

# STUDIENARBEIT

zum Thema:

Untersuchung von Mikroobjektiven  
der Firma FOKUS  
Sankt Petersburg  
Russische Föderation

# INHALT

1. Einführung.....	4
2. Konkretisierung der Aufgabenstellung .....	5
3. Arbeitsplanung.....	7
3.1. Einarbeitung .....	7
3.2. Projektplanung.....	8
4. Theoretische Grundlagen.....	11
4.1. Adaptive Selektive Montage ( ASM ).....	11
4.1.1. Kriterien für die Anwendung der ASM.....	11
4.1.2. Prinzip der ASM.....	11
4.2. Monochromatische Abbildungsfehler.....	13
4.2.1. Sphärische Aberration (Öffnungsfehler).....	13
4.2.2. Definitionshelligkeit / Strehlezahl.....	17
4.2.3. Koma.....	18
4.2.4. Astigmatismus / Zweischalenfehler .....	19
4.2.5. Bildfeldwölbung .....	19
4.2.6. Verzeichnung .....	20
4.3. Chromatische Aberration .....	21
4.3.1. Farblängsfehler .....	22
4.3.2. Farbquerfehler .....	23
4.4. Übersicht über die Bildfehler und Ihrer Ursachen.....	24
5. Untersuchungen .....	25
5.1. Untersuchung der Abhängigkeit zwischen den Krümmungsradien der optisch wirkenden Flächen und der sphärischen Aberration.....	27
5.2. Untersuchung der Abhängigkeit der Lage der Fläche und der sphärischen Aberration .....	29
5.3. Anwendungsmöglichkeiten der Untersuchungsergebnisse im	

Im System der ASM .....	30
5.3.1. Messbarkeit .....	13
5.3.1.1. Zusammenhang zwischen der Anzahl der Newtonschen Ringe und der sphärischen Aberration .....	31
5.3.1.2. Bestimmung der Einzelübertragungs- Funktionen .....	32
5.3.2. Sortierbarkeit im Sinne der ASM .....	33
5.3.3. Abhängigkeit zwischen Formfaktor g und der sphärischen Aberration des Systems .....	35
5.3.4. Bedeutung der Ergebnisse .....	37
6. Anwendungsmöglichkeiten einer Selektive Montagestrategie an optischen Systemen .....	38
6.1. Anforderungen an das zu erstellende Optikprogramm .....	38
6.2. Präzisierung der Anforderungen .....	40
6.3. Optische Grundlagen .....	41
6.4. Berechnungsalgorithmen der Systembrennweite und der Schnittweite .....	42
6.5. Berechnungsalgorithmen erstellt in Mathcad zur Berechnung der Sphärischen Aberration verschiedener Linsensysteme .....	43
7.    Schlusswort .....	44
8.    Danksagung .....	45
9.    Literaturverzeichnis.....	46
10.   Anhang .....	47

## **1. Einführung**

Diese Studienarbeit entstand im Rahmen des Projektes Einführung der Adaptiven, und Selektiven Montage (ASM) in die Produktion von Mikroobjektiven bei der Firma Fokus unter Federführung von Herrn Dr. Zocher.

An diesem Projekt sind folgende Unternehmen und Institutionen beteiligt:

**ITMO** - Institut für Informationstechnologie, Mechanik & Optik  
Sankt Petersburg

**Technische Universität Ilmenau**, Fakultät für Maschinenbau

**НПП ФОКУС** Sankt Petersburg

**DAAD** – Deutscher Akademischer Auslandsdienst

Erste Betrachtungen zu dieser Studienarbeit erfolgten im Zeitraum

Mai 2005 – August 2005

am ITMO und bei der Firma NPP Fokus.

Zudem absolvierte ich an der Pädagogischen Universität Gerzen / St. Petersburg einen 6-wöchigen Intensivkurs der russischen Sprache.

Siehe hierzu: Dokumente – Zwischenbericht 20.09.2005 *im elektronischen Anhang*

**Weitergeführt wurde die Aufgabe in Zusammenarbeit mit Andre Voronin an der Fakultät KIPOP unter Leitung von Professor Latiev im Zeitraum**

**November 2006 – März 2007**

**Dieser Bericht bezieht sich auf die Arbeiten in diesem Zeitraum.**

## **2. Konkretisierung der Aufgabenstellung**

In Absprache mit Professor Latiev und in Bezugnahme auf den Abschlussbericht von Ronny Pankratz vom April 2005 sowie unter Berücksichtigung des Arbeitsplanes stellt sich folgende Aufgabe:

## „Untersuchung der Einflüsse von Herstellungsfehlern auf die Abbildungsqualität von Mikroobjektiven im Hinblick auf die Anwendung der Adaptiven und Selektiven Montage als Qualitätssicherungssystem“

Diese Aufgabe lässt sich im Arbeitsplan dem Punkt 3.2.: „Erarbeiten der komplexen Übertragungsfunktion für alle Typen“ zuordnen.

Grund der Aufgabe:

Zur Anwendung der Adaptiven Selektiven Montage ist es notwendig, sämtliche Prozessgrößen und ihren Einfluss auf das Endprodukt zu kennen.

Einer der schwerwiegendsten Fehler bei Mikroobjektiven ist die Sphärische Abberation, da sie maßgebend für die Qualität und damit auch für den Verkaufspreis des Mikroobjektives ist. Ziel der Aufgabe soll sein, herauszufinden, ob sich durch geschickte Kombination fehlerbehafteter Teile die Abberation minimieren lässt.

Auf Basis der Fehlerkompensation soll die Anwendung der Adaptiven Selektiven Montage als Qualitätssicherungssystem bei der Herstellung von Mikroobjektiven ermöglicht werden.

Die Aufgabe besteht:

- in der Untersuchung von möglichen Herstellungstoleranzen und ihren Einfluss auf die Abbildungsfehler
- in der Auswahl geeigneter Gesamtfehler als Zielgrößen
- in der Auswahl geeigneter, und im Hinblick auf die Anwendung messbarer Einflussgrößen
- in der Wichtung der gefundenen Einflussgrößen auf den Gesamtfehler
- im Finden einer Fehlerübertragungsfunktion
- und im Festlegen geeigneter Toleranzgruppen mit Hilfe des Programms ASM OPT 320

### **3. Arbeitsplanung**

Die Durchführung der Projektarbeit erfolgt am Lehrstuhl von Prof. Dr. S.M. Latiev am Fachgebiet KIPOP ( Optische Konstruktion ) an der staatlichen Universität für Informationstechnologie, Mechanik und Optik ( ITMO ), Sankt Petersburg, Russische Föderation.

Die Arbeit entsteht in enger Zusammenarbeit mit Andre Voronin ( Student KIPOP ).

### 3.1. EINARBEITUNG

Zur Einarbeitung in die Thematik „Berechnung von Mikroobjektiven“ konnte ich an einer Projektgruppe unter Leitung von Dr. Frolov teilnehmen.

Hier wurden anhand der Optikrechenprogramme:

<b>OPAL</b>	<b>Code 5</b>	<b>OSLO</b>
<b>Saro</b>	<b>ZEMAX</b>	

verschiedene Linsensysteme berechnet und analysiert. Hinzu kamen Betrachtungen verschiedenster Glaskataloge um analoge Gläser in den Katalogen zu finden.

Betrachtete Kataloge waren:

<b>GOST</b>	( staatlicher Standard Russland)	[4]
<b>China</b>	( staatlicher Standart China )	
<b>OHARA</b>	( Herstellerkatalog der Fa. OHARA)	
<b>Schott</b>	( Herstellerkatalog der Fa. Schott )	

Im Hinblick auf die bevorstehenden Aufgaben konnten wir Bibliotheken sämtlicher, bei der Focus hergestellten Mikroobjektive und Mikroskope erstellen.

Außerdem liefen Betrachtungen zum Thema: Abbildung von Diffraktionspunkten mit Hilfe von Mikroskop und CCD – Kamera. Hierzu konnten einige theoretische Vorbetrachtungen gemacht werden, wie zum Beispiel die Simulation des Messstandes in Opal sowie die Auswahl möglicher Kamerasensoren. Aufgrund der fehlenden geeigneten Kamera konnte ein geeigneter Messstand am ITMO bisweilen noch nicht realisiert werden. Diffraktionsbilder können hier derzeit weder vermessen noch ausgewertet werden.

Ziel der Projektgruppe „Diffraktionspunktmethod“ ist es, anhand von Erkenntnissen aus Diffraktionsbildern einzelner Komponenten auf die Qualität von Mikroobjektiven zu schließen, wobei man auch hier noch mit diversen Schwierigkeiten in der Erarbeitung des Messstandes kämpft und die Methodik an sich umstritten ist.

Sollten hier allerdings in naher Zukunft wesentliche Fortschritte und Ergebnisse erzielt werden, so könnte das angestrebte Vermessungs- und Kompensationsverfahren auch für das Projekt „ASM Mikroobjektive“ interessant werden.

Für die Untersuchung einzelner Objektivkomponenten und Ihren Einfluss auf den Bildfehler konnte diese Betrachtungsweise aus oben aufgeführten Gründen noch nicht angewendet werden.

Somit erfolgen die Betrachtungen auf Basis von Simulationen in den o.g. Programmen und an einer

Auswahl von Mikroobjektiven der Focus.

In enger Zusammenarbeit mit Andre Voronin ( Optikstudent ITMO, KIPOP ) wurde nun auf der Basis meiner Ergebnisse vom Vorjahr ( Siehe Bericht 2005 ) eine systematische Untersuchung der Mikroobjektive im Sinne der Anwendung der ASM begonnen.

### **3.2. PROJEKTPLANUNG**

Zeitlicher Rahmen: 01. Dezember 2006 bis 31 März 2007

#### **01. – 30.12.2007 Konsultationen mit Dr. Sverev**

In diesem waren wöchentliche Konsultationen mit Dr. Sverev ( Dozent und Optikrechner am ITMO ) angesetzt.

Themen: **Funktionsweise von optischen Systemen**  
**Optische Bildfehlertheorie**  
**Zusammenhang zwischen Optik und Lichttechnik**

im Rahmen einer kleinen Vorlesungsreihe.

#### **03.02.2007 Vorverteidigung**

Eine Vorstellung der Projektaufgabe und Präsentation erster Zwischenergebnisse erfolgen im Rahmen einer Fachgebietsübergreifenden Konferenz am 03.02.2007 am ITMO.

Zeitlicher Rahmen: 30 min

Thema: **„Rechnerische Qualitätsuntersuchung an Mikroobjektiven und die Bedeutung der Herstellungstoleranzen optischer Komponenten hinsichtlich der Anwendung der Adaptiven Selektiven Montage“**

Siehe hierzu: Dokumente – Vorverteidigung *im elektronischen Anhang*

#### **15. – 20.02.2007 Konsultationen zum Thema ASM**

Bis zum 15.02.2007 müssen die Untersuchungen soweit vorangetrieben sein, um offene Fragen im Hinblick auf die Anwendung der Adaptiven Selektiven Montage klären zu können. In diesem Zeitraum steht Dr. Zocher ( TU – Ilmenau ) für Konsultationen in Sankt Petersburg zur Verfügung.

