



Bestimmung des integralen Brechungsindex durch Befliegen des Meßstrahles

Werner Schrefl ¹, Gottfried Gerstbach ², Wolfgang Rössler ³

¹ *Wiedner Hauptstraße 17, A-1040 Wien*

² *Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik der TU Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien*

³ *Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik der TU Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien*

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie **69** (3–4), S. 113–125

1981

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Schrefl_VGI_198107,  
Title = {Bestimmung des integralen Brechungsindex durch Befliegen des Me{\ss}  
strahles},  
Author = {Schrefl, Werner and Gerstbach, Gottfried and R{"o}ssler, Wolfgang},  
Journal = {"0sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessungswesen und  
Photogrammetrie},  
Pages = {113--125},  
Number = {3--4},  
Year = {1981},  
Volume = {69}  
}
```



Bestimmung des integralen Brechungsindex durch Befliegen des Meßstrahles

Von *Werner Schrefl, Gottfried Gerstbach* und *Wolfgang Rössler*, Wien

Zusammenfassung

Es wird gezeigt, daß die systematischen Fehler der Streckenmessung (etwa 2–4 ppm bei Licht- bzw. Mikrowelle) durch Befliegen des Meßstrahles auf 0,5–1 ppm vermindert werden können. Die technischen, navigatorischen und organisatorischen Probleme werden behandelt.

Abstract

Determining the integral refractive index by airplane the systematic errors of EDM can be reduced to 0.5–1 ppm. The problems of instruments, navigation and organisation are discussed.

0. Einleitung

Die Mikrowelle wird in der elektromagnetischen Distanzmessung wenig verwendet, weil ein gewisses Mißtrauen in die Erfäßbarkeit des repräsentativen Brechungsindex besteht. Ihr Einsatz ist aber wetterunabhängig und daher sehr rationell, so daß Untersuchungen über die meteorologischen Fehlereinflüsse sinnvoll und nützlich sind.

Die vorliegende Publikation befaßt sich mit einer der Möglichkeiten, den Brechungsindex der Luft für Mikrowellen mit entsprechender Genauigkeit zu ermitteln: die Befliegung des Meßstrahles zur Gewinnung integraler Brechungsindexwerte.

Die technischen, navigatorischen und organisatorischen Fragen solcher Meßflüge werden diskutiert und die Ergebnisse mit Resultaten gänzlich verschiedener Herkunft verglichen.

1. Beflogene Strecken

Im Jahre 1976 wurde in der Umgebung Wiens ein EDM-Testnetz geschaffen (Forschungsprojekt 2720, Projektleiter Prof. Dr. *K. Bretterbauer*), das aus 7 Punkten mit durchschnittlichen Distanzen von 36 km besteht. Alle 21 Strecken wurden mehrfach gemessen und als freies Netz ausgeglichen.

Für die Befliegung wurden die Strecken Hermannskogel–Buschberg (34,7 km) und Buschberg–Hundsheimer Berg (63,6 km) ausgewählt. Der Punkt Hermannskogel befindet sich auf einer 17 m hohen gemauerten

Aussichtswarte, die beiden anderen sind Bodenpunkte. Der Meßstrahl hat eine durchschnittliche Höhe über Grund von 250 m bzw. 240 m (Abb. 1.1 und 1.2) und verläuft etwa zu gleichen Teilen über Wald und Felder.

