

Vorwort nach 10 Jahren Toroid-Erfahrung

Der nachfolgende Artikel "Der Schliff eines torischen Spiegels" wurde in der Frühphase der Schweizer YOLO-Bewegung geschrieben und in der Amateur-Zeitschrift "Orion", Ausgabe Nr. 259, im Dezember 1993 veröffentlicht. In der Zwischenzeit wurden in der YOLO-Gruppe viele Spiegel (an die 20 Stück) mit verschiedenen starken Toroid-Formen erfolgreich poliert. Aus dieser "statistischen" Erfahrung über verschiedene Spiegelschleifer sind folgende Punkte erwähnenswert:

- 1) Die Verwendung des Parallelogramm-Hebels ist hilfreich, aber bei entsprechender Sorgfalt nicht zwingend notwendig. Das heisst nicht, dass Pechhaut und Spiegel gegeneinander verdreht werden dürften. Aber es genügt durchaus, das oben liegende Teil (Spiegel oder Pechhaut) und den Untergrund des Schleiftisches klar mit Richtungsmarkierungen zu versehen. Das Auge kann während der Polierbewegungen sehr empfindlich die Parallelität der Markierungen überwachen.
- 2) Es führen viele Wege zum polierten Toroid. Der im Artikel beschriebene Weg, einen Kugelspiegel auf den langen Radius des Toroids vorzubereiten und nachfolgend an kurzem und langem Radius abwechselnd zu arbeiten, ist eine der Möglichkeiten. Ein alternativer Weg hat sich auch gut bewährt: man geht von einer Sphäre mit dem kurzen Radius des Toroids aus und bearbeitet für die Zylinderkorrektur ausschliesslich den langen Radius (dabei immer Spiegel unten, Pechhaut oben). Eine getrimmte Pechhaut beschleunigt dabei den Fortschritt der Zylinderkorrektur erheblich (ca. 30% der Fläche einer runden Pechhaut um gut 0,1mm mit Schablone während des Pressens absenken. Die Pechhaut soll vorallem dort nicht greifen, wo auch kein Glas entfernt werden soll, d.h. an den Enden der Achse vom kurzen Radius). Für die letzten Retouches muss dann aber wieder eine Pechhaut mit durchgehender Fläche verwendet werden.
- 3) Die Toroidform ist innerhalb der YOLO-Gruppe zu etwas Alltäglichem geworden. Wer einmal eine solche Fläche gefertigt hat, stuft sie im Schwierigkeitsgrad ähnlich ein wie den typischen Parabolspiegel.

Dornach, 29.10.2003

Der Schliff eines torischen Spiegels

Lukas Howald, Unterdorfstr.21, CH-4143 Dornach
August 1993

Einleitung

Dieser Artikel über den Schliff eines torischen Spiegels ist eine praktische Fortsetzung der von H.G. Ziegler in Orion Nr.251 [1] eingeleiteten „Aktion YOLO“. Ich war sofort begeistert von der optisch eleganten Lösung von A.S. Leonards YOLO-Schiefspiegler [2] und begann im September des vergangenen Jahres mit dem Bau eines solchen Instrumentes. Da ich zuvor noch nie einen Spiegel geschliffen hatte, war alles Neuland für mich. Für die grundlegenden Techniken des Spiegelschliffs orientierte ich mich an der köstlichen Anleitung von H. Rohr [3] und dem umfangreichen Werk von J. Texereau [4].

Der Primärspiegel des YOLO-Schiefspieglers ist ein schwach gekrümmter konkaver Kugelspiegel mit einer hyperbolischen Korrektur. Die Herstellung eines solchen Spiegels geht genau gleich vor sich wie diejenige eines Parabolspiegels für ein langbrennweitiges Newton-Teleskop. Eher ungewohnt ist der Sekundärspiegel des YOLO. Dieser ebenfalls schwach gekrümmte konkave Spiegel weist zwei verschiedene Krümmungsradien in zwei zueinander senkrechten Achsen auf. Eine solche Fläche kann durch mechanisches Verspannen eines Kugelspiegels entstehen (wie von A.S. Leonard [2] beschrieben) oder durch geeignete Bewegungen geschliffen werden (wie von J. Sasian [5] und J. Mulherin [6] beschrieben). Dass derartige optische Flächen geschliffen werden können, zeigt auch die Brillenindustrie täglich mit Linsen, die den Astigmatismus des Auges korrigieren. In den folgenden Abschnitten möchte ich anhand meiner eigenen Erfahrung zeigen, dass der Amateur-Spiegelschleifer tatsächlich mit einfachsten Mitteln astigmatische Flächen sehr präzise schleifen und auch kontrollieren kann. Im nächsten Abschnitt wird die Torusfläche und deren Anwendung im Schiefspiegler näher erläutert. Das praktische Vorgehen beim Schliff des torischen Spiegels ist dann im Abschnitt „Der Schliff“ beschrieben. Danach werden zwei optische Testverfahren vorgestellt, mit denen der Spiegel geprüft wird. Insbesondere der beschriebene Nulltest garantiert die hohe Präzision, welche für ein astronomisches Teleskop nötig ist.

An dieser Stelle möchte ich betonen, dass alle in meinem Artikel beschriebenen Verfahren in den angegebenen amerikanischen Originalarbeiten z.T. ausführlich beschrieben sind. Die Lektüre dieser Arbeiten empfehle ich sehr. Im vorliegenden Artikel geht es darum, weitere Amateure zum Schliff eines solchen Spiegels zu ermutigen. Wenn ein paar wenige Spielregeln eingehalten werden, ist der Schwierigkeitsgrad nicht grösser als bei einem normalen Parabolspiegel.

Die zwei Voraussetzungen die der Spiegelschleifer für den Schliff des torischen Spiegels mitbringen sollte, sind: erstens die Erfahrung vom erfolgreichen Schliff eines Kugelspiegels und zweitens, eine gewisse Vertrautheit in der Anwendung von Foucault- und/oder Ronchi-Test mit der daraus abgeleiteten Korrektur von Zonenfehlern. Diese Erfahrungen können vom Neuling durchaus während des Schliffs eines Primärspiegels für den YOLO gewonnen werden, wie mein Beispiel zeigt. Wer sich zu unsicher für den Alleingang fühlt, sollte sich der nächstgelegenen Spiegelschleifgruppe anschliessen oder den Erfahrungsaustausch mit einem langjährigen „Glaswurm“ suchen.

