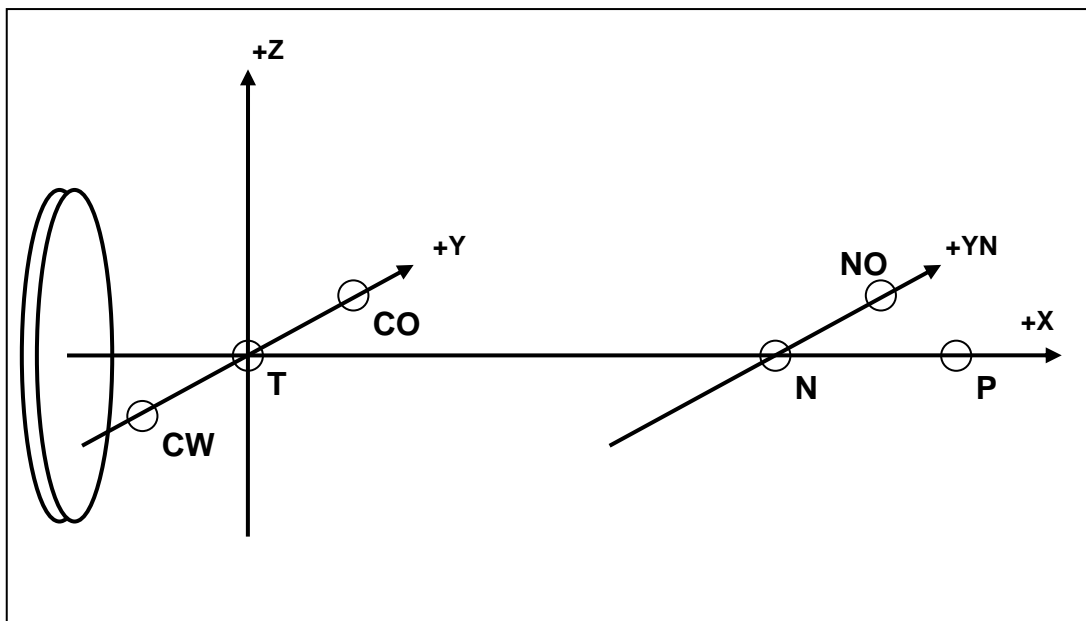


## Checkliste zur Kollimation des MFT

Dieses Dokument ist *keine* komplette Beschreibung für die Kollimation des MFT. Am besten lernt man diesen Ablauf direkt praktisch am Fernrohr. Ebenso wenig wird hier die ganze Kollimationstheorie im Detail erklärt, weil es dafür schon genügend Literatur gibt. Dieses Dokument beschreibt nur knapp die notwendigen Schritte, um die diversen optischen Elemente korrekt untereinander und zur mechanischen Deklinationsachse auszurichten und auf die optische Achse zu kollimieren. Es soll in diesem Sinne als Gedankenstütze und Checkliste dienen bei der Kollimation des MFT.

### I. Definition des hier benutzten Koordinatensystems:



- Die **X-Achse** wird definiert durch die optische Hauptachse und zeigt vom Hauptspiegel Richtung Primärfokus.
- Die **Y-Achse** wird durch die Deklinationsachse definiert (+Y zeigt auf die Rohrseite mit dem Newtonblick – in Parkstellung also Richtung Osten).
- Die **Z-Achse** schneidet die Deklinationsachse (Y) und die optische Achse (X) senkrecht und zeigt in Parkstellung nach "oben".
- Eine weitere **Hilfsachse +YN** liegt (fast) parallel zur Y-Achse, schneidet die X-Achse und geht durch den seitlichen Newtonfokus.
- Ausserdem werden die folgenden **Hilfspunkte** bezeichnet:

T	(Tertiärspiegel)	P	(Primärfokus)
CW	(Cassegrain West)	N	(Newton-Sekundärspiegel)
CO	(Cassegrain Ost)	NO	(NewtonOst).

## II. Benutzte Hilfsmittel:

- A. Laserstrahl achsial justierbar montiert in einem Rohr, welches auf die Okularstutzen passt. Vorzugsweise mit zusätzlichen Projektionsmuster (z.B. Punktmuster wie bei "LaserMax" oder ähnliches)
- B. Strahlteilerprisma zur Montage auf justierbarem Laserstrahl. Komplet mit seitlichem 90 Grad Anschluss. (Bemerkung: der interne Reflex eines handelsüblichen Strahlteilersprismas darf *nicht* als Referenz verwendet werden, weil sein interner 90 Grad Winkel nur auf  $\pm 5$  Bogenminuten spezifiziert ist, dieser direkte Reflex wird aber für das ganze Prozedere auch gar nicht benötigt)
- C. Anschlussrohr für Strahlteilerprisma / Laserstrahl zur absolut spielfreien Montage in den drei Fokussiereinheiten (bei CO, CW und NO). Dies ist *wahrscheinlich der heikelste Punkt* der ganzen Kollimation. Obwohl unsere Okularanschlusstutzen einen sehr grosse Durchmesser haben (System Lichtenknecker), bleiben sie im Vergleich zu den projizierten Strahllängen von mehreren Metern doch noch sehr klein. Daher ist jede Verkippung gegenüber der Rotationsachsen der Okularstutzen kritisch. In der Praxis hat es sich aber gezeigt, dass mit sehr sorgfältigem Anpressen und Festschrauben des Anschlussrohres auf den jeweiligen Okularstutzen diese Fehlerquelle klein genug gehalten werden kann. (Im Zweifelsfall um  $\pm 180$  Grad verdrehen und allfällige axiale Abweichungen überprüfen)
- D. Planspiegel A mit Montagemöglichkeit auf der X-Achse in der Nähe des Punktes N. Justierbar auf die Y-Z Ebene. Der verwendete Planspiegel ist per Federspannung und Nivellierschrauben sehr exakt und feinfühlig justierbar.
- E. Planspiegel B mit Montagemöglichkeit auf den Lichtenknecker Okularstutzen bei CO, CW und NO. Er soll jeweils exakt senkrecht zu den Rotationachsen der Okularstutzen montierbar sein (das ist nicht automatisch auch die Ebene der Stirnseite der Okularhülsen!) Entweder einen nivellierbaren Spiegel benutzen oder jeweils  $\pm 180$  verdrehen, um die allfällige Fehlweisung zu eruieren.
- F. Diverse Klarsichtsfolien und Papierscheiben mit konzentrischen Kreismarkierungen als Zentrierscheiben.