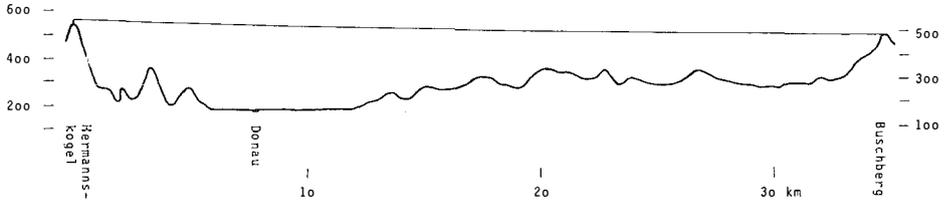


Abb. 1.1: Streckenprofil Hermannskogel - Buschberg (10-fach überhöht)

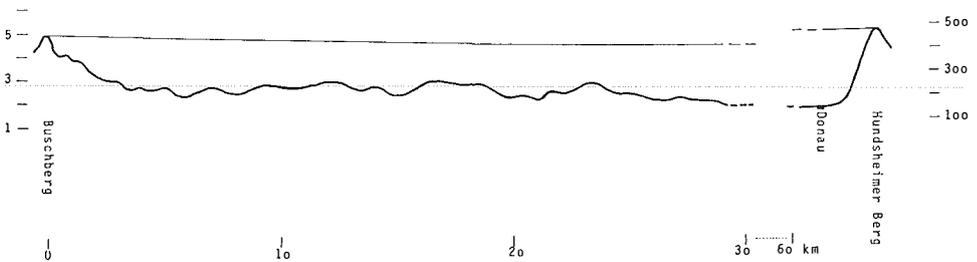


Abb. 1.2: Streckenprofil Buschberg - Hundsheimer Berg (10-fach überhöht)

2. Meßeinrichtung

Zur Temperaturmessung im Fluge diente ein Widerstandsthermometer der Type P7. Die Sonde ist eine Platinspirale, eingegossen in einem Glaszylinder, 50 mm lang, Durchmesser 5 mm. Der Widerstand beträgt 100 Ω , die Halbwertszeit $t_{50\%} = 0,4$ sec, $t_{90\%} = 4,5$ sec.

Die Feuchtmessung erfolgte mit einem Gerät der Type Väisälä HM 11. Dabei absorbierte eine etwa 1 μm starke polymere Schicht durch eine Metallelektrode Wassermoleküle. Dies führt zu einer Änderung der Kapazität des Sensors, die proportional der relativen Feuchte ist. Die Eichung erfolgte bei konstanten Dampfdruckwerten, die sich über verschiedenen gesättigten Salzlösungen einstellen.

Zusätzlich wurde die gesamte Meßvorrichtung in ruhiger und strömender Luft mit Psychrometermessungen verglichen, um die Größenordnung von systematischen Abweichungen abschätzen zu können. Während der Meßflüge wurden Temperatur- und Feuchteverlauf kontinuierlich durch 2 Plotter registriert. Der Luftdruck wurde nachträglich zwischen den Endpunktwerten interpoliert.

Als Fluggerät stand ein zweisitziges Sportflugzeug Piper PA 18 „150“ zur

Verfügung. Die Meßsonden wurden gemäß Abb. 2.1 montiert, um eine möglichst störungsfreie Erfassung der meteorologischen Daten zu sichern. Es wurde auf ausreichenden Abstand zu Propellerstrahl und Flügelende (Randwirbel) geachtet, um die an der Meßstelle herrschende Strömungsgeschwindigkeit abschätzen zu können. Sie ergab sich aus aerodynamischen Berechnungen zu 160 km/h bei einer Eigengeschwindigkeit von 150 km/h.

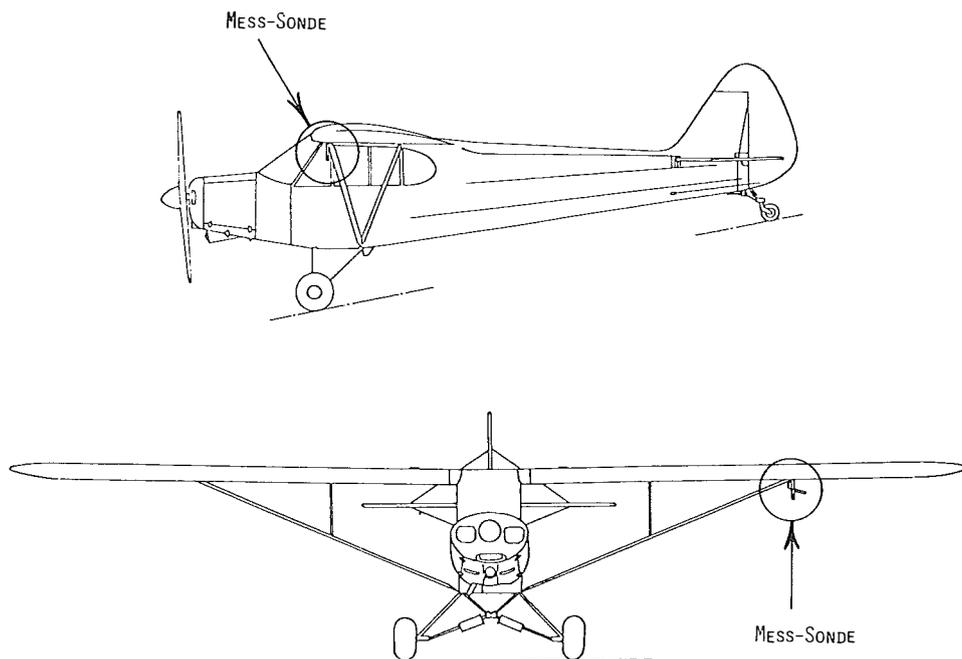


Abb. 2,1

3. Organisation der Meßflüge

Die Streckenendpunkte waren mit je 2 Mann besetzt, die das Tellurometer bedienten, Psychrometer- und Barometerlesungen durchführten und das Flugzeug mit Theodolit und Funkgerät einwiesen. Außer dem Piloten, der auch die Navigation besorgte, befand sich ein Operator im Flugzeug. Dieser setzte über markanten, vorher festgelegten Geländepunkten Marken auf die Plotterstreifen und notierte zu erster und letzter Marke die Zeit, so daß eine örtliche und zeitliche Zuordnung der Meßdaten möglich war.