Die Torusfläche

Der unabgeschattete Strahlengang im YOLO-Schiefspiegler wird durch Kippen des Primärspiegels erreicht. Die durch den schiefen Strahlengang entstehenden Abbildungsfehler werden einerseits durch Kippwinkel und Abstand des Sekundärspiegels und andererseits durch geeignete Formen beider Spiegel korrigiert. Die drei hauptsächlichen *Bildfehler*, welche korrigiert werden müssen, sind sphärische Aberration, axiale Koma und axialer Astigmatismus. Der axiale Astigmatismus des gesamten YOLO-Systems wird durch eine entsprechende astigmatische Verformung des Sekundärspiegels aufgehoben. Unter den verschiedenen geometrischen Flächen bietet der Torus die gewünschten Eigenschaften für eine astigmatische Spiegelfläche. Abbildung 1 zeigt zwei verschiedene Toruskörper. Den in Abb. 1a dargestellten Körper könnte man als „wurstförmigen Ring“ bezeichnen. Er entsteht durch Drehen einer Kreisscheibe mit Radius R_1 um die senkrechte Drehachse D . Im vorderen aufgeschnittenen Bildteil sieht man, dass der Radius R_2 am Äquator wesentlich grösser ist als der in einer Meridianebene liegende Radius R_1 . Nimmt man nun als Spiegelfläche einen kleinen Ausschnitt auf dem Äquator der Torusfläche (schwarzes Scheibchen mit Pfeil markiert), so hat auch dieser Ausschnitt entlang dem Äquator einen Kreisquerschnitt mit Krümmungsradius R_2 und senkrecht dazu einen Kreisquerschnitt mit R_1 . Diese Spiegelfläche hat gleichzeitig zwei verschiedene Brennweiten. Sie vereint das gespiegelte Licht nicht in einem einzigen Brennpunkt, sondern in zwei zueinander senkrechten „Brennlinien“ die weit auseinander liegen können. Der torische Spiegel hat deshalb als Einzelfläche einen typischen Astigmatismus. Eine sehr stark astigmatische Spiegelfläche ($R_1:R_2 = 1:2$ wie in Abb. 1a) wurde von J. Sasian in seinem sogenannten Newton-Schiefspiegler [7] verwendet. Bei diesem Beispiel muss der Übergang vom Kugelspiegel zum Toroid schon während der letzten Stufe des Feinschliffs gemacht werden. Für den YOLO braucht es dagegen eine viel schwächere Deformation. Das entsprechende Toroid ist nahe der Kugelform und die Radien R_1 und R_2 unterscheiden sich nur um wenige Prozent (siehe Abb. 1b). Auch hier ist die eigentliche Spiegelfläche ein winziger Ausschnitt auf dem Äquator. Wegen der langen Krümmungsradien ist die zu entfernende Glasmenge beim Übergang zum Toroid klein und kann während der Politur des Spiegels wegpoliert werden.

Dank der langen Krümmungsradien (verglichen mit dem Spiegeldurchmesser) gibt es zwei andere geometrische Flächen welche die Torusfläche am Äquator mit grosser Genauigkeit annähern. Die *erste Näherung* beschreibt die Torusfläche als Kugelfläche mit einer leichten *zylinderförmigen Korrektur*. Diese Näherung hilft den Schleifvorgang zu verstehen und wird im nächsten Abschnitt verwendet. Die *zweite Näherung* ersetzt den Torus am Äquator durch ein *Ellipsoid*. Dadurch kann eine einfache Anordnung für den Nulltest des fertigen Spiegels berechnet werden.

Der Schliff

Beim Spiegelschliff wird die Gesetzmässigkeit ausgenützt, dass von zwei aufeinanderliegenden, nur durch Schleifpulver getrennten Glasplatten die obere ausgehöhlt wird, sobald sie regelmässig über die untere hin und her geschoben wird. Die untere Glasplatte nimmt dabei die entgegengesetzte Passform an. Wenn nun der Spiegelschleifer die Reibrichtung ständig ändert, indem er langsam um den Schleiftisch herumgeht und auch noch die Glasplatten gegeneinander langsam dreht, so bildet sich auf natürliche Weise eine kugelförmige Oberfläche der Glasplatten. Unter den geschilderten Bedingungen ist die Kugel die einzige Passform, welche für alle Stellungen der Glasplatten einen gleichmässigen Kontakt und somit eine regelmässige Verteilung des Schleifpulvers erlaubt.

Bleibt nun aber der Spiegelschleifer an einem Ort stehen und unterdrückt jegliche Drehbewegung zwischen den beiden Glasscheiben, so entsteht auf ebenso natürliche Weise eine Zylinderfläche anstelle der Kugelfläche. Somit ist das ganze Geheimnis um den Schliff des torischen Spiegels gelüftet: zuerst wird ein normaler Kugelspiegel geschliffen und poliert, danach wird er durch eine zylinderförmige Korrektur zum Toroid umgearbeitet. Die Feinheiten die es dabei zu beachten gilt, beschreibe ich im folgenden am Beispiel des Sekundärspiegels für einen YOLO-Schiefspiegler mit 150mm Öffnung und 1/12 Öffnungsverhältnis. Die Daten für diesen „Standard-YOLO“ sind in Tabelle I gegeben. Für eine Abbildung des Strahlengangs und die Definition der Kippwinkel κ_1 und κ_2 verweise ich auf die Zeichnung im Artikel von H. Ziegler [1]. Der längere Krümmungsradius des Sekundärspiegels liegt in der Zeichenebene. Zum Primärspiegel möchte ich hier nur wenig sagen. Mit 610 cm Krümmungsradius ist er sehr schwach gekrümmt und der Grobschliff geht entsprechend schnell. Der Krümmungsradius sollte auf etwa 5 bis 10 cm genau erreicht werden. Andernfalls müsste das System nochmals durchgerechnet werden. Die hyperbolische Korrektur mit einem K-Faktor von $-4,4$ ist äusserst gering (ca 15 Minuten Polierzeit können ausreichen). Das Vorgehen beim Hyperbolisieren ist gleich wie beim Parabolisieren eines Spiegels, mit dem einzigen Unterschied, dass im Foucault-Test die berechneten Parabelwerte für die Schneidposition in unserem Fall mit $4,4$ multipliziert werden.