Siehe hierzu:

Dokumente – Zwischenbericht 15.02.2007 *im elektronischen Anhang*

### **03.03.2007                    Datenaustausch mit der Arbeitsgruppe von Dr. D.N. Frolov**

Treffen mit Dr. Frolov bei NPP FOKUS, Sankt Petersburg Austausch der bisher erstellten Ergebnisse beider Arbeitsgruppen ( Diffractionspunktmethode / ASM – Mikroobjektive) , Rückkopplung und Einschätzung des Arbeitsfortgangs.

Siehe hierzu: Dokumente – Zwischenbericht 03.03.2007 *im elektronischen Anhang*

### **07.03.2007                    Konsultation Dr. Gramatin**

Dr. Gramatin ist Entwickler des Programms SARO und kennt die Berechnungsmethoden und vor allem die Fehlerübertragung in optischen Systemen.

Da Ausführungen in der Literatur sehr dürftig sind und eine konkrete Übertragungsfunktion für die Anwendung der Adaptiven Selektiven Montage gefunden werden muss, ist diese Konsultation einer der Schlüssel im Projekt. Zudem kennt er die Funktionsweise der russischen Optikprogramme.

Siehe hierzu:

Dokumente – Zwischenbericht 08.03.2007 *im elektronischen Anhang*

### **13.03.2007                    Konsultation mit Prof. Dr. Valetov**

Prof. Dr. Valetov ist Technologe am Fachgebiet für Technologie. Klärung von Fragen, die den Technologischen Prozess betreffen.

Siehe hierzu:

Dokumente – Zwischenbericht 13.03.2007 *im elektronischen Anhang*

### **bis 31.03.2007                Abschluss der Untersuchungen**

Abschluss der Arbeiten, Erstellung eines Abschlussberichtes in deutscher und russischer Sprache. Vorstellung der Ergebnisse am ITMO Sankt Petersburg sowie an der TU –Ilmenau.

## 4. Theoretische Grundlagen

### 4.1. Adaptive Selektive Montage ( ASM )

#### 4.1.1. Kriterien für die Anwendung der ASM

Die ASM findet Anwendung in der Montage von Baugruppen bestehend aus mehreren technischen Gebilden. Die Baugruppe zeichnet sich durch ein oder mehrere Qualitätsmerkmale (  $Y$  ) aus. Einfluss auf die Qualitätsmerkmale der Baugruppe üben die Qualitätsmerkmale der einzelnen technischen Gebilde (  $X$  ) aus.

Die Qualität der Baugruppe ist also über einen funktionellen Zusammenhang durch die Qualität der einzelnen technischen Gebilde ( im folgenden Strukturelemente genannt ) charakterisiert.

$$Y = f ( X_i ) \quad \text{wobei } ( i \in \{ 1, \dots, v \} )$$

Jedes Strukturelement zeichnet sich damit durch *ein* relevantes Qualitätsmerkmal  $X_i$  aus .  
Zudem wird die *Unabhängigkeit* der Einflussgrößen  $X$  vorausgesetzt.

Können in der Bauelemente- bzw. Teilefertigung die geforderten Toleranzen  $\delta X_i$

Nur unter sehr hohem Aufwand oder gar nicht realisiert werden und kann demzufolge die zulässige Toleranz der Baugruppe  $\delta Y$  nicht realisiert werden, so kommen die Methoden der Adaptiven und Selektiven Montage zur Anwendung.

#### 4.1.2. Prinzip der Adaptiven Selektiven Montage

Prinzip der ASM ist, durch geschickte Kombination eigentlich minderwertiger Einzelteile die geforderte Toleranz der Baugruppe zu gewährleisten.

Dazu ist es nötig, direkt im Anschluss an die Herstellung der Einzelteile, diese zu *vermessen*, in Toleranzgruppen zu *sortieren* und in einem Zwischenspeicher *abzulegen*.

Der Montagezelle werden nun aus den verschiedenen Zwischenspeichern die kombinierbaren Einzelteile zugeführt.

Ziel der ASM ist es, die Produktqualität bei gleichzeitiger Senkung der Qualitätskosten zu

verbessern.

Methodische Grundlagen bilden die *statistische Toleranzanalyse und -synthese* sowie die *statistische Prozesskontrolle und -regelung*.

Verbesserung der Produktqualität bei gleichzeitiger Senkung der Qualitätskosten, „Null – Fehler – Produktion“ und integrierte Qualitätssicherung in der Teilefertigung und Montage, auch unter Berücksichtigung der Zulieferfertigung, stehen im Vordergrund der Adaptiven und Selektiven Montage. Das Messen eigengefertigter und zugelieferter Bauelemente und Einzelteile nach Toleranzgruppen und ordnen unter Echtzeitbedingungen in der informell verketteten flexiblen Teilefertigung sind die Wesensmerkmale der ASM.

Statistische Toleranzanalyse und Synthese sowie statistische Prozesskontrolle und Regelung sind also methodische Grundlagen der Qualitätssichernden Fertigungsgestaltung und Steuerung

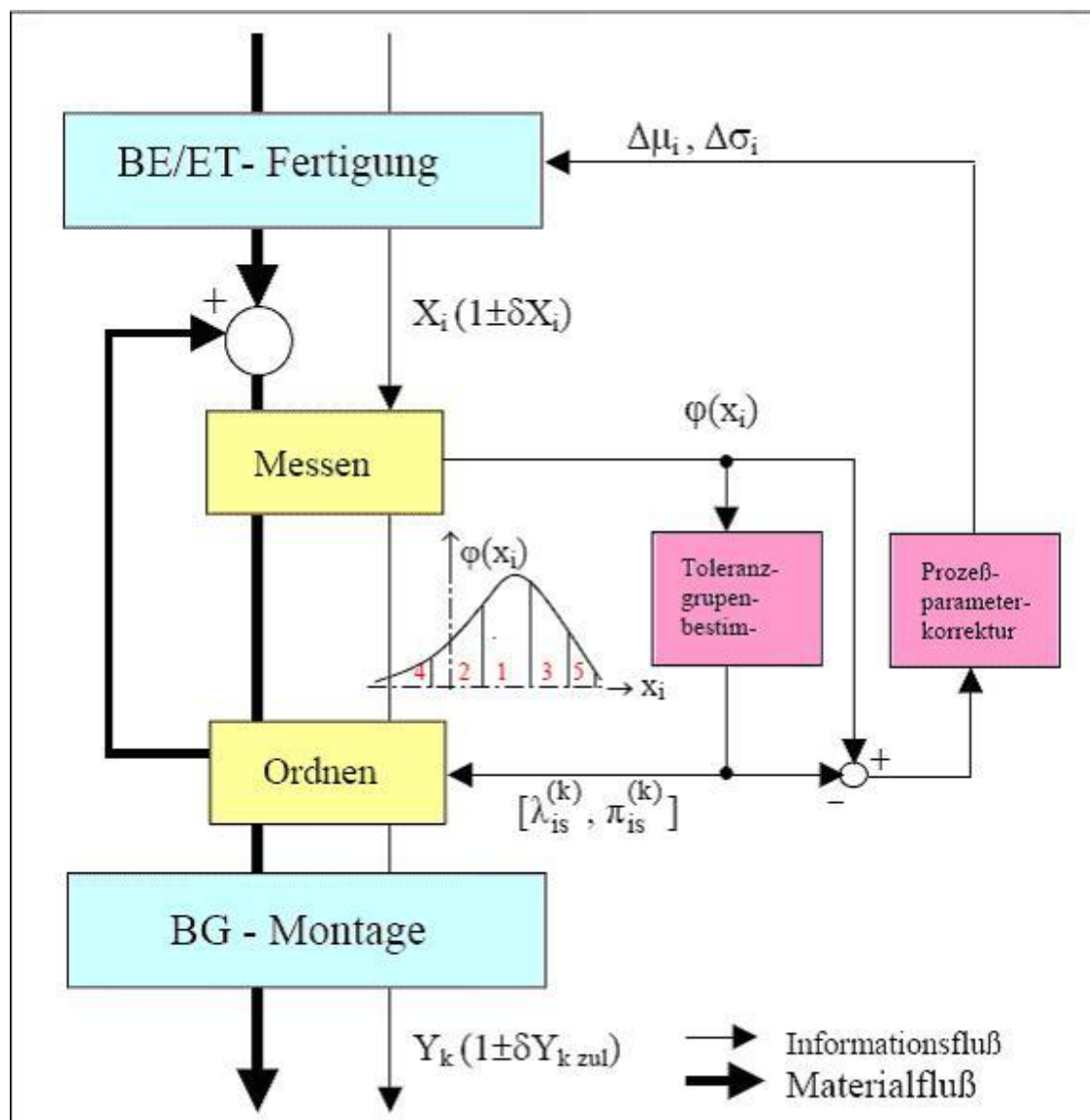


BILD 1: Prinzip der ASM

[6,7,8]

## 4.2. Abbildungsfehler an optischen Systemen

### 4.2.1. Die Sphärische Aberration ( Öffnungsfehler )

Die Sphärische Aberration ist definiert als Längsabweichung der Strahlen durch ein optisches System. Strahlen eines Achsparallelen Strahlenbündels haben eine unterschiedliche Schnittweite nach dem Durchgang durch eine Linse. Die Differenz zwischen den einzelnen Schnittweiten ist umso größer, je weiter das Strahlenbündel von der Hauptachse entfernt liegt. Die Längsabweichung ist somit von der Strahlhöhe und damit unmittelbar von der Öffnung abhängig. Man spricht daher auch vom Öffnungsfehler.

Die Ursache dieser Schnittweitendifferenzen begründet sich in der Wirkung der Kugelflächen, welche nicht ideal fokussieren.

Betrachtet man die Einhüllende des Strahlenbündels, so erhält man am Ort der engsten Einschnürung die effektive Bildebene. Diese weicht um  $\Delta s'$  von der Gaußschen Bildebene ab. Bei Sammellinsen liegt die effektive Bildebene vor, bei Zerstreuungslinsen hinter der Gaußschen Bildebene. Sammellinsen sind von sich aus unterkorrigiert, Zerstreuungslinsen überkorrigiert.

Mit einer geschickten Kombination von Sammel- und Zerstreuungslinsen lässt sich die Sphärische Aberration korrigieren.

