

Deutsche Optische Wochenschrift

Heft Nummer 13

1. Juli 1949

Herausgeber: Professor Dr. H. Pistor, Direktor der Staatlichen Meisterschule für das Augenoptikerhandwerk, Jena. Schriftleitung: Karl Radicke „Deutsche Optische Wochenschrift“, Berlin-Schöneberg, Ebersstraße 78

**Zentralzeitung
für Optik
und Mechanik**
66. JAHRGANG

Druck und Verlag: Thüringer Volksverlag GmbH, Weimar, Hegelstr. 2a
Anzeigen-Verwaltung: „Deutsche Optische Wochenschrift“ Weimar
Hegelstraße 2a, Fernsprecher 2351 bis 2354 · Postverlagsort Weimar

Über die Verzeichnung bei optischen Instrumenten, die in Verbindung mit dem blickenden Auge gebraucht werden Von Dr. A. Sonnefeld

I.

Der Verzeichnungsfehler bei optischen Instrumenten für den objektiven Gebrauch ist in allen Lehrbüchern der geometrischen Optik nach der von Bow und Sutton in den Jahren 1861 und 1862 bereits festgelegten Bedingung behandelt. Die allgemeine Bedingung lautet:

$$\frac{y'}{y} = \frac{\xi' \cdot \operatorname{tg} w'}{\xi \cdot \operatorname{tg} w} = \beta = \operatorname{const} \quad (1)$$

Darin bedeuten:

- y' die wirkliche Bildhöhe,
- y die dazugehörige Objekthöhe,
- ξ' die Entfernung des Bildes vom bildseitigen Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen,
- ξ die Entfernung des Objekts vom objektseitigen Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen,
- w u. w' die bildseitige und objektseitige Hauptstrahlneigung und
- β den Vergrößerungsmaßstab im paraxialen Gebiet, wie ihn die Gaußsche Theorie liefert.

Gleichung (1) gilt für endliche Abstände für Bild und Objekt. Für teleskopische Systeme geht (1) über in

$$\frac{\operatorname{tg} w'}{\operatorname{tg} w} = \Gamma_0 = \frac{f_{\text{Obj}}}{f_{\text{Ok}}} = \operatorname{const} \quad (2)$$

f_{Obj} und f_{Ok} bedeuten die Brennweite von Objektiv und Okular.

Diese Bedingungen gelten streng für die Abbildung einer Ebene auf eine Ebene, wie sie von den photographischen Aufnahmegegeräten gefordert wird. Bezüglich der Gültigkeit dieser Beziehungen für optische Instrumente, die in Verbindung mit dem blickenden Auge gebraucht werden, bestehen aber seit längerer Zeit starke Meinungsverschiedenheiten, die noch einer Klärung harren, und zwar waren es Whitwell, Tscherning und E. Weiß, die für die subjektive optische Betrachtung die Gültigkeit von (1) bzw. (2) bestritten. Boegehold als Vertreter der Abbeschen Schule hat in seiner Arbeit: „Treue Darstellung und Verzeichnung bei optischen Instrumenten“, Die Naturwissenschaften 1921, 9, S. 273–280, die klassische Auffassung von Airy und Bow und die Ansichten von Rohrs nochmals in aller Ausführlichkeit dargelegt und vertreten und ist dann auf die abweichenden Ansichten der obigen drei Verfasser eingegangen. Es wird im allgemeinen genügen, über dieses Thema die Boegeholdsche Arbeit genauer nachzulesen, um über die gegenteiligen Auffas-

sungen, die hier vorliegen, Klarheit zu gewinnen. Die grundsätzliche Frage ist zunächst folgende: Ist beim subjektiven Gebrauch der optischen Instrumente für die Verzeichnung das Tangentenverhältnis von augenseitigen und dingseitigen Hauptstrahlenwinkel maßgebend oder das Winkelverhältnis dieser Schwinkel? In mathematischer Formulierung:

