

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

Maschinenbau von Makro bis Nano / Mechanical Engineering from Macro to Nano

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Burbajev, A. / Latyev, S./ Theska, R.

Analyse der Lagefehler von rotierenden Geradsichtprismen und Methode für deren Justage

KURZFASSUNG

Im Vortrag werden Lagefehler des Dove-Prismas im parallelen Strahlenbündel und des Pechanprismas im konvergierenden Strahlenbündel diskutiert, die sich bei Drehung des Prismas in Form von Bildabweichungen auswirken. Im Ergebnis der Analyse wird eine optimale Justierreihenfolge für die bestimmte Justage vorgeschlagen.

EINLEITUNG

Geradsichtprismen, wie Dove-, Abbe-, Pechan-, Würfel- und Uppendalprisma dienen zur Erzeugung von aufrechten und seitenrichtigen Bildern in Rundsichtfernrohren, in Scanneinrichtungen sowie in feststehenden optischen Systemen (**Bild 1**).

Dove- und Würfelprisma werden bekanntermaßen ausschließlich im parallelen Strahlengang verwendet, während Abbe-, Pechan- und Uppendalprisma auch im konvergierenden Bündel Anwendung finden.

Die Justage von rotierenden Geradsichtprismen ist nicht trivial und erfordert die Kenntnis der Fehlerursachen, sowie deren Auswirkung auf die Abbildung. Sind diese bekannt, ist eine bestimmte Justierung möglich.

Stellvertretend sollen in diesem Beitrag die Justage von Dove- und Pechanprisma betrachtet werden.

DIE JUSTAGE DES ROTIERENDEN DOVEPRISMAS

Im **Bild 2a** steht das Doveprisma (2) im parallelen Strahlengang zwischen Kollimator (1) und Kamera (3). Das Prisma führt eine drehende Bewegung um Achse (Y_1) aus, die im Idealfall parallel zur Ziellinie des Kollimators verläuft. Statische Abweichungen von dieser Parallelität ($\Delta\alpha$ - in Vertikalebene, $\Delta\gamma$ - in Horizontalebene), der Kollimationsfehler Δk (Abweichung der Normale auf der Reflexionsfläche des Prismas zur Normalen auf der Drehachse des Prismas) sowie der Pyramidalfehler rufen ungewollte Bewegungen des Kollimatormarkenbildes hervor. Die Auswirkung des Pyramidalfehlers kann durch Justage nicht beseitigt werden. Aus diesem

Grund muß dieser Fehler technologisch, durch Einhaltung enger Toleranzanforderungen, klein gehalten werden.

Die durch die Abweichungen $\Delta\alpha$, $\Delta\gamma$ und Δk hervorgerufenen Bildbewegungen lassen sich durch Justage beseitigen.

Das Bild eines Punktes der Kollimatormarke bewegt sich in der Ebene des Bildempfängers auf einer Pascal'schen Schnecke (**Bild 2c**). Die zugehörigen Koordinaten für die Achsen Z und X ergeben sich zu:

$$\begin{aligned}z &= f'(2 \Delta k \sin\varphi_y + \Delta\gamma \cos 2\varphi_y - \Delta\alpha \sin\varphi_y - \Delta\gamma); \\x &= f'(2 \Delta k \cos\varphi_y - \Delta\gamma \sin 2\varphi_y - \Delta\alpha \cos\varphi_y - \Delta\alpha).\end{aligned}\tag{1}$$

Hierbei ist f' die Brennweite des Kameraobjektives und φ_y die Drehung des Prismas um die Achse Y_1 .

Die durch den Kollimationsfehler Δk hervorgerufene Komponente der Bewegung, bewirkt einen Kreis mit dem Durchmesser $4 f' \Delta k$. Die durch $\Delta\alpha$ und $\Delta\gamma$ hervorgerufenen Komponenten beschreiben Kreise mit den Durchmessern $2f' \Delta\alpha$ und $2f' \Delta\gamma$, die im Vergleich zu Δk mit doppelter Winkelgeschwindigkeit durchlaufen werden.

Wenn die Fehler gleich groß sind ($\Delta\alpha = \Delta\gamma = \Delta k$), geht die Pascal'schen Schnecke in eine Kardioide über. Aus der Analyse der Formel (1) zeigt sich, dass bei einer Drehung des Prismas von 180° um die Achse Y_1 ein Fehler von $4f' \Delta k$ auftritt.

