curvatura dello specchio (mm)	INFINITO
Deformazione II ordine (mm)	3.474393*10 <sup>-4</sup>
Deformazione IV ordine (mm)	1.045181*10 <sup>-9</sup>
Deformazione VI ordine (mm)	-7.960140*10 <sup>-12</sup>
Deformazione VIII ordine (mm)	3.079813*10 <sup>-15</sup>

Risultati	
OPD (maximum scale)	$\pm 1.000\lambda$
PTV	$0.8167\lambda$

## LENTE 2

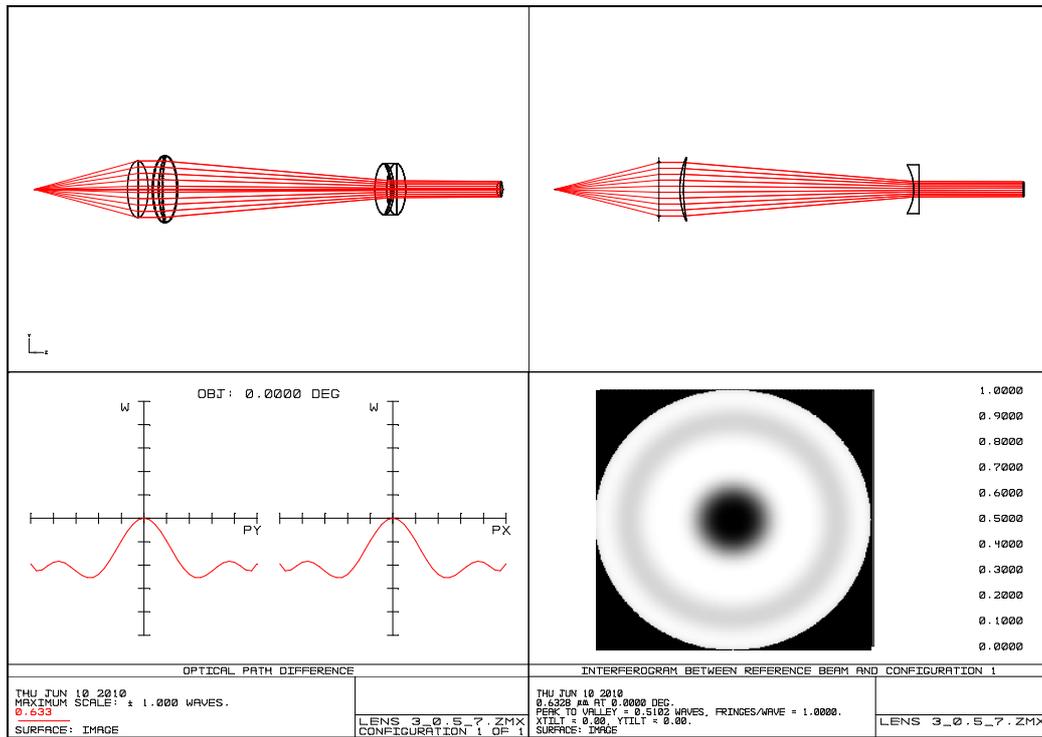


Parametri lente compensatrice	
R <sub>1</sub> (mm)	-229.230000
R <sub>2</sub> (mm)	INFINITO
Spessore (mm)	4.000000
Diametro (mm)	50.800000
Focale (mm)	-501.577696
Catalogo : Sigla vetro	INFRARED : F_SILICA
Catalogo : Sigla lente	EDMUND : 8075

Parametri sistema	
Distanza lenti (mm)	135.065799
Distanza Specchio (mm)	20.000000
Tipo di superficie dello specchio	EVEN ASPHERE
Diametro dello specchio (mm)	43.042684
Raggio di curvatura dello specchio (mm)	INFINITO
Deformazione II ordine (mm)	$-2.092393 \cdot 10^{-5}$
Deformazione IV ordine (mm)	$2.765983 \cdot 10^{-8}$
Deformazione VI ordine (mm)	$5.016422 \cdot 10^{-11}$
Deformazione VIII ordine (mm)	$-4.474203 \cdot 10^{-14}$