Gilt

$$\frac{\operatorname{tg} w'}{\operatorname{tg} w} = \operatorname{const}$$

oder

$$\frac{w'}{w} = \operatorname{const}$$

Für objektive Beobachtung wird also auch von den Gegnern die Gültigkeit der alten Auffassung in keiner Weise angezweifelt. Für die Kamera, also für die Abbildung einer Ebene auf eine Ebene, bleibt also nur das Tangentenverhältnis als die einzige selbstverständliche Forderung bestehen, die sich ja auch durch Messung völlig einwandfrei nachprüfen läßt und oft nachgeprüft und bestätigt wurde.

Die Schwierigkeit beginnt erst bei den optischen Instrumenten für den subjektiven Gebrauch, also in Verbindung mit dem rollenden Auge, aber auch erst dann, wenn diese Instrumente ein größeres subjektives Gesichtsfeld besitzen, das dem des menschlichen Auges von 130° bis 140° einigermaßen in der Größe entspricht. Es erscheint daher verständlich, daß die neueren Auffassungen zuerst bei der Einführung der modernen Brillen mit großem Blickfeld von etwa 90° aufkamen. Man hat jedoch bisher die Verzeichnung bei den Brillen und Ferngläsern als einen unwesentlichen Schönheitsfehler nicht weiter beachtet. Ich habe aber bereits im Jahre 1924 in meiner Arbeit „Die Fälschung der Perspektive durch Fernrohre“, C. Z. 45, 1924, Seiten 210–213, darauf hingewiesen, welche Bedeutung die Verzeichnung für die Fernrohre hat und bin auf erheblichen Widerstand gestoßen.

Es ist zunächst nicht ohne weiteres einzusehen, daß eine Bedingung, die für die Abbildung einer Ebene auf eine Ebene gilt, auch dann gelten soll, wenn — wie es beim Auge doch der Fall ist — die Schirmfläche eine Kugel ist. Daraus folgt, daß wir uns bei der subjektiven optischen Betrachtung das Auge und seine Arbeitsweise zuvor genauer vergegenwärtigen müssen, d. h., daß wir uns einmal ganz gründlich mit der physikalisch optischen Seite des Sehvorgangs und weiter noch mit der Bildauffassung und Vorstellung, also auch mit den psychischen Vorgängen befassen müssen. Also

¹⁾ S. Czapski u. Eppenstein, Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente nach Abbe, Dritte Aufl., Leipzig 1924, S. 166.

nicht nur das Sehen rein optischer Natur von der Hornhaut bis zur Netzhaut haben wir zu berücksichtigen, sondern auch das Sehen, das sich weiterhin zwischen Netzhaut und Gehirn abspielt. Man hat den letztgenannten Vorgang in neueren Büchern über physiologische Optik²⁾ als „bildaufrichtendes Okular“ bezeichnet. Diese Bezeichnung ist zu geometrisch-optisch und zu mager, eine bessere wäre schon „Bildwandler“, aber auch sie erfährt nicht entfernt alles, was hier tatsächlich geschieht. Die Bildumkehrung wird aufgehoben auf Grund der Erfahrung und inneren Anschauung der Dinge. Diese werden zueinander in Beziehung gesetzt, der ganze Sehraum wird geordnet und zu einem kontinuierlichen Ganzen geformt, in das die Dinge nach Lage und Bewegung, Form und Farbe eingegliedert werden. Welche unendliche Mühe und Geduld, welche fortgesetzte Uebung von Anfang an hier das Einzelwesen zu leisten hat, kann nur der unterschätzen, der das Sehen lediglich äußerlich optisch betrachtet und niemals mit großer Aufmerksamkeit ein Kind beobachtet hat, wie es sehen lernt, wie es sich von der nächsten Umgebung aus allmählich in den Raum vortastet, und wie es langsam Tastsinn, Bewegungssinn und Gesichtssinn benutzt und sich von seinem Munde vorsichtig über die Kissen und Kanten seines Bettchens zu den Dingen in den weiten Raum hineinarbeitet.