Der ebenfalls sehr schwach gekrümmte Sekundärspiegel wird zuerst als normaler Kugelspiegel geschliffen. Grobschliff, Feinschliff und Politur mit der Pechhaut verlaufen wie in den Lehrbüchern des Spiegelschliffs beschrieben. Die Scheiteltiefe

der Kugelhöhhlung beträgt weniger als 0,3 mm. Der Grobschliff kann deshalb mit Karbo 120 oder 280 erfolgen. Keinesfalls sollte Karbo 80 verwendet werden, da die tiefen Ausbrüche nachher in vielen Stunden Arbeit nur langsam verschwinden. Sogar Karbo 120 hat bei meinem Spiegel noch tiefe Spuren hinterlassen. Ich empfehle deshalb, Karbo 120 nur während des Abtragens von maximal 2/3 der Scheiteltiefe zu verwenden und die restliche Höhlung mit Karbo 280 zu schleifen. Die Politur muss nicht ganz bis zur perfekt auspolierten Oberfläche getrieben werden, da beim späteren Übergang zum Toroid noch mehrere Polierstunden hinzukommen. Hingegen muss aber eine sehr gute Kugelform des Spiegels bis an den Rand hinaus angestrebt werden (Foucault- oder Ronchi-Test!). Der ideale Krümmungsradius des Kugelspiegels liegt beim langen Radius des Toroids oder sogar etwas länger, und nicht etwa zwischen den beiden Radien. Auch hier genügt es, wenn dieses Ideal auf 5 bis 10 cm genau erreicht wird. Der YOLO-Schiefspiegler hat ja die schöne Eigenschaft, dass die endgültigen Kippwinkel und Abstände nochmals mit den fertig vorliegenden Spiegeln berechnet werden können. Dies bedeutet aber auch, dass der Tubus für einen YOLO erst nach dem Spiegelschliff gebaut werden sollte.

Nun kommt der Übergang zum Toroid. Auf der Rückseite und am Rand des Spiegels werden die beiden zukünftigen Achsen des Toroids angezeichnet. Die Achse des langen Krümmungsradius wird auch auf die Rückseite der Pechhaut übertragen. Wie schon angedeutet, sollen bei der zylindrischen Korrektur die Drehbewegungen zwischen Pechhaut und Spiegel unterbleiben. Damit dies mit der nötigen Genauigkeit klappt, sollte sich der Spiegelschleifer eine kleine Hilfseinrichtung [5] basteln. Der in Abb. 2 skizzierte Parallelogramm-Hilfshebel wird mit einem Ende am Schleiftisch und mit dem anderen Ende auf der Rückseite von Spiegel oder Pechhaut befestigt. Der Mechanismus besteht aus sieben gleich langen Streifen (z.B. Plexiglas), die drehbar miteinander verbunden sind. Dieser Hebelmechanismus verhindert die Drehbewegung, lässt aber alle seitlichen Bewegungen zu. Er sollte mit leichtem Spiel aufgebaut sein, damit Spiegel und Pechhaut frei aufeinander liegen. Um den Hebel mit wenigen Handgriffen entfernen zu können, habe ich an der Rückseite von Spiegel und Pechhaut je eine mit Schrauben versehene Gegenplatte mittels doppelseitigem Klebband befestigt. Der einzig erlaubte Drehwinkel sind exakte 180°. Dieses „Umkehren“ der Pechhaut, gefolgt von einem Kaltpressen, verkleinert die Gefahr von starken Zonenfehlern. Der Spiegelschleifer sollte auch regelmässig den Standort am Schleiftisch zwischen „vorne“ und „gegenüber“ wechseln. Die zylindrische Deformation könnte alleine durch die Bearbeitung in einer einzigen Achsenrichtung (z.B. verkürzend mit Spiegel oben) erreicht werden. J. Mulherin [6] schlägt aber ein abwechslungsweises Verkürzen in Achsenrichtung K und Verlängern in Achsenrichtung L vor. Dies ist eine weitere Massnahme um Zonenfehler zu vermeiden und die abzutragende Glasmenge möglichst klein zu halten. Die zugehörigen Anordnungen auf dem Schleiftisch sind in Abb. 3 dargestellt. In Anordnung 3a ist der Spiegel oben und der kurze Radius wird verkürzt. In Anordnung 3b ist der ganze „Sandwich“

von Spiegel und Pechhaut auf den Kopf gestellt *und um 90° gedreht*. Mit der Pechhaut oben wird jeweils der lange Radius verlängert.

Die einzelnen Stufen beim Polieren der zylindrischen Deformation sind im Schleifplan (Tabelle II) zusammengefasst. Anfangs wird mit einer kräftigen Strichlänge von etwa $2/3$ poliert (gemessen am Spiegeldurchmesser). In den ersten Polierstunden bildet sich eine rinnenförmige Vertiefung quer durch den Spiegel. Mit dem später beschriebenen Plustest sieht man bereits eine deutliche Radiendifferenz. Das Testbild ist in diesem Stadium aber noch recht verwaschen. Der lange Strich wird beibehalten bis die Radiendifferenz des Toroids erreicht ist. Nun geht es darum, die Zylinderhöhlung bis an den Rand der Achse K auszuarbeiten. Da es mit immer kürzeren Strichen sehr lange dauern würde, bis der Rand erreicht ist, empfehle ich folgendes Vorgehen. Mit einem Strich von etwa $1/3$ Länge wird weiterpoliert, bis die Radiendifferenz um rund 10% überschritten ist. In Abb. 4b) ist die Spiegelform zu diesem Zeitpunkt dargestellt. Der grösste Teil der Fläche ist von der Zylinderhöhlung erfasst. Der Plustest ist auch entsprechend schärfer. Die noch verbleibenden Randregionen des kurzen Radius zeigen sich aber im Foucault- oder Ronchi-Test als hässliche „Ohren“ am Spiegel. Um auch diese Ohren noch zu beseitigen, sollen nun die Radien *in beiden Achsenrichtungen verlängert* werden. In der Achse K wird jeweils etwas länger poliert, damit die Radiendifferenz wieder auf den Sollwert zurückgeht. Die Radiendifferenz sollte auf 0,5 bis 1 mm genau erreicht werden. Zum Schluss verbleiben noch die Retouchen an den letzten Formfehlern, welche nur noch Bruchteile von Wellenlängen hoch sind. Der Nulltest als Ellipsoid ist genau gleich empfindlich wie der Foucault-Test eines Kugelspiegels. Das Vorgehen beim Retouchieren ist ebenfalls gleich wie beim Kugelspiegel, wobei allerdings der Parallelogramm-Hilfshebel immer noch seine wichtige Funktion zu erfüllen hat.