Risultati	
OPD (maximum scale)	$\pm 0.500\lambda$
PTV	$0.2858\lambda$

### LENTE 3



#### Parametri lente compensatrice

$R_1$ (mm)	-51.680000
$R_2$ (mm)	INFINITO
Spessore (mm)	5.000000
Diametro (mm)	50.000000
Focale (mm)	-100.332137
Catalogo : Sigla vetro	SCHOTT : BK7
Catalogo : Sigla lente	EDMUND : 45037

#### Parametri sistema

Distanza lenti (mm)	220.856312
Distanza Specchio (mm)	100.000000
Tipo di superficie dello specchio	EVEN ASPHERE
Diametro dello specchio (mm)	15.215594
Raggio di curvatura dello specchio (mm)	-6922.757009
Deformazione II ordine (mm)	$-7.439653 \cdot 10^{-5}$
Deformazione IV ordine (mm)	$1.472431 \cdot 10^{-6}$
Deformazione VI ordine (mm)	$1.972792 \cdot 10^{-8}$
Deformazione VIII ordine (mm)	$1.273376 \cdot 10^{-10}$

#### Risultati

OPD (maximum scale)	$\pm 1.000\lambda$
PTV	$0.5102\lambda$

E' opportuno evidenziare come sia difficile trovare una lente compensatrice per la lente 1: quest'ultima essendo divergente necessita di una lente positiva con diametro maggiore del proprio e quindi maggiore di 70 mm, raro nei cataloghi. Inoltre è immediato osservare come, appena si utilizza una lente non su misura, sia necessaria e piuttosto modesta la deformazione dello specchio.

Il vantaggio risiede nella certezza dell'esistenza della lente. Infatti il programma, richiesto gli l'ottimizzazione della lente, potrebbe dare risultati poco realistici proponendo raggi di curvatura impossibili.

Il tipo di superficie dello specchio può essere scelta diversa: Odd Asphere, Polinomial. Sono tutte superfici che permettono deformazioni ai vari ordini: più ordini si utilizzano migliore è il risultato, più accurata e complessa è la deformazione. Una superficie Even Asphere ha dato, nei casi sopra considerati, risultati più soddisfacenti.

Se il fascio esce parallelo dalla coppia di lenti la distanza dello specchio è ininfluenza sul risultato: in questo caso conviene posizionarlo vicino per favorire la compattezza del sistema.

Se il fascio non esce parallelo la distanza assume un'importanza notevole tanto da doverla ottimizzare insieme agli altri parametri.

