

FRIEDRICH ACKERMANN, OBERKOCHEN

PROBLEME
UM DAS STATOSKOP

Der Vortrag wurde am 9. Oktober 1958 auf der WGL-Tagung in Stuttgart gehalten.

PROBLEME UM DAS STATOSKOP, EIN FEINBAROMETER
FÜR DIE ZWECKE DER LUFTBILDMESSUNG

1. DIE „AUßERE ORIENTIERUNG“ VON LUFT-
AUFNAHMEN

Das Arbeitsmaterial der Luftbildmessung oder Aero-photogrammetrie, die heute ein unentbehrlicher Bestandteil des Vermessungswesens geworden ist, bilden photographische Reihenaufnahmen der Erdoberfläche vom Flugzeug aus. Die meßtechnische und kartographische Auswertung der Aufnahmen erfordert als maßgetreue Rekonstruktion des Bildinhaltes die Kenntnis der Maßbeziehungen zwischen Bild und abgebildetem Geländeausschnitt. Die Luftbildmessung steht damit vor dem grundsätzlichen Problem, neben den inneren Eigenschaften der Aufnahmekamera vor allem Ort und Richtung jeder Aufnahme im Raum zu kennen. Unter diesem Gesichtspunkt lassen sich praktisch alle bekannten photogrammetrischen Auswerteverfahren als Methoden zur indirekten Bestimmung dieser sogenannten „äußeren Orientierung“ der Luftbilder ansprechen. Demgegenüber ist die innere Orientierung, d. h. die Lage des photographischen Bildes in der Kamera relativ zum Objektiv, stets bekannt; sie soll hier nicht weiter erläutert werden.

Die äußere Orientierung eines Luftbildes ist durch 6 unabhängige geometrische Elemente bestimmt, z. B. die 3 Raumkoordinaten für das Perspektivitätszentrum der Abbildung und 3 Richtungsangaben für die Ausrichtung des Bildes im Raum (Bild 1). Der anzustrebende Idealfall wäre, beim Bildflug zu jeder Aufnahme unmittelbar die 6 Elemente der äußeren Orientierung zu messen und zu registrieren. Diesem Ziel stellen sich jedoch beträchtliche Schwierigkeiten entgegen, da die Aufnahme-„Standpunkte“ in der Luft schwer zu fixieren sind.

Die bisherige Entwicklung der Luftbildmessung ist daher notgedrungen von dem Bestreben gekennzeichnet, ohne die direkte Bestimmung der äußeren Orientierung auszukommen und mit indirekten Methoden zu arbeiten. Diesem Bestreben war großer Erfolg beschieden, wie allein schon die heutige weltweite Anwendung der Photogrammetrie verdeutlichen mag. Es ist nämlich auf Grund der geometrischen Eigenschaften perspektiver Abbildungen möglich, mit Hilfe gegebener, geodätisch auf der Erde vermessener Paßpunkte, die im Luftbild sichtbar sein müssen, die Orientierung des Bildes nachträglich zu rekonstruieren. Man kann, wie man sagt, ein Luftbild und ebenso auch Bildpaare auf gegebene Festpunkte einpassen. Mit diesen

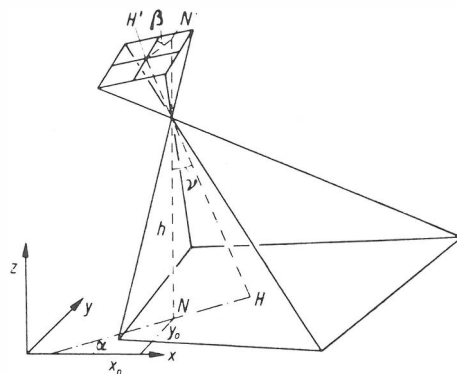


Bild 1. Die „äußere Orientierung“ einer Luftaufnahme.

geometrischen Problemen, ihren Sonderlösungen und Grenzfällen haben sich vor einigen Jahrzehnten schon die Theoretiker intensiv beschäftigt, wie die verschiedenen Studien zum räumlichen Rückwärtseinschnitt oder zur Doppelpunkteinschaltung im Raum bezeugen. Von der schwerwiegenden und belastenden Bindung an terrestrisch vermessene Paßpunkte konnte sich die Luftbildmessung jedoch glücklicherweise weitgehend wieder freimachen, als man erkannte, daß der Anschluß eines Bildes an ein schon orientiertes Nachbarbild ohne Zuhilfenahme von Paßpunkten möglich ist. Dank dieser Tatsache konnte die Luftbildmessung ihre Tätigkeit auf unvermessene oder nur spärlich mit trigonometrischen Punkten besetzte Gebiete der Erde ausdehnen. Hierin liegt die eigentliche Leistungsfähigkeit der modernen Photogrammetrie und ihre große wirtschaftliche Überlegenheit im Vergleich zur klassischen terrestrischen Vermessung.