Ein Wort zur *Pflege der Pechhaut* scheint mir auch noch wichtig zu sein, denn alle Massnahmen gegen Zonenfehler sind nutzlos, wenn mit einer verbrauchten Pechhaut gearbeitet wird. Durch die starke Belastung während der langen Striche lässt die Güte der Pechhaut nach einigen Polierstunden nach. Spätestens wenn die Rillen stellenweise flach werden, muss die Pechhaut nachgerillt werden. Die Methode mit dem Nudelholz nach H. Rohr [3] hat sich bei mir sehr bewährt. Der Durchmesser der Pechhaut sollte ebenfalls überwacht werden und 95% des Spiegeldurchmessers nicht überschreiten. Je nach Zustand der Pechhaut lohnt sich sogar ein Neuguss für die letzten Retouchen, da eine gute Pechhaut viel schneller zum Ziel führt. Ich habe gute Erfahrungen gemacht mit einer quadratisch gerillten Pechhaut, deren Rillen 45° zu den Achsenrichtungen des Spiegels gedreht waren.

Plustest und Nulltest

Der Schliff eines exakten Spiegels steht und fällt mit dem Testverfahren. Für den torischen Spiegel gibt es gleich zwei Messverfahren. Das erste ist eine optische Methode zur Messung der *Differenz der beiden Krümmungsradien*. Der Spiegel wird dazu auf einen Teststand gestellt. Etwa im Krümmungszentrum des Spiegels wird auf einer gemeinsamen Halterung eine Lichtquelle und ein eher lanbrennweitiges Okular montiert (siehe Abb. 5a). Beide Teile sollten gemeinsam in Richtung der optischen Achse um etwa 20cm verschoben werden können und die dabei gefahrene Strecke sollte auf 0,5 mm genau ablesbar sein. Mit dem Okular wird nun das vom astigmatischen Spiegel erzeugte Bild der Lichtquelle angeschaut. Dieser Spiegel hat ja keinen eigentlichen Brennpunkt, sondern zwei auseinanderliegende Brennlinien welche senkrecht zueinander stehen. Lichtquelle und Okular sollten möglichst nahe beisammen sein und auch *immer zusammen verschoben* werden. Der Abstand zwischen den beiden Brennlinien entspricht dann genau der Differenz der Krümmungsradien. Als Lichtquelle empfiehlt J. Mulherin [6] einen ausgeleuchteten feinen Kreuzspalt (Pluszeichen, ca 5 mm gross). Damit das Bild dieser Kreuzbalken scharf wird, muss die Orientierung mit den Spiegelachsen übereinstimmen. Je ein Balken ist dann am Ort einer Brennlinie scharf zu sehen. Noch einfacher geht der Test mit einer *hellen Punktquelle*. Ohne jegliche Ausrichtung zeigen die beiden Brennlinien direkt die Achsenrichtungen an. So kann auch überprüft werden, ob die Achsen senkrecht zueinander stehen. Beim Schliff meines Spiegels haben sich die Achsenrichtungen leicht von den ursprünglichen Markierungen wegbewegt. Dies ist aber weiter nicht schlimm, solange sie senkrecht zueinander bleiben.

Die zweite Prüfmethode ist der *Nulltest als Ellipsoid*. Dies ist ein abgewandelter Foucault- oder Ronchi-Test. Die torische Spiegelfläche kann damit gleich genau wie ein Kugelspiegel geprüft werden. Wie schon erwähnt, kann das Toroid an seinem Äquator meist mit hoher Genauigkeit durch ein Ellipsoid angenähert werden. Im Falle unseres Standardspiegels beträgt die Differenz zwischen Toroid und Ellipsoid weniger als $1/10^4000$ einer Wellenlänge und ist somit jenseits von allen Genauigkeitsansprüchen. Das Ellipsoid entsteht durch Drehen einer Ellipse um ihre grosse Achse. Der Spiegel ist dabei ein Flächenausschnitt auf dem „kleinen Äquator“. In Abb. 5b ist eine Aufsicht auf die Testanordnung gegeben (der lange Krümmungsradius des Spiegels liegt in der Zeichenebene). Das Interessante am Ellipsoid mit seinen zwei Brennpunkten ist nun die Eigenschaft, dass diese Fläche alles Licht, welches von einer Punktquelle in einen Brennpunkt ausgeht, wieder punktförmig im zweiten Brennpunkt sammelt. Der Beobachter mit seiner Messerschneide für den Foucault-Test, oder mit seinem Ronchigitter, merkt in dieser Anordnung nichts vom Astigmatismus des Spiegels und kann so tun als würde er einen Kugelspiegel prüfen. Das Aufstellen der Anordnung ist etwas mühsamer als beim normalen Test. Der Abstand zwischen den Brennpunkten sollte möglichst genau eingehalten werden (Berechnung siehe Formel in Abb. 5b).

Die Achse L (siehe Abb. 4b) muss schön parallel zur Verbindungslinie zwischen Lichtquelle und Beobachtungsort liegen. Der Spiegel sollte in beiden Achsen geprüft werden. Das heisst, dass beim Foucault-Test die Messerschneide einmal von der Seite und einmal von unten (oder oben) kommt. Beim Ronchi-Test wird das Liniengitter einfach um 90° gedreht.

Zum Test sehr langbrennweitiger Spiegel ist noch folgendes zu sagen: Beim ersten Anblick aus 6 m Entfernung sieht der 115 mm-Spiegel entmutigend klein aus. Man ist versucht anzunehmen, dass ein solcher Test viel ungenauer ausfallen müsse als bei einem kurzbrennweitigen Spiegel. Dies ist aber nicht richtig, denn die Empfindlichkeit des Foucault-Tests nimmt für längere Krümmungsradien stark zu. Die Erfahrung hat gezeigt, dass Oberflächenfehler von weniger als $1/50$ Wellenlänge noch deutlich von blossen Auge (oder mit Brille) zu sehen sind.

Schlussbemerkungen

Wer einen eigenen Entwurf für einen YOLO-Schiefspiegler machen will, kann die Formeln von J. Sasian [8] verwenden. In der Schweiz gibt es inzwischen eine von H. Ziegler ins Leben gerufene Gruppe von YOLO-Interessierten (siehe Bericht von J. Schibli [9]). Innerhalb dieser Gruppe gibt es auch eigene Formelapparate und Berechnungsprogramme. Die genaue Strahldurchrechnung von YOLO-Schiefspiegler war bis vor kurzer Zeit nur mit sehr teuren kommerziellen Programmen möglich. Dies hat sich glücklicherweise geändert. Es ist wiederum der Optiker J. Sasian der, zusammen mit seiner Frau, seit Frühjahr 1993 ein sehr gutes und preisgünstiges (S 33.-) Programm für den PC anbietet [10]. Das Programm ist auf Reflektoren spezialisiert und erlaubt echte Optimierungsrechnung. Das Kompositbild mit 9 Zerstreungsfiguren in Tabelle I ist mit diesem Programm entstanden.