### III. Fehlerechnungen zu den Winkelabweichungen

**Projizierte Grösse ( $\mu\text{m}$ , mm) eines Winkels (arcsec / arcmin) über eine projizierte Distanz (mm)**

		$\mu\text{m}$	mm								
Distanz (mm)	Winkel (arcsec)					Winkel (arcmin)					
	1	2	5	10	30	1	2	5	10	30	60
	1	2	5	10	30	60	120	300	600	1'800	3'600
1	0.005	0.010	0.024	0.048	0.145	0.291	0.582	1.454	2.909	8.727	17.45
2	0.010	0.019	0.048	0.097	0.291	0.582	1.164	2.909	5.818	17.45	0.035
5	0.024	0.048	0.121	0.242	0.727	1.454	2.909	7.272	14.54	0.044	0.087
10	0.048	0.097	0.242	0.485	1.454	2.909	5.818	14.54	0.029	0.058	0.175
20	0.097	0.194	0.485	0.970	2.909	5.818	11.64	0.029	0.058	0.175	0.349
50	0.242	0.485	1.212	2.424	7.272	14.54	0.029	0.073	0.145	0.436	0.873
100	0.485	0.970	2.424	4.848	14.54	0.029	0.058	0.145	0.291	0.873	1.745
200	0.970	1.939	4.848	9.696	0.029	0.058	0.116	0.291	0.582	1.745	3.491
500	2.424	4.848	12.12	0.024	0.073	0.145	0.291	0.727	1.454	4.363	8.727
1'000	4.848	9.696	0.024	0.048	0.145	0.291	0.582	1.454	2.909	8.727	17.45
2'000	9.696	19.39	0.048	0.097	0.291	0.582	1.164	2.909	5.818	17.45	34.91
5'000	0.024	0.048	0.121	0.242	0.727	1.454	2.909	7.272	14.54	43.63	87.27
10'000	0.048	0.097	0.242	0.485	1.454	2.909	5.818	14.54	29.09	87.27	174.5

366	1.774	3.549	8.872	17.74	0.053	0.106	0.213	0.532	1.065	3.194	6.388
1'211	5.871	11.74	0.029	0.059	0.176	0.352	0.705	1.761	3.523	10.57	21.14
1'577	7.646	15.29	0.038	0.076	0.229	0.459	0.917	2.294	4.587	13.76	27.52
3'600	17.45	0.035	0.087	0.175	0.524	1.047	2.094	5.236	10.47	31.42	62.83
5'500	0.027	0.053	0.133	0.267	0.800	1.600	3.200	7.999	16.00	48.00	95.99

**Lesebeispiel:** Über eine Distanz von 2000 mm wird ein Winkel von 2 arcmin (120 arcsec) auf eine Grösse von 1.164 mm projiziert.

Man beachte, dass auch bei einer grossen 2-Zoll Flanschauflage mit 50 mm Durchmesser bereits ein sehr kleiner Verkantungsfehler von nur 0.015 mm zu einer Fehlweisung von 1 Bogenminute führt. Es ist also nicht praktikabel den mechanisch angeflanschten Kollimationslaser für extrem genaue Ausrichtungen zu verwenden (1 Bogenminute dürfte etwa die erreichbare Limite sein). Die Messung von sehr kleinen Winkeln im Bogensekunden-Bereich ist mit direkten optischen Mitteln in Autokollimation (z.B. Penta Prisma und Theodolit) möglich, solche Messungen sind aber bei unseren Kollimationstoleranzen nicht erforderlich.

Ebenfalls aus dieser Liste kann der Abbildungsmassstab des Teleskops herausgelesen werden: So hat etwa das MFT im Cassegrain Fokus (5'500 mm Brennweite) einen Massstab von 0.027 mm oder 27 Mikrometer pro Bogensekunde und der Vollmond (30 Bogenminuten) wird auf einen Kreis mit 48 mm Durchmesser abgebildet.

## IV. Schrittweises Vorgehen zur vollständigen Kollimation:

### 1. Definition der 180 Grad Ost-West Umlegung der Deklinationsachse.

- 1.1. Zwei fixe Zeiger (ZeigerOst und ZeigerWest) am Fernrohr und zwei mitdrehende Markierungen (MarkeOst und MarkeWest) auf dem 180 Grad Umschlagring anbringen.
- 1.2. ZeigerOst mit MarkeOst zur Deckung bringen. Ebenso ZeigerWest mit MarkeWest
- 1.3. Umschlagen (etwa 180 Grad), bis MarkeOst auf ZeigerWest zeigt. Dann ist die Differenz zwischen ZeigerOst und MarkeWest die doppelte Abweichung vom 180 Grad Umklappwinkel.
- 1.4. Umklappwinkel auf 180 Grad justieren mittels Anstellschrauben am Umschlagring und Schritte 1.1. bis 1.4. iterativ wiederholen, bis alles passt.

### 2. Achsiale Zentrierung des Laserstrahls auf das Anschlussrohr.

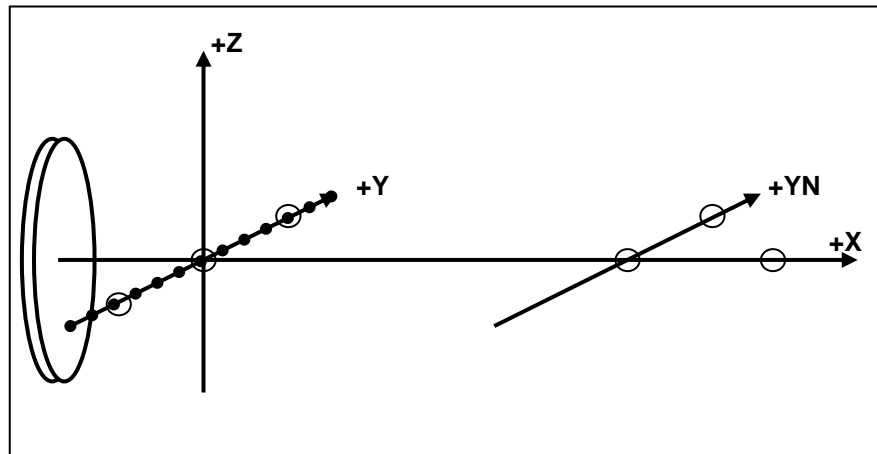
- 2.1. Planspiegel B wird auf das Anschlussrohr gelegt und der reflektierte Strahl über das Strahlteilerprisma auf Achse zentriert mittels achsialer Verkippung und Verschiebung des Lasers. Somit ist eine erste Grobzentrierung möglich.
- 2.2. Die montierte Einheit „Laser, Strahlteiler und Anschlussrohr“ wird z.B. bei CO montiert.
- 2.3. Jetzt wird der Laserstrahl auf einige Meter Distanz projiziert (ohne Hyperbolspiegel oder über beide Planspiegel). Die gesamte Einheit in der NO-Fokussiereinheit 4 x 90 Grad drehen und den Lasers so justieren, so dass die 4 projizierten Punkte deckungsgleich sind.
- 2.4. Punkte 2.1. bis 2.4 iterativ wiederholen, bis alle Offsets und Fehlweisungen des Lasers am Anschlussrohr verschwunden sind.
- 2.5. Somit ist der Laserstrahl kollimiert auf die mechanische Achse des Anschlussrohres. Bei exakter Arbeitsweise kann eine Genauigkeit von etwa 1mm auf 10 Meter Distanz erreicht werden, was einer Fehlweisung von etwa 20 Bogensekunden entspricht.