# Capitolo 3

## 3.1 Esperimento e messa su banco

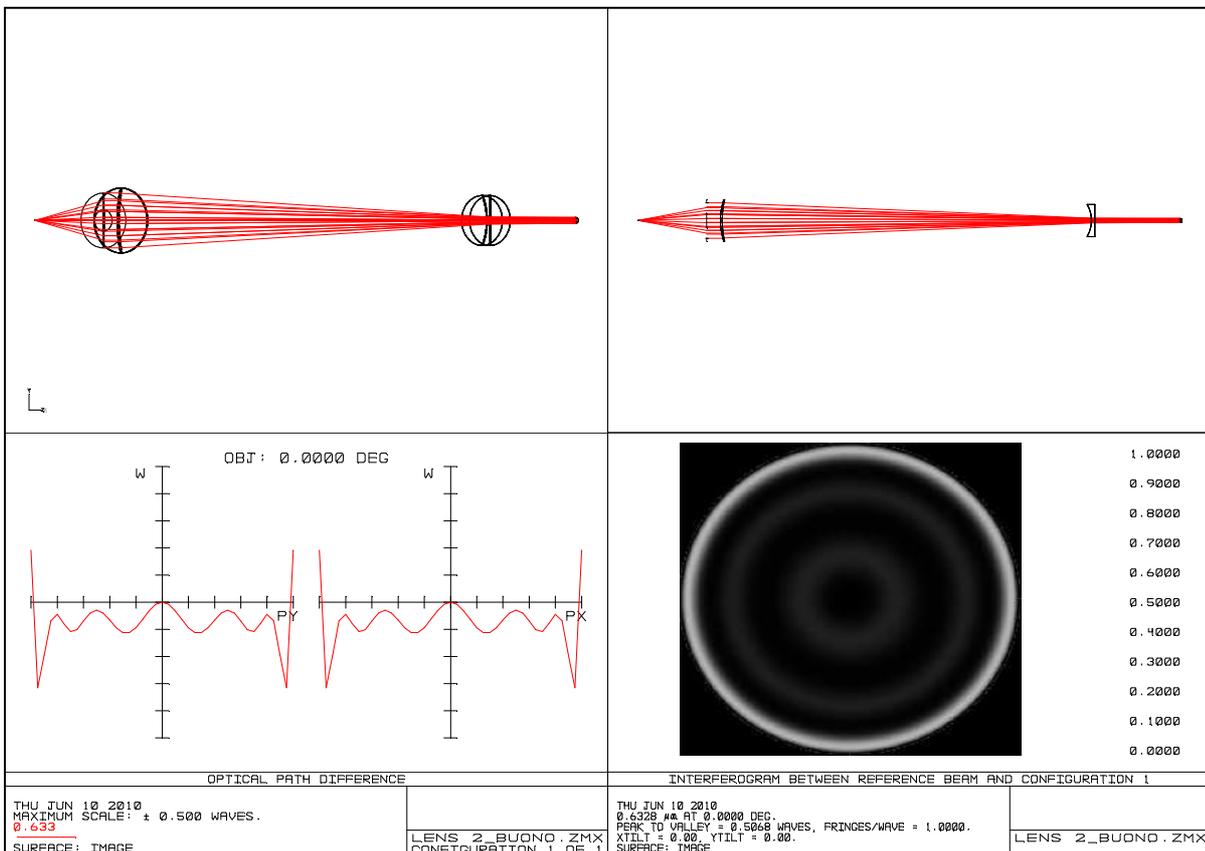
Nel procedere alla concretizzazione delle simulazioni sorgono delle complicazioni. Quando dalla teoria si passa alla pratica bisogna sempre fare i conti con le “forze a disposizione” e con l’obiettivo da raggiungere:

- si vuole una lente compensatrice da catalogo per non dover costruire ogni volta una lente su misura.
- si vuole un interferogramma il più possibile nullo:  $l'OPD < \lambda$ .
- esistono dei vincoli opto-meccanici dello specchio adattivo:

Diametro (mm)	11
Range di curvatura (raggio ,mm)	$-\infty < R < -3000$ o $3000 < R < +\infty$
Range di deformazione	$0 < def < 10\mu m$

- poiché questo è uno strumento di test, per garantire una certa compattezza della struttura non si accetta una lunghezza totale maggiore di 1000 mm.

Nessuna simulazione del capitolo precedente sta dentro ai limiti; ne viene mostrata in seguito una opportuna e realizzata. Valgono tutte le condizioni delle precedenti simulazioni in aggiunta a quelle su scritte. La lente oftalmica utilizzata è la LENTE 2.