Whitwell war der erste, der für einen Unterschied in der Auffassung der Verzeichnung bei optischen Instrumenten für subjektiven und objektiven Gebrauch eintrat, wenn er auch seinen Standpunkt nicht exakt beweisen konnte.

Tscherning bemerkte als Ophthalmologe, daß die Träger starker Brillengläser sehr über die Verzeichnung Klage führten und hielt diesen Fehler für ebenso wichtig wie den Astigmatismus. Auch er fordert für die Brille die Konstanz des Winkelverhältnisses.

Diese Auffassung Tschernings ist durchaus beachtlich und beschränkt sich nicht einmal immer auf die stark Kurzsichtigen und Staroperierten. Auch schon bei schwacher Fehlsichtigkeit kann diese Verzeichnung recht unangenehm stören. Ich selbst habe dies sofort beim Tragen einer schwachen Altersbrille von $1\frac{1}{2}$ dptr empfunden. Mich störte z. B., daß der Rechenschieber und namentlich die Klaviatur beim Spielen gebogen erschienen. Deshalb ließ ich mir sofort eine Lesebrille anfertigen, die diesen Fehler vermied, ohne die punktuelle Abbildung preiszugeben.

E. Weiß stimmt der Tscherningschen Auffassung bezüglich der Forderung der Konstanz des Winkelverhältnisses zu, jedoch fordert er gleichzeitig die Hebung des Astigmatismus, deren Notwendigkeit er für weit wichtiger hält.

In den Auffassungen dieser drei Anhänger der Konstanz des Winkelverhältnisses tritt wohl klar der Gedanke heraus, daß bei der subjektiven optischen Betrachtung die Tangentenbedingung nicht richtig sein könne, aber es wird dabei doch der zweite Punkt übersehen, nämlich der, daß es sich auch noch um ein größeres Gesichtsfeld handeln muß, bei dem eben das Tangentengesetz gänzlich versagt, wovon man sich sofort durch einen sehr einfachen Versuch überzeugen kann.

II.

Auf Grund eines Vortrages, den ich im engsten Kreise von eingeweihten Fachleuten der Firma Carl Zeiss über die Verzeichnung bei optischen Instrumenten für den subjektiven Gebrauch hielt, und dem eine lange, sehr rege Diskussion folgte, haben sich noch einige Herren außer mir mit diesen Fragen näher befaßt, und zwar besonders Dr. Slevogt.

Auch er stand zunächst mit mir auf dem gleichen Standpunkt, zumal ihm an einem Weitwinkelokular bei der geometrisch-optischen Durchrechnung ebenso aufgefallen war, daß die Ermittlung der Verzeichnung nach der Tangentenbedingung zu recht unwahrscheinlich großen Werten führte.

Inzwischen hatte ich einen einfachen Weg gefunden, wie ich bei einem Weitwinkel-Fernrohr mit 1,5facher Vergrößerung und 90° objektivem Sehfeld auch die Tangentenbedingung erfüllen konnte. Ich brauchte nämlich nur eine Fläche der Augenlinse parabolisch statt spärlich auszuführen, wobei sich glücklicherweise die übrigen Fehler nur wenig veränderten. Der Typus des Okulars war

von Huygensscher Bauart mit einem mehrlinsigen Lupenteil, dessen Augenlinse dreiteilig verkittet war.

Die beiden äußerlich gleichen Fernrohre wurden zum Vergleich nebeneinander aufgestellt, so daß Objekte mit langen geraden Konturen (Schorneine, hohe Gebäude usw.) sowohl in der Mitte wie am Rande des Sehfeldes beobachtet werden konnten.