### 3. Laserstrahl auf Deklinationsachse legen.

- 3.1. Kollimierte Einheit (siehe Punkt 2) an Fokussiereinheit bei CO anschliessen. Die Einheit muss absolut spielfrei angeflanscht werden!

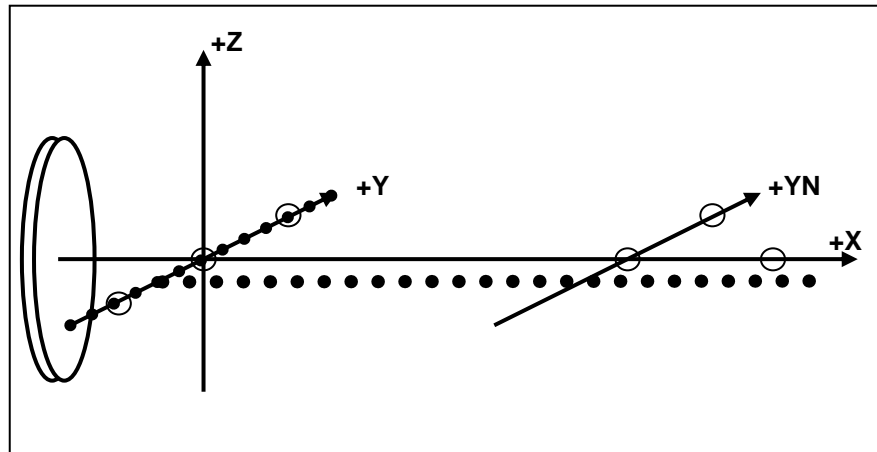
**Anmerkung 1:** Grossteleskope werden bei diesem Schritt mittels Zielfernrohr und Autokollimation justiert. Dabei wird das externe Zielfernrohr auf einen Planspiegel, resp. Pentaprisma gerichtet, welcher/s auf der Deklinationsachse mitreitet. Beim Verändern der Deklination muss dann die Autokollimation exakt erhalten bleiben, damit das Zielfernrohr exakt entlang der Deklinationachse schaut. Dieses Verfahren liefert zwar eine Genauigkeit von etwa 1 Bogensekunde (also nur 0.05 mm Fehlweisung auf 10 Meter Projektionsdistanz) ist aber sehr aufwändig und in unserer Sternwarte kaum durchführbar.

- 3.2. Damit zeigt der Laserstrahl (•••••) entlang der negativen Deklinationsachse.



#### 4. Tertiär-Planspiegel verkippen, bis Laser parallel zur Hauptachse umgelenkt wird.

- 4.1. Montiere justierbaren Planspiegel A in der Nähe des Punktes N. (Dazu muss der Sekundärspiegel und die Nabenhalterung komplett ausgebaut werden)
- 4.2. Laserstrahl von CO: justiere Planspiegel A bis Reflexion des Strahls über Tertiärspiegel und Strahlteiler zentrisch ins Strahlteilerprisma zurückkommt. (Eine erste grobe Hilfe zum Finden des Reflexes ist eine Papierblende im Rohrinnern, welche den Strahl und sein Reflex in der Nähe der Tageslichtblende der Tertiärspiegels auffangen kann.)



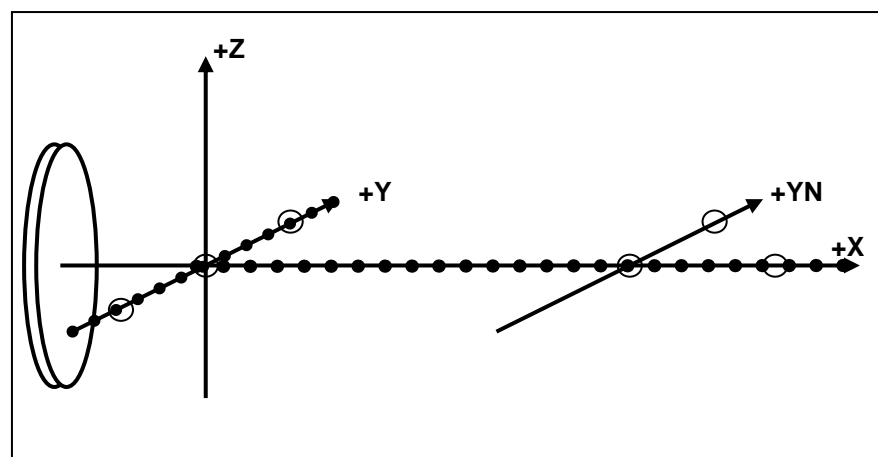
- 4.3. Laserstrahl von CW: messe den Offset des reflektierten Strahles. Die  *Hälfte* dieses Offsets mit dem justierbaren Planspiegel A korrigieren und den Rest mit dem Tertiärspiegel.
- 4.4. Wiederhole das Prozedere mit Laser von CO und CW und kontrolliere die korrekte Winkeleinstellung bis keine Abweichungen mehr auftreten

## 5. Tertiär-Planspiegel verschieben, bis Laser auf die Hauptachse umgelenkt wird.

- 5.1. Aufbau gleich wie unter Punkt 4.
- 5.2. Laserstrahl von CO: Markiere den Punkt, wo der Strahl auf den Planspiegel A auftrifft. (Dazu kann eine Papierzielscheibe vor den Planspiegel A auf der Nabenhalterung montiert werden.)
- 5.3. Laserstrahl von CW: Markiere wiederum den Durchstosspunkt des Strahls auf Planspiegel A.
- 5.4. Der Offset (entlang der Y-Achse) zwischen den beiden Durchstosspunktes von CO und CW wird durch Verschieben des Tertiärspiegels entlang der X-Achse halbiert.
- 5.5. Wiederum kann mittels einer Papierblende in der Nähe der Tertiär-Tageslichtblende kontrolliert werden, ob der Strahl und seine Reflexion jetzt bei jeder Distanz deckungsgleich sind. Gleichzeitig kann dabei auch die Tageslichtblende korrekt eingemittet werden (sie ist aufgesteckt und per Hand minim justierbar).
- 5.6. Jetzt wird nochmals mit Strahl von CO kontrolliert, ob der seitliche Offset bei jeder Distanz eliminiert ist.