Der unbeschränkten Ausdehnung der Luftbildmessung auf unzugängliche Gebiete sind aus Genauigkeitsgründen Grenzen gesetzt, zumal der wiederholte Bildanschluß einer ungünstigen Fehlerfortpflanzung unterworfen ist. Deshalb bleibt trotz der großen Erfolge der indirekten Methoden die direkte Messung der äußeren Orientierung oder wenigstens einiger ihrer Elemente nach wie vor dringend erwünscht. Denn jede zusätzliche Messung kann zu größerer Genauigkeit beitragen oder bei gleichen Anforderungen die Überbrückung noch ausgedehnter festpunkt-

loser Räume ermöglichen. Die Bestimmung der äußeren Orientierung beeinflusst daher direkt die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Photogrammetrie.

Zur direkten Messung der Elemente der äußeren Orientierung kommen heute verschiedene teils physikalische, teils geometrische Meßmethoden in Betracht: Für die Lagebestimmung sind grundsätzlich die Verfahren der Funkortung geeignet. Neigungsdaten der Aufnahmen können aus kreiselgestützter Lotanzeige abgeleitet werden. Ferner finden ebenfalls zur Neigungsbestimmung Horizontaufnahmen und photographische Sonnenortung Verwendung. In diesem Zusammenhang müssen auch die Versuche zur Kreiselstabilisierung erwähnt werden, wo die Aufnahmekamera ständig möglichst genau in senkrechter Stellung gehalten werden soll. Diese Meßmethoden haben sich trotz mancher Einzelerfolge bis jetzt nicht allgemein in der breiten photogrammetrischen Praxis durchsetzen können. Die Gründe dafür sind im hohen instrumentellen Aufwand, in unzureichenden Genauigkeitsleistungen oder in Beschränkungen der allgemeinen Anwendbarkeit zu suchen.

Demgegenüber nimmt die barometrische Höhenmessung hinsichtlich ihrer Einfachheit und guten Genauigkeit eine Sonderstellung ein. Zwar ist die absolute barometrische Höhenmessung bei weitem nicht genau genug und wird für die Luftbildmessung nicht in Betracht gezogen. Doch ist es möglich, den Höhenweg des Flugzeugs in der Luft mit Hilfe von Differenzdruckmessungen sehr genau zu verfolgen, sofern nur eine nach anderen Methoden bestimmte absolute Anfangshöhe bekannt ist. Die auf barometrischer Grundlage arbeitenden Differenzhöhenmesser nennt man Statoskope. Sie sind stets mit einer Registriervorrichtung versehen, die zu jedem Luftbild den zugehörigen Meßwert für die spätere Auswertung festhält. Statoskope sind seit 1929 als Hilfsgeräte zur Höhenbestimmung in die Luftbildmessung eingeführt und in der Zwischenzeit in verschiedenen Ausführungen gebaut worden.

2. EINE NEUKONSTRUKTION ALS BEISPIEL FÜR BAU UND WIRKUNGSWEISE EINES STATOSKOPS

Ein Statoskop ist im Grunde ein Feinbarometer mit beschränktem Meßbereich, das während des Bildfluges Luftdruckunterschiede in bezug auf einen in gewissem Umfang willkürlichen und dem Betrag nach unbekanntem Referenzdruck sehr genau zu messen vermag. Bau, Wirkungsweise und konstruktive Schwierigkeiten eines solchen Gerätes seien nachfolgend kurz am Beispiel des von der Firma Carl Zeiss, Oberkochen, neu entwickelten Statoskops erläutert, das sich an eine vor dem Kriege in Jena gebaute Ausführung anlehnt. Die Entwicklung ist ausführlich in [1] beschrieben.

Im Prinzip handelt es sich um ein Flüssigkeitsmanometer, das etwa als U-Rohr ausgebildet sein kann und in dessen Schenkeln die Steighöhen der Flüssigkeit unmittelbar ein Maß für die Druckänderungen der Außenatmosphäre darstellen.

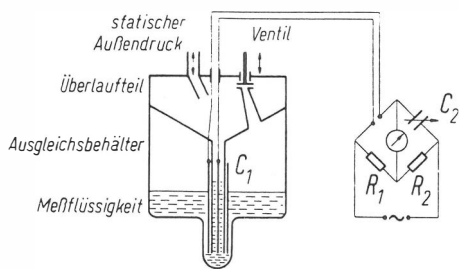


Bild 2. Statoskop — Schema der Druckmessung.