Neben den Standard-YOLO's gibt es auch noch höher korrigierte Systeme. Als Warnung und gleichzeitiger Ausblick sei hier erwähnt, dass der erste von Sasian beschriebene Schiefspiegler [5] mit einem Öffnungsverhältnis von $1/8,6$ kein gewöhnlicher YOLO ist. Mit weiteren Korrekturen hat der Erbauer auch den linearen Astigmatismus sowie die lineare Koma beseitigt. Dies wird möglich mit einer Spiegeldeformation höherer Ordnung, welche Koma beseitigt. Diese „komatische“ Deformation ist noch eine Stufe ungewohnter als das Toroid. Es deutet aber alles daraufhin, dass diese Form ebenfalls vom Amateur geschliffen und getestet werden kann.

Ich hoffe, dass ich mit dem vorliegenden Artikel einige Spiegelschleifer und Spiegelschleiferinnen zum Bau eines YOLO ermutigen kann. Ebenfalls glaube ich, viele Vorurteile gegenüber dem Schliff eines torischen Spiegels entkräftet zu haben. Diese Vorurteile, die in deutschsprachigen Arbeiten immer wieder zu finden sind, werden ja ausschliesslich von Leuten verbreitet, die es eben noch nie versucht haben. Das Konzept des YOLO eröffnet mit nur zwei konkaven Spiegelflächen dem Amateur einen äusserst eleganten Weg zu einem sehr gut korrigierten und abschattungsfreien Teleskop.

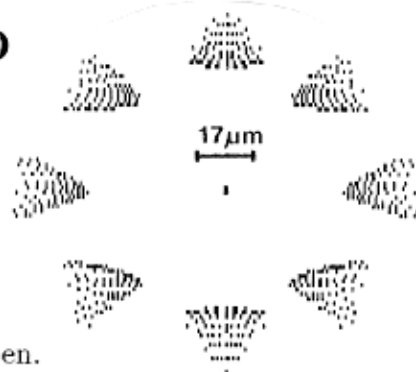
Literatur

- [1] H.G. Ziegler „Aktion Yolo“, Orion Nr.251 (August 1992) p. 152.
- [2] A.S. Leonard „The Yolo Reflector“, Advanced Telescope Making Techniques (Vol. 1), p. 228.
A.S. Leonard „Design for a Yolo Reflector“, Advanced Telescope Making Techniques (Vol. 1), p. 229, Willmann-Bell Verlag, Richmond, Virginia, USA (1986).
- [3] H. Rohr „Das Fernrohr für Jedermann“, Orell Füssli Verlag, Zürich.
- [4] J. Texereau „How to Make a Telescope“, zweite englische Auflage, Willmann-Bell Verlag, Richmond, Virginia, USA (1984).
- [5] J.M. Sasian „A Practical Yolo Telescope“, Sky & Telescope (August 1988) p. 198.
- [6] J. Mulherin „A Simple Procedure for Producing a Yolo Telescope“, Telescope Making #45.
- [7] J.M. Sasian „An Unobstructed Newtonian Telescope“, Sky & Telescope (März 1991) p. 320.
- [8] J.M. Sasian „Designing a Yolo Telescope“, Telescope Making #37.
- [9] J. Schibli „Aktion YOLO“, Orion Nr. 257 (August 1993), p. 189.
- [10] Programm **TCT's** von Jose & Leticia Sasian. „A small user friendly program for evaluating and designing Tilted Component reflecting Telescopes“. Läuft auf PC mit CGA-Graphik. Bezugsadresse: J. & L. Sasian, 970 E. Porter Ave., Naperville, IL 60540 (USA).

Daten für den Standard-YOLO

Öffnung 150 mm; Brennweite 1802 mm;
 Öffnungsverhältnis 1/12; volles Gesichtsfeld 0,5°; Bilddurchmesser 15,7 mm.

Nebenstehendes Raytracing-Bild zeigt 9 Zerstreuungsfiguren für verschiedene Einfallswinkel (1 axial und 8 am Rand des Gesichtsfeldes). Als Skala ist der Durchmesser des Beugungsscheibchens im Balken angegeben.



	Durchmesser (o)pt.:(r)oh	Krümmungs- radius	D/f	Form	Kipp- winkel	Abstand
Primär- spiegel	150 (o) 155 (r)	6100	1/20	Hyperboloid mit $K = -4,4$	$\kappa_1 =$ 3,95°	1000 bis Sek.
Sekundär- spiegel	110 (o) 115 (r)	$R_K = 5900,0$ $R_L = 5978,6$	1/27	Toroid mit $\Delta R = 78,6$	$\kappa_2 =$ 3,12°	1212,8 bis Fokus

Die Bildebene ist um $-1,14^\circ$ gegenüber der Achse gekippt (Drehsinn gegenläufig zu κ_1 und κ_2). Abgesehen von 0,25% Anamorphismus, ist die Abbildung unverzerrt.

Tabelle II

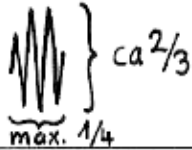
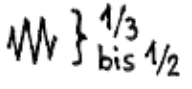
Schleifplan für den torischen Spiegel

(Durchmesser 115 mm, $R_{Kurz} = 5900$ mm, $R_{Lang} = 5978,6$ mm)