Als Navigationshilfe wurde eine Karte 1 : 50 000 verwendet, in die der Meßstrahl und seine theoretischen Meereshöhen an mehreren Stellen eingetragen waren. Diese Höhen wurden zwischen den Streckenendpunkten unter Berücksichtigung von Erdkrümmung und Refraktion interpoliert.

Zuerst erfolgte ein Probeanflug zur Höheneinweisung. Die vorberechnete Flughöhe wurde am Höhenmesser eingestellt, sobald über Funk bestätigt wurde, daß sich die Maschine im Fadenkreuz befand. Sodann wurde die Strecke hin und zurück in Strahlhöhe beflogen. Es folgten zwei „Gradientenflüge“ 400 Fuß darüber, um Refraktionskoeffizienten bestimmen zu können. Währenddessen erfolgte am Boden die Distanzmessung. Abschließend wurde der Strahl wieder in beiden Richtungen beflogen.

4. Navigation und ihre Genauigkeit

Eine Abweichung des Flugzeuges vom Meßstrahl führt zu systematischen Fehlern in der Erfassung des Brechungsindex, weshalb die Genauigkeit des gewählten Verfahrens der Sichtnavigation bzw. der barometrischen Höhenavigation abzuschätzen ist. Da der Pilot mit Steuerung, Navigation und Kontrolle des Luftraumes ausgelastet ist, wäre eine höhere Genauigkeit nur durch ein drittes Besatzungsmitglied und zusätzliche Instrumente erreichbar, was die Kosten merklich steigern würde.

4.1 Kursgenauigkeit

Die horizontalen Abweichungen vom Meßstrahl sollen kleiner sein als die durchschnittliche Breite homogener Luftpakete. Letztere wurde für das Testgebiet aus der Größe der Konvektionszellen beim thermischen Segelflug und den Flächen gleichartigen Bewuchses zu ≥ 150 m geschätzt. Aus den tatsächlich registrierten Temperaturprofilen der Meßflüge ergaben sich Werte ≥ 250 m.

Die Steuerung einer in die Karte eingetragenen Kurslinie anhand markanter Punkte läßt sich als Allgemeinfall der nautischen „Deckpeilung“ ansehen, bei der die zwei zur Deckung zu bringenden Marken in unterschiedlichen Höhenwinkeln liegen. Um sie in gleichem Azimut zu halten, muß der Beobachter die Vertikale schätzen. Nach [2] ist dies auf 1° (aufrechte Kopfhaltung) bis 5° (Kopfneigung 30°) möglich, was mit früheren Selbstversuchen des Autors etwa übereinstimmt und wofür ein Mittelwert $d\gamma = 3^\circ \approx 0,05$ rad gelten möge.