In der tatsächlichen Ausführung ist das U-Rohr abgewandelt, wie Bild 2 zeigt, doch bildet nach wie vor die Höhe der Flüssigkeitssäule im Steigrohr die eigentliche Meßgröße. Dieser mechanische Meßwert wird nicht unmittelbar wie in den früheren Geräten photographisch registriert, sondern elektrisch abgegriffen. Zu diesem Zweck ist das Steigrohr als elektrischer Kondensator ausgebildet und als solcher an eine empfindliche kapazitative Meßbrücke angeschlossen. Die Kapazität dieses Kondensators wird durch die als Dielektrikum wirkende Flüssigkeitssäule beeinflusst, was eine praktisch trägheitslose Umwandlung der mechanischen Meßgröße in eine elektrische darstellt. Es mußte nur durch entsprechende Dimensionierung dafür gesorgt werden, daß die Relation zwischen Steighöhe und Kapazitätsänderung genügend linear bleibt. Die Änderungen werden über die Meßbrücke genau gemessen, verstärkt und mit Mikroampèremetern angezeigt.

Zur bequemen Registrierung der Anzeige ist ein Mikroampèremeter in die Aufnahmekamera eingebaut, wo gleichzeitig mit jeder photographischen Aufnahme zusammen mit anderen Nebenabbildungen der augenblickliche Statoskop-Meßwert in zweifelsfreier Zuordnung abgebildet wird. Ein zweites Anzeigegerät ermöglicht dem Piloten nach Statoskop zu fliegen, d. h., die Maschine im Meßbereich des Gerätes zu führen.

Es ist geglückt, die Konstruktion in einem handlichen, leicht zu bedienenden Gerät unterzubringen, dessen Gesamtansicht Bild 3 zeigt. Wengleich eine eingehende

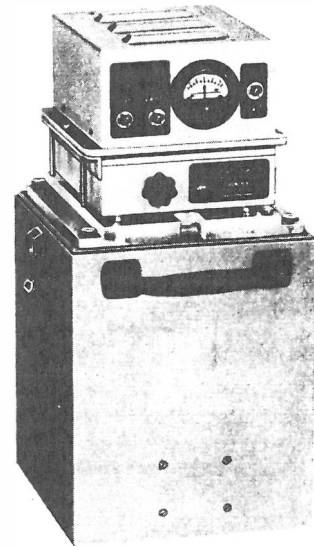


Bild 3. Statoskop — Gesamtansicht.

Beschreibung hier nicht am Platze ist, können doch einige Einzelheiten die Bedingungen und technischen Schwierigkeiten verdeutlichen, die beim Bau dieses Präzisionsmeßgerätes zu beachten waren:

Eine einschneidende Bedingung war von vornherein durch die erforderliche Temperatur-Konstanz gegeben, denn das Manometer ist zunächst eher ein Temperaturindikator als ein Druckmesser. Bei der angestrebten Meßgenauigkeit muß die Temperatur im Meßbehälter auf etwa $0,01^\circ\text{C}$ konstant sein. Unter Verzicht auf komplizierte Thermostaten wird der Meßbehälter deshalb im Betrieb ganz in Eiswasser getaucht, das sich in einem Thermosbehälter für die Dauer eines Bildfluges ohne Änderung auf 0°C hält.

Ferner war es notwendig, die elektrische Baugruppe hermetisch abzuschließen, da sie temperatur- und vor allem feuchtigkeitsempfindlich ist. Ebenso sind besondere Maßnahmen erfolgt, um den Einfluß von Spannungsschwankungen aufzufangen.

Die größten Schwierigkeiten bereitete die Wahl der Meßflüssigkeit, die sehr widersprechende elektrische und mechanische Eigenschaften in sich vereinigen muß. Aus Genauigkeitsgründen sind zunächst geringes spezifisches Gewicht, geringe Zähigkeit und hohe Dielektrizitätskonstante erforderlich. Im Zusammenhang damit soll die Flüssigkeit als Isolator hohen spezifischen Widerstand aufweisen. Niedriger Gefrierpunkt und geringer Dampfdruck sind weitere Forderungen, und aus praktischen Gründen sollte die Meßflüssigkeit zudem nicht giftig, nicht feuergefährlich und nicht ätzend sein. Besondere Aufmerksamkeit erfordern die kapillaren Eigenschaften, denn sie beeinflussen entscheidend die erreichbare Genauigkeit. Nach langen Versuchen hat man sich für eine benetzende Flüssigkeit entschieden und rauht zusätzlich die Innenwand des Steigrohres auf, damit sich der Flüssigkeitsfilm dort ständig zu halten vermag.

Diese Bemerkungen sollen genügen, um die geräte-technischen Probleme anzudeuten. Auf die weiteren Forderungen nach ausreichendem Meßbereich, geringer Ansprechzeit ($\leq 0,1$ sec), linearer Anzeige oder bequemer Bedienung sei nur hingewiesen.

In der derzeitigen Ausführungsform liefert dieses Stoskop eine Meßgenauigkeit von $1/30$ mb. Es wird üblicherweise so geeicht, daß 1 Skalenteil der Anzeige etwas weniger als $1/10$ mb entspricht.