Die Sphärische Aberration einer Linse ist Abhängig von den Krümmungsradien ihrer Oberflächen und ihrer Brechzahl und berechnet sich wie folgt:

$$\Delta s' = -\frac{1}{8} f \times \Omega^2 \times S$$

*Sphärische Aberration als Schnittweitendifferenz*

*Unter Verwendung folgender Größen:*

$$g = \frac{r_1 + r_2}{r_2 - r_1}$$

*Formfaktor g der Linse*

$$S = \frac{n^2}{(n-1)^2} \left[ 1 - \frac{2n+1}{2n^2}(g+1) + \frac{n+2}{4n^3}(g+1)^2 \right]$$

*Näherung an die Summe der Seidelschen Koeffizienten*

$$\Omega = 2 \frac{h_1}{f}$$

*Öffnungswinkel*

Mit:  $h$ : Höhe des einfallenden Strahles  
 $f$ : Brennweite  
 $r$ : Krümmungsradius

Die o. g. Formeln berechnen die Sphärische Aberration nur Näherungsweise und gelten nur für ausreichend kleine Formfaktoren. Zudem betrachtet dieser Zusammenhang nur eine Linse. Er kommt nicht für die Berechnung von Systemen in Frage.

Die Sphärische Aberration ist das wichtigste Kriterium bei der Beurteilung der Qualität von Mikroskopen.

[1,2]

### Berechnung der Sphärischen Aberration über die Seidel'schen Flächenteilkoeffizienten 1ter

#### Ordnung (S1):

Seidelscher Flächenteilkoeffizient:

$$B_k = \omega_k^4 + Q_k^2 \delta \left( \frac{1}{ns} \right)_k$$

mit:  $k$ : Nummer der wirkenden Fläche

$$\omega_k = \frac{h_k}{h_1}$$

$$Q_k = n'_k \left( \frac{1}{r_k} - \frac{1}{s'_k} \right) = n_k \left( \frac{1}{r_k} + \frac{1}{s_k} \right)$$

und:

$$\delta s' = \frac{1}{n'_k s'_k} - \frac{1}{n_k s_k}$$

Betrachtung als Gesamtfehler am optischen System:

$$\Delta x'_B = -\frac{1}{2} \frac{x_{p1} (x_{p1}^2 + y_{p1}^2) s_1^4 \beta'}{n_1 p_1^3} \sum_k B_k$$

*Öffnungsfehler in der Sagittalebene*

$$\Delta y'_B = -\frac{1}{2} \frac{y_{p1} (x_{p1}^2 + y_{p1}^2) s_1^4 \beta'}{n_1 p_1^3} \sum_k B_k$$

*Öffnungsfehler in der Meridionalebene*

[1]

### Darstellungsmöglichkeiten der Sphärischen Aberration / Auswahl

- Berechnung der Seidelschen Koeffizienten für jede wirkende Fläche und Addition dieser. Die Summe gilt als Maß für die Sphärische Aberration des Systems. Alle zur Verfügung stehenden Optikprogramme verfügen über diese Berechnungsoption. Basis ist eine Strahldurchrechnung.
- Berechnung der Schnittweitendifferenz als reales Längenmaß auf Basis der Strahldurchrechnung. Die russischen Programme Opal und SARO verfügen über diese Berechnungsoption.
- Betrachtung des Diffraktionsbildes und Auswertung dieses nach Anzahl der auftretenden Ringe. Die Zahl der sichtbaren Ringe sollte bei idealer Fokussierung bei hochwertigen Mikroskopobjektiven nicht größer als eins sein. Vorteil dieser Methode ist, dass durch Auswertung dieses Bildes Rückschlüsse auf alle auftretenden Bildfehler. Simulierte Darstellungen bieten auch alle zur Verfügung gestellten Programme.
- Wellenoptische Betrachtung des Öffnungsfehlers, Bestimmung der Definitionshelligkeit als Maß für die Güte des Systems.

[1]

#### 4.2.2. Definitionshelligkeit / Strehlezahl

Die Angabe über die Korrektur der Längsabweichung zur Beurteilung des Öffnungsfehlers eines Mikroskopobjektivs ist meist unzureichend.

Um einen Einfluss des Öffnungsfehlers auf die Bildgüte des optischen Systems anzugeben müssen daher auch wellenoptische Größen betrachtet werden.

Basis dieser Betrachtungsweise ist die Wellenaberration. Eine Welle wird aufgrund der sphärischen Aberration des Systems deformiert. Nach Durchgang durch das System entspricht ihre Form nicht mehr ihrer Kugelgestalt am Eingang. Die Abweichung von der idealen Kugelform bezeichnet man als Wellenaberration.

Als Maß gilt die Abweichung von der idealen Kugelfläche. Da sie in einem unmittelbaren Zusammenhang mit der Sphärischen Aberration steht, ist auch sie von der Öffnung und damit von der Strahlhöhe abhängig.

Es gilt auch hier, dass die Gaußsche Bildebene nicht mehr die günstigste Einstellebene ist.

Bezieht man sich auf den Ort größter Helligkeit, so findet man diesen im Krümmungsmittelpunkt der Idealen Kugelfläche, welche sich der deformierten Kugelfläche bestmöglich anschmiegt.

[1,2]

Definition der Definitionshelligkeit:

„Die Definitionshelligkeit / Strehle – Zahl gibt das Verhältnis der Intensität im Zentrum im Zentrum des Beugungsscheibchens eines mit Aberration behafteten Objektivs zur entsprechenden Intensität eines sonst gleichen, aber ideal korrigierten Objektivs an“

[1, S 63]

Liegt im System kein Öffnungsfehler vor, so ist die Definitionshelligkeit gleich 100%, bzw. 1. Reale, d.h. aberrationsbehaftete Systeme weisen je nach Fehlergröße eine geringere Definitionshelligkeit auf.

Ihr Wert sollte bei Mikroskopobjektiven nicht unter 80% bzw. 0,8 liegen.

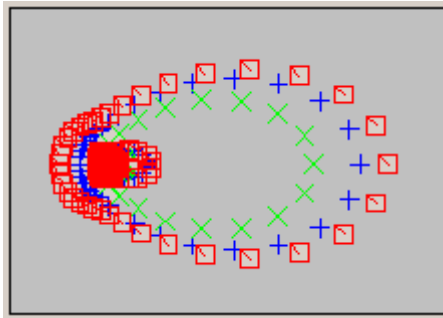
#### 4.2.3. Koma

Mikroskopobjektive sind zentrierte optische Systeme. Ein asymmetrischer Bildfehler wie Koma tritt nur bei der Abbildung von außeraxialen Objektstrukturen auf.

Seine Ursachen liegen in der Verkipfung und Dezentrierung von optischen Komponenten und damit von der Lage des Krümmungszentrums der betrachteten Fläche.

Ist ein optisches System komabehaftet, so liegt der Schnittpunkt zweier Meridionalstrahlen

der gleichen Öffnungszone nicht auf dem Hauptstrahl, sondern seitlich daneben.  
 Man unterscheidet nach Innen- und Außenkoma, je nachdem, ob der sich ausbildende Schweif in Richtung Bildmitte bzw. in Richtung Bildrand zeigt.  
 Korrektur von Koma ist für die Abbildungsqualität von Mikroskopobjektiven von entscheidender Bedeutung. In einem komakorrigierten System muss die Abbesche Sinusbedingung unbedingt erfüllt sein.



**Abb. 2: Koma in Abh. von der Wellenlänge ( Spotdiagramm )**

[1,2]

#### 4.2.4. Zweischalenfehler ( Astigmatismus )

Auch bei kleinen Öffnungswinkeln erfolgt die Abbildung von Strahlenbündeln *nicht* punktförmig. Es entstehen in diesem Fall 2 senkrecht aufeinander stehende Bildlinien. Der Abstand zwischen diesen Bildlinien wird als astigmatische Differenz bezeichnet.

Grund für den Astigmatismus ist, dass Strahlenbündel in der Meridionalebene anders gebrochen werden als Strahlenbündel in der dazu senkrecht liegenden Sagittalebene. Sagittale Strahlenbündel werden also in einer anderen Bildschale abgebildet als Meridionale. Man spricht somit auch vom 2 – Schalenfehler, bzw. von sagittaler und meridionaler Bildfeldwölbung, wenn man die Schalen einzeln betrachtet.

[1, 2]

#### 4.2.5. Bildfeldwölbung

Bei der Abbildung von ebenen Objekten liegen die Bildpunkte auf einer gekrümmten zur optischen Achse rotationssymmetrischen Fläche. Die Bildfeldwölbung ist also die Abweichung der Bildfläche von der Gaußschen Bildebene.

Für die Abbildung bedeutet dies, dass bei Fokussierung auf die Bildmitte, der Bildrand unscharf erscheint. Um Details am Rand zu betrachten, muss also auf diese Nachfokussiert

werden. ( Ist dies nicht möglich, weist dies auf das Vorhandensein von Koma und Astigmatismus hin ).

Bei korrigiertem Astigmatismus kennzeichnet die verbleibende Bildschale ( = Petzvalfläche) die Bildfeldwölbung.

Die Ebnung des Bildfeldes ist mit erheblichem Aufwand verbunden. Objektive, die hinsichtlich der Bildfeldwölbung korrigiert sind, führen die Bezeichnung „Plan...“.

Zur Bildfeldebhnung am Mikroskop muß die Bedingung gelten, dass sich die Petzvalsumme zu Null ergibt. ( Die Gültigkeit der Theorien von Seidel und Petzval sind aufgrund der kleinen Öffnungswinkel am Mikroskop gegeben. )

Berechnung des Petzval – Koeffizienten für brechende Flächen:

$$P_v = -\frac{1}{r_v} \left( \frac{1}{n'_v} - \frac{1}{n_v} \right)$$

Für die Bildfeldebhnung muss gelten:

$$\sum P_v \rightarrow 0$$

Dies wird konstruktiv durch den Einsatz besonderer Linsentypen realisiert.

Generell gilt, je kürzer die Brennweite einer Linse, umso größer ist die Bildfeldwölbung. Mit kleiner werdenden Krümmungsradien verstärkt sich die Bildfeldwölbung. Verbessert lässt sich die Bildfeldwölbung durch den Einsatz von Glas hoher Brechzahl, da so der Krümmungsradien der Linse bei gleicher Brennweite größer sein können.

Eine besondere Rolle bei der Beseitigung der Bildfeldwölbung kommt dem Einsatz von dicken Menisken zu. Man nutzt den Effekt, das Menisken in Form einer Zerstreuungslinse ab einer bestimmten Dicke als Sammellinse wirken. Sie gehen wie Zerstreuungslinsen mit negativen Vorzeichen in die Petzvalsumme ein, haben allerdings, wie Sammellinsen, eine positive Brennweite.

Bedingung für die Dicke eines Meniskus mit positiver Brennweite:

$$d > n \left( \frac{r_1 - r_2}{n - 1} \right)$$

#### 4.2.6. Verzeichnung

Verzeichnung tritt dann auf, wenn der Abbildungsmaßstab über die Objektgröße nicht konstant ist. Dies führt zu einer Gestaltänderung der abgebildeten Objekte im Bild.

Die Verzeichnung ist quadratisch von der Bildgröße abhängig. Dies bedeutet, dass in der Bildmitte keine Verzeichnung auftritt zum Rand hin jedoch zunimmt.

Arten der Verzeichnung:

- kissenförmig:           Abbildungsmaßstab wird zum Rand hin größer, d.h.  
ein Quadrat wird kissenförmig abgebildet

- tonnenförmig           Abbildungsmaßstab wird zum Rand hin kleiner, d.h.  
ein Quadrat wird tonnenförmig abgebildet.