Ich ließ etwa 50 Beobachter ohne jede Rücksicht auf ihre Augenfehler beobachten und stellte fest, daß die überwältigende Mehrheit der Beobachter, und namentlich der kompetenten, einwandfrei bestätigten, daß sie die Bilder des Fernrohrs mit erfüllter Winkelbedingung nahezu völlig verzeichnungsfrei fänden, während sie bei dem Fernrohr mit erfüllter Tangentenbedingung einwandfrei tonnenförmige Verzeichnung feststellten. Einige unter den Beobachtern waren Brillenträger mit stärkerer positiver und negativer Refraktion von über 4 dptr. und mit stärkerem Astigmatismus. Trotzdem erkannten auch unter diesen die meisten den Unterschied im beabsichtigten Sinne; einer allerdings behauptete, gerade das Gegenteil zu sehen.

Angeregt durch diese Versuche, hat sich auch Slevogt näher mit diesem Problem befaßt. Er hat an geraden Konturen im Zimmer bei Beobachtungen mit blickendem Auge ohne optische Hilfsmittel stärkere tonnenförmige Verzeichnungen wahrgenommen und daraufhin in der Physiologischen Optik von Helmholtz auch seine Beobachtungen unter den Ausföhrungen über das Listingsche Bewegungsgesetz beschrieben und erklärt gefunden. Ich habe daraufhin selbst Beobachtungen nach den Beschreibungen von Helmholtz an gestellt und kann sie im allgemeinen bestätigen. Es fiel mir dabei besonders auf, daß man diese tonnenförmigen Verbiegungen an geraden Konturen beim Blicken auffällig wahrnimmt, wenn man nicht besonders auf die Objekte akkommodiert. Gewissermaßen erweist sich das flüchtige Erinnerungsbild als besonders geeignet, die tonnenförmige Verbiegung der Geraden festzustellen, während man beim direkten Blicken wieder in Zweifel gerät, d. h., wenn man absichtlich Beobachtungen in dieser Richtung anstellen will.

Rein qualitativ war damit schon eine gewisse Aufklärung gefunden, weshalb die Tangentenbedingung bei der subjektiven optischen Beobachtung versagen mußte. Der äußerst schwierige quantitative Nachweis war natürlich auf diese Weise nicht zu erbringen und ist von Slevogt auf andere Weise durch geometrisch-optische Ueberlegungen versucht worden, die schließlich zu dem Ergebnis führten, daß weder die Tangentenbedingung noch die Winkelbedingung die Verzeichnung bei optischen Instrumenten für den subjektiven Gebrauch charakterisierten, sondern die Bedingung

$$\frac{\operatorname{tg} \frac{w'}{2}}{\operatorname{tg} \frac{w}{2}} = \text{const} \quad *)$$

eine Bedingung, die von der stereographischen Projektion her bekannt ist und auch von Boegehold in seiner Arbeit: „Treue Darstellung und Verzeichnung bei optischen Instrumenten“, Die Naturw. 9, 273—280, 1921, berücksichtigt ist.

Ich suchte mehr auf dem Wege der inneren Anschauung zu einer Lösung des Problems zu kommen. Daß unser Sehraum nach Anlage unseres Auges sphärische oder wenigstens annähernd sphärische Form haben müsse, das war mir aus vielen Beobachtungen nicht mehr zweifelhaft. Der Horizont, der Himmel, die Beobachtung an horizontalen Drähten und horizontalen Scheinwerferstrahlen, wenn man sie, fast senkrecht darunter stehend, in größerer Höhe betrachtet, alles dies bestätigte, daß das menschliche Auge nicht nach den streng geometrischen Gesetzen einer starren Photokammer arbeitet, und daher das Tangentengesetz, wie es für diese von Bow und Sutton aufgestellt war, nicht gültig sein konnte.

Es war mir klar, daß der Versuch an dem Weitwinkel-Fernrohr mit schwacher Vergrößerung wohl die Unhaltbarkeit der Tangentenbedingung bestätigt hatte, doch nicht einwandfrei bewies, welche Bedingung dafür zu treten habe.