**Anmerkung 2:** Theoretisch müsste hier jetzt noch der tertiäre Planspiegel vor dem Nasmyth Einblick eingemittet werden (analog wie bei einem Newton-Sekundärspiegel). Diese Einmitten ist für die optische Kollimation zwar nicht relevant, wohl aber für allfällige Vignettierungen im Gesichtsfeld des Nasmythfokus. Unser Nasmyth Tertiärspiegel ist aber sowie grosszügig bemessen, so dass keinerlei Probleme zu erwarten sind mit der Genauigkeit, welche hier von der Konstruktion schon vorgegeben wird. Eine Verschiebung entlang der Planspiegelebene wird daher kaum nötig sein (es ist mechanisch auch keine spezielle Justierung vorgesehen).

- 5.7. Alle Messungen der Punkte 4.1 bis 5.6. iterativ nachkontrollieren, bevor der Planspiegel A definitiv demontiert wird.



- 5.8. Damit ist sichergestellt, dass der Strahl von der Y-Achse durch den Tertiärspiegel um genau 90 Grad und genau auf die X-Achse umgelenkt wird. Diese X-Achse muss jetzt also unsere optische Hauptachse sein (und nicht etwa die Mitte-Rohrachse!).

**Anmerkung 3:** Durch die Verwendung beider Nasmyth Foki muss unser MFT wie ein Grossteleskop auf die Deklinationsachse kollimiert werden. Wir dürfen also hier nicht das bei Amateurastronomen übliche "Einfachverfahren" wählen, die Optik auf die "Mitte-Rohrachse" zu kollimieren. Dadurch würde jegliche Abweichung vom 90 Grad Winkel zwischen dieser Rohrachse und der Deklinationsachse ein exaktes Umschlagen zwischen den beiden Nasmyth Foki verunmöglichen. Übrigens könnte ein derart "rohrzentriertes" Teleskop mit einer optischen Achse nicht senkrecht zur Deklinationsachse auch nicht exakt zum Himmelsnordpol schauen.

## **6. Markieren der optischen Achse relativ zur Mechanik der Sekundär-Nabe.**

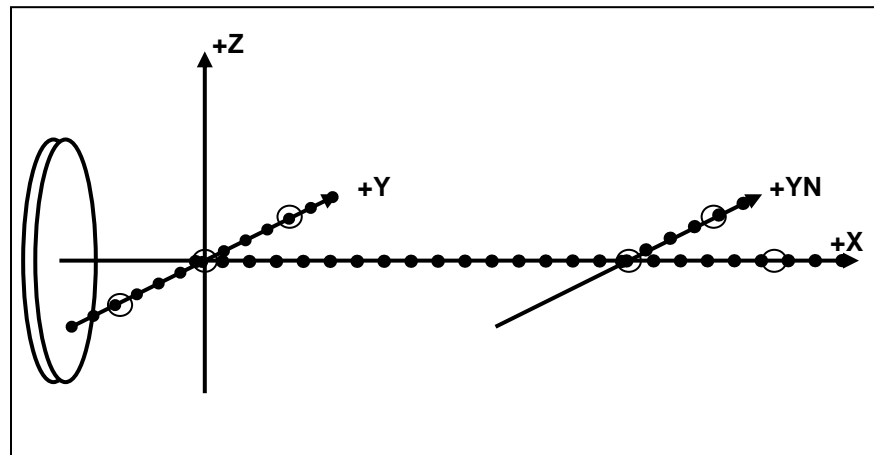
- 6.1. Planspiegel A demontieren.
- 6.2. Strahl von CO oder CW (sollte jetzt keinen Unterschied mehr ergeben!). Auf einer bei der Sekundärnabe montierten Paperzentrierscheibe (keine Klarsichtfolie!) mit mindestens 150 mm Durchmesser den Durchstosspunkt des Strahls markieren.
- 6.3. Auf der gleichen Papierscheibe die Lage der vier Anschlussgewinde der Sekundärnabe markieren und die Orientierung "oben" anschreiben.
- 6.4. Diese Zentrierscheibe wird später (siehe Punkt 10) nochmals gebraucht, um die optische Achse zu finden. Wir müssen diese also sorgfältig aufbewahren!

**Anmerkung 4:** Dieser Punkt ist daher wichtig, weil wir unsere optische Achse später für die Kollimation des Hauptspiegels wieder finden müssen. Jegliche (unvermeidliche) Abweichung von der Rohrmitte führt dazu, dass weder die Lage der Spinne noch die geometrische Rohrmitte eine gute Referenzposition für die optische Achse bietet.

## **7. Optische Achse über Newton-Sekundärspiegel auf Fokussierstutzen kollimieren.**

- 7.1. Sekundärnabe wieder einsetzen und dabei mit Hilfe der Kollimationsmarken am Rohrrinnenrand und am Montagetool die korrekte Drehposition genau beachten.
- 7.2. Newton-Planspiegel montieren.
- 7.3. Strahl immer noch von CO (oder CW).
- 7.4. Planspiegel B bei NO montieren (exakt senkrecht zur optischen Achse des Okularstutzens).
- 7.5. Reflektierter Strahl zurück über Newton Planspiegel, Tertiärspiegel und Strahlteiler einmitten durch Verkippen des Newton-Planspiegels. (eine erste Grobjustierung wird erleichtert durch einen Papierschirm in der Gegend der Tertiär-Streulichtblende. Auf diesem Schirm ist der Strahl gleichzeitig mit seiner Reflexion sichtbar.)
- 7.6. Schritte 7.4. und 7.5 wiederholen, aber diesmal mit einem zusätzlichen Zwischenrohr als Verlängerung am Newon-Okularauszug.
- 7.7. Somit läuft der Strahl parallel zur Achse der Fokussiereinheit durch die Newton-Fokussiereinheit. Er ist aber noch nicht *auf* der Achse.