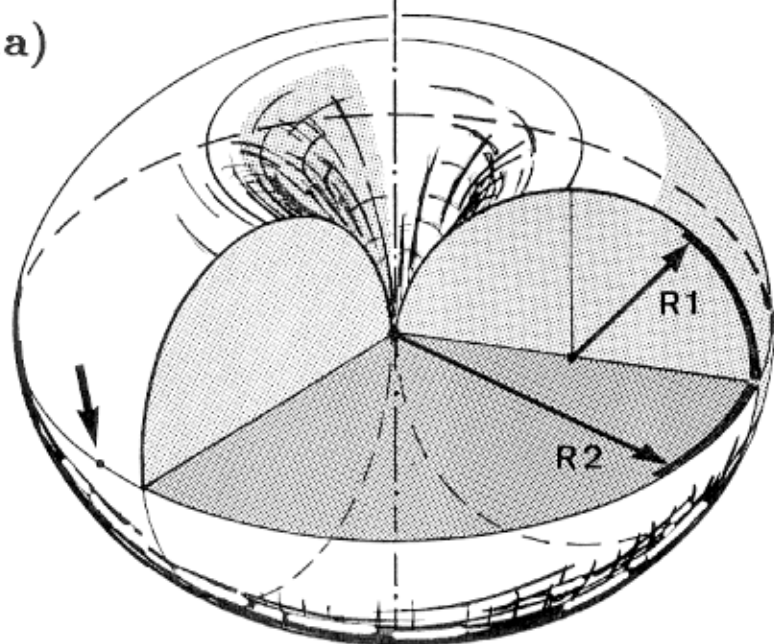
1.)
 Normaler Schliff eines Kugelspiegels bis zu einer mittelmässig auspolierten Oberfläche (aber schöne Sphäre unter Foucault- oder Ronchi-Test). Als optimaler Krümmungsradius wird R_{Lang} des Toroids angestrebt.

2.) Übergang zum Toroid:

Die zylindrische Deformation wird poliert. Ausser der Drehung um exakt 180° sind alle Drehbewegungen zwischen Spiegel und Pechhaut verboten! Es sollte unbedingt der Parallelogramm-Hilfshebel verwendet werden.

Strich	Bemerkung	Test
A 	Abwechslungsweise mit Spiegel oben R_K verkürzen und dann mit Spiegel unten R_L verlängern. ΔR wächst um 7 bis 10 mm pro Stunde (Ceroxyd).	Nach wenigen Stunden mit Plustest beginnen
B 	Wenn ΔR erreicht, mit kürzeren Strichen die Form verfeinern und ΔR um 10% bis 15% überschreiten.	Plustest wird schärfer
C R_K jeweils länger als R_L bearbeiten	Jetzt beide Radien verlängern (Spiegel unten) um Randregion von R_K zu verbessern und ΔR zurückzuarbeiten.	Plustest wird noch schärfer
D	Retouche, bis Randregion von R_K gut ist und der Spiegel im Nulltest „flach“ erscheint.	Nulltest als Ellipsoid

1a)



1b)

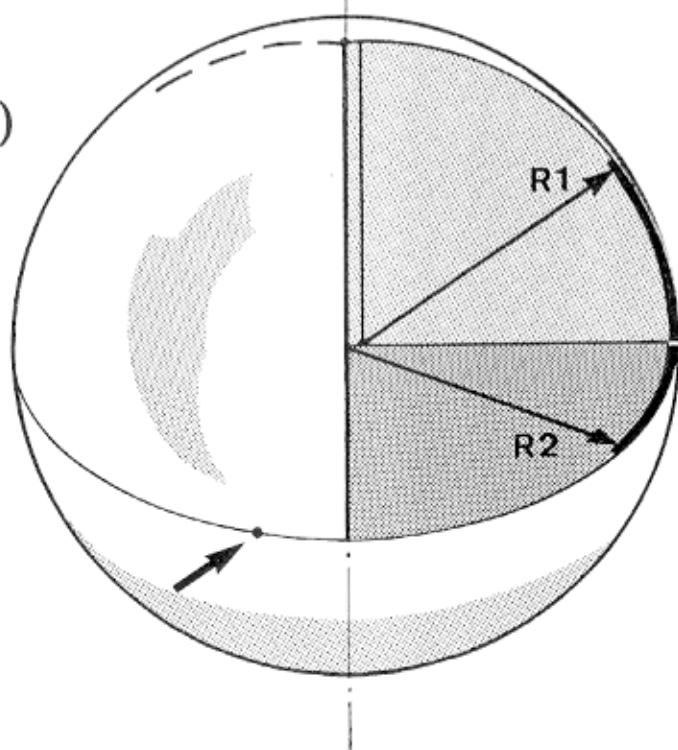


Abb. 1

Der Toruskörper entsteht durch Drehen einer Kreisscheibe um eine Achse (D).
a) Stark ringförmiger Körper. b) Ein derartiger Torus wird im YOLO verwendet.
Die Spiegelfläche ist dabei ein winziger Ausschnitt auf dem Äquator des Körpers
(siehe Pfeil).

2)

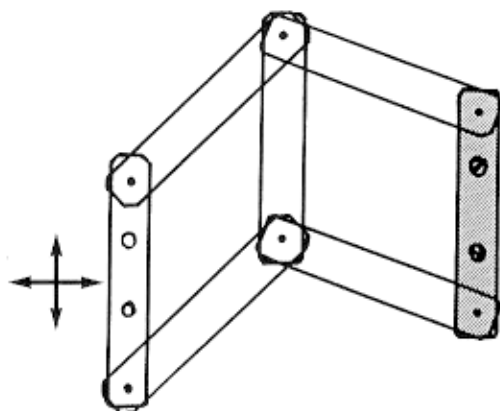


Abb. 2

Der Parallelogramm-Hilfshebel für die Politur der zylindrischen Korrektur verhindert Drehungen zwischen Spiegel und Pechhaut. Der Mechanismus besteht aus 7 gleich langen Streifen (z.B. Plexiglas, 20cm) die drehbar miteinander verbunden sind. Der Hilfshebel wird auf einer Seite am Schleiftisch befestigt und das freie Ende führt den Spiegel.