Die Korrektur der Verzeichnung erfolgt im Allgemeinen durch Einflussnahme auf die Lage der Eintrittspupille.

Für die Qualitätsbeurteilung von Mikroobjektiven spielt die Verzeichnung nur eine untergeordnete Rolle, da eine geringe Verzeichnung in der mikroskopischen Abbildung nicht stört. [2]

#### 4.3. Farbfehler ( Chromatische Abbildungsfehler )

Chromatische Abbildungsfehler ( Farbfehler ) haben ihre Ursache in der Brechzahlabhängigkeit von der Wellenlänge. Diese Abhängigkeit nennt man Dispersion.

Bei normaler Dispersion nimmt die Brechzahl mit zunehmender Lichtwellenlänge ab.

Dies bedeutet für eine Sammellinse, dass rote Bilder eine wesentlich längere Schnittweite haben als Blaue. Ihre ideale Abbildungsebene liegt somit hinter derer des Blauen.

Zerstreuungslinsen wirken hinsichtlich der Lage der Schnittebenen genau umgekehrt.

Die maximale Schnittweitendifferenz ist als Farblängsfehler definiert.

Durch geschickte Kombination von Zerstreuungs - und Sammellinsen lässt sich der Farblängsfehler korrigieren.

Durch die prismatische Wirkung von Linsen, werden außeraxiale parallele Strahlen Spektral zerlegt. Somit entstehen für unterschiedliche Wellenlängen auch unterschiedliche Bildgrößen.

Der Abbildungsmaßstab ist damit von der Wellenlängeabhängig. Dieser Fehler wird Farbvergrößerungsfehler genannt.

Auch ist zu beachten, dass die in den Punkten 4.2.1 – 4.2.5. betrachteten monochromatischen Fehler in ihrer Größe von der Wellenlänge abhängig sind.

[1, 2]

### 4.3.1 Farblängsfehler

Eine Farblängsfehler behaftete Abbildung von Objekten ist durch farbige Säume gekennzeichnet. Die Eingrenzung des Farblängsfehlers von Mikroskopen hat eine dementsprechende Bedeutung.

Der Farblängsfehler wird für zwei Farben durch geeignete Kombination von Zerstreuung- und Sammellinse, vorzugsweise aus Kron- und Flintglas, beseitigt.

Die Dispersion eines Glases wird durch die Abbesche Zahl beschrieben.

Sie definiert sich zu:

$$v = \left( \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}} \right)$$

wobei die Indizes, e, F' und C' bestimmte Wellenlängen bedeuten.

e:	546 nm	grün
F':	480 nm	blau
C':	644 nm	rot

Zur Farblängsfehlerkorrektur auf 2 Farben (Achromasie) für 2 dünne, eng benachbarte Flächen muss gelten:

$$v_1 f_1 + v_2 f_2 = 0$$

**(Achromasiebedingung)**

Korrigiert man auf drei verschiedene Wellenlängen (Apochromasie), so ist der Dispersionsverlauf in optischen Medien einzubeziehen.

Zur Korrektur eignet sich aufgrund des Dispersionsverlaufes Flusspat und Fluorphosphat als Linsenmaterial.

Als Angabe über das Dispersionsverhalten definiert man neben der Abbe-Zahl die *Relative Teildispersion*:

$$g_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}{n_{F'} - n_{C'}}$$

Bei Achromasie zweier eng benachbarter dünner Linsen muss neben der Achromasiebedingung zusätzlich noch folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\frac{1}{g_1} v_1 f'_1 + \frac{1}{g_2} v_2 f'_2 = 0$$

( Die Angaben über die Dispersion und die relative Teildispersion finden sich in den jeweiligen Glaskatalogen, wobei die Größen teilweise neu berechnet werden müssen, da sich die Kataloge auf verschiedene Wellenlängen beziehen. )

[2]

#### 4.3.2. Farbvergrößerungsfehler

Bei der Abbildung außeraxialer Objektpunkte tritt infolge der Dispersion der Farbvergrößerungsfehler auf.

Er ist umso bedeutender, je größer das abgebildete Objektfeld ist.

Ein Maß für den Farbquerfehler ist die chromatische Vergrößerungsdifferenz:

$$CVD = \frac{y'_{F'} - y'_{C'}}{y'_e} \times 100 \quad [\text{in \%}]$$

Farbfehlerkorrektur mittels Achromaten:

Eine Sammellinse hat nach obiger Gleichung eine positive CVD, eine Zerstreuungslinse eine Negative. Kombiniert man eine Sammellinse mit kurzer Brennweite aus einem Glas geringer Dispersion mit einer Zerstreuungslinse mit langer Brennweite aus einem Glas hoher Dispersion und verkittet diese, gelingt es ein für 2 Farben korrigiertes System von positiver Brechkraft ( sammelnd ) zu erzeugen. Die Einzellinsen korrigieren gegenseitig ihren Farblängsfehler für 2 Farben und der

Farbvergrößerungsfehler ist beseitigt.

[2]

#### 4.4. Übersicht der optischen Bildfehler und ihre Ursachen

Linsenfehler	Abbildungsfehler					
	Sphärische Aberration	Chromatische Aberration	Koma	Astigmatismus	Bildfeld-Wölbung	Verzeichnung
Krümmungsradius	III	III	II	II	III	II
keine Parallelität zwischen optischer und mechanischer Achse			I	I		
Kittkeilfehler einer optischen Baugruppe			I	I		
Dezentrierung der optischen Achse (keine rotationssymmetrische Linse)			I			
Fehler/Unterschiede bei der Brechzahl der Linse (global)	II	II	II	II	I	I

**Tabelle 1: Übersicht der Einfüße auf Abbildungsfehler**

Die Bewertungen I, II und III in Tabelle 3 bedeuten:

- I – durch den Linsenfehler direkt hervorgerufen
- II – Fehler vorhanden, in seiner Stärke durch Linsenfehler beeinflusst
- III – Fehler generell vorhanden, durch Linsenfehler jedoch beeinflusst, d.h. Verminderung und Verstärkung, jedoch keine Auslöschung darüber möglich.

[7]

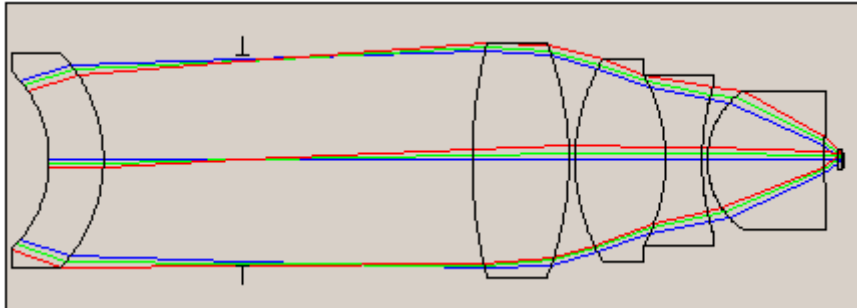
## 5. Untersuchungen

Als Beispielobjektiv diente das Mikroobjektiv:

Planapochromat 40 x 0,65 der Firma Fokus, Sankt Petersburg

Dieses Objektiv wurde als Vertreter einer Reihe unfizierter Mikroobjektive des Herstellers ausgewählt. Es setzt sich aus 5 Einzellinsen zusammen.

Zudem ist ein Linsenpaar geklebt. Diese Paarung kann im weiteren Verlauf der Arbeiten im Sinne der ASM eventuell als vorgefertigte Baugruppe aufgefasst werden.



**Abb. 3: Mikroobjektiv 40 x 0,65 ( Fokus ), Prinzipskizze**



**Abb. 4 : Mikroobjektiv 40 x 0.65 ( Fokus ), Foto**

Die Simulationen erfolgen in den Programmen OPAL und ZEMAX.

Ziel ist es, einen funktionellen Zusammenhang zwischen Herstellungsfehlern an Strukturelementen ( Bauteilen ) und dem dadurch verursachten Bildfehler zu finden.

Wie bereits in den Vorbetrachtungen unter Punkt 4.2.1. erörtert, ist die Sphärische Aberration des Systems eine der wesentlichen Qualitätsmerkmale von Mikroobjektiven. Dies deckt sich auch mit den Aussagen von Prof. Dr. Latiev (SPGU ITMO) und Dr. Frolov (NPP Fokus)

Aufgrund der Vielzahl von Bildfehlern, die konstruktionsbedingt auftreten können, besteht für die Untersuchungen folgende Idee:

- Finden einer Übertragungsfunktion, die den Einfluss von Herstellungstoleranzen auf den Bildfehler beschreibt
- Festlegung der zulässigen Toleranz des Gesamtsystems bzgl. des betrachteten Bildfehlers
- Bestimmung der zulässigen Toleranzen einzelner Komponenten auf Basis der in der

Herstellung auftretenden Streubreiten

- Toleranzgruppenbestimmung / -optimierung mit ASM Opt 320
- Betrachtung der vorgeschlagenen Kompensationsvorschläge hinsichtlich anderer Bildfehler, da der begründete Verdacht eines Zielkonfliktes bei der Minimierung von Bildfehlern besteht.
  - o eventuell Einengung der Toleranzen der einzelnen Bauteile nötig
  - o eventuell Aufnahme weiterer Zielgröße in den Optimierungsprozess

Anmerkung: Die Untersuchungen erfolgen auf Basis von Simulationen, d.h. auf Basis mathematischer Rechenmodelle. Es ist damit auch zwingend erforderlich eventuell gefundene Zusammenhänge in der Realität zu prüfen. Optische Berechnungen basieren immer auf der Grundlage von systembeschreibenden Modellen, die immer nur eine Annäherung an die Realität sein können. Basis bei der Berechnung von Bildfehlern wie zum Beispiel Sphärische Aberration oder Koma ist das Strahlenmodell. Die Programme berechnen den Verlauf einzelner Strahlen geometrisch – optisch durch das System und ziehen einen Rückschluss auf den entstehenden Bildfehler.

Die Anwendung der ASM fordert einen festen physikalischen Zusammenhang zwischen Einflussgröße und Zielgröße.

Daher ist eine reelle Prüfung der Simulationsergebnisse unabdingbar.

Eine Untersuchung auf realem Wege, d.h. Vermessung der Strukturelemente und Zusammenbau im System mit anschließender Systemvermessung, kommt wegen zu hohem Aufwand nicht in Frage. Zudem würde eine Reale Untersuchung durch Montagefehler und andere Einflüsse verfälscht werden.

### **5.1. Untersuchung der Abhängigkeit zwischen den Krümmungsradien der Oberflächen und der Sphärischen Aberration**

Die erstellte Simulation erfolgte im Programm Opal am Mikroobjektiv Planapochromat 40 x 0,65 der Firma Fokus.