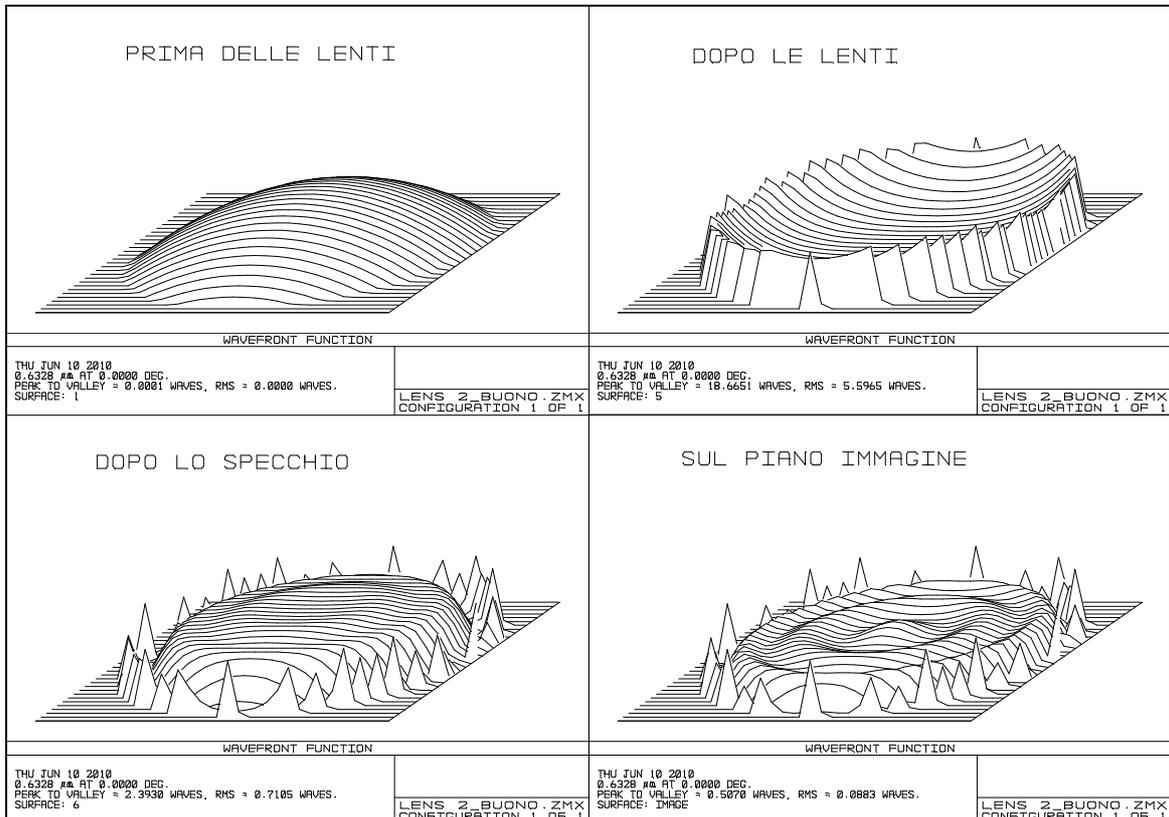


Parametri lente compensatrice	
R <sub>1</sub> (mm)	-51.680000
R <sub>2</sub> (mm)	INFINITO
Spessore (mm)	5.000000
Diametro (mm)	50.000000
Focale (mm)	-100.332137
Catalogo : Sigla vetro	SCHOTT : BK7
Catalogo : Sigla lente	EDMUND : 45037

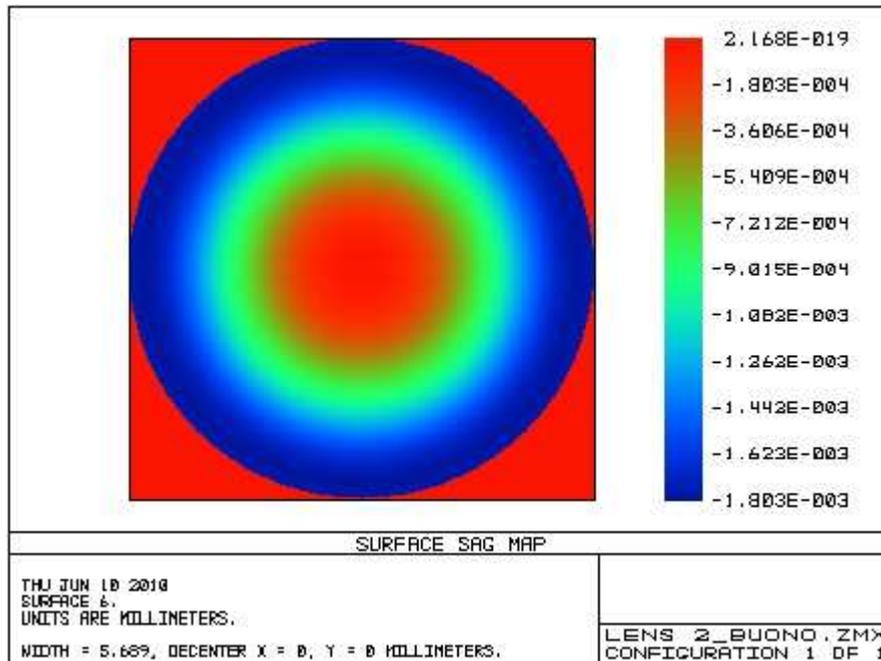
Parametri sistema	
Distanza lenti (mm)	538.000000
Distanza Specchio (mm)	125.997490
Tipo di superficie dello specchio	EVEN ASPHERE
Diametro dello specchio (mm)	5.689340
Raggio di curvatura dello specchio (mm)	-3100.000000
Deformazione II ordine (mm)	-2.065938*10 <sup>-4</sup>
Deformazione IV ordine (mm)	1.675466*10 <sup>-7</sup>
Deformazione VI ordine (mm)	1.860417*10 <sup>-6</sup>
Deformazione VIII ordine (mm)	5.312959*10 <sup>-8</sup>