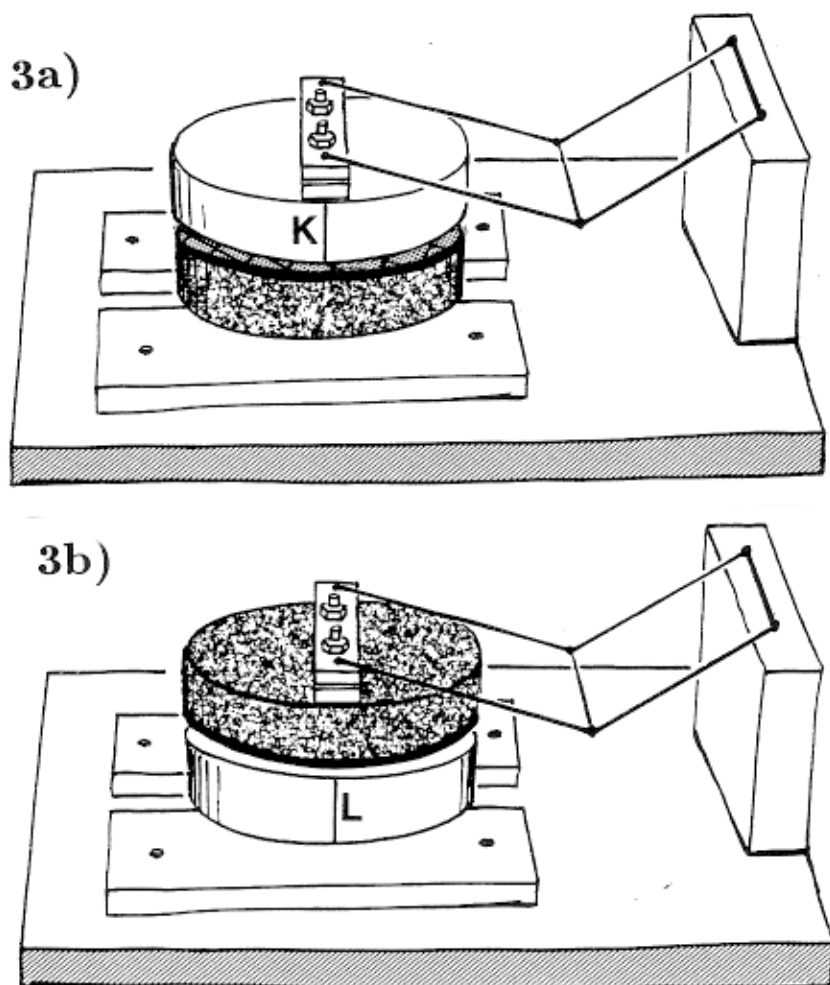
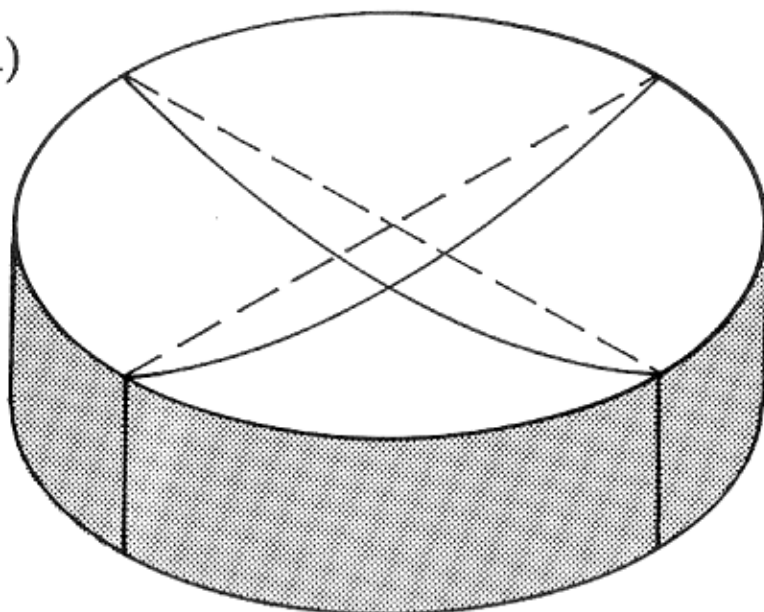


Abb. 3

Die Anordnungen auf dem Schleiftisch (aus der Sicht des Spiegelschleifers): a) In der oberen Position wird der kurze Krümmungsradius weiter verkürzt; Schleifrichtung (K). b) Mit Pechhaut oben wird der lange Radius verlängert; Schleifrichtung (L). Der Parallelogramm-Hilfshebel ist hier nur angedeutet.

4a)



4b)

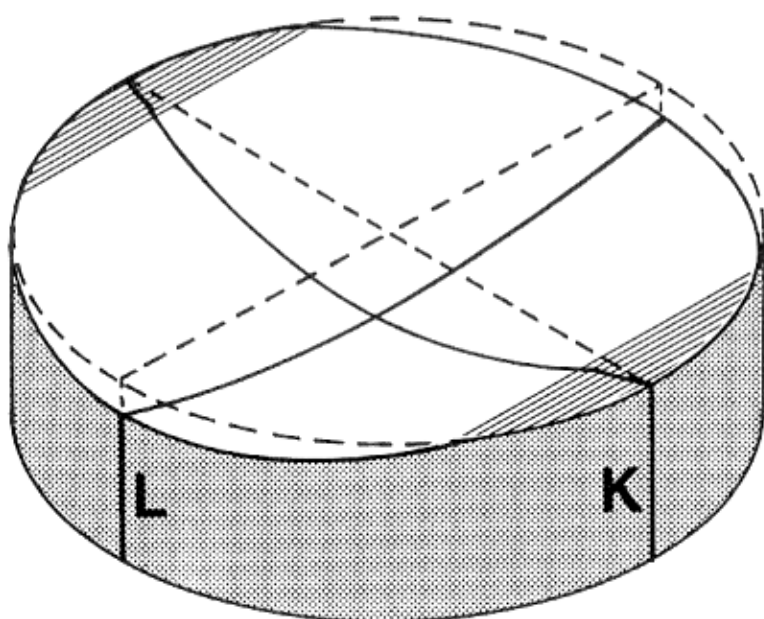
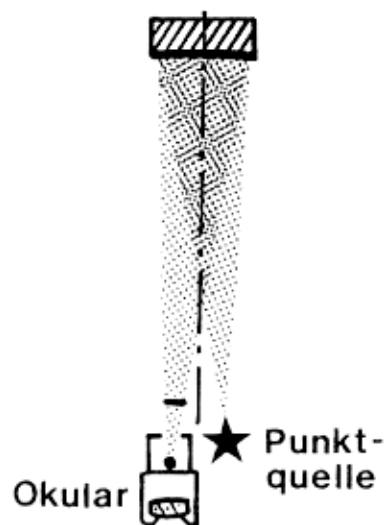


Abb. 4

Das Fortschreiten der zylindrischen Deformation: a) Der Kugelspiegel als Ausgangsform. b) Die zylindrische Korrektur hat fast den ganzen Spiegel erfasst. Dieser Zustand ist etwa am Ende von Schritt B des Schleifplans erreicht. Die Randregionen der Achse (K) müssen im nächsten Schritt auch noch erfasst werden.