- 7.8. Der seitliche Offset (in der X-Y Ebene) des Strahl zur Okularmitte wird jetzt beseitigt durch achsiale Verschiebung des Newton-Sekundärspiegels entlang der X-Achse. Der seitliche Versatz soll dabei sowohl beim kurzem als auch beim langem Okularstutzen verschwinden.
- 7.9. Jetzt bleibt noch ein vertikaler Strahlversatz auf der YN-Achse parallel zur Y-Z Ebene. Das entspricht der „Fehlweisung“ des Okularstutzens zur optischen Hauptachse. Auch dieser Offset wird sowohl mit kurzem als auch mit langem Okularrohr gemessen. Der Offset wird schliesslich beseitigt durch vertikale Verschiebung/Verkipfung des gesamten Okularstutzens.
- 7.10. Weil bei dieser Verschiebung des Okularstutzens auch wieder eine minime axiale Drehung entsteht, muss der ganze Punkt 7 wiederholt werden, bis alle drei Offsets (Strahlreflexion, seitlicher und vertikaler Offset) verschwinden – unabhängig von der Länge des Okularstutzens.
- 7.11. Somit ist sichergestellt, dass die Achse des Newton-Okularstutzens zusammenfällt mit der optischen Achse, welche vom Sekundärspiegel umgelenkt wurde.
- 7.12. Beachte, dass eine exakte Ausrichtung des Newton-Okularstutzens auf die YN – Achse (das heisst parallel zur Y-Achse) nicht nötig ist. (eine solche „parallel-zur Deklinationsachse und exakt 90 Grad“ Kalibration wäre z.B. mit Hilfe eines Pentaprismas machbar)



## 8. Optische Zentrierung des Newton-Planspiegels vor dem Okularstutzen.

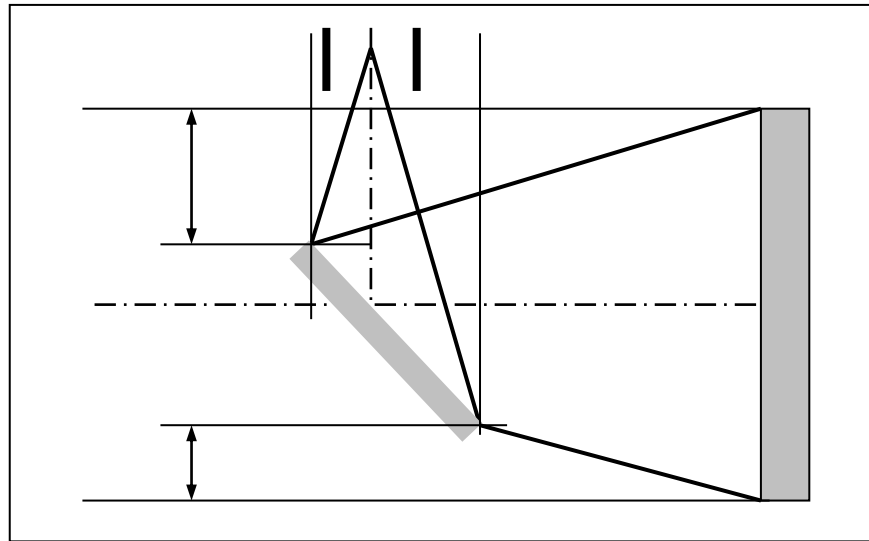
- 8.1. Hier wird die *sichtbare* Projektion des Newton Planspiegels vom Okularstutzen her gesehen eingemittet. Mit Hilfe einer kleinen Lochblende in der Mitte des Okularstutzens beim Newtonfokus schauen wir auf den Rand des Newton-Planspiegel. An der innerern Stirnseite des Okularauszuges befestigen wir zudem eine durchsichtige Zentrierfolie. Die scheinbare Kreisform des elliptischen Planspiegels wird jetzt auf die Zentrierfolie eingemittet mittels Justierungen des Planspiegels entlang der X und der Z-Achsen.

**Anmerkung 5:** Diese Verstellungen sind leider erst jetzt, mit korrekt ausgerichtetem Okularauszug möglich. Gleichzeitig verändern sie aber wieder die Kollimation unter Punkt 7. Weshalb eine zusätzliche Iteration der Punkt 7 und 8 nötig sein wird, um alle Offsets zu eliminieren.



- 8.2. Jetzt ist noch die korrekte Einstellung des Newton-Umlenkspiegels entlang der Y-Achse einzustellen. Dies kann per Einblick in den Okularstutzen nicht eingestellt werden und muss als theoretisch berechnete Grösse berücksichtigt werden.

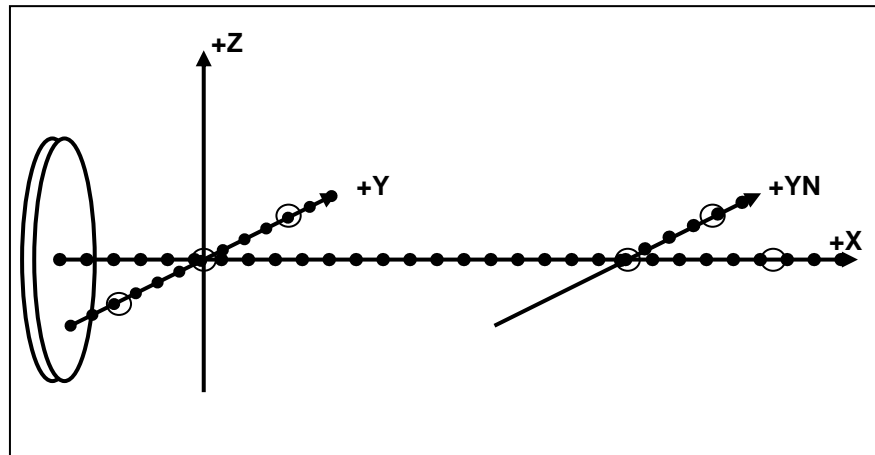
**Anmerkung 6:** Wie bei jedem (insbesondere kurzbrennweitigen) Newton-Teleskop darf der Umlenkspiegel nicht geometrisch auf die optische Achse zentriert werden, sondern er muss leicht asymmetrisch versetzt "vom Okularstutzen entfernt" montiert sein, damit er optisch exakt zentriert ist. Bei unserem Newtonsystem beträgt dieser seitliche Versatz etwa 7 mm, resp. 14 mm oben-unten Differenz. Die untenstehende Zeichnung verdeutlicht diesen "anormalen" Sachverhalt jeder korrekten Newton-Kollimation. Nebst diesem Versatz baut zudem unsere Spiegelzelle für den Newton-Planspiegel aus konstruktiven Gründen nicht genau kreisrund, was ein weiterer Grund ist, dass der Newtonplanspiegel nicht kreisymmetrisch auf der optischen Achse stehen darf.