Steuert der Pilot mittels zweier unter den Tiefenwinkeln t_1, t_2 befindlichen Marken ($t < 20^\circ$), werden sie daher einen Azimutunterschied

$$d\alpha = d\gamma (t_{g1} - t_{g2}) = d\gamma \cdot H_g \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2} \right) \quad (4.1)$$

aufweisen. Andererseits ergibt sich $d\alpha$ aus der Querablage ds' (Abb. 4.1)

$$d\alpha = \arctg \frac{ds'}{s_1} - \arctg \frac{ds'}{s_2} \doteq ds' \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2} \right), \quad (4.2)$$

so daß ds' nur von der Flughöhe über Grund H_g abhängt,

$$ds' \approx d\gamma \cdot H_g \approx 0,05 H_g \quad (4.3)$$

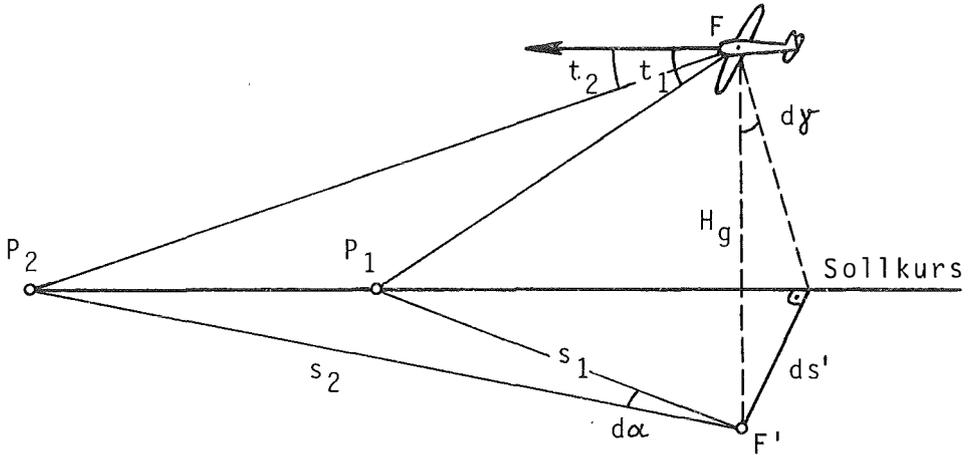


Abb. 4,1

Dies entspricht übrigens dem Gesamtfehler eines mit Navigationsteleskop überwachten photogrammetrischen Bildfluges.

Die tatsächliche Ablage wird zufolge Abdriftänderungen (Böen) und unklaren Marken größer sein. Bei einer Eigengeschwindigkeit $v_e = 150 \text{ km/h}$ und Wind bis 50 km/h bleibt die Abdrift unter 20° , so daß für den Einfluß einer Bö $d\beta < 10^\circ$ anzunehmen ist. Bei 10 sec Ausregelzeit wäre $d\beta$ etwa 3 sec voll wirksam, so daß

$$ds'' = d\beta \cdot 3 v_e \approx \frac{10}{57,3} \cdot 3 \cdot \frac{150}{3,6} = 22 \text{ m} \quad (4.4)$$

Für den Einfluß schlecht erkennbarer Marken werden $10'$ (zehnfache Sehschärfe) angenommen, woraus bei $5\text{--}10 \text{ km}$ Distanz $15\text{--}30 \text{ m}$ folgen. Für die Generalisierung in der Österr. Karte $1 : 50000$ werden nach Untersuchungen des Institutes für Kartographie der TU Wien durchschnittlich 15 m angesetzt. Zusammen mit (4.3) und (4.4) ergibt sich bei $H_g = 250 \text{ m}$ ein zu erwartender Navigationsfehler von $\pm 40 \text{ m}$. Demgegenüber schätzte der Beobachter, der das Flugzeug mittels Theodolit und Sprechfunk in den Meßstrahl einwies, mittlere Ablagen von 30 m . Beide Werte liegen weit unter der A-priori-Genauigkeitsforderung von 150 m , so daß die Sichtnavigation für den angestrebten Zweck völlig ausreicht.

Diese Aussage dürfte auch für größere Flughöhen bis einige km über Grund gelten. Denn einerseits wachsen nur zwei der vier Fehlereinflüsse mit der Flughöhe, andererseits steigt zufolge besser durchmischter Luft auch die Fehlergrenze an.