Wird der Fehler Δk durch Justage beseitigt ($\Delta k = 0$), ergibt sich bei weiterer Drehung $\varphi_y = 90^\circ$ der Fehler zu $2 f' \Delta\gamma$. Wird der Fehler $\Delta\gamma$ durch Justage ebenfalls beseitigt ($\Delta\gamma = 0$), ergibt sich bei nochmaliger Drehung φ_y von 90° der Fehler zu $2 f' \Delta\alpha$.

Nachdem auch dieser Fehler durch Justage abgestellt wurde, ist die Justage abgeschlossen.

Aus den gezeigten Zusammenhängen ergibt sich die notwendig die nachfolgende Justierreihenfolge:

- Justage von Kollimator und Kamera (Abbildung der Kollimatormarke zentrisch zum Kamerasensor)
- Ausrichtung des Doveprismas mit Fassung, so dass die Reflexionsfläche unten und die Abbildung der Kollimatormarke im Zentrum der CCD-Matrix liegt. Die Z-Koordinate des Bildes wird in Bezug zum existierenden raumfesten Koordinatensystem abgelesen.
- Drehung des Doveprismas um einen Winkel $\varphi_y = 180^\circ$ und Ablesung der zweiten Lage in Z.

Die Differenz der Ablesewerte ergibt sich aus dem vierfachen Kollimationsfehler $4f' \Delta k$. Zur Justage dieses Fehlers muß das Doveprisma um die Achse X_1 geschwenkt werden.

Die Justierung um X_1 erfolgt solange, bis die Bildlage zentrisch zu den beiden vorher abgelesenen Werten liegt. Dies lässt sich mit entsprechenden Justageeinrichtungen leicht realisieren (**Bild 2a**).

Bild 2d zeigt eine konstruktive Ausführung mit elastisch verformbaren Elementen, die mit Hilfe von Schrauben (5) feinfühlig justiert werden können. In **Bild 2e** ist eine Variante dargestellt, bei der die Justierung ebenfalls mittels Schrauben erfolgt, die über Segmente (6) auf das Prisma einwirken. In Folge der Justage können Restspannungen und Deformationen in der reflektierenden Fläche des Prismas verbleiben, die sich in Form von Astigmatismus im Bild auswirken. Eine Überprüfung der Abbildungsgüte nach der Justage ist deshalb notwendig.

- Nochmalige Drehung des Doveprismas um einen Winkel zur Bestimmung des Fehlers $2f' \Delta \gamma$ und Drehung der Baugruppe um Z zur Beseitigung des Fehlers.
- Weitere Drehung des Doveprismas in Position $\varphi_y = 0^\circ$ bzw. $\varphi_y = 180^\circ$ zur Detektierung des Fehlers $2f' \Delta \alpha$ und Drehung der Baugruppe um X zur Beseitigung des Fehlers.

Um eine weitere Verbesserung des Justierzustandes zu erreichen kann der gesamte Vorgang ein weiteres mal durchlaufen werden.

DIE JUSTAGE DES ROTIERENDEN PECHANPRISMAS

In der nachfolgenden Betrachtung wird von einem herstellungsfehlerfreiem Pechanprisma ausgegangen. Im Pechanprisma treten 5 Reflexionen auf. Es stellt eine Kombination aus einem Halbpentaprisma und einem Schmidprisma dar. Das Pechanprisma kann zur einfacheren Betrachtung äquivalent zu einer Kombination aus einem Planspiegel und einer dazu senkrechte stehenden Spiegeltreppe angesehen werden. Es treten vier Lagefehler auf:

- Kollimationsfehler - Unparallelität der Planspiegelfläche zur Drehachse (Δk)
- Verschiebung des Planspiegels in Richtung seines Normalenvektors auf den Schnittpunkt von Ziellinie und Abbildungsebene (Δl)
- Unparallelität der Drehachse zur Ziellinie ($\Delta \omega$)
- Rechtwinkligkeitsabweichung der Spiegeltreppe zur Drehachse ($\Delta k, \Delta p$).

Bild 3a zeigt das Schema eines Justierstandes zur Justierung für das Pechanprisma, das im konvergenten Strahlenverlauf zwischen Marke (4) und Objektiv (2) drehbar angeordnet ist. Die Marke wird von einer Beleuchtungseinrichtung (5) beleuchtet, wobei das Bild der Marke mit Hilfe einer CCD-Kamera (1) betrachtet werden kann.