Hierzu wurden alle Systemdaten ( Radien, Abstände, Glassorten und Öffnungswinkel ) in Opal eingegeben. Über die im Programm vorhandene Analysefunktion wurde die Sphärische Aberration des Systems in mm berechnet. Von einer Betrachtung des Fehlers über die

Summe der Seidelschen Koeffizienten wurde von den russischen Optikern abgeraten, da sie im System Mikroobjektiv wenig Aussagekräftig seien.

Da allerdings ein konkreter Zusammenhang zwischen dieser Berechnungsweise und den Seidelschen Koeffizienten ( Siehe Literatur [AA] ) besteht, ist diese Aussage nur schwer nachvollziehbar.

Da man sich aber im Sinne des Sachverhaltes auf eine Betrachtungsweise einigen muss, und diese der russischen Herangehensweise entspricht, wurde diese Berechnungsart gewählt.

Im Sinne der ASM stellt der Krümmungsradius die Einflussgröße und die Sphärische Aberration des Systems die Zielgröße dar.

Anzumerken ist auch, dass bei der Berechnung jeweils nur eine Oberfläche variiert wurde, wobei das restliche System konstant blieb um den Einfluss der einzelnen Fläche zu ermitteln.

Die Lage der Nullpunkte erklärt sich dadurch, dass das System auf eine Sphärische Aberration von -0,00158mm im Sinne anderer Bildfehler optimiert ist.

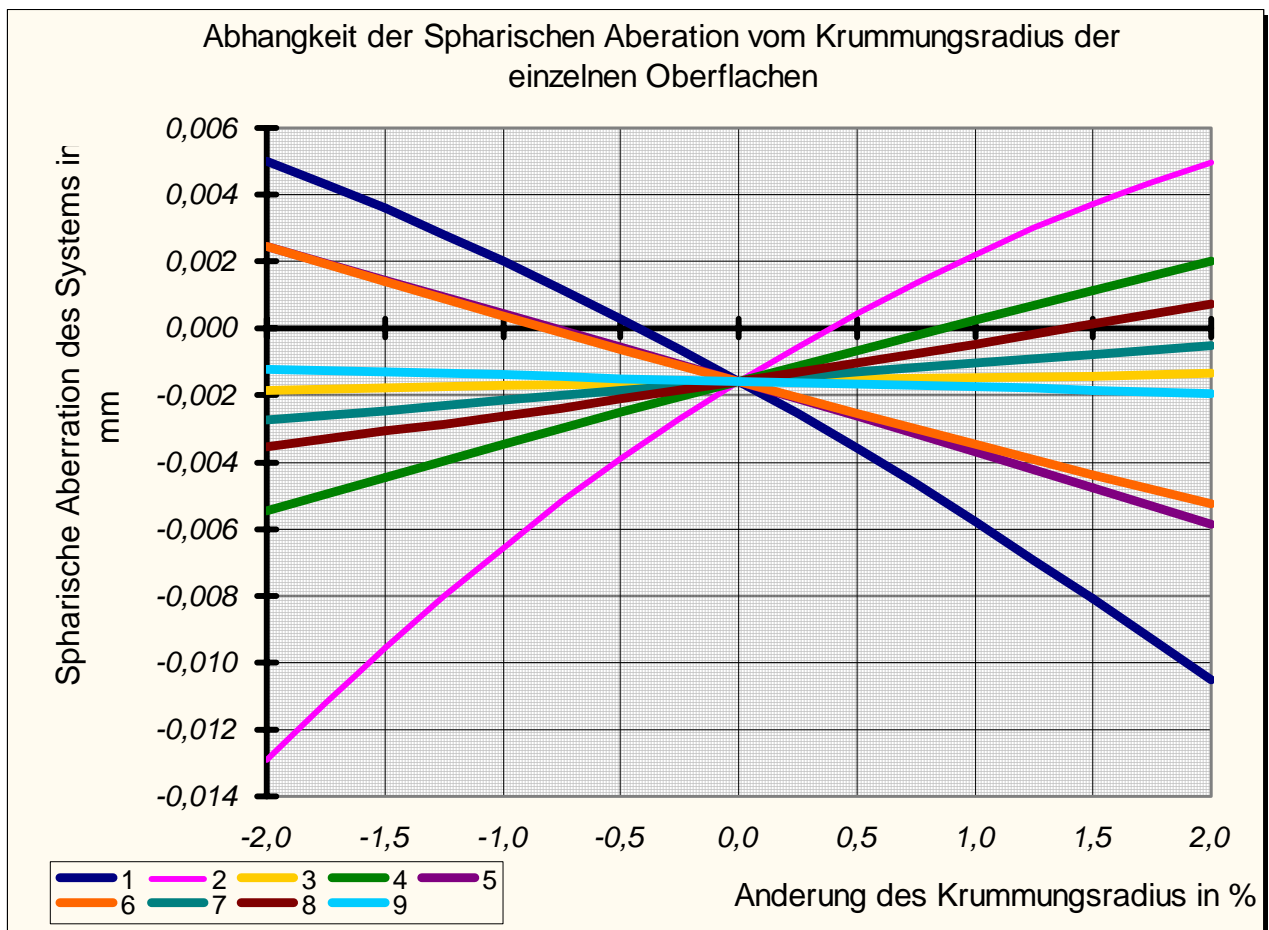


Abb. 5: Sphärische Aberration in Abhängigkeit der Krümmungsradien

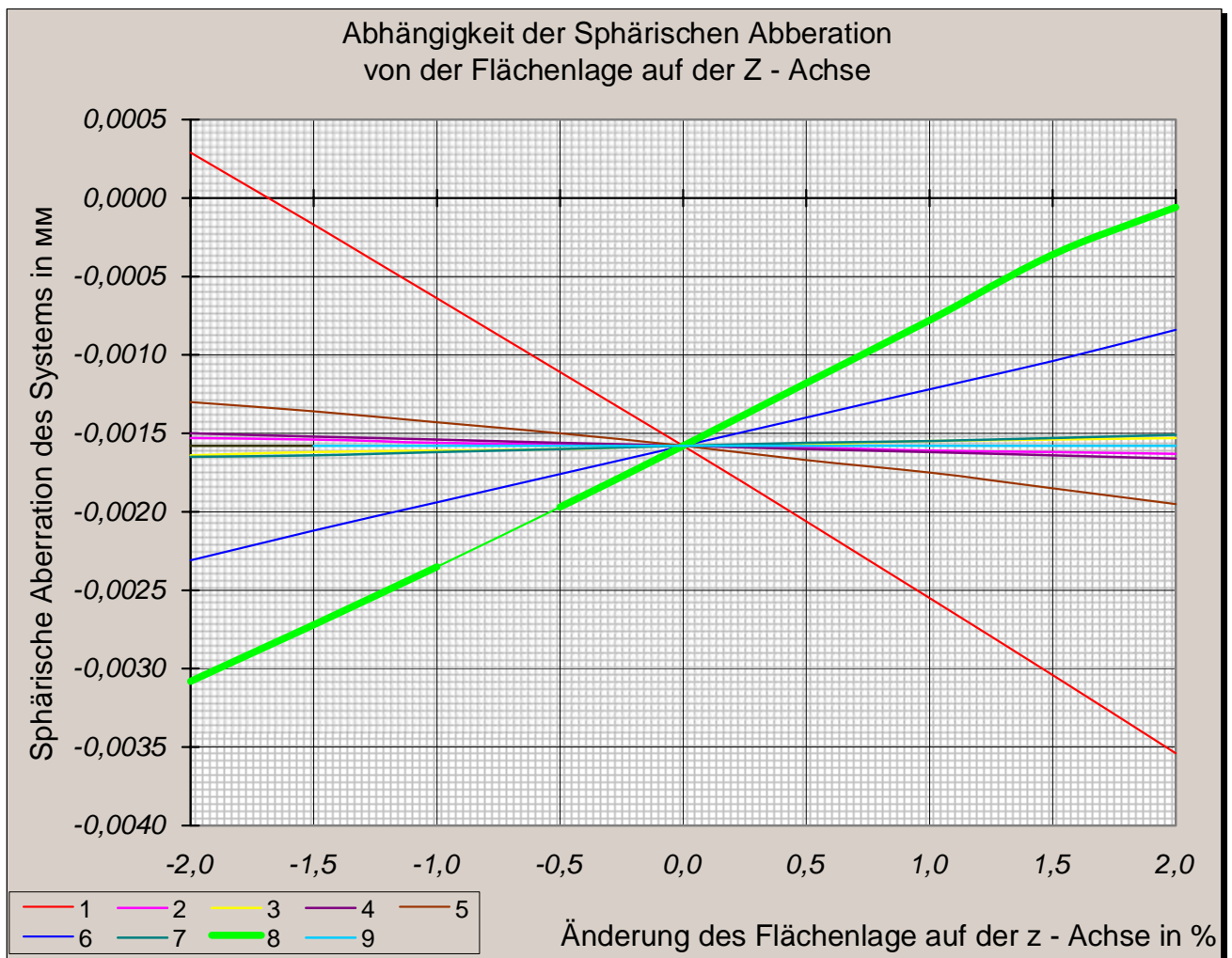
Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, ist der Zusammenhang zwischen Sphärischer Aberration und

Krümmungsradius der einzelnen Oberflächen annähernd linear. Betrachtet wurden Radiusabweichungen zwischen  $-2\%$  bis  $+2\%$  vom Sollmaß in Schritten von  $0,5\%$ . Den größten Einfluss auf die Sphärische Aberration übt die erste Linse aus ( Fläche 1 und 2 ), da sie im Diagramm den größten Anstieg haben. Aufgrund dieses Diagramms sollte es möglich sein, die Sphärische Aberration, durch geschickte Kombinationen Fehlerbehafteter Oberflächen zu kompensieren.

Da es sich beim betrachteten Bildfehler um nichts anderes als eine Längenabweichung als geometrisches Maß handelt, sollte die Summe der einzelnen Übertragungsfunktionen die Gesamtübertragungsfunktion ergeben. Diese Theoretische Aussage ist im weiteren Verlauf zu prüfen.

## **5.2. Untersuchung der Abhängigkeit der Lage der Flächen auf der Z – Achse und der Sphärischen Aberration**

Diese Betrachtung erfolgte analog zu 5.1. am selben Objektiv im selben Optikprogramm. Allerdings wurde nicht die Radiusabhängigkeit, sondern die Abhängigkeit der Lage der Oberflächen auf der Z – Achse des Systems untersucht. Auch hier wurde die Abweichung vom Sollwert in Schritten von  $0,5\%$  von  $-2\%$  bis  $+2\%$  untersucht.



**Abb. 6: Abhängigkeit der Sphärischen Aberration von der Flächenlage**

Grundlegend ist festzustellen, dass der Einfluss der Lageabweichung auf die Sphärische Aberration um den Faktor 10 geringer ausfällt als bei der Radiusabweichung innerhalb derselben Toleranzen. Somit ist eine Kompensation der Sphärischen Aberration verursacht durch Radienabweichung durch eine Lageänderung des Bauteils entlang der Z – Achse nur schwer möglich. Auch hier ist wieder der Einfluss der ersten Fläche von großer Bedeutung. Im Sinne der Anwendung der ASM lässt sich diese Grafik wie Abbildung 5, Punkt 5.1. (siehe oben) interpretieren.