4.2 Höhengenaugigkeit

Wegen der ausgeprägten Vertikalgradienten der Luft muß das Meßflugzeug in Höhe wesentlich genauer navigiert werden als in Richtung. Bei durchschnittlichen Verhältnissen nimmt der Mikrowellen-Brechungsindex um $0,03$ bis $0,05 \cdot 10^{-6}$ pro Höhenmeter ab. Soll die gemessene Distanz auf $1 \cdot 10^{-6}$ reduziert werden, muß der systematische Höhenfehler des Flugzeuges unter 20 m bleiben.

Nach [5] sind die wichtigsten systematischen Fehlerquellen der barometrischen Flughöhenmessung

- a) Wetterfehler zufolge Differenz zwischen wahrer und Standard-Atmosphäre,
- b) Einbaufehler der Drucksonde (ca. 5% des Staudrucks),
- c) Verzögerung der Meßanordnung und Anzeige (bis etwa 20 Sekunden).

Bei ungestützter Messung, wenn der Höhenmesser nach dem Start nicht mehr nachgestellt wird, können die Fehler 100 m überschreiten. Bei höhenmäßiger Einweisung des Flugzeuges von einem oder beiden Streckenendpunkten bleiben sie jedoch wesentlich geringer.

Für kleine Fluggeschwindigkeiten überwiegt der „Wetterfehler“ bei weitem. Er setzt sich, wenn die Nullpunktverschiebung durch Einstellen des QNH-Wertes am Flugplatz beseitigt ist, aus der Wirkung horizontaler und abweichender vertikaler Luftdruckgradienten zusammen. Die Extremwerte hierfür ergeben sich aus Wetterkarten bzw. bei einem Temperaturbereich von -5° bis $+35^\circ\text{C}$ zu

$$\varepsilon' \leq 1 \cdot 10^{-3}, \quad \varepsilon'' \leq 7,3 \cdot 10^{-2}. \quad (4.5)$$

Ist die Meßstrecke 100 km vom Flugplatz entfernt und 2 km höher als dieser, sind die resultierenden Höhenfehler bei ungestützter Messung maximal 100 m bzw. 146 m. Da die Gradienten normalerweise kaum die Hälfte von (4.5) erreichen, ist mit einem systematischen Höhenfehler von etwa ± 90 m zu rechnen.

Wird der Pilot von einem Streckenendpunkt eingewiesen, wirkt ε' nur mit der halben unüberwachten Streckenlänge, ε'' mit dem aliquoten Teil des Höhenunterschiedes. Mit $D = 50$ km, $\Delta H = 500$ m und den halben Beträgen von (4.5) folgt

$$dH' \leq \frac{D}{2} \cdot \varepsilon' = 13 \text{ m}, \quad dH'' \leq \frac{\Delta H}{2} \cdot \varepsilon'' = 9 \text{ m}. \quad (4.6)$$

Um die systematischen Höhenfehler sicher unter der gesetzten Schranke von 20 m zu halten, wird es also nützlich sein, das Flugzeug möglichst lange einzuweisen. Dies ist wegen der Größe des Flugzeuges bis mindestens 15 km möglich, so daß die Werte (4.6) um 30% sinken. Der Aufwand für eine Einweisung auch vom anderen Endpunkt kann entfallen. Bei Strecken über 60 km müßten allerdings die Differenzen zwischen vorausberechneten und eingewiesenen Flughöhen für den unkontrollierten Streckenteil extrapoliert wer-

den, oder man könnte den Höhenmesser auf die aktuellen Gradienten berichtigen.

Der „Einbaufehler“ macht für $v_e = 150$ km/h nur etwa 5 m aus. Bei Höheneinweisung kann er, ebenso wie der Verzögerungseinfluß, gänzlich außer Betracht bleiben. Überdies läßt sich die Verzögerung durch leichtes Klopfen am Höhenmesser stark vermindern, was bei steileren Meßstrecken ($\Delta H > 500$ m) angezeigt wäre. In solchen Fällen erleichtert auch das Variometer die Höhennavigation des Piloten.