Ogbleich viele kompetente und fachlich eingeweihte Beobachter fast restlos überzeugt waren, daß die Winkelbedingung das

²⁾ A. König, Physiologische Optik, Handbuch der Experimentalphysik, Wien-Harms Bd. 20, 1, S. 4, Leipzig, 1929.

³⁾ Vgl. H. Slevogt: „Zur Definition der Verzeichnung bei optischen Instrumenten für den subjektiven Gebrauch.“ Optik 1, S. 388, 1946.

richtige Kriterium sei und namentlich besonders hervorhoben, daß beim Schwenken des Fernrohrs die absolute Bildruhe schon die Richtigkeit dieser Auffassung bestätigte — bei dem Fernrohr mit erfüllter Tangentenbedingung zeigte das Bild beim Schwenken des Fernrohrs eine auffällige Unruhe —, war mir selbst aufgefallen, daß ein gewisser Unterschied in der Verzeichnung horizontaler und vertikaler Linien vorhanden war, wenn auch nicht von sehr auffälliger, praktischer Bedeutung. Diese Feststellungen brachten eine gewisse Unsicherheit in das Problem, die sich meiner Ansicht nach nicht durch theoretische Erwägungen klären ließen.

Ich beschloß daher zunächst, weitere Versuche mit Weitwinkel-Fernrohren stärkerer Vergrößerungen vorzunehmen. Es gelang mir, drei Weitwinkel-Fernrohre mit gleicher 10facher Vergrößerung und objektivem Sehfeld von $8,5^\circ$ zu errechnen, bei denen

$$1. \text{ Die Tangentenbedingung } \frac{\text{tg } w'}{\text{tg } w} = \text{const},$$

$$2. \text{ die Bedingung } \frac{\text{tg } \frac{w'}{2}}{\text{tg } \frac{w}{2}} = \text{const} \text{ und}$$

$$3. \text{ die Winkelbedingung } \frac{w'}{w} = \text{const} \text{ erfüllt waren.}$$

$$\text{Die Bedingung } \frac{\text{tg } \frac{w'}{2}}{\text{tg } \frac{w}{2}} = \text{const} \text{ will}$$

ich die Kreisbedingung nennen, weil bei ihrer Erfüllung wegen $v_s = v_t$ im ganzen Felde kleine Kreise in kleine Kreise abgebildet werden. Es wäre auch noch möglich gewesen, als vierte Bedingung die Sinusbedingung hinzuzufügen, doch hielt ich dies nach den früheren Erfahrungen und den Beobachtungen an Feldstechern für überflüssig

Die Versuche brachten leider insofern keine eindeutige Klärung, als keine der drei Bedingungen ein einwandfrei verzeichnungsfreies Bild ergab. Obwohl gerade die Kreisbedingung am besten erfüllt war, zeigte sich hier noch deutlich kissenförmige Verzeichnung und erst recht natürlich bei der Winkelbedingung. Ein praktisch verzeichnungsfreies Bild zeigte demgegenüber das erste Fernrohr, bei dem eigentlich die Tangentenbedingung erfüllt sein sollte, deren Korrektur jedoch nicht exakt gelungen war, so daß eine kissenförmige Verzeichnung von 4,75 Prozent übrig geblieben war. Aus der Beobachtungsreihe mit den drei Fernrohren erhält man also für die Verzeichnungsfreiheit ein Kriterium, das zwischen Kreisbedingung und Tangentenbedingung liegt.

Schon etwas vorher hatte ich hierzu einen Parallelversuch an einer Verantlupe durchgeführt. Es war mir nämlich aus früheren Versuchen erinnerlich, daß die Verantlupen nach v. Rohr, obwohl sie streng auf die Tangentenbedingung korrigiert waren, doch deutlich tonnenförmig verzeichneten.