Risultati	
OPD (maximum scale)	± 0.500λ
PTV	0.5070λ

Si riportano in seguito le immagini relative al fronte d'onda.



Il grafico seguente in “ false color” riporta in millimetri la sagoma del fronte d’onda valutata a livello dello specchio. I numeri sulla destra danno l’indicazione sulla deformazione dello specchio adattivo.



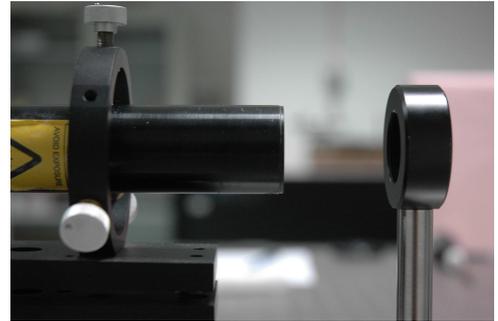
- ✓ **Lunghezza totale = 790.6 mm**
- ✓ **Diametro dello specchio = 5.689340 mm**
- ✓ **Raggio di curvatura dello specchio = -3100mm**
- ✓ **Deformazione max -1.803μm**
- ✓ **OPD = ± 0.500λ**

E' opportuno sottolineare come la lente compensatrice utilizzata in questa simulazione sia la stessa della simulazione B, lente 3.

Quindi *con una lente compensatrice si possono testare più lenti oftalmiche* a patto di variare la deformazione dell'ottica adattiva.

L'effettiva messa su banco ha bisogno di alcuni ulteriori accorgimenti: di cosa c'è bisogno?

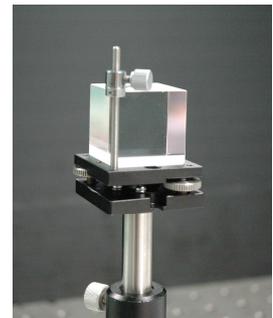
Una sorgente: il *laser*.  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  , nel rosso.  
Nell'immagine a lato si può vedere anche un filtro  
che serve per diminuire la classe del laser.  
In sostanza ne attenua l'intensità.



Un *beam expander*: viene utilizzato al posto della lente,  
serve per espandere il fascio e generare fronti d'onda  
paralleli.



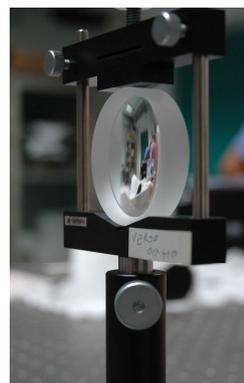
Un *beam splitter*: serve per generare due componenti  
del fascio ortogonali tra loro. Quello utilizzato ha  
lato 3 cm: questo comporta una riduzione dell'apertura  
del sistema rispetto a quella delle simulazioni.