Mit ± 25 Skalenteilen umfaßt der Meßbereich des Gerätes etwa 5 mb, was z. B. in 5 000 m Höhe einen Höhenbereich von rund 70 m bedeutet. Dieser Betrag reicht unter Bildflugbedingungen aus, um das Flugzeug im Stoskop-Meßbereich zu führen.

Zur Auswertung der Stoskop-Registrierungen und zur Umwandlung der Skalenteile in Höhenangaben ist grundsätzlich die barometrische Höhenformel heranzuziehen. Wegen des begrenzten Meßbereichs kann in der Praxis unter Benützung der Eichkonstanten des Gerätes eine sehr vereinfachte Beziehung verwendet werden. Man benötigt dazu nur sehr rohe Angaben über den absoluten statischen Luftdruck und die Temperatur in der Flughöhe, so daß es genügt, diese Angaben der Normatmosphäre zu entnehmen.

In diesem modernen Stoskop steht also für die Höhenmessung ein leistungsfähiges Meßgerät zur Verfügung, das technisch den Forderungen der Luftbildmessung nach Genauigkeit sowie Einfachheit der Bedienung und Auswertung vollauf entspricht.

3. DIE PHYSIKALISCHEN GRENZEN DER MESSMETHODE

Um die Leistungsfähigkeit der Stoskop-Höhenmessung abschätzen zu können, müssen die Grenzen der Meßmethode aufgezeigt werden. Die innere Genauigkeit des hier beschriebenen Stoskops liegt bei $1/30$ mb, das entspricht in den unteren Schichten der Atmosphäre einer Höhenstufe von 30 cm. Die Empfindlichkeit des Gerätes könnte dabei leicht noch um den Faktor 2 gesteigert werden. Auf eine Steigerung der Meßgenauigkeit verzichtet man jedoch zugunsten des Meßbereichs, weil es andere, vom Meßgerät unabhängige Fehlereinflüsse gibt, die wesentlich größere Beträge annehmen können. Die Leistungsfähigkeit der barometrischen Differenzhöhenmessung wird nicht durch die Genauigkeit des Stoskops,

sondern durch äußere Einflüsse begrenzt, die in der physikalischen Struktur der Atmosphäre ihre Ursache haben.

Die Höhenmessung mit dem Stoskop beruht auf der Messung von Luftdruckunterschieden relativ zu einer durch konstanten statischen Luftdruck gekennzeichneten Referenzfläche in der Atmosphäre. Änderungen des statischen Luftdrucks werden als Höhenänderungen des Flugzeuges in bezug auf diese Referenzfläche interpretiert, was im Rahmen der Meßgenauigkeit berechtigt ist, sofern der Absolutwert des Luftdrucks und die Lufttemperatur genähert bekannt sind. Diese Höhendifferenzen sind jedoch nur dann als absolute Höhenangaben brauchbar, wenn man Lage und Form der Referenzfläche kennt. Leider sind nun die Flächen konstanten statischen Drucks in der Atmosphäre weder parallel zur mathematischen Erdoberfläche, dem Geoid, noch sind sie räumlich und zeitlich unveränderlich. Zudem unterliegen sie in kleinen Bereichen noch Störungen mannigfacher Art.

Über die Großformen der isobaren Flächen in der Atmosphäre und über ihre Veränderlichkeit gibt das umfangreiche, laufend veröffentlichte meteorologische Material der Radiosondenmessungen Auskunft. Aus beliebig herausgegriffenen Karten des täglichen Wetterberichtes des deutschen Wetterdienstes ersieht man z. B., daß die Höhenlage der 700-mb-Fläche (≈ 3 000 m hoch) über dem Kontinent Europa Unterschiede in der Größenordnung von 400 m aufweist. Andererseits zeigt z. B. die 100-mb-Fläche, die in rund 16 000 m Höhe liegt, Höhenunterschiede bis zu 1 000 m. Ähnliche Beträge findet man auch schon bei den 200-mb- und 300-mb-Flächen. Diese Verhältnisse widerlegen die verbreitete Meinung, die isobaren Flächen seien mit zunehmender Höhe stärker geglättet und praktisch als Flächen konstanter Höhe anzusehen. Es scheint geradezu umgekehrt zu sein, daß nämlich im großen die Topographie dieser Flächen mit zunehmender Höhe bewegter wird.

Weiterhin läßt sich den Karten des Wetterdienstes entnehmen, daß die täglichen Änderungen der Höhenlage isobarer Flächen, die neben ihrer Form von Interesse sind, Beträge bis zu 100 m annehmen.

Selbst, wenn man bei einer Würdigung dieser Verhältnisse im Auge behält, daß sich Bildflüge für photogrammetrische Zwecke selten über mehr als 300 km erstrecken und außerdem nur bei guten Wetterlagen und meist in Höhen von 2 000 bis 6 000 m ausgeführt werden, ist die Schlußfolgerung zunächst unausweichlich, daß isobare Flächen nicht ohne weiteres zur Stützung von Höhenmessungen geeignet sind. Auch wenn man extreme Wetterbedingungen ausschließt, ist noch mit absoluten Höhenfehlern bis zu 50 m zu rechnen, die mit nachträglichen meteorologischen Korrekturen schwerlich auf die angestrebte Genauigkeit von einigen dm reduziert werden können.

