

Athermale Korrektur optischer Systeme

Eckhard Langenbach
FISBA OPTIK AG, St. Gallen
mailto:eckhard.langenbach@fisba.ch

Optische Systeme werden häufig in großen Temperaturbereichen eingesetzt, und dabei können sich die Abbildungseigenschaften merklich ändern. Für jede Fläche des Systems lässt sich der Einfluss der Brechzahländerungen und der thermischen Ausdehnung auf die Fokusslage bestimmen. Dies hilft bei der Optimierung temperaturstabiler Optiken.

1 Einleitung

Werden optische Systeme in großen Temperaturbereichen eingesetzt, können sich Brechzahlen, Linsen-Radien und -Abstände so stark ändern, dass die Abbildungsleistung merklich abnimmt. Dominierende Folge der Temperaturänderung ist eine Defokussierung des Systems. Um dies zu vermeiden, korrigiert man zusätzlich zu den üblichen Bildfehlern auch noch die Ableitung der Fokusslage nach der Temperatur. Die hier vorgestellte paraxiale Näherung erlaubt dabei einen genauen Einblick, wie sich Brechzahl-, Radien- und Abstandsänderungen auf die Fokusslage auswirken. Dies hilft bei der Wahl geeigneter Linsen- und Fassungsmaterialien.

2 Vergleich zur Farbkorrektur

Die Vorgehensweise entspricht derjenigen bei der Achromatisierung, die eine Optik für mehrere Wellenlängen korrigiert. Dabei ändert sich die Brechzahl der Linsenmaterialien mit der Wellenlänge, und dadurch wirkt sich jede Linsenoberfläche auf die Farbabhängigkeit der Fokusslage (Farblängsfehler) und die Bildgröße (Farbquerfehler) aus. Die Linsen-Radien und -Materialien werden bei der Farbkorrektur so gewählt, dass sich die Auswirkungen der Flächen auf die Farbfehler kompensieren.

Bei der Athermalisierung kann man sehr ähnlich vorgehen, aber zusätzlich zur Brechzahländerung mit der Temperatur variieren jetzt wegen der Temperatureausdehnung auch noch die Krümmungsradien, Dicken und Abstände der optischen Elemente. Eine damit eventuell verbundene geringe Bildgrößenänderung (Querfehler) ist hier aber weniger gravierend, da – im Unterschied zu den Wellenlängen bei der Farbf Fehlerkorrektur – das System nicht bei mehreren Temperaturen gleichzeitig verwendet wird.

Während die Farbf Fehlerkorrektur von allen Optikrechenprogrammen sehr gut unterstützt wird, ist dies bei der Athermalisierung zumindest erheblich umständlicher. Üblicherweise optimiert man die Bildgüte des Systems gleichzeitig für mehrere Konfigurationen, die zu unterschiedlichen Temperaturen ge-

hören. Die Unterschiede der Konfigurationen werden dabei mit Skalierungen („pickups“) oder mit Zwangsbedingungen („constraints“) modelliert. Bei dieser Vorgehensweise fehlt der Überblick, bei welcher Fläche Fehler entstehen und wo sie kompensiert werden.

3 Paraxiale Rechnung

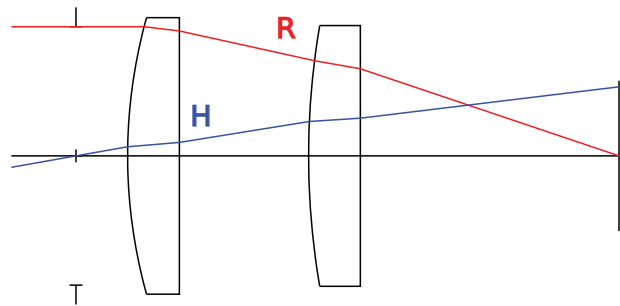


Abbildung 1 Optisches System mit Randstrahl **R** und Hauptstrahl **H**

Für die paraxiale Analyse optischer Systeme werden zwei Standardstrahlen berechnet: Der Randstrahl **R** beginnt in der Objektebene auf der optischen Achse und durchläuft die Blende am oberen Rand, und der Hauptstrahl **H** startet am Objektrand und geht durch die Blendenmitte (Abb. 1). Für beide Strahlen bestimmt man an jeder Fläche i die Strahlhöhe r bzw. s und die Steigung hinter der Fläche u bzw. v :

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r \\ u \end{pmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} s \\ v \end{pmatrix}$$

Paraxiale Optik ist linear: Alle paraxialen Strahlen lassen sich als Linearkombinationen dieser beiden Strahlen $x \cdot \mathbf{R} + y \cdot \mathbf{H}$ beschreiben.

Wenn sich durch einen Temperaturwechsel ΔT der Abstand d zwischen den Flächen i und $i + 1$ um $\delta = \alpha \cdot d \cdot \Delta T$ ändert, wirkt sich das auf die Strahlhöhe r_{i+1} des Randstrahls aus. Der weitere Verlauf des neuen, durch die Abstandsänderung gestörten Strahls kann als Linearkombination der ursprünglichen Strahlen **R** und **H** dargestellt werden:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{i+1} \\ u_i \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} r_{i+1} + u_i \cdot \delta \\ u_i \end{pmatrix} = (1 + a) \cdot \mathbf{R} + b \cdot \mathbf{H}$$