Ich habe nun drei Verantlupen von 71,5 mm Brennweite, also wieder mit 3,5facher Vergrößerung, errechnet, bei denen die Verzeichnung nach den obengenannten drei Bedingungen korrigiert war einmal also nach der Tangentenbedingung, was ja schon v. Rohr getan hatte, dann nach der Kreisbedingung und schließlich nach der Winkelbedingung. Das Ergebnis war eindeutig zugunsten der Winkelbedingung ausgefallen, wenn auch der Unterschied gegen-

über der Kreisbedingung nicht erheblich war, diese aber doch schon zur tonnenförmigen Verzeichnung neigte.

Bei den Verantlupen zeigte sich nun, daß diejenige, die am wenigsten Verzeichnung hatte, also bei der die Winkelbedingung nahezu ideal erfüllt war — eine geringe Zone ist ja bei dem scheinbaren Gesichtsfeld von 60° unvermeidlich —, auch die Forderung $\delta V = 0$ erfüllte, daß also die Vergrößerung in allen Blickrichtungen $\delta V = 0$ erfüllt war, wenn man den Mittelwert $\frac{f_s + f_t}{2}$ als Brennweite in den Hauptstrahlrichtungen einführte und demgemäß

$$V = \frac{250}{\frac{f_s + f_t}{2}}$$

bildete.

III. Zusammenfassung:

An einem Fernrohrmodell mit 1,5facher Vergrößerung und 90° objektseitigem Sehfeld wurde einwandfrei beobachtet, daß die Tangentenbedingung als Kriterium für die verzeichnungsfreie Wiedergabe der Objekte versagt und die von Tscherning, Whitwell und E. Weiß (Rathenow) vertretene Winkelbedingung ein besseres Kriterium zu sein scheint⁴⁾. Die universelle Gültigkeit der Winkelbedingung für die optischen Instrumente für den subjektiven Gebrauch konnte nicht bewiesen werden. Der von Boegehold vorgebrachte Einwand gegen die Winkelbedingung ist nicht ganz stichhaltig und beachtet nicht die physiologisch-optischen Erfahrungstatsachen von Listing und Helmholtz. Weitere Untersuchungen an Verantlupen mit 3,5facher Vergrößerung und 60° scheinbarem Gesichtsfeld schienen die Gültigkeit des Winkelgesetzes zu bestätigen. Versuche mit astronomischen Fernrohren mit 10facher Vergrößerung und $8,5^\circ$ objektseitigem Sehfeld konnten die allgemeine Gültigkeit der Winkelbedingung nicht bestätigen und führten auf eine Bedingung, die zwischen Tangentenbedingung und Winkelbedingung — anscheinend sogar etwas näher an der Tangentenbedingung — liegt. Aus diesen Feststellungen und aus physiologisch-optischen Betrachtungen, vereint mit geometrisch-optischen Untersuchungen von Slevogt und mir, kann man vorläufig die Bedingung

$$\frac{\text{tg } \frac{w'}{2}}{\text{tg } \frac{w}{2}} = \text{const}$$

als zur Zeit ausreichendes Kriterium für die Hebung der Verzeichnung in optischen Instrumenten für den subjektiven Gebrauch ansehen, da die strengen Bedingungen

$$\begin{aligned} \delta \cdot V &= 0, \\ \delta \cdot V_s &= \delta \cdot V_t = 0 \\ \text{bzw.} \\ \delta \cdot I' &= 0 \\ \delta \cdot I'_s &= \delta \cdot I'_t = 0 \end{aligned}$$

in der Praxis unerfüllbar sind. Die optische Abbildung bei den Fernrohren und sonstigen Instrumenten für den subjektiven Gebrauch ist nicht einmal in der unmittelbaren Umgebung der Achse konform im streng mathematischen Sinne, die Abbildung kann nur als ähnlich im weiteren Sinne bezeichnet werden⁵⁾.

⁴⁾ Herr Dr. F. Staebble, München, teilte mir im Jahre 1943 mit, daß er bereits um 1916 eine ähnliche Feststellung an einem Fernrohrmuster machte.

⁵⁾ Vgl. hierzu S. Czapski u. O. Eppenstein a. a. S. 220.