Die barometrische Höhenmessung mit Stoskop wird erst wieder diskutabel, wenn die eingangs erwähnte Tatsache herangezogen wird, daß sich die Luftbildmessung ohnehin auf Paßpunkte stützen muß. Nimmt man an, am Anfang und Ende jedes Flugstreifens seien Paßpunkte verfügbar, aus denen die Flughöhe genau bestimmt werden kann, dann sind damit die wichtigsten und größten Fehlereinflüsse erfaßt. Es bleibt nur noch zu untersuchen, welche Restfehler nach linearer Interpolation zwischen zwei bekannten Punkten einer isobaren Referenzfläche zu erwarten sind.

Aus den erwähnten Karten des deutschen Wetterdienstes kann leicht abgeleitet werden, daß in Bereichen bis zu 300 km Ausdehnung die Form und die zeitlichen Änderungen der isobaren Flächen durch lineare Interpolation

sehr gut erfaßt werden können. Die Restfehler haben die Größenordnung von 0,1 mb. Das bedeutet, daß die Großformen der isobaren Flächen in der Atmosphäre wie auch ihre stetigen zeitlichen Änderungen regelmäßig genug sind, um darauf unter den erwähnten Voraussetzungen Differenzhöhenmessungen mit einer Genauigkeit von etwa 1 m zu stützen.

Wie steht es nun aber mit der Mikrostruktur der im großen sehr regelmäßigen isobaren Flächen? Mit welchen lokalen oder kurzzeitigen Störungen und Schwingungen muß gerechnet werden?

Diese wichtige Frage kann die Meteorologie leider nicht unmittelbar beantworten, denn sie hat praktisch keine Möglichkeit, die Störungen und kurzperiodischen Änderungen isobarer Flächen in der freien Atmosphäre mit hoher Genauigkeit zu messen und zu verfolgen. Es ist gerade umgekehrt, daß mit Bodenpunkten kontrollierte Stoskop-Messungen erstmals zuverlässige Rückschlüsse auf die Feinstruktur isobarer Flächen liefern können.

eine Genauigkeit in der Größenordnung von 0,1 mb erreichen können. Darüber hinausgehende Genauigkeitssteigerungen scheitern an den physikalischen Eigenschaften der Atmosphäre.

Ohne näher darauf einzugehen, sei noch das technische Problem der Erfassung des statischen Drucks erwähnt. Es soll ja der statische Luftdruck der Atmosphäre unverfälscht an das Meßgerät im Flugzeug herangeführt werden. Dieser Forderung stellen sich zwei wesentliche Schwierigkeiten entgegen. Einmal ist das Druckfeld in der Umgebung des Flugzeugs grundsätzlich gestört, und zum andern unterliegt die Trennung des statischen Drucks vom Fahrtdruck mannigfaltigen Fehlereinflüssen. Die auftretenden technischen Probleme brauchen hier nicht im einzelnen erörtert zu werden, weil sie zum großen Teil dadurch gegenstandslos werden, daß die Photogrammetrie nur an Differenzmessungen interessiert ist. Beim Bildflug muß ohnehin auf möglichst gleichmäßige Flugbedingungen geachtet werden (z. B. konstante Drehzahl der Motoren, gleicher Kurs, gleiche Höhe, gleiche Trimmung, Dreiaachsensteuerung u. a.),

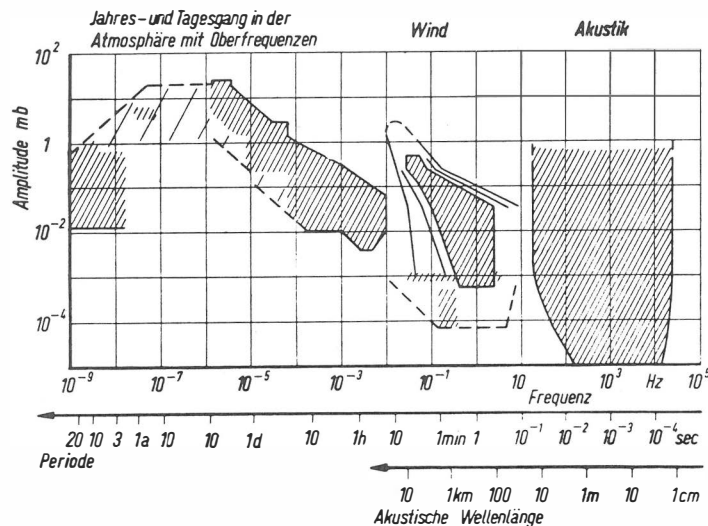


Bild 4. Spektrum der atmosphärischen Luftdruckschwankungen nach Courvoisier.