Die Höhe dieses neuen Strahls in der Bildebene ist ein Maß für die durch die Abstandsänderung hervorgerufene Defokussierung und beträgt

$$(1 + a) \cdot \underbrace{r_{img}}_{=0} + b \cdot s_{img} = b \cdot s_{img}$$

wobei die Lösung des obigen Gleichungssystems

$$b = \frac{-\delta \cdot u_i^2}{r_{i+1} \cdot v_i - s_{i+1} \cdot u_i}$$

ergibt. Temperaturänderungen beeinflussen außerdem die Krümmungsradien R der Linsen und die Brechzahlen n der optischen Medien und damit auch die Steigung des Randstrahls um $\tau = \tau_\alpha + \tau_n$, wobei

$$\tau_\alpha = -\alpha \cdot \frac{r_i}{R_i} \cdot \left(\frac{n_{i-1}}{n_i} - 1 \right)$$

auf die Temperaturexpansion und

$$\tau_n = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{n_{i-1}}{n_i} \right) \cdot \left(u_i + \frac{r_i}{R_i} \right)$$

auf die Brechzahländerungen zurückzuführen ist. Der weitere Verlauf des Strahls ist dann

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_i \\ u_i \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} r_i \\ u_i + \tau \end{pmatrix} = (1 + a') \cdot \mathbf{R} + b' \cdot \mathbf{H}$$

und wie oben ergibt sich aus der Lösung dieses Gleichungssystems

$$b' = \frac{\tau \cdot r_i}{r_i \cdot v_i - s_i \cdot u_i}$$

und der zugehörige Bildfehler beträgt $b' \cdot s_{img}$.

Da alle diese Störungen als klein angenommen werden, lässt sich der Gesamtfehler des Systems als Summe aller Einzelfehler berechnen.

4 Beispiel: dünnes Kittglied



Abbildung 2 Schnittbild des Kittglieds mit temperaturabhängiger Fokusselage

Als einfaches Beispiel wird ein Kittglied aus einem bleifreien und einem bleihaltigen Schwerflintglas untersucht (Abb. 2):

| | RDY | THI | GLA |
|------|----------|------------|-------------|
| OBJ: | INFINITY | INFINITY | |
| STO: | INFINITY | 0.000000 | |
| 2: | 41.34181 | 0.000000 | NSF6_SCHOTT |
| 3: | INFINITY | 0.000000 | SF11_SCHOTT |
| 4: | 81.68476 | 100.000000 | |
| IMG: | INFINITY | 0.000000 | |

Das sehr unterschiedliche Temperaturverhalten dieser beiden Glastypen ist dazu genutzt worden, die hintere Schnittweitenänderung an die Temperaturexpansion $\alpha = 236 \cdot 10^{-7}/K$ einer Aluminium-Fassung anzupassen. Ein CodeV-Makro gibt die Beiträge der Einzelflächen zum Gesamtfehler aus:

| SRF | D | R | N | SUM | EXPd | EXPr | dndT | GLA |
|-----|----------|----------|----------|----------|------|------|-------|------|
| 1 | -0.00000 | -0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 236 | 236 | 0.00 | |
| 2 | -0.00000 | 0.00089 | -0.00011 | 0.00078 | 90 | 90 | 1.65 | NSF6 |
| 3 | -0.00000 | -0.00000 | 0.00062 | 0.00062 | 61 | 76 | 12.88 | SF11 |
| 4 | -0.00118 | -0.00030 | 0.00008 | -0.00140 | 236 | 61 | 0.00 | |
| S | -0.00118 | 0.00059 | 0.00059 | 0.00000 | | | | |

Dabei ist

D: Fehlerbeitrag der Abstandsänderung

R: Fehlerbeitrag der Radienänderung

N: Fehlerbeitrag der Brechzahländerung

SUM: Summe der Beiträge der Fläche SRF

S: Zeile mit allen Spaltensummen

EXPd: Ausdehnungskoeffizient α der Abstandsänderung in $10^{-7}/K$; innerhalb der Linsen ist dies der Wert des Linsenmaterials; Luftabstände L setzen sich aus mehreren Glas- und Fassungsabständen zusammen ($L = \sum l_j$), deren effektiver Ausdehnungskoeffizient $\alpha_L = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T} = \frac{\sum \alpha_j \cdot l_j}{\sum l_j}$ beträgt

EXPr: Ausdehnungskoeffizient der Radienänderung in $10^{-7}/K$; bei Glas-Luft-Übergängen wird der Wert des Glases und bei Kittflächen der Mittelwert beider Gläser genommen

dndT: $\partial n / \partial T$ in $10^{-6}/K$

Die Gesamtsumme 0 zeigt an, dass die Fokusselage bei Temperaturänderungen stabil bleibt. Eine Variante des Makros berechnet als Funktion den Gesamtfehler und kann als benutzerdefinierter Fehler bei der Optimierung verwendet werden, um ein System athermal zu machen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Rechenverfahren ermöglicht auf der Basis einer paraxialen Strahldurchrechnung eine detaillierte Analyse, welchen Einfluss einzelne Systemparameter auf die Temperaturabhängigkeit der Fokusselage haben. Als benutzerdefinierter Abbildungsfehler kann das Gesamtergebnis dieser Rechnung als Optimierungsziel verwendet werden, um eine Optik zu athermalisieren. Erste Anwendungen zeigen, dass sich damit bei der Athermalisierung nur einer Wellenlänge oft ein temperaturabhängiger Farblängsfehler einstellt. Abhilfe schafft die gleichzeitige Athermalisierung von zwei Wellenlängen. Alternativ könnte man das Rechenverfahren auch auf die direkte Athermalisierung des Farblängsfehlers erweitern.

Untersucht man in einem modifizierten Rechenverfahren nicht die temperaturbedingte Störung des Randstrahls \mathbf{R} sondern die des Hauptstrahls \mathbf{H} , dann kann man damit die Temperaturabhängigkeit der Bildgröße analysieren und optimieren.