Bei idealer Montage der Prismenbaugruppe fällt die Oberfläche des virtuellen Planspiegels, mit der Drehachse, zusammen. Die Spiegelrette steht dabei rechtwinklig zur Drehachse (Sie ist charakterisiert durch ihre Basis b und verschiebt die reflektierten Lichtstrahlen in eine Brennebene mit dem doppelten Betrag des Abstands der Basis) (**Bild 3a**).

Bei nicht idealer Montage wird der Äquivalenzspiegel nicht parallel, sondern relativ zur Drehachse gekippt liegen. Das Äquivalent der Spiegelrette steht in einer unbekanntenen Neigung relativ zur Drehachse, während die Drehachse selbst sich relativ zur Ziellinie neigt.

Als Folge entstehen drei wesentliche Justierfehler (**Bild 3c**):

- Kollimationsfehler Δk
- Verschiebungsfehler Δl – Verschiebung zwischen dem Durchstoßpunkt des Äquivalenzspiegels und der Drehachse in der Markenebene
- Abweichung der Rechtwinkligkeit der Spiegelrette zur Drehachse in zwei Richtungen:
 - a) in der Ebene des Hauptschnitts des Prismas aufgrund des Fehlers Δk ,
 - b) in der Ebene, rechtwinklig zum Hauptschnitt des Prismas, um den Winkel Δp .

Zum Ermitteln der Trajektorie des Schlages der drehenden Markenabbildung, aufgrund der angeführten Fehler, werden die folgenden ortsfesten Koordinatensysteme eingeführt (**Bild 3c**):

- X_1, Y_1, Z_1 - mit dem Koordinatenursprung O_1 , der mit dem Markenzentrum T zusammenfällt;
- X, Y, Z mit dem Koordinatenursprung O , in der Fokusebene des Objektivs angeordnet und auf der Achse Z liegend;
- X_2, Y_2, Z_2 - wobei Achse Z_2 parallel zur Drehachse und um den Winkel $\Delta \omega$ gegen die Achse X_1 geneigt ist.

Der Radiusvektor der Markenabbildung, der durch das Drehen des Äquivalenzspiegels (E-E) im System der Achsen X_1, Y_1, Z_1 entsteht, kann wie folgt beschrieben werden [1]:

$$\bar{\rho}' = (1 - M')\Delta\bar{r} + 2\Delta l\bar{N}, \quad (2)$$

wobei:

$\Delta\bar{r}$ – Radiusvektor der Spur durch Drehung (um Punkt B) des Spiegels (E-E) relativ zum Markenzentrum T,

Δl – Abstand vom Punkt B zum Spiegel (E-E),

M^p – Einfluss-Matrix des ebenen Spiegels,

\bar{N} - Einheitsrichtungsvektor der Spiegelnormalen, gekippt um den Winkel γ .

Daraus ergibt sich

$$\bar{N} = S_{\Delta\omega}^{-1} S_{\gamma}^{-1} S_{\Delta\omega} \bar{N}_0 = \left(S_{\Delta\omega}^{-1} S_{\gamma}^{-1} S_{\Delta\omega} \right) \cdot \left[\cos(\Delta\omega + \Delta k) \bar{j}_1 - \sin(\Delta\omega + \Delta k) \bar{n}_1 \right] \quad (3)$$

wobei:

$S_{\Delta\omega}$ und $S_{\Delta\omega}^{-1}$ – die Transformationsmatrizen vom Achsensystem X_1, Y_1, Z_1 zum Achsensystem X_2, Y_2, Z_2 und umgekehrt sind,

S_{γ}^{-1} ist die transponierte Matrix, die den Winkel γ der Drehung der Äquivalenzspiegelnormalen gegen die Achse Z_2 einführt.

Nach Substitution und Umstellen der Gleichung ergibt sich:

$$\bar{p}' = \begin{Bmatrix} -\Delta r \sin 2\gamma - 2\Delta l \sin \gamma \\ -2\Delta r \cos^2 \gamma - 2\Delta l \cos \gamma \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

Die erhaltene Trajektorie stellt sich als Pascal'sche Schnecke dar, deren Koordinatenursprung im Punkt B liegt.