Wenn deshalb keine Angaben über die freie Atmosphäre bekannt sind, so geben doch die Messungen an vielen erdfesten Stationen, die im Hochgebirge bis über 4 000 m reichen, gewisse Anhaltspunkte, welche Störungen des statischen Luftdruckes auftreten können. Dabei kann allgemein erwartet werden, daß die in der unteren Grenzschicht der Atmosphäre gemessenen Werte ungünstiger ausfallen als die beim Bildflug auftretenden Störungen.

In einer zusammenfassenden Arbeit von P. Courvoisier, Davos [2], sind alle bis 1948 bekanntgewordenen Messungen berücksichtigt. Die wichtigsten Ergebnisse zeigt das „Spektrum der atmosphärischen Luftdruckschwankungen“, das von den Schallfrequenzen bis zu den periodischen Klimaänderungen reicht. Es ist mit einigen Vereinfachungen in Bild 4 wiedergegeben. In dem hier interessierenden Bereich der Luftdruckschwankungen mit Perioden von 10⁻¹ sec bis 3 h treten hauptsächlich Windeinflüsse hervor sowie die Oberfrequenzen atmosphärischer Energieumsetzungen und Eigenschwingungen der Atmosphäre. Die Beträge der Störungen liegen zwischen 10⁻⁴ und 1 mb. Wenn extreme Wetterverhältnisse ausgeschlossen werden, kann man daraus entnehmen, daß unter Bildflugbedingungen mit Luftdruckschwankungen bis 0,1 mb zu rechnen ist.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß barometrische Höhenmessungen im Flugzeug mit dem Stoskop

so daß die Fehlerquellen in der Erfassung des statischen Drucks, die Höhenfehler bis zu 100 m und mehr zur Folge haben können, praktisch nicht mehr zur Auswirkung kommen. Untersuchungen während des Krieges haben einen unregelmäßigen Höhenfehler von ± 2 m ergeben. Allerdings ist in dieser Angabe noch ein erheblicher Fehler des älteren Meßinstrumentes enthalten, so daß es nicht zu optimistisch erscheint, wenn man bei Bildflügen mit einem Höhenfehler in der Stoskop-Messung von ± 1 m rechnet.

4. STATOSKOP IN VERBINDUNG MIT RADAR-HÖHENMESSER

Nach den Überlegungen zur erreichbaren Genauigkeit sollen im Zusammenhang mit der neuesten Entwicklung die Ergebnisse einiger Tests erwähnt werden, die umgekehrt die Richtigkeit der genannten Abschätzungen bestätigen.

Praktische Ergebnisse von Stoskop-Flügen hat z. B. K. Löfström aus Finnland veröffentlicht [3]. Er kommt auf Höhen genauigkeiten von $\pm 1,1$ m aus 4 000 m Flughöhe. Diese Werte sind in neuerer Zeit grundsätzlich durch die Resultate bestätigt worden, die sich mit der Kombination von Stoskop und Radar-Höhenmesser ergeben haben. Diese interessante und vielversprechende Entwicklung ist nach dem Kriege vor allem in Kanada voran-

getrieben worden, das bei der Ausdehnung des Landes vor große Vermessungsaufgaben gestellt ist.

Radar-Höhenmessung allein liefert nur die Abstände zwischen Flugzeug und Geländeoberfläche. Ohne weitere Angaben sind diese Werte nicht zur Höhenmessung im vermessungstechnischen Sinne verwendbar. Erst wenn zusätzlich der tatsächliche Höhenweg des Flugzeugs in der Luft mit einem Statoskop verfolgt wird, können Radar-Distanzmessungen zur Erdoberfläche für die absolute Höhenbestimmung von Geländeprofilen herangezogen werden. Die für Vermessungsflüge eingesetzten Radar-Höhenmesser (sogenannte radar profile recorder) sind daher mit einem Statoskop ausgerüstet, dessen Angaben bei der Radar-Höhenregistrierung schon berücksichtigt sind.

Die Genauigkeitsleistung der Radar-Höhenmessung in Verbindung mit dem Statoskop lag bis vor kurzem bei ± 3 m. Nachdem nun in die kanadischen Geräte verbesserte Statoskope eingebaut worden sind, hat man dort neuerdings über 300 km lange Flugstreifen im Mittel (nach der Ausgleichung) absolute Höhengenauigkeiten von ± 1 m erzielt.

Dieses Beispiel mag die kurze Übersicht über die Probleme und Möglichkeiten der Statoskop-Höhenmessung abschließen. Es zeigt, wie auch abgegrenzte Spezialaufgaben der Luftbildmessung in die allgemeine Entwicklung der Technik einmünden, und verdeutlicht die heutige Tendenz, wonach physikalische Meßmethoden den geometrischen zur Seite treten und sie ergänzen oder auch ersetzen werden.