- 8.3. Nachdem die X, Z und Y Positionen des Newtonplanspiegels korrekt eingestellt sind, wird wie oben erwähnt nochmals eine Kollimation (Iteration ab Punkt 7) durchgeführt.

## 9. Seitliche Verschiebung der mech. Hauptspiegelmitte auf die optische Achse.

- 9.1. Strahl wird von NO her eingestrahlt und es ist jetzt sichergestellt, dass der Newton-Umlenkspiegel den Strahl auf die X-Achse (optische Achse) hinunterlenkt.
- 9.2. MFT auf genügend hohe Elevation über Horizont richten (Hauptspiegel muss in seiner Zelle aufliegen).
- 9.3. Mit den Zentrierkreisen und Punkten des LaserMax wird der seitliche Offset des Hauptspiegels zur optischen Achse ausgemessen. Allfällige kleine Abweichungen können durch Verschieben des Hauptspiegels in der Y-Z Ebene eliminiert werden.
- 9.4. Damit liegt der *mechanische* Mittelpunkt des Hauptspiegels auf der optischen Achse. (Strenggenommen kann jetzt noch ein seitlicher Offset zur *optischen* Mitte (Parabolachse) des Hauptspiegels bestehen – eine solche ist aber erst anhand der genauen Analyse der Beugungsbilder festzustellen und bei der Feinkollimation zu korrigieren).

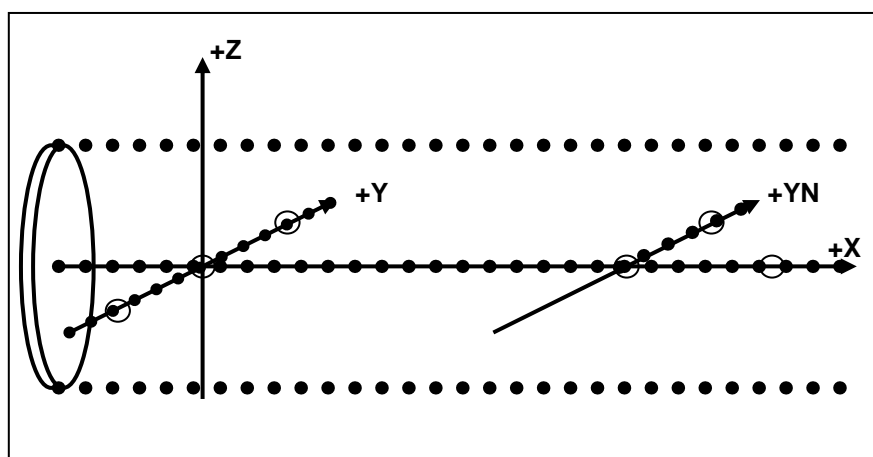


## 10. Verkippung des Hauptspiegels auf die optische Achse.

- 10.1. Jetzt wird die unter Punkt 6 hergestellte Zentrierfolie für die optische Achse bei N wieder auf die Sekundärnabe montiert. Die vom Hauptspiegel reflektierten Punkte und Kreise müssen jetzt durch Verkippen des Hauptspiegels auf diese Folie um die optische Achse zentriert werden.
- 10.2. Damit ist der Hauptspiegel auf die optische Achse kollimiert. (Strenggenommen erst seine mechanische Mitte aber noch nicht die Parabolachse, siehe Punkt 9.4).

**Anmerkung 7:** Hiermit ist die Grobkollimation des Newtonteleskops abgeschlossen. Eine abschliessende Feinkollimation ist an einem Sternbild mittels Startests möglich und soll mittels Feinjustierung des Hauptspiegels erfolgen (allenfalls seitlich schieben und verkippen).

**Anmerkung 8:** Falls nur ein achsialer Laserstrahl zur Verfügung steht, dann gibt es die Möglichkeit, durch temporären Ausbau des Tertiär-Planspiegels den Laserstrahl auf den Hauptspiegel zu projizieren. Strahldurchstosspunkt und Reflexion zurück über Newton-Sekundär zum Strahlteiler sind dann wie gewohnt zu benutzen zur Kollimation des Hauptspiegels für die Punkte 9 und 10.



## 11. Feinkollimation des Newtonteleskops an einem Stern (Startest).

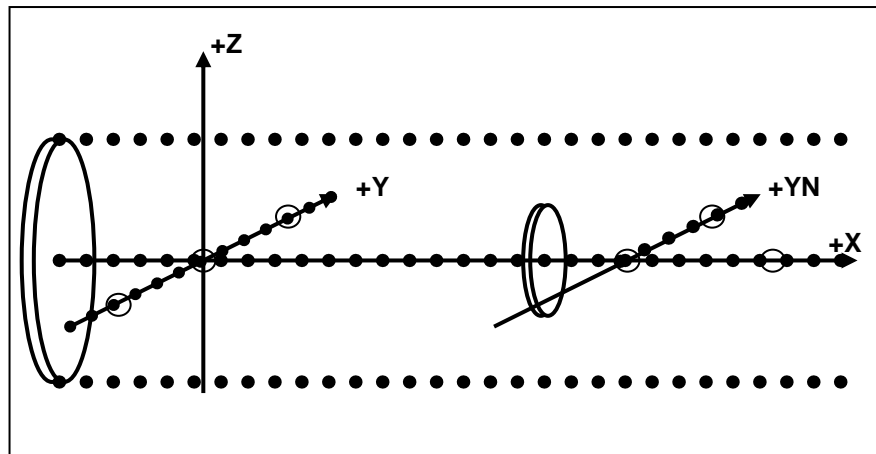
- 11.1. Einen hellen Stern in Zenitnähe einmitten und Startests bei NO unter höchster Vergrößerung durchführen. Allenfalls geeignete Barlowlinse zusammen mit 7 mm Okular (225fach) verwenden. Ein vernünftig ruhige Luft (seeing) ist dazu erforderlich.

**Anmerkung 9:** Es ist entscheidend, die Feinkollimation des Newtonteleskops (durch Feinjustierung des Hauptspiegel) zu beenden, bevor diejenige des Cassegrain Systems (mittels Feinjustierung des Hyperbolspiegels) durchgeführt wird. Bei umgekehrter Reihenfolge würde die Feinkollimation des Cassegrain wieder zerstört. Bei schlechter Witterung können also zwar noch die Justierschritte 12, 13 und 14 des Hyperbolspiegels vorgezogen werden. Aber die Feinkollimation des Cassegrain Systems (Punkt 15) darf erst *nach* derjenigen der Newton (hier beschrieben) vorgenommen werden.