Die *zufälligen* Fehler der Höhensteuerung dürften, zufolge der kleineren vertikalen Luftbewegungen, unter den Beträgen (4.4) liegen. Dazu kommt noch die Ablesegenauigkeit des Höhenmessers (Teilung 20 ft = 6,1 m), so daß Abweichungen von etwa ± 20 m zu erwarten sind. Dieser Wert stimmt mit den Schätzungen des Beobachters am Theodolit überein und zeigt, daß die zufälligen Höhenfehler wegen der zahlreichen Registrierungen pro Meßstrecke keinerlei Rolle spielen.

5. Auswertung und Genauigkeitsabschätzung

5.1 EDV

Die Auswertung der Meßflüge erfolgte am Rechenzentrum der TU Wien. Die wesentlichen Schritte im dazu entwickelten Fortran-Programm sind:

- a) Interpolation der Luftdruckwerte aus den Streckenendpunkten unter Berücksichtigung von Erdkrümmung und Refraktion ($k = 0,25$).
- b) Berechnung von Brechungsindizes für äquidistante Orte der Meßstrahlen aus Temperatur, Feuchte und Druck. Innerhalb der Zeitintervalle, in denen das Meßflugzeug an diesen Orten war, können nun Werte für beliebige Zeitpunkte interpoliert werden.
- c) Ermittlung integraler Brechungsindizes, die zu den gewünschten Zeitpunkten am Meßstrahl Geltung hatten.
- d) Ausgabe von Korrelationskoeffizienten zwischen den Feuchte-, Temperatur- und Brechungsindexprofilen. Die hohen Korrelationskoeffizienten zeigen einerseits die Verlässlichkeit der registrierten meteorologischen Daten, andererseits ihre starke Ortsabhängigkeit.

5.2 Fehlereinflüsse

Da der Brechungsindex der Luft fast 1 beträgt ($n \approx 1,0003$), ist der relative Fehler einer gemessenen Distanz gleich dem negativen Brechungsindexfehler.

$$\frac{dD}{D} = - \frac{dn}{n} \approx - dn \quad . \quad (5.1)$$

Allen Fehlerabschätzungen liegt die Formel von *Essen* und *Froome* zugrunde (Luftdruck p und Dampfdruck e in Torr, Temperatur T in Kelvin):

$$N = (n-1) \cdot 10^6 = \frac{103,49}{T} (p-e) + \frac{86,26}{T} \left(1 + \frac{5748}{T}\right) e \quad (5.2)$$

Der Dampfdruck wird in vorliegender Arbeit nicht aus der psychrometrischen Temperaturdifferenz, sondern aus der relativen Feuchte U (in %) und dem Sättigungsdampfdruck E berechnet (Temperatur t in °C):

$$e = \frac{U}{100} \cdot E = \frac{U}{100} \cdot 10^{(0,6609 + \frac{7,5 t}{237,3+t})} \quad (5.3)$$

Wegen dieser Tatsache und der Höhenfehler ergeben sich neue Zusammenhänge zwischen den Fehlern der meteorologischen Daten und der Genauigkeit des daraus abgeleiteten Brechungsindex [4]. Sie sind in Abb. 5.1 und 5.2 für einen Druck von 715 Torr dargestellt.