Aufgrund des 10fach geringeren Einflusses auf die Sphärische Aberration konzentrieren sich die weiteren Betrachtungen vordergründig auf die Radiusabweichungen. Dies ist auch darin begründet, dass in der Bewertung von Mikroobjektiven eine Sphärische Aberration von 0 mm +/- 0.0035 als ausreichend gilt. Der durch die Lageänderung verursachte Fehler liegt somit im Bereich der geforderten Toleranz.

### **5.3. Anwendungsmöglichkeiten der Untersuchungsergebnisse im System der ASM**

Aus oben aufgezeigten Erkenntnissen wird vordergründig die Radiusabweichung im weiteren Verlauf betrachtet. Sollte hier eine Möglichkeit zur Nutzung der ASM gefunden werden, so kann die Lageabhängigkeit als weitere Einflussgröße auf analogem Wege hinzugezogen werden.

#### **5.3.1. Messbarkeit**

Als erste Frage zur Anwendungsmöglichkeit der ASM stellt sich die Messbarkeit der simulierten Ergebnisse. Es muss geklärt werden, ob der Krümmungsradius der Linse hinreichend genau messbar ist.

Hierzu bietet sich ein Interferenzmessverfahren an. Die Radiusabweichung vom Sollmaß kann über die Anzahl und das Verhalten der Newton'schen Ringe hinreichend genau bestimmt werden.

Hierzu wird die zu untersuchende Fläche auf eine ideale Vergleichsfläche ( Negativform ) gelegt und unter kohärentem Licht betrachtet. Je nach Lichtwellenlänge und Radiusabweichung bilden sich Interferenzerscheinungen ( Newton'sche Ringe ) aus.

Zudem lässt sich erkennen, ob die Radiusabweichung positiv oder negativ ist.

Die Messgenauigkeit liegt im Bereich der halben Wellenlänge und ist damit ausreichend.

Zusammenhang zwischen Anzahl der Newton'schen Ringe und der Radiusabweichung:

$$\Delta r = 4 \times \lambda \times N \times \left( \frac{R}{D} \right)^2$$

mit:	Delta r:	Radiusabweichung [mm]
	Lambda:	Lichtwellenlänge [mm]
	N:	Anzahl der Newtonschen Ringe
	R:	Krümmungsradius der optisch wirksamen Fläche
	D:	Optisch wirksamer Linsendurchmesser

#### **5.3.1.1 Zusammenhang zwischen Anzahl der Newtonschen Ringe pro Fläche und der Sphärischen Aberration**

Für das betrachtete System wurden für eine Ringanzahl von – 25 bis plus 25 die zugehörigen Radien nach oben genannter Formel berechnet.

Für diese Radien wird die Sphärische Aberration nach bekanntem Weg in Opal simuliert.

Diese Simulation lieferte folgende Ergebnisse.

Zur weiteren Berechnung wurden die Ergebnisse mit 0,00158 mm Addiert um den Schnittpunkt der Grafen auf die X-Achse zu legen.

Wie erwartet unterscheidet sich diese Grafik nicht wesentlich von den oben erstellten Grafiken, jedoch ist nun ein Bezug zum realen Messwert gegeben.

Die zu oben unterschiedlichen Anstiege begründen sich darin, dass die Radiusabweichung jetzt nicht mehr prozentual erfolgt, sondern in Abhängigkeit von der Art der Interferenzerscheinung.

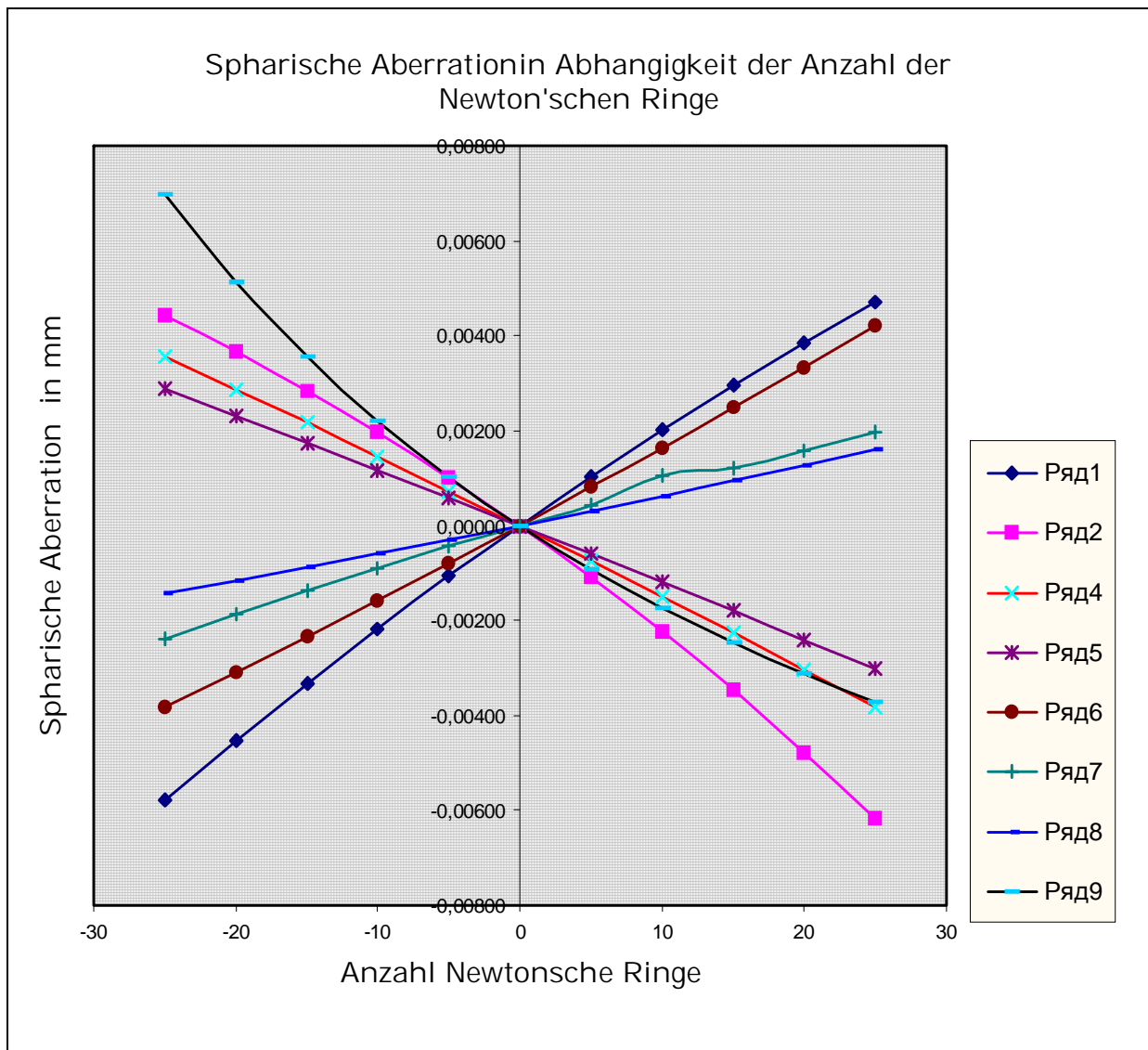


Abb. 6: Sphärische Aberration in Abhängigkeit von der Anzahl der Ringe.

### 5.3.1.2. Bestimmung der Einzelübertragungsfunktionen

Das Programm Excel bietet die Möglichkeit durch Anlegen einer Trendlinie an einen Graphen, dessen mathematische Gleichung in hinreichender Näherung zu bestimmen.

Auf diesem Weg konnte für jede Fläche eine Übertragungsfunktion gefunden werden.

Diese haben die Form eines Polynoms 3ter Ordnung:

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

Im Fortgang ist zu prüfen, wie sich diese Einzelübertragungsfunktionen zu einer Gesamtübertragungsfunktion ergeben.

Siehe hierzu: DOKUMENTE - Excelmappen *im elektronischen Anhang*

### 5.3.2. Sortierbarkeit im Sinne der ASM

Um die Anwendung der ASM als Qualitätssicherungs- und Montagesystem zu ermöglichen, ist es notwendig, die Bauteile / Baugruppen nach ihren Eigenschaften zu Sortieren.

Wie in Punkt 4.2.1. erörtert, muss sich jedes Strukturelement durch *ein* Qualitätsbeschreibendes Merkmal auszeichnen. Dies ist Notwendiges Kriterium für die Sortierbarkeit der Strukturelemente.

Im optischen System Mikroobjektiv sind die betrachteten Strukturelemente Linsen bzw. geklebte Linsengruppen. Hinzu kommen die Komponenten des mechanischen Systems Mikroobjektiv. Eine Trennung von mechanischem und optischem System ist im Sinne der Betrachtung, da in dieser Arbeit keine Kraftübertragung sondern rein die Bildübertragung betrachtet wird. Erst wenn beide Systeme hinreichend genau untersucht sind, sollten Koppelstellen gesucht werden.

Betrachtet man nur die Sphärische Aberration als Entscheidungskriterium für die Güte des Mikroobjektivs, was in dieser Arbeit als „theoretisches Modell“ zur Vereinfachung der Komplexität angenommen wird, so zeichnet sich jedes Strukturelement ( Linse ) durch drei Eigenschaften aus.

Diese sind:

- Krümmungsradius der ersten Fläche
- Krümmungsradius der zweiten Fläche
- Linsendicke ( Flächenlage entlang der Z – Achse )

Würde man nun noch mehr Bildfehler betrachten, würden die, die Qualität beeinflussenden Eigenschaften um ein vielfaches zunehmen.

Weitere Qualitätsrelevante Eigenschaften sind dann zum Beispiel:

- Lage des Krümmungszentrums der Flächen ( 2 pro Linse )
- Parallelität der Außenflächen ( => Verkippung )
- Einfluss und Ausführung von Klebeverbindungen
- u.v.m.

Es stellt sich aus optischer Sicht und auch aus Sicht der Sortierbarkeit die Frage, nach welchem Kriterium man die Strukturelemente ( Linsen ) sortiert.

Eine Sortierung nach mehreren Eigenschaften wäre im technologischen Sinne nicht zu empfehlen. Denn allein nach den oben aufgeführten Einflussgrößen wäre selbst bei der Annahme von nur wenigen Toleranzgruppen die Zahl der Magazine in den jeweiligen Zwischenspeichern immens groß. Da es sich bei der Produktion von Mikroobjektiven im Wesentlichen um eine größere Kleinserienproduktion und nicht um eine Massenproduktion handelt, steht die effektive Nutzung einer selektiven Montage Strategie bereits hier in Frage.

*Siehe hierzu: Zwischenbericht\_13.03.07 im elektronischen Anhang*

Da für die hiesige Untersuchung nur die Sphärische Aberration betrachtet wird, liegt die Zahl der Einflussgrößen bei 3. Gefordert im Sinne der ASM ist 1.