- 11.2. Montieren der axialsymmetrischen Papierblende (von Punkt 6) bei der Sekundärnabe, um die optische Achse zu markieren und die systembedingten Asymmetrien des kurzbreitigen Newtonsystems (siehe unter Punkt 8) zu eliminieren.
- 11.3. Allfällige Abweichungen von der theoretisch zu erwarteten Symmetrie vom Beugungsbild und Papierblende-Abschattung mit Hilfe des **Hauptspiegels** kollimieren (insbesondere Verkippung und allenfalls auch Verschiebung). Je nach Luftunruhe kann dafür die Defokussierung von etwa  $\pm 10 \lambda$  ( $\pm 0.7 \text{ mm}$ ) bis hinunter zum effektiven Fokus benutzt werden.

## 12. Seitliche Justierung des Cassegrain-Hyperbolspiegels auf die optische Achse.

- 12.1. Strahl wiederum von CO (oder CW).
- 12.2. Wir montieren eine Folie mit Zentrierkreisen auf die Oberfläche des Cassegrain Sekundär-Hyperbolspiegels.

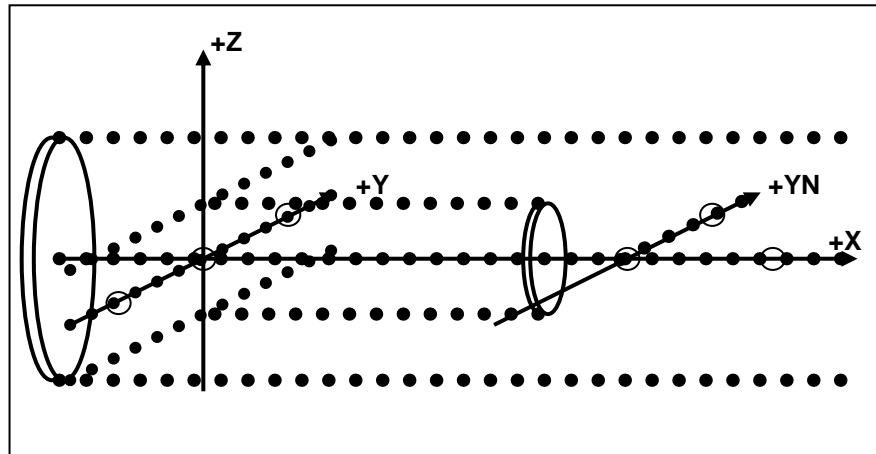


- 12.3. Mittels der Justierschrauben nahe der Nabe („unten am Hals“) wird der Hyperbolspiegel seitlich verschoben, bis sein *mechanisches* Zentrum auf die optische Achse fällt.

**Anmerkung 10:** Wie beim Parabolspiegel wäre hier wiederum eine seitlicher Offset zwischen mechanischer Spiegelachse und optischer Hyperbelachse möglich, welcher erst später anhand der genauen Analyse der Abbildungsleistung korrigiert werden kann.

### 13. Verkippung des Cassegrain-Hyperbolspiegels auf die optische Achse.

- 13.1. Demontieren der Zentrierkreis-Scheibe vor dem Hyperbolspiegel und Strahl wiederum von CO (oder CW).



- 13.2. Mittels der Justierschrauben nahe des Hyperbolspiegels („oben am Hals“) wird dieser verkipp, bis der reflektierte Strahl über Tertiärspiegel und Strahlteiler wiederum eingemittet ist. (eine erste Grobjustierung wird erleichtert durch einen Papierschirm in der Gegend der Tertiär-Streulichtblende analog wie unter Punkt 5.5. Auf diesem Schirm kann gleichzeitig der Strahl und seine Reflexion sichtbar sein.)
- 13.3. Damit ist die Grobkollimation des Cassegrain-Nasmyth Teleskops abgeschlossen. Eine Einstellung der Fokusebene und eine abschliessende Feinkollimation ist an einem Sternbild möglich. (siehe Punkt 14.)

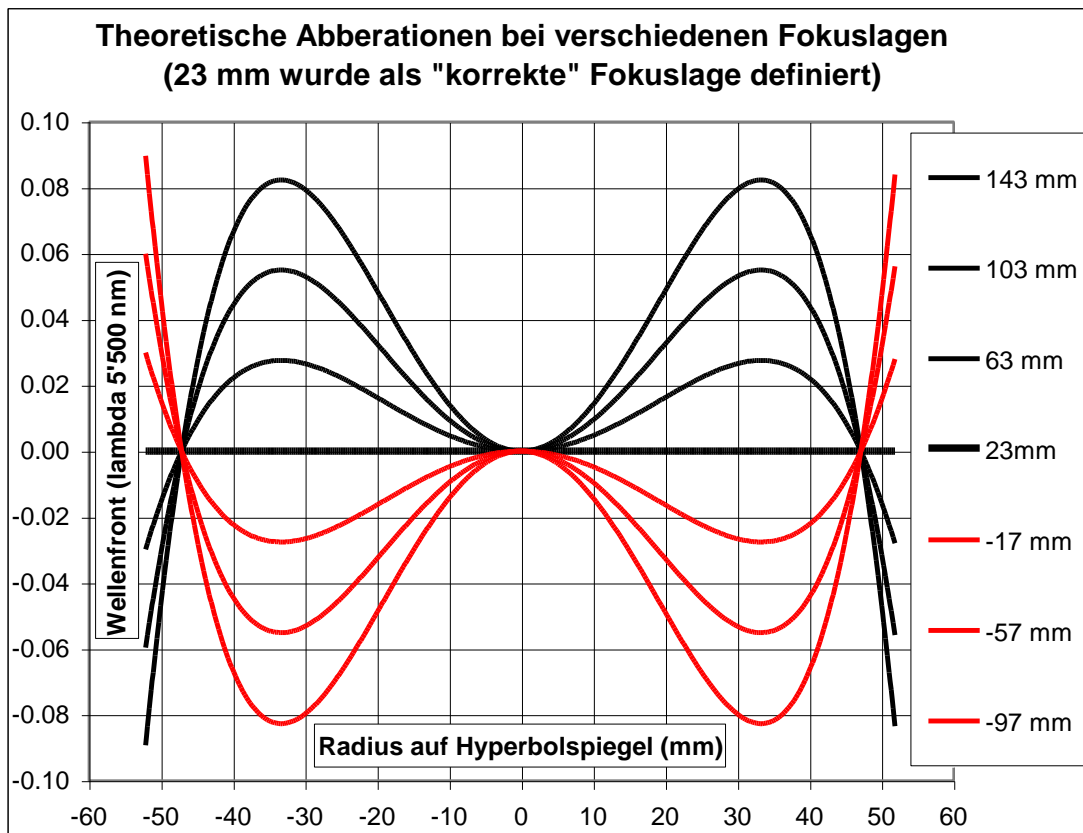
### 14. Achsiale Verschiebung des Cassegrain-Sekundärspiegels (Fokusalage).