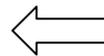
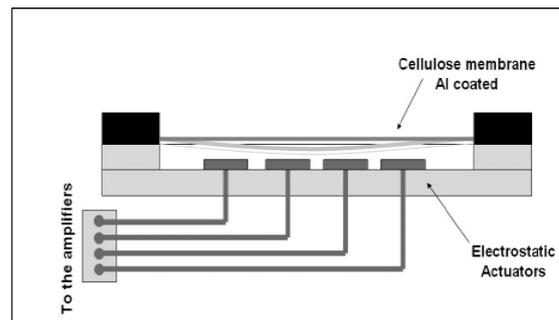
Lo *specchio* del braccio verticale dell'interferometro.



La *lente oftalmica* e quella *compensatrice*.



Lo *specchio adattivo*: è formato da una membrana sottile riflettente che può esser deformata da degli attuatori elettrostatici comandati da un circuito elettronico opportuno. Tramite un software, ad esempio Matlab, si possono dare le istruzioni necessarie per muovere gli attuatori e conferire la deformazione desiderata. E' possibile interagire con ogni singolo attuttore in modo da effettuare deformazioni localizzate.



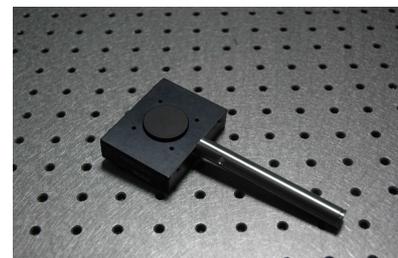
Facendo variare un indice tra 0 e 1 è possibile assegnare allo specchio diversi raggi di curvatura secondo la seguente relazione:

$$R = \frac{r^2}{2d}$$

dove  $r$  è il raggio dimensionale e  $d$  è lo sbalzo massimo che subisce lo specchio;  $d$  è in relazione con il range di variazione secondo una legge quadratica:

$$d = ax^2 \quad \Rightarrow \quad R = \frac{r^2}{2ax^2} \quad (\text{con } a \text{ costante reale})$$

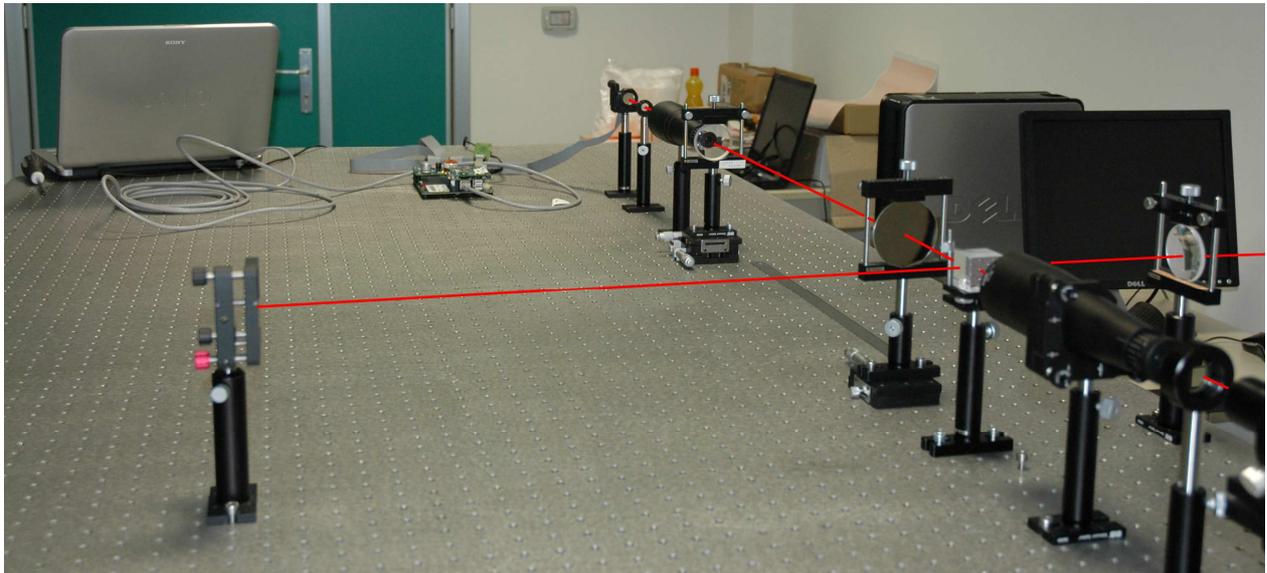
Il *rivelatore CCD*: è un dispositivo in silicio organizzato in modo da formare una matrice di elementi fotosensibili in cui accumulare cariche, prodotte dalla radiazione incidente, e leggerne il contenuto successivamente. La struttura di un elemento base del CCD è quella di una capacità MOS.