Nun betrachten wir das Verhalten der Äquivalenzspiegelntreppe mit der Basis b (verschiebt man jedoch die Marke von der Position T in die Position O , so nimmt sie die Größe $2b$ an) mit Berücksichtigung Ihrer Neigung Δp und Drehung um die Drehachse mit dem Winkel γ :

$$\bar{p}'' = \bar{p}' + 2b \bar{N}_{P_2} + \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta r + 2b\Delta\omega \\ 2b \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} -\Delta r \sin 2\gamma - 2(\Delta l + b\Delta k) \sin \gamma + 2\Delta p b \cos \gamma \\ -\Delta r \cos 2\gamma - 2(\Delta l + b\Delta k) \cos \gamma - 2\Delta p b \sin \gamma \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

Dies ist die parametrische Gleichung der Pascal'schen Schnecke in der Ebene XOY (**Bild 3b**), mit Symmetrieachse um den Winkel γ_0 zur Achse Y .

Die Summe der einfließenden Fehler Δk , Δl , Δp (ohne den Fehler Δr , er besitzt eine andere Periodizität) wird nach der Drehung des Prismas aus beliebiger Ausgangslage um 180° sichtbar. Die Differenz der Radiusvektoren für diese beiden Lagen des Prismas nach den Komponenten x und y aufgeteilt entspricht:

$$\begin{aligned} \Delta p_x''' &= 4[(\Delta l + b\Delta k) \sin \gamma - b\Delta p \cos \gamma]; \\ \Delta p_y''' &= 4[(\Delta l + b\Delta k) \cdot \cos \gamma + b\Delta p \sin \gamma]. \end{aligned} \quad (6)$$

Die Methodik zur Justierung des Prismas ist zweckmäßigerweise nach folgendem Muster durchzuführen:

1. Der Kollimationsfehlers Δk , wird im parallelen Strahlengang in der zur Justierung des Dove-Prismas oben beschriebenen Art und Weise ausjustiert, wobei beim Pechan-Prisma die Lagen 0° und 180° zu wählen sind.
2. Zur Beseitigung des Fehlers Δp wird das Prisma im Konvergenzbündel positioniert (Abb.2a). Nachdem der Fehler Δk beseitigt ist, ergeben sich aus Ausdruck (6) folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned}\Delta p_x''' &= 4(\Delta l \sin \gamma - b \Delta p \cos \gamma); \\ \Delta p_y''' &= 4(\Delta l \cos \gamma + b \Delta p \sin \gamma).\end{aligned}\tag{7}$$

Die Eliminierung von Δp erreicht man mit seitlicher Neigung des Prismas relativ zur Drehachse. Die Justierung ist abgeschlossen, wenn die Markenbilder in der Ausgangsposition des Prismas und in der um 180° gedrehten Position in einer Schnittfläche parallel zum Hauptschnitt liegen.

3. Die Beseitigung des Fehlers Δl erreicht man durch Verschiebung des Prismas relativ zur Drehachse in der Ebene des Hauptschnitts. Ziel ist die symmetrische Lage der Markenbilder für zwei um 180° versetzte Prismenlagen.

Wenn die Fehler Δk , Δl , Δp beseitigt sind, nimmt der Ausdruck für den Radiusvektor des Schrages der drehenden Markenabbildung folgende Form an:

$$\Delta \rho_x''' = -\Delta r \sin 2\gamma; \Delta \rho_y''' = -\Delta r \cos 2\gamma\tag{8}$$

Geht man nach dieser Reihenfolge vor, so bleibt an dieser Stelle zur endgültigen Beseitigung des Schrages der drehenden Abbildung nur übrig, die Spur der Drehachse (um Punkt B) mit dem Punkt T zu vereinen. Dies kann entweder durch Verschiebung bzw. Neigung der Prismenbaugruppe, oder durch Verschiebung der Marke entlang der Achsen X und Y realisiert werden.

Literatur:

[1] Pogarev, G. V.: Justierung optischer Geräte; Verlag für Maschinenbau, 1982

Autoren:

Prof.-Dr.-Ing.habil. Svjatoslav Latyev
Technische Universität IFMO, 197101 St. Petersburg
Sablinskaja 14 / Russland
Latyev@grv.ifmo.ru

Prof. Dr.-Ing. Habil. René Theska
TU Ilmenau, 98684 Ilmenau, PF 10 05 65, Deutschland
Tel.: 0049 (0)3677 69-3957
Fax: 0049 (0)3677 69-3823
Email: rene.theska@tu-ilmenau.de