5. SCHRIFTTUM

- [1] *H. K. Meier*: Ein neues Statoskop mit elektrischer Registrierung. Bildmessung und Luftbildwesen, Sonderheft 1956, S. 60—69.
- [2] *P. Courvoisier*: Über Luftdruckvariographen und Luftdruckschwankungen. Arch. für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie (A) 1 (1948), S. 1—38.
- [3] *K. Löfström*: Photogrammetrische Untersuchung einer Eisfeldaufnahme. Veröffentlichung des finnischen Geodätischen Instituts, Nr. 36, Helsinki 1949, S. 153—161.

Übersicht

Die Luftbildmessung hat als Arbeitsgrundlage photographische Reihenaufnahmen der Erdoberfläche und steht im Hinblick auf deren Auswertung sowohl instrumententechnisch als auch methodisch vor dem Problem, Lage und Richtung jeder Aufnahme zu bestimmen, d. h. die sogenannte äußere Orientierung der Luftbilder festzuhalten. Man strebt an, die dazu notwendigen Daten (drei Lage- und drei Richtungsangaben) während des Bildfluges direkt zu messen. Als Hilfsmittel kommen dafür in Betracht: Funkortung, barometrische Höhenmessung, Stabilisierung der Kamera, kreiselgestützte Lotanzeige, Horizontaufnahmen oder gar photographische Sonnenortung. Im Rahmen dieser Möglichkeiten und Methoden, deren Leistungsfähigkeit den Genauigkeitsansprüchen der Luftbildmessung heute erst teilweise genügt, nimmt die Höhenmessung mit Hilfe des Statoskops bezüglich der einfachen Durchführung und guten Genauigkeit eine bevorzugte Stellung ein.

Das Statoskop ist ein Feinbarometer zur Messung und Registrierung von Luftdruckänderungen während des Bildfluges, die als Funktion der Flughöhe den Höhenweg des Flugzeuges in der Atmosphäre repräsentieren. Der wesentlichste Teil des hier beschriebenen Statoskops, eine Neuentwicklung der Firma Carl Zeiss, Oberkochen, ist ein Flüssigkeitsmanometer, in dessen Steigrohr die Höhe der Flüssigkeitssäule ein Maß für den statischen Druck der Atmosphäre bildet. Zur elektrischen Messung der Druckänderungen ist das Steigrohr als Kondensator ausgebildet, dessen Kapazität von der als Dielektrikum wirkenden Flüssigkeit beeinflusst wird. Der Kondensator ist Glied einer empfindlichen Meßbrücke, die nach vorheriger Nullabstimmung Kapazitätsänderungen sehr genau zu messen erlaubt. Die angestrebte Meßgenauigkeit von etwa $1/20$ Torr stellt hohe An-

forderungen an die Konstruktion des Gerätes. Z. B. ist eine Temperaturkonstanz von $1/100$ °C erforderlich, weshalb der Meßbehälter im Betrieb in Eiswasser getaucht sein muß. Besondere Schwierigkeiten bereitet auch die Wahl der Meßflüssigkeit, die einander widersprechende elektrische und mechanische Eigenschaften in sich vereinigen soll.

Die Leistungsfähigkeit des Statoskops wird nicht durch die Konstruktion des Gerätes, sondern durch die physikalischen Eigenschaften der Atmosphäre begrenzt. Die Höhenmessungen beziehen sich ihrer Natur nach auf Flächen gleichen Luftdrucks in der Atmosphäre, die jedoch weder konstante Höhenlage haben, noch zeitlich unveränderlich sind und zudem im einzelnen mannigfachen Störungen unterliegen. Eine weitere, von außen kommende praktische Schwierigkeit bietet die unverfälschte Erfassung des statischen Außendrucks während des Fluges.

Trotz aller Einschränkungen bedeutet das Statoskop in der Praxis eine wertvolle Hilfe für die Luftbildmessung, vor allem zur Aufnahme ausgedehnter unvermessener Gebiete. Bei guter Wetterlage lassen sich über Flugstreifen bis zu 300 km Länge im Mittel Höhengenauigkeiten in der Größenordnung von 1 m erreichen. Besonders erfolgversprechend hat sich in jüngster Zeit die Koppelung des Statoskops mit einem Radar-Höhenmesser (radar profile recorder) erwiesen.

Summary

All aerial photogrammetry work is based on consecutive photographs of the surface of the earth. With respect to the plotting of such photography there is both the instrumental and the methodical problem of determining the position and the direction of every photo, i. e. to record the so-called outer orientation of the aerial photographs. The general tendency is to be measured the respective data directly (3 indications of position and 3 of direction) during the flying mission. Aids for this purpose are radio navigation, levelling by means of barometer, camera stabilization, gyroscopic indication of the vertical, horizon photographs or even photographic determination of the sun. Among these possibilities and methods the efficiency of which is still only partly sufficient for aerial photogrammetry, aerial levelling with the aid of the statoscope plays an important part on account of its simplicity and its accuracy.