Impegnativo ma indispensabile per ottenere dei risultati è l' allineamento di ogni componente con la sorgente: bisogna controllare che il fascio non subisca dei tilt indesiderati. Inoltre si deve prestare

attenzione alle retroriflessioni: è necessario che non interferiscano , per quanto possibile, col fascio principale.

E' riportata in seguito un'immagine del sistema completo su banco.



Il beam expander è la soluzione migliore per ottenere un fascio espanso e collimato ma, essendo composto da due lenti, introduce delle aberrazioni aggiuntive.

Al posto del CCD è stata impiegata una lente: in questo modo è possibile visualizzare le frange su un foglio di carta o su un muro bianco. E' chiaro come suddetta lente aggiunga ulteriori aberrazioni.

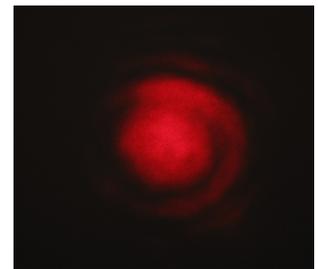
Vengono riportate in seguito alcune immagini delle frange a seconda dei raggi di curvatura dello specchio. La qualità non elevata delle immagini dipende dal fatto che l'ottica adattiva non aveva una superficie ottimale e dal fatto che i fenomeni d'interferenza siano difficili da stabilizzare: bastano infatti piccole vibrazioni, fluttuazioni di temperatura per avere frange in movimento.



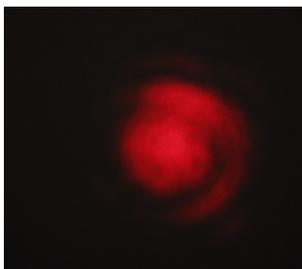
**R =  $\infty$**



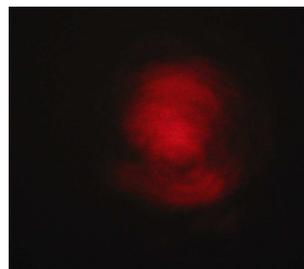
**R = 75.21 m**



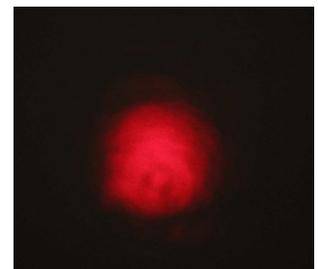
**R = 37.6 m**



**R = 25.07 m**



**R = 18.8 m**



**R = 15.04 m**

Si può vedere come diminuendo il raggio di curvatura e cioè aumentando la curvatura dello specchio si riducano le frange fino a scomparire.

# Conclusioni

In riferimento al lavoro svolto è opportuno fare delle considerazioni visti i risultati ottenuti.

## *Lenti*

In primis, nella scelta della distanza tra le due lenti, per costruire un sistema afocale secondo la teoria si può agire in due modi: si possono usare due lenti con focali opposte a distanza opportuna oppure due lenti con focali concordi, lasciando “cadere” il fuoco in mezzo alle due, sempre a distanza opportuna.

I risultati migliori sono stati ottenuti fruendo della prima soluzione.

In questo caso si è visto inoltre che è più opportuno che le focali, oltre ad esser discordi, abbiano valori assoluti vicini. Infatti, data una lente oftalmica positiva, se si sceglie di porre distante la lente compensatrice il disturbo dell'aberrazione sferica è maggiore. Nel caso di una lente oftalmica negativa il problema è un altro: più aumenta la distanza e più il diametro della lente compensatrice deve crescere con la conseguente difficoltà di trovare lenti da catalogo con quelle caratteristiche. Per ovviare a questo problema è possibile mettere prima la lente compensatrice e poi quella oftalmica, aggiustando opportunamente l'apertura del sistema.