BILDANHANG

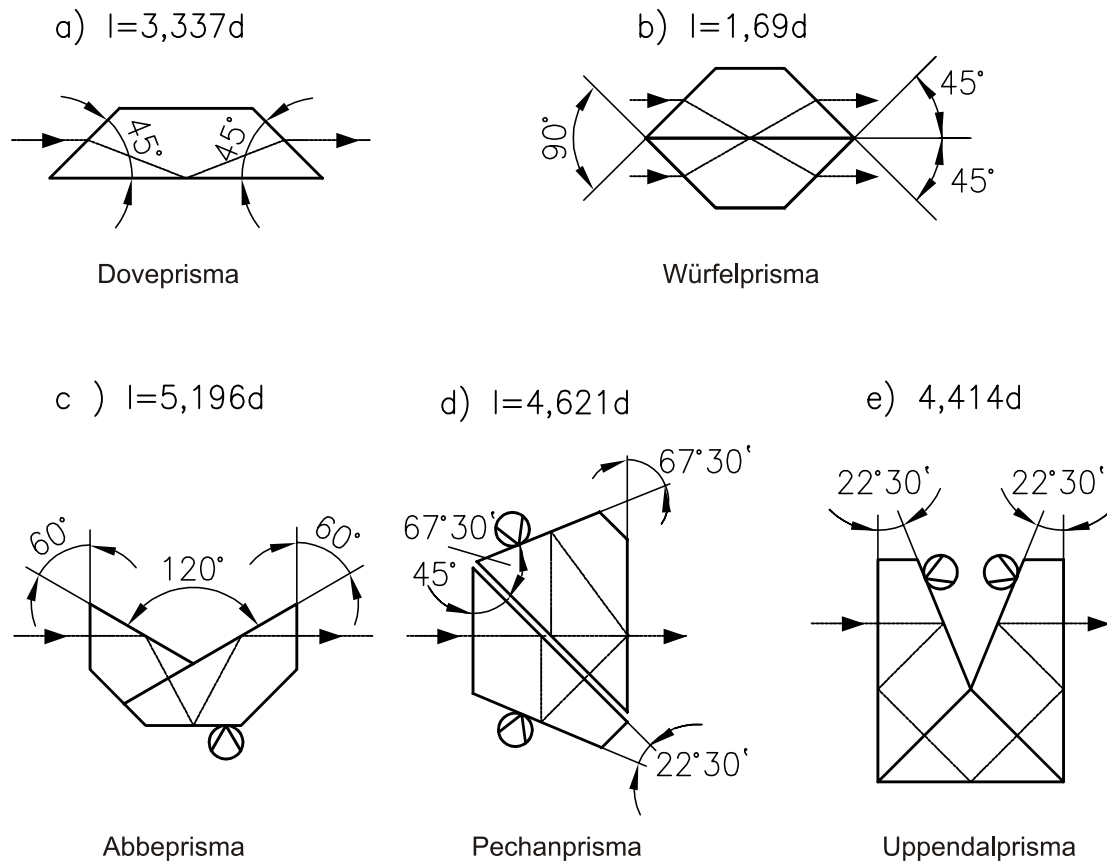


Bild 1

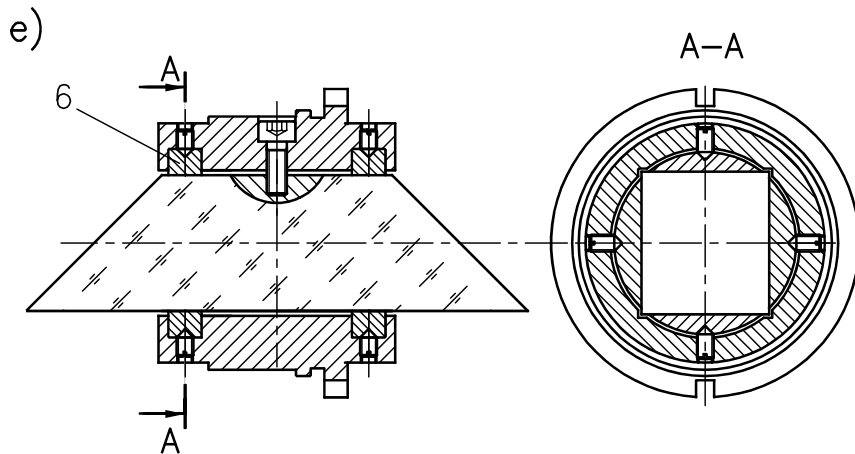
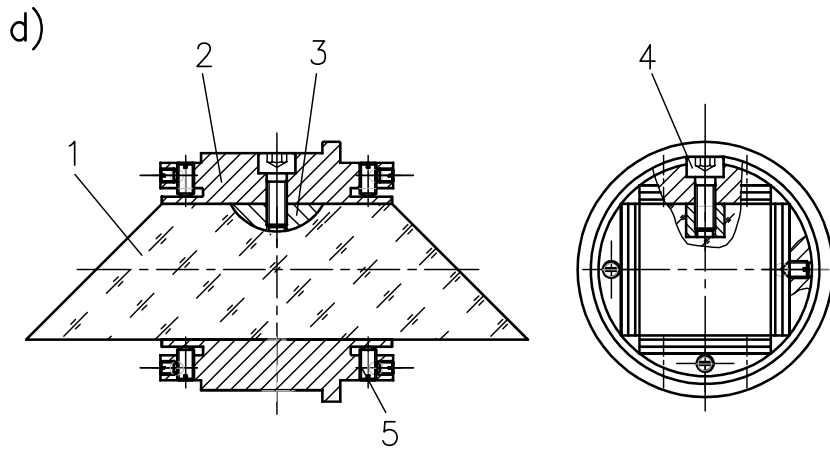