- 14.1. Beobachtung eines Sterns bei CO (oder CW) bei niedriger Vergrößerung.
- 14.2. Um die Lage des Brennpunktes auf die mechanischen Gegebenheiten des Okularstützen optimal abzustimmen, kann durch achsiale Verschiebung des Hyperbolspiegels („Halslänge“ verändern) eine entsprechende Feinabstimmung erfolgen. Dabei ist folgendes zu beachten:  
Die Optik und Mechanik des Cassegrain Systems ist theoretisch wie folgt ausgelegt:

Primärbrennweite des Newtonspiegels:	1576.00 mm
Distanz von Parabel Scheitel zu Hyperbelscheitel:	1167.86 mm
Distanz von Hyperbelscheitel zu Cassegrain Fokus:	1436.86 mm
Radius der Hyperbolspiegels auf der optischen Achse:	- 1140.14 mm
Sollwert konische Konstante $E^2$ der Hyperbel	- 3.217
Brennweite des Cassegrain Systems	5548.30 mm
Cassegrain-Fokusalage auf Millimeter Skala mit V133	23.00 mm
Brennweitenverlängerung Cassegrain / Newton:	3.520

Bei der Einstellung der theoretisch „korrekten“ Fokusalage haben wir eine gewisse Toleranzbreite bevor störende Aberrationen erzeugt werden (siehe nachstehende Grafik). So erzeugt z.B. eine Verschiebung der Fokusalage um + 40 mm eine „peak-peak value“ Deformation der Wellenfront (nach refocusing) von etwa  $0.057 = 1/17$  Lambda, das entspricht einem Oberflächenfehler auf der Optik von  $1/35$  Lambda. In der Praxis ist die theoretisch korrekte Fokusalage nicht exakt bekannt, sondern kann

mittels Startest ermittelt werden. Die exakte Fokusslage ist aber (wie diese Analyse zeigt) auch nicht heikel für die Bildqualität. (Gemäss Victor Larrosa hat die Hyperbel einen achsialen Radius von  $-1140.14$  mm und ist mit einer konischen Konstanten von  $-3.2$  poliert.



**Zur Grafik:** Bei einer angenommenen korrekten Fokusslage von 23 mm entstehen bei Abweichungen von jeweils 40 mm entsprechende Deformationen der Wellenfront im Cassegrainfokus. Beachte auch dass der ausgeleuchtete Radius der Hyperbel für den Strahlengang auf der optischen Achse nur etwa 52 mm beträgt. Der volle Radius des Hyperbolspiegels von 60 mm wird nur für die Reduzierung der Vignettierung bei maximalem Bildfeld benötigt. Die genauen Daten der gerechneten Beispiele sind in der untenstehenden Tabelle aufgeführt.

Cass.-fokus mit V133 (mm)	-97	-57	-17	23	63	103	143
Distanz Parabel-Hyp. (mm)	1'177.3	1'174.1	1'170.9	1'167.9	1'164.9	1'162.1	1'159.3
Distanz Hyp.-Cass.fok. (mm)	1'326.3	1'363.1	1'399.9	1'436.9	1'473.9	1'511.1	1'548.3
Soll-Konst. $E^2$ der Hyp. ( )	-3.458	-3.373	-3.292	-3.217	-3.145	-3.078	-3.015
Brennweite Cass. (mm)	5'243	5'345	5'446	5'548	5'651	5'753	5'856
Brennweite Cass./Newton ( )	3.327	3.391	3.456	3.520	3.586	3.650	3.716

14.3. Weil durch die geringfügige Anpassung der "Halslänge" die Justierungen unter Punkt 12 und 13 wiederum beeinträchtigt werden können empfiehlt sich wiederum eine iterative Wiederholung der Punkte 12 bis 14.

## 15. Feinkollimation des Cassegrain-Nasmyth Systems an einem Stern (Startest).

- 15.1. Einen hellen Stern in Zenitnähe einmitten und Startests bei CO (und/oder CW) unter höchster Vergrößerung (7mm Okular = 790fach). Ein vernünftig ruhige Luft (seeing) ist dazu erforderlich.
- 15.2. Allfällige Abweichungen von der theoretisch zu erwarteten Symmetrie von Beugungsbild und Fangspiegelabschattung mit Hilfe des **Hyperbolspiegels** kollimieren (insbesondere durch axiale Verkippung und allenfalls auch seitliche Verschiebung – also "Halsverrenkung"). Je nach Luftunruhe kann dafür die Defokussierung von etwa  $\pm 10 \lambda$  ( $\pm 8.4 \text{ mm}$ ) bis hinunter zum effektiven Fokus benutzt werden.

**Anmerkung 11:** Die genaue Interpretation des Startests (siehe Referenz unten) braucht etwas Erfahrung und diese abschliessenden Feinkollimationen sollten daher nur von entsprechend kundigen Personen durchgeführt werden.

### Buchreferenz zum Startest:

Harold Richard Suiter: "Star Testing Astronomical Telescopes" A Manual for Optical Evaluation and Adjustment. Willmann-Bell, Richmond Virginia 1994, ISBN 943396-44-1

Eine entsprechende Simulations-SW "Aberrator" von Luc Berrevoets kann gratis (freeware) vom Internet heruntergeladen werden unter

<http://aberrator.astronomy.net/>

**FAZIT:** Damit ist das MFT in allen 3 optischen Anordnungen optisch kollimiert und zudem ist die optische Hauptachse exakt senkrecht zur Deklinationssachse ausgerichtet. Das heisst wir sollten auch den Himmels-Nordpol exakt optisch zentrieren können.

Im Kollimationskoffer liegt zudem eine montierte Rasier Klinge für den 31 mm Okularadapter. Damit können Foucault Tests der Optik direkt an einem Sternbild durchgeführt werden.

---

Roland Stalder, Version 3, Dezember 2003