Da sich in den Untersuchungen gezeigt hat, dass die Lageabweichung der Flächen einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Sphärische Aberration hat als eine Abweichung der Krümmungsradien, empfiehlt es sich als logische Konsequenz, diese zu vernachlässigen.

Diese Vernachlässigung wird allerdings den Erfolg der selektiven Montage schmälern, da Trotz Kompensation der Radienfehler, sphärische Aberration am System auftreten wird.

Es stellt sich nun die Frage, wie man die beiden Radien auf einen gemeinsamen Nenner bringt.

Sinnvoll scheint die Einführung eines Formfaktors:

$$g = \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1}$$

Dieser Faktor wurde für alle möglichen Kombinationen von Anzahlen der Newton'schen Ringe für jede Linse berechnet.

Es ist somit ein Qualitätsmerkmal für jedes Strukturelement bestimmt.

### **5.3.3. Abhängigkeit zwischen Formfaktor g und der Sphärischen Aberration des Systems**

Mit den Daten aus den bereits erstellten Simulationen konnten nun jedem Formfaktor eine

Sphärische Aberration als Summe der jeweiligen Einzelaberrationen zugeordnet werden.  
Zur Prüfung wurden diese Berechnungen in OPAL und ZEMAX Stichprobenweise simuliert.  
Interessanter Weise, standen die Simulationsergebnisse in keinem Verhältnis zu den berechneten Ergebnissen.

Auch ein nach den Simulierten Ergebnissen aufgestelltes Gleichungssystem war mathematisch nicht lösbar.

Analyse: Diese Tatsache lässt im Wesentlichen nur einen Schluss zu:

**Die durch eine Fläche verursachte Sphärische Aberration ist in ihrer Größe Abhängig von der vorigen Fläche.**

**Dies bedeutet, dass der durch eine Einflussgröße verursachte Fehler in seiner Größe abhängig von einer anderen Einflussgröße ist.**

**Natürlich wurde bisher der Radius als Einflussgröße betrachtet, und natürlich sind die Radien in ihrer Größe voneinander unabhängig. In ihrer Wirkung im optischen System allerdings, sind sie von einander Abhängig.**

**EINE UNABHÄNGIGKEIT DER EINFLUSSGRÖSSEN, WIE SIE DIE ASM IN IHREN ANWENDUNGSKRITERIEN FORDERT IST IM OPTISCHEN SYSTEM NICHT GEGEBEN!**

Dies erfordert eine genauere Definition der Begriffe Einflussgröße und gemessene Bauteiltoleranz.  
Die betrachtete Radiusabweichung kann als Bauteilmaß gemessen und als Bildfehler verursachende Größe gesehen werden. Diese Größe ist fest an die Fläche gebunden und steht in keinem Zusammenhang mit Radien anderer Flächen. Die reinen Maßtoleranzen sind voneinander unabhängig.

Betrachtet man allerdings den Strahlverlauf im optischen System so entsteht ein Bildfehler immer aufgrund einer inkorrekten Strahlableitung. Man muss also davon ausgehen, dass die Einflussgröße auf einen Bildfehler immer durch die Ablenkung eines oder mehrerer Strahlen beschrieben wird. Die Abweichung des Krümmungsradius' ist in diesem Sinne lediglich die technische Ursache für die Ablenkung.

Wie ein Strahl abgelenkt wird hängt natürlich vom Krümmungsradius der Fläche als festes Maß sowie vom Einfallswinkel als flexible Größe ab.

Dies bedeutet, die Einflussgröße im optischen System bezüglich des Bildfehlers ist die Brechung der Strahlen an den einzelnen Oberflächen. Die Brechung ist auch Abhängig von

Strahlhöhen und Einfallswinkeln, welche durch die vorige wirksame Fläche bestimmt sind  
Dies bedeutet, man kann im optischen System nicht von einer Unabhängigkeit der Einflussgrößen im Sinne der ASM ausgehen.

Die ASM als technologisches System geht davon basiert darauf die konkrete Übertragungsfunktion zu kennen und auf Basis Ihrer Ableitung nach den einzelnen Einflussgrößen diese zu Wichten.  
Im Ergebnis stehen die Gewichtskoeffizienten erster und zweiter Ordnung für jedes Strukturelement.

Im hier betrachteten Fall würde das Bedeuten, dass die Gewichtskoeffizienten ( Anstiege der obigen Kurven ) Abhängig vom Gewichtskoeffizienten des vorherigen Bauteils wären, und damit **nicht** konstant wären.

#### **5.3.4. Bedeutung der Ergebnisse**

Die Erkenntnisse aus dem Punkt 5.3.2. beschreiben die Komplexität des Sachverhaltes. Es gibt eine sehr hohe Anzahl von Eigenschaften je Strukturelement, die einen Einfluss auf den oder gar die Bildfehler ausüben. Eine Anwendung der Adaptiven Selektiven Montage, die in ihrem Wesen auf einer Sortierung nach Einflussgrößen in Toleranzgruppen basiert, und in der Montage das Vorhandensein des jeweiligen Strukturelementes in der benötigten Toleranzgruppe voraussetzt, macht in diesem Falle nur bei extrem hohen Stückzahlen Sinn.

Ansonsten müssten sehr hohe Leerlaufzeiten im Montagezyklus in Kauf genommen werden.

Bei der derzeitigen Produktionslage würden allerdings mehr Toleranzgruppen als hergestellte Linsen existieren. Allein deshalb kann eine Einführung der ASM am hiesigen Standort, bzw. am derzeitigen Produktionsstandort China nicht empfohlen werden.

Theoretisch besteht die Möglichkeit, nur nach ausgewählten Messgrößen zu sortieren. Dazu müsste man allerdings eine hohe Genauigkeit und vor allem auch Konstanz der vernachlässigten Größen im Herstellungsprozess der Strukturelemente gewährleisten sein, um einen Kompensationserfolg in der Selektiven Montage zu gewährleisten.

Prof. Dr. Valetov sieht dies allerdings, wie ich auch, skeptisch. Als Strategie für den Technologischen Prozess ist davon abzuraten.

Die im Punkt 5.3.2. gewonnenen Erkenntnisse sprechen Eindeutig gegen die Anwendbarkeit der ASM in optischen Systemen, da eine Unabhängigkeit der Einflussgrößen nicht gewährleistet ist. Diese Abhängigkeit bedeutet konkret, dass die Gewichtskoeffizienten 1ter und 2ter Ordnung je

Strukturelement nicht Konstant sind. Sie sind in diesem Fall als Funktion von den Gewichtskoeffizienten vorheriger Elemente zu sehen. Dies ist mit der Theorie der Adaptiven Selektiven Montage nicht vereinbar.

**Eine Anwendung der Adaptiven Selektiven Montage nach Zocher in optischen Systemen zur Bildfehlerkompensation ist nach jetzigem Kenntnisstand nicht möglich.**

*Die Untersuchungen werden hiermit eingestellt.*

Die Aufgabe besteht nun darin, Möglichkeiten zu finden, wie man effektiv und unter Minimierung des Ausschusses von Bauteilen die Qualität an Mikroobjektiven sichern kann.

Der bisherige Ansatzpunkt bestand darin, das Optische System in die Theorie der ASM zu drücken. Nun muss versucht werden, die mathematischen Grundlagen der ASM den Bedingungen optischer Systeme anzupassen.

## **6. Möglichkeiten der Anwendung einer Selektiven Montagestrategie an optischen Systemen**

Ausgehend von den Ergebnissen aus den Betrachtungen hinsichtlich der Sphärischen Aberration und von der Komplexität der optischen Bildfehlertheorie an optischen Systemen muss ein neuer Weg zur Sicherung der Qualität unter Anwendung einer Selektiven Montagestrategie gefunden werden.

Aufgrund der hohen Anzahl von Qualitätsentscheidenden Kenngrößen pro Bauteil scheint eine Sortierung in Toleranzgruppen wenig sinnvoll.

Für die Sicherung der Qualität an Mikroobjektiven sollte daher jedes Bauteil durch ein Messprotokoll genau charakterisiert sein. Anhand der genauen Messdaten sollte nun die ideale Kombination mit anderen schon gefertigten und vermessenen Bauteilen mit Hilfe eines noch zu entwickelnden Computerprogramms errechnet werden. Durch eine gute Logistik sollten der Montagezelle nun die Kombination von Bauteile zugeführt werden, die die geforderte Qualität des Endproduktes gewähren.

### **6.1. Anforderungen an das zu erstellende Optikprogramm**

Im Wesentlichen ist ein Optikrechenprogramm zu entwickeln, das auf der Basis der Messdaten der einzelnen Komponenten alle Kombinationsmöglichkeiten der vorhandenen Linsen durchrechnet. Aus diesen Ergebnissen müssen nun nach ausgewählten Strategien die Kombinationsmöglichkeiten für die Montage gewählt werden. Ziel der Auswahl soll sein,

zum einen den Ausschuss von fehlerbehafteten Teilen zu minimieren und zum anderen die geforderte Qualität an das Endprodukt zu erfüllen.

Dieses Programm sollte schrittweise entwickelt werden. Für den Anfang sollte dieses Programm einzig auf Basis der Sphärischen Aberration simulieren und im Anschluss auf weitere Zielgrößen erweitert werden.

Da zudem sollte Anfangs auch die Eingangsdatenbasis, die in der Realität die Messeinrichtungen liefern sollte, simuliert werden.

Es wird daher folgender Prototyp vorgeschlagen:

**Eingabegrößen:**

**Systemgrößen:** Öffnungswinkel des Systems

Radien der einzelnen Oberflächen

Abstand der einzelnen Oberflächen ( in Form von Linsendicke und Abstand zwischen den Linsen )

Durchmesser

**Produktionsgrößen:** Maximaltoleranzen in % für Radius und Linsendicke

Zulässige Funktionstoleranz des optischen Systems

Toleranzverteilungsfunktion für die Bauteile

Stückzahl der vorhandenen Linsen

**Ausgabegrößen:**

**Montagerelevant:** Optische Systeme die die Funktionstoleranz erfüllen

**Statistik:** Prozentualer Anteil an Ausschuss pro Bauteil

Optionale Ausgabe aller Kombinationen und ihrer Bildfehler

## 6.2. Präzisierung der Anforderungen:

Das zu erstellende Programm sollte im ersten Schritt unter Verwendung der in 6.1. aufgeführten Eingabegrößen aus folgenden Teilen bestehen:

1. ANALYSE DER EINGABEDATEN
2. OPTISCHE SIMULATION
3. ANALYSE DER SIMULATION

Zu 1.) Analyse der Eingabedaten:

Verteilung der vorhandenen Bauteile nach der angegebenen  
Toleranzverteilungsfunktion

Kombinatorische Erfassung aller Montagemöglichkeiten

Zu 2.) Berechnung der Sphärischen Aberration für jede Kombinationsmöglichkeit  
auf Basis der Durchrechnung ausgewählter Strahlen ( und anderer Fehler )

Zu 3.) Auswahl aller, die Funktionstoleranz erfüllenden, Kombinationen

Hieraus Auswahl der Kombinationen hinsichtlich der Ausschussminimierung

Abspeicherung der Ergebnisse für weitere Statistische Auswertung

Besondere Bedeutung kommt hierbei dem dritten Teil zu. Er würde erstmalig eine statistische Auswertung auf einer großen Datenbasis im Sinne des Technologischen Prozesses ermöglichen.