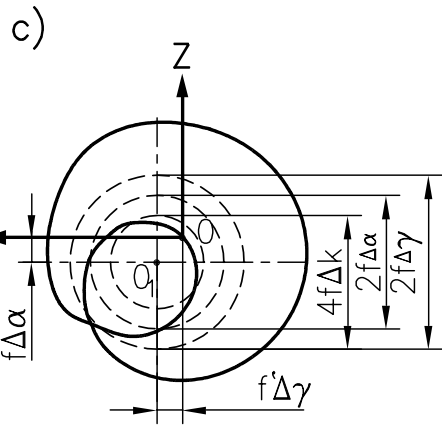
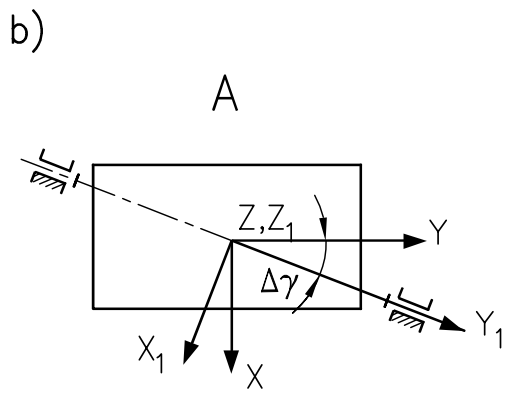
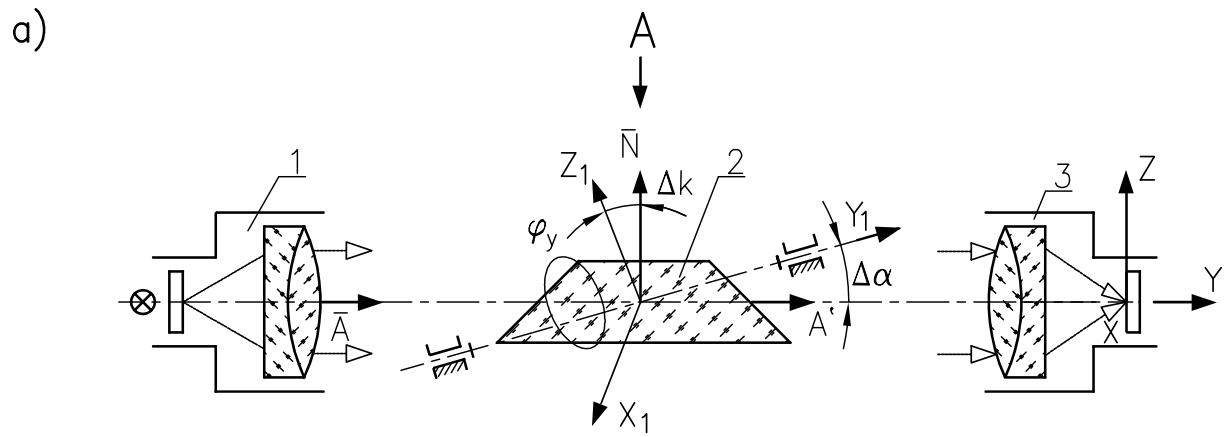
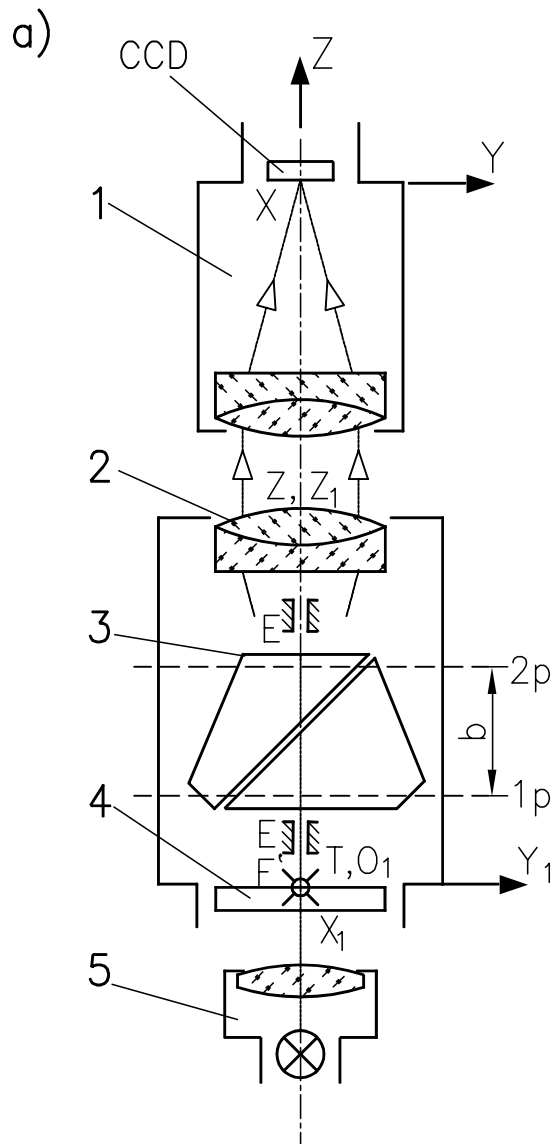