5a) Plustest



5b) Nulltest als Ellipsoid

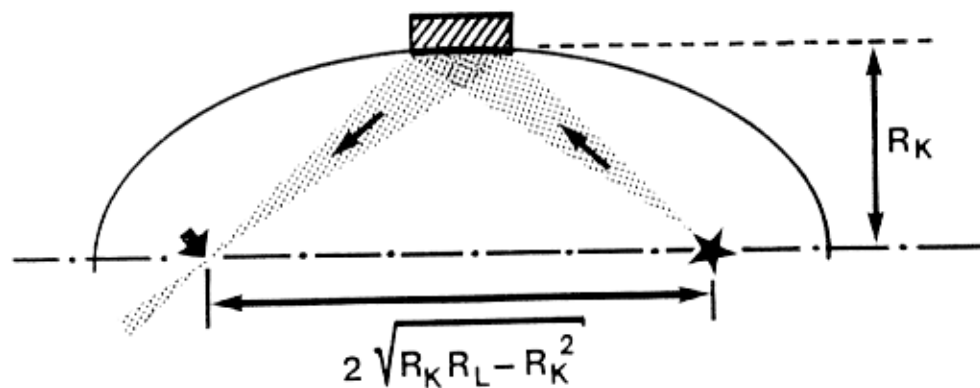


Abb. 5

Zwei Testverfahren für den torischen Spiegel. a) Mit dem sogenannten Plustest wird die Radiendifferenz gemessen. Das vom astigmatischen Spiegel erzeugte Bild einer Punktquelle wird mit einem Okular angeschaut. Lichtquelle und Okular werden zusammen in Achsenrichtung verschoben um nacheinander die beiden Brennpunkte des Spiegels zu finden. b) Der Nulltest als Ellipsoid ist ein abgewandelter Foucault- oder Ronchi-Test. Die Lichtquelle sitzt im ersten Brennpunkt der Ellipse und der Beobachter im zweiten. Der fertige Spiegel muss flach erscheinen.

Anhang:

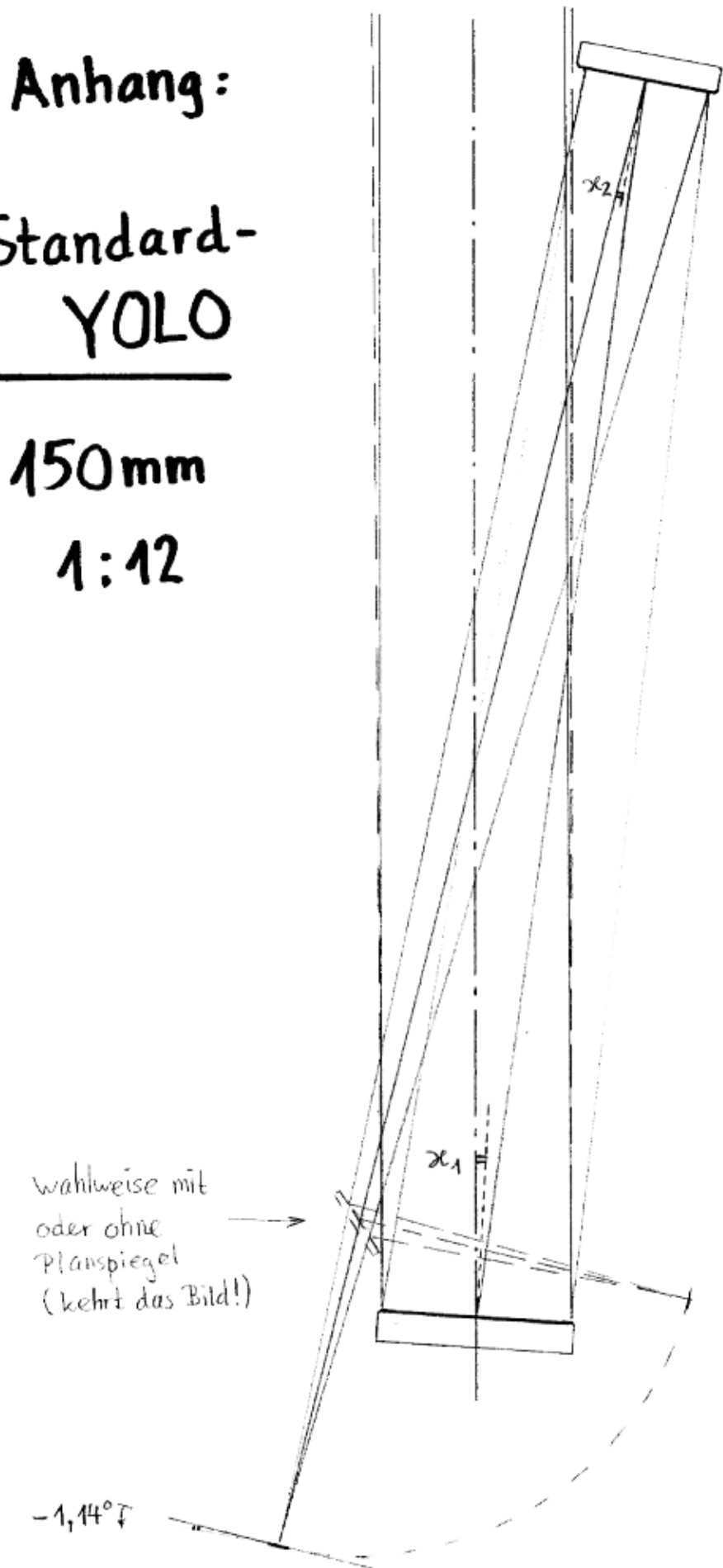
Standard- YOLO

150mm

1:12

wahlweise mit
oder ohne
Planspiegel
(kehrt das Bild!)

-1,14°



SPECIFICATIONS FOR SYSTEM Standard YOLO 150/12 ; L.Howald

F/number 12.02

Aperture 150.00 mm

Focal length 1802.27 mm

Image diameter 15.73 mm

Field of view 0.50 degrees

DATA: Standard YOLO 150/12 ; L.Howald

Units are mm, degrees, and waves for coma and line coma

Mirror: R-sag, Spacing, Tilt angle, Conic constant, R-tan, Coma, Line coma

1	-6100.000	-1000.000	+3.95	-4.40	-6100.000	+0.00	+0.00
2	+5900.000	+1212.764	+3.12	+0.00	+5978.600	+0.00	+0.00

↑
6,3λ

CLEAR APERTURES FOR SYSTEM Standard YOLO 150/12 ; L.Howald

Mirror Clear aperture in mm

1	150.0000
2	109.5861