Non è stata trovata alcuna regola riguardo il tipo di lente: dato ad esempio un menisco la lente compensatrice non deve essere obbligatoriamente un menisco; l'importante è mantenere la ‘regola’ sulle focali.

## *Specchio*

Qualora fosse possibile, è meglio avere uno specchio adattivo con un diametro grande: considerando che le lenti oftalmiche hanno in genere diametri non superiori ai 75 mm è opportuno possedere uno specchio di quelle dimensioni. Distinguiamo i due casi: nel caso di lente negativa, per ovvie ragioni, il diametro dello specchio dovrà esser un po' più grande di quello della lente, tanto da riuscire a contenere il fascio uscente dalla lente compensatrice (vedi simulazione B, lente 2); nel caso di lente positiva, tenuto conto del discorso sulla distanza, lo specchio deve esser tale da contenere il fascio: si possono distanziare le lenti per avere uno specchio piccolo ma si introducono più aberrazioni.

Inoltre, a meno di non costruire due sistemi, uno per lenti positive e uno per lenti negative, con uno specchio grande si prendono “due piccioni con una fava”. Questo influisce sul costo: dimensioni e costo sono direttamente proporzionali.

## *Sistema*

E' sconsigliato l'uso di lenti aggiuntive per ridurre il fascio in modo da poter usare uno specchio più piccolo perché a questo beneficio corrisponde un aumento delle aberrazioni.

A seguire, tanto è migliore la compensazione tanto meno si dovrà intervenire con l'ottica adattiva come veniva mostrato dalla prima simulazione (vedi simulazione A).

E' il caso di prestare attenzione alle distanze tra le varie componenti onde evitare di costruire un sistema troppo ingombrante, a maggior ragione se si vuole renderlo ‘portatile’.

Da ricordare, anche se quasi superfluo, che è opportuno eseguire il test con una lunghezza d'onda nello spettro del visibile preferibilmente scegliendone una a cui l'occhio è più sensibile.

### *Messa su banco*

Se si vogliono avere risultati sperimentali coerenti con le simulazioni si deve essere molto rigorosi nella fase di set up. Prerequisito fondamentale è la coerenza della sorgente. L' allineamento è il secondo step da realizzare per non avere imprecisioni successive che darebbero risultati fasulli.

Bisogna assicurarsi di possedere componenti di qualità elevata: sarebbe vano testare una lente oftalmica usando una lente compensatrice o un'ottica adattiva non ottimali.

Come prima cosa è opportuno realizzare un interferometro preciso e in seconda battuta posizionare le componenti del sistema null lens facendo attenzione ad essere meticolosi nelle distanze.

Essendo un lavoro di interferometria la sensibilità alle piccole vibrazioni, alla temperatura è elevata.

Con queste precauzioni è possibile realizzare un sistema di test efficace , efficiente e versatile attraverso il quale si possono testare le lenti oftalmiche utilizzando un set di lenti compensatrici e l'ottica adattiva.

# Bibliografia

William F. Ganong, *Fisiologia medica*, (11 edizione italiana) a cura di M.Midrio-A.De Lorenzo-B.De Luca-S. Ferraina, ed. PICCIN.

P.Mazzoldi, M.Nigro, C.Voci, *Elementi di fisica: onde*, ed. EDISES.

M.Jalie , *The priciples of ophtalmic lenses*, fourth edition, the Association of British dispensing Opticians.

Virendra N. Mahajan, *Aberration theory made simple*, Donald C. O'Shea, Series Editor Georgia Institute of Tecnology, a publication of SPIE.

<http://www.oculistanet.it/ottica-fisiop/ottica-fisiop-6.htm>

[http://www.opticampus.com/cecourse.php?url=lens\\_design/](http://www.opticampus.com/cecourse.php?url=lens_design/)