Bild 2



- 1 - CCD-Kamera
- 2 - Objektiv
- 3 - Pechan Prisma
- 4 - Marke
- 5 - Beleuchtungsoptik

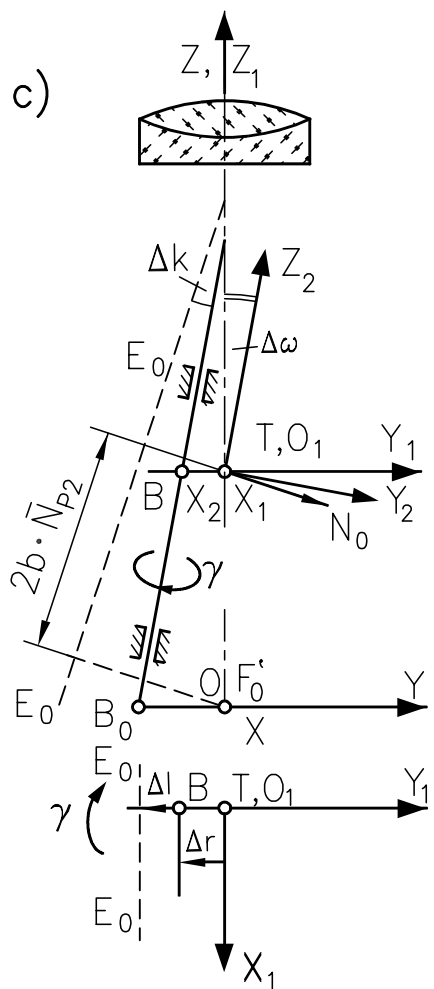
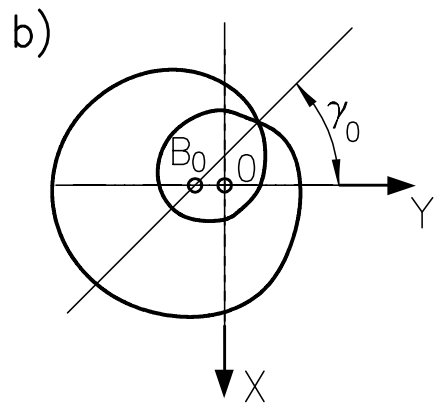


Bild 3