Dies ist derzeit besonders wichtig, da reelle Produktionsdaten fehlen.

Die statistische Analyse der so gewonnen Daten sollte ihrerseits wiederum Rückschlüsse auf Produktionsstrategien und eventuell die Rückkopplung in die Bauteilherstellung zulassen.

### **6.3. Optische Grundlagen**

Nach aufwendigen Literaturrecherchen zeigten sich viele Möglichkeiten der Berechnung von optischen Systemen. Zudem erhebt keine Quelle einen Anspruch auf Vollständigkeit.

Zudem gilt die Maxime, den Rechenweg zu finden, den eines der vorhandenen Optikrechenprogramme anwendet. Damit soll eine Vergleichbarkeit und Überprüfung der Ergebnisse gewährleistet werden.

Zum Finden und Prüfen der mathematisch – optischen Grundlagen soll folgende Strategie verfolgt werden:

- 1. Auswahl von drei Beispielobjektiven ( Linsensystem )**
- 2. Berechnung ihrer Bildfehler in Opal**
- 3. Übertragung ihrer Daten ( Eingangsparameter ) in Mathcad**
- 4. Berechnung der gesuchten Fehlergrößen und der dafür benötigten Zwischengrößen in Mathcad nach gefundenen Berechnungsmethoden ( Konsultationen mit Prof. Dr. Sverev, Prof. Dr. Grammatin )**
- 5. Vergleich der Ergebnisse mit Ergebnissen aus Opal**
- 6. Einbettung der gefundenen Algorithmen in das zu erstellende Hauptprogramm**

### **6.4. Berechnungsalgorithmus der Systembrennweite und der Schnittweite**

*Nach Rodionov [3]*

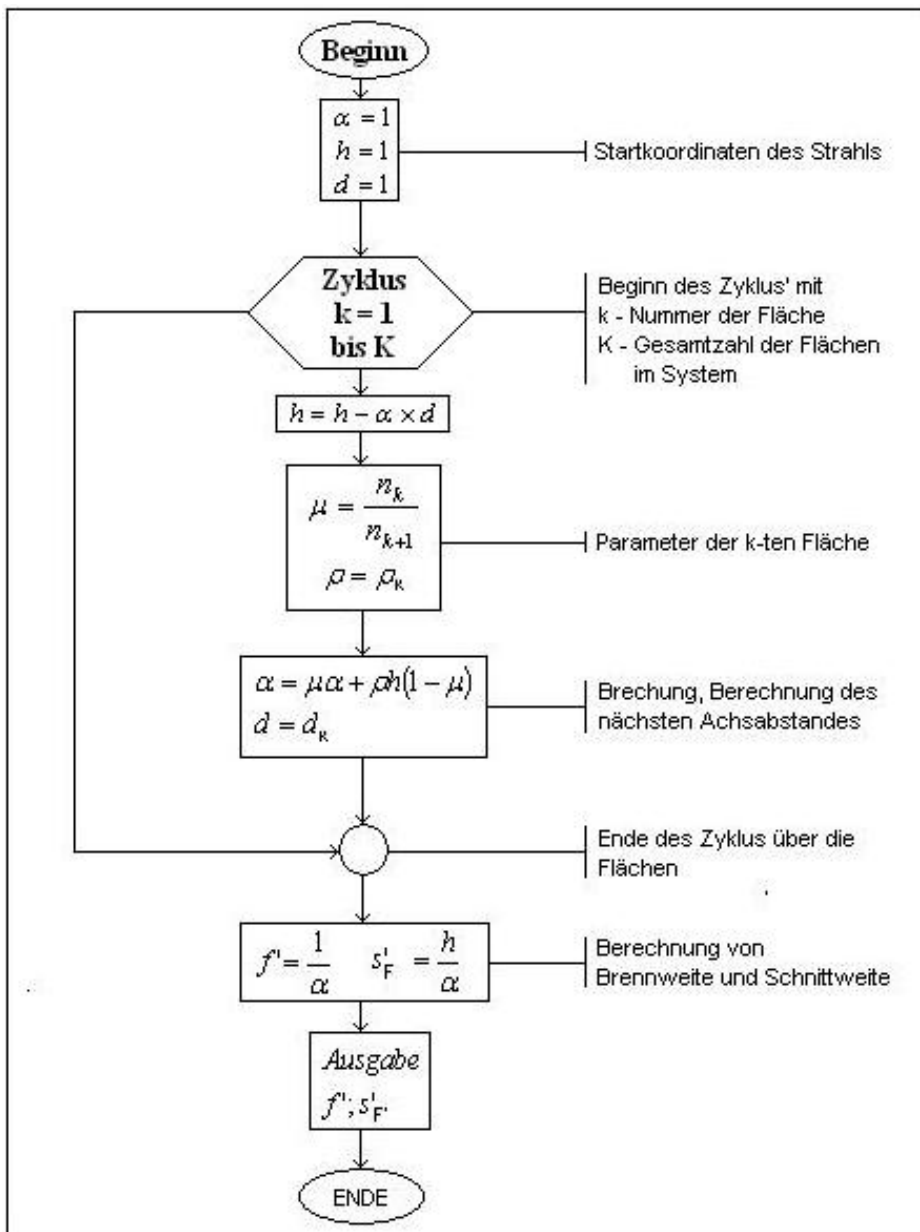


Abb.7: Algorithmus zur Berechnung von Brennweite und Schnittweite [3]

## 6.5. Berechnungsalgorithmen erstellt in Mathcad zur Berechnung der Sphärischen Aberration verschiedener Linsensysteme

Auswahl der Linsensysteme:      Planapochromat 40 x 0,65  
    Mikroobjektiv 20 x 0,65  
    Sammellinse mit  $f = 33$  mm

Siehe hierzu: Mathcad – Datei „OPTIKRECHNUNG“      *im elektronischen Anhang*

## 7. Schlusswort

Wie die Analyse der theoretischen Grundlagen sowohl der Bildfehlertheorie als auch der Methodik der ASM sowie die erstellten Untersuchungen gezeigt haben, kommt eine Anwendung der ASM nach den von Dr. Zocher beschriebenen Methoden [6] zur Bildfehlerkompensation in optischen Systemen nicht in Frage. Grund hierfür ist die Konfrontation der mathematischen Modelle aus ASM und Optik. Diese lassen sich nicht vereinen.

Da eine Anwendung der ASM in optischen Systemen 1 : 1 nicht realisierbar ist, müssen nun Methoden gefunden werden, wie man Teile der Strategien der ASM in den Produktionsprozess von Mikroobjektiven einfließen lassen kann.

Ideen hierfür soll die unter Punkt 6. beschriebene Strategie geben. Die optischen Grundlagen zur Berechnung von Mikroobjektiven sind für die erste Stufe des zu entwickelnden Optimierungsprogramms ausgearbeitet. In Zusammenarbeit zwischen einem Technologen und einem Programmierer sollte es nun möglich sein einen Prototyp zu entwickeln.

Zudem könnte so erstmals eine Breite Datenbasis simuliert werden, die bisher für statistische Auswertungen gefehlt hat.

Für den weiteren Fortgang der Arbeiten muss zudem angemerkt werden, dass derzeit am Standort Sankt Petersburg (RF) Mikroobjektive nur in geringer Stückzahl bei NPP Fokus hergestellt werden. OAO LOMO hat die Produktion von zivil genutzten optischen Komponenten nach China verlagert. Es wird also immer schwieriger werden reelle Daten zu erhalten. Das Projekt sollte sich also mehr und mehr auf die theoretischen Grundlagenuntersuchungen im Sinne des Technologischen Prozesses bei der Herstellung von Mikroobjektiven beschränken.

## **8. Danksagung**

Diese Arbeit entstand an den Lehrstühlen für Optische Konstruktion und Technologie Am ITMO Sankt Petersburg. Beiden Lehrstühlen möchte ich hiermit meinen Dank für die in diesem Jahr sehr gute Zusammenarbeit aussprechen. Besondere Anerkennung verdient dabei die hohe Bereitschaft aller Beteiligten zu fachlichen Konsultationen und die Vermittlung an Spezialisten auch an anderen Lehrstühlen.

Einen großen Dank auch für die zahlreichen Einladungen zu wissenschaftlichen Kolloquien und den spürbar hohen Willen der Wissensvermittlung.

Besonderen Dank verdient Professor Latiev der diese Arbeit durch Vermittlung zahlreicher Kontakte ermöglicht. Gleiches möchte ich für Dr. Sverev aussprechen, Ansprechpartner Nummer 1 in fachlichen Fragen.

Großen Dank auch an Andre Voronin, für die gute Zusammenarbeit und vor allem auch die sehr gute Zuarbeitung bei der Erstellung der Simulationen, der Einweisung in die verwendeten Computerprogramme und für die Literaturbeschaffung.

Danke auch an Gallina für die zahlreichen Übersetzungen und das starke Engagement für das gemeinsame Projekt.

Meinen Dank möchte ich auch Herrn Dr. Frolov und Fr. Dr. Vinogradova für die Einarbeitung in die Materie aussprechen.

Danke auch an alle anderen Kollegen und Mentoren, die mich Tatkräftig unterstützt und mir Vor allem Lehrreichen aber auch interessanten und schönen Aufenthalt in der Russischen Föderation ermöglicht haben.

## 9. Literaturverzeichnis

**[1] Skript: Bewertung optischer Systeme**

**Hrsg.: Dr. Wolfgang Richter TU Ilmenau**

**[2] Handbuch der Mikroskopie ( 3. Auflage )**

**Hrsg.: Dr. Hermann Beyer  
Dr. Horst Riesenberg VEB Verlag Technik Berlin**

**[3] Автоматизация проектирования оптических систем**

**Hrsg: С.А. Родионов  
Издательство Машиностроение  
Ленинград 1969**

**[4] Методы Расчета оптических систем**

**Hrsg: Г.Г. Слюсарев  
Издательство Машиностроение  
Ленинград 1982**

**[5] Glaskatalog, «Стекло оптическое бесцветное»**

технические условия

ГОСТ 3514-94

**[6] Skript: Grundlagen der qualitätssichernden Fertigungsgestaltung und Steuerung**

**Teil 1 – 5**

**Hrsg: Dr. Klaus – Peter Zocher TU Ilmenau, 2002**

**[7] Качество Машин, Выпуск 1**

Международный научно – технический сборник

**Hrsg: ЛМЗ – ВТУЗ / ИТМО  
ЛМЗ – ВТУЗ  
Санкт Петербург 2006**

**[8] Конструирование точных оптических приборов (часть 2)**

**Hrsg: С.М. Латыев Санкт Петербург 1999**

## 10. Anhang