The statoscope is a sensitive barometer for measuring and recording changes in atmospheric pressure during the flying mission. As a function of the flying height, these changes represent the way of the aircraft in the atmosphere. The most essential part of the statoscope discussed in this paper, a new instrument developed by Messrs. Carl Zeiss of Oberkochen is a liquid manometer in the ascending tube of which the level of a liquid column serves as a measure for the static pressure of the atmosphere. In order to make the electrical measurement of such changes in pressure possible the ascending tube is designed as a condenser the capacity of which is influenced by the liquid which acts as a dielectric. This condenser is a link in a *Wheatstone's* bridge which — after having been set to zero — makes a very exact measurement of such changes in capacity possible. The desired measuring accuracy of approximately $1/20$ Torr requires a high degree of perfection in the design of the instrument. So, for instance, a constancy of temperature of $1/100$ °C is required, so that during operation the measuring container must be immersed in ice water. The selection of the measuring liquid which is said to combine very contradictory electrical and mechanical properties represents special difficulties.

The efficiency of the statoscope is not limited by the design of the instrument but by the physical properties of the atmosphere. All height measurements refer to levels of identical atmospheric pressure. These levels of equal atmospheric pressure neither have a constant altitude level nor are they invariable in time, and — moreover — they are subject to manifold disturbances. Another practical difficulty is the unfalsified recording of the statical pressure of the atmosphere during the flight.

In spite of all these facts, however, the statoscope is a valuable practical aid for aerial photogrammetry above all for flying missions over extensive unsurveyed territories. Under favourable weather conditions an average vertical accuracy in

the order of 1 m can be obtained in flight strips up to 300 km long. Recently especially good results were achieved by connecting the statoscope with a radar profile recorder.

Résumé

La photogrammétrie est basée sur des photographies de la surface terrestre prises en série. En ce qui concerne la restitution de ces images on se trouve méthodiquement et instrumentalement devant le problème de la détermination de la situation et direction de chaque prise de vue, c'est à dire de « l'orientation extérieure » des images aériennes. En conséquence, on essaie de mesurer les indications nécessaires à cette orientation (3 indications de situation et 3 de direction) directement pendant le vol. Comme moyens de mesure on se sert de la radiogoniométrie, de l'altimétrie barométrique, de la stabilisation de la chambre de prises de vue, de l'indication gyrostatique de la verticale, des prises de l'horizon et même de la détermination photographique du point solaire. Parmi tous ces procédés et méthodes dont la précision est, en partie, encore insuffisante pour les buts de la photogrammétrie, l'altimétrie par le statoscope joue, grâce à sa simplicité et la bonne précision obtenue, un rôle de première importance.

Le statoscope est un baromètre de précision pour mesurer et enregistrer les changements de pression d'air pendant le vol de prise de photographies. Ces changements de pression d'air représentent comme fonction de l'altitude du vol le chemin parcouru par l'avion dans l'atmosphère. La partie essentielle du statoscope en question qui est une construction récente des usines Carl Zeiss à Oberkochen, est un manomètre à liquide. La colonne de liquide dans le tuyau ascendant indique la

pression statique de l'atmosphère. Pour pouvoir mesurer électriquement les changements de pression atmosphérique, le tuyau ascendant est construit en condensateur dont la capacité est influencée par le liquide faisant fonction de diélectrique. Le condensateur fait partie d'un pont de *Wheatstone* très sensible qui — après avoir été mis au point zéro — permet de mesurer les changements de capacité avec une grande précision. La précision de mesure de $\frac{1}{20}$ Torr exige une construction particulièrement soignée de l'instrument. Une température stable de $\frac{1}{100}$ °C étant nécessaire, le récipient de mesure doit tremper dans de l'eau glacée pendant le service. Le choix d'un liquide spécial ayant des qualités électriques et mécaniques absolument contraires présentait également de très grandes difficultés.

La capacité productive du statoscope n'est pas limitée par des questions de construction de l'appareil, mais par les qualités physiques de l'atmosphère. L'altimétrie dépend des couches de la même pression atmosphérique qui ne sont pas toujours de la même altitude ni temporairement invariables; en outre, elles sont soumises aux perturbations multiples. Une autre difficulté extérieure présente la détermination exacte de la pression statique extérieure pendant le vol.

Malgré toutes ces restrictions le statoscope constitue un appareil auxiliaire appréciable pour la photogrammétrie pratique, avant tout pour les levés de vastes régions non cartographiées. Pendant le temps favorable il est possible de faire des prises de vue aériennes sur des distances de 300 km avec une précision altimétrique de l'ordre de 1 m environ. Des rendements particulièrement favorables ont été récemment obtenus par l'emploi d'un statoscope couplé avec un « radar profile recorder ».