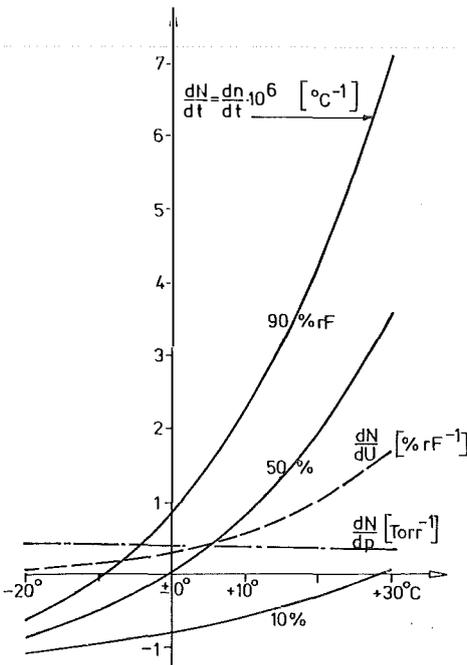


Abb. 5,1

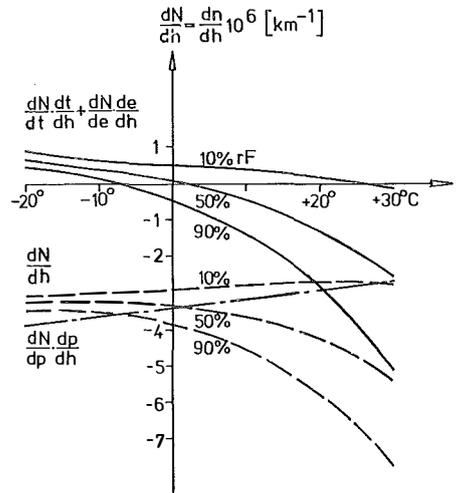


Abb. 5,2

Die Meßfehler beim beschriebenen Verfahren werden aus Beobachtungen, Justage und theoretischen Überlegungen abgeschätzt (Tab. 5.1).

Der Fehler wegen $k \neq 0,25$ ließe sich durch Höhenkorrektur der Meßdaten verringern, wenn der Refraktionskoeffizient aus „Gradientenflügen“ bestimmt wird:

$$k = - \frac{dn}{dh} R \quad (R \text{ Erdradius}). \quad (5.4)$$

	zufällig	systematisch	Faktor
Temperatur	$\pm 0,1^0$	$0,2^0$	dN/dt
Feuchte	$\pm 1 \%$	1 %	dN/dU
Druck	-	0,5 Torr	dN/dp
$k \neq 0,25$ ($D=50\text{km}$)	-	3 m	dn/dh
Höhenfehler	$\pm 20 \text{ m}$	10 m	$\frac{dN}{dt} \frac{dt}{dh} + \frac{dN}{de} \frac{de}{dh}$

Tabelle 5.1

	- 20 ⁰	- 10 ⁰	0 ⁰	+ 10 ⁰	+ 20 ⁰	+ 30 ⁰
10 %	$\pm 0,3$ 0,7	$\pm 0,3$ 0,7	$\pm 0,4$ 0,8	$\pm 0,6$ 1,0	$\pm 1,0$ 1,3	$\pm 1,7 \cdot 10^{-6}$ 2,0
30 %	$\pm 0,3$ 0,6	0,3 0,6	0,4 0,7	0,6 0,9	1,0 1,5	1,8 2,5
50 %	$\pm 0,3$ 0,6	0,3 0,6	0,4 0,6	0,6 1,1	1,1 1,8	1,9 3,0
70 %	$\pm 0,3$ 0,6	0,3 0,5	0,4 0,7	0,7 1,3	1,2 2,2	2,1 3,6
90 %	$\pm 0,3$ 0,6	0,3 0,5	0,4 0,8	0,8 1,5	1,4 2,5	2,3 4,1

Tabelle 5.2

Mit den Werten der Tab. 5.1 ergeben sich die zu erwartenden und die maximalen systematischen Fehler gemäß Tab. 5.2 in Abhängigkeit von Feuchte und Temperatur für 715 Torr und Distanzen um 50 km.

Wegen der großen Datenmengen, aus denen die mittleren Brechungsindizes berechnet werden (Äquidistanz 0,5 km), wird der zufällige Fehleranteil gegenüber dem systematischen bedeutungslos.

6. Ergebnisse der Meßflüge

Die Abbildungen 6.1 und 6.2 zeigen Feuchte- und Temperaturregistrierungen der Strecke Hermannskogel–Buschberg (mit Navigationsmarken) an zwei Flugtagen. Man erkennt, wie stark sich die meteorologischen Profile bei verschiedenen Wetterbedingungen unterscheiden. Die Einheit ist 10% bzw. 1°C.

In Tabelle 6.1 sind die mit Bodenwerten reduzierten Distanzen (ohne Zentrierung) den mit Flugwerten reduzierten gegenübergestellt [4].

Bemerkenswert ist, daß der mittlere Streckenfehler m_D durch die aus Flügen gewonnenen Brechungsindizes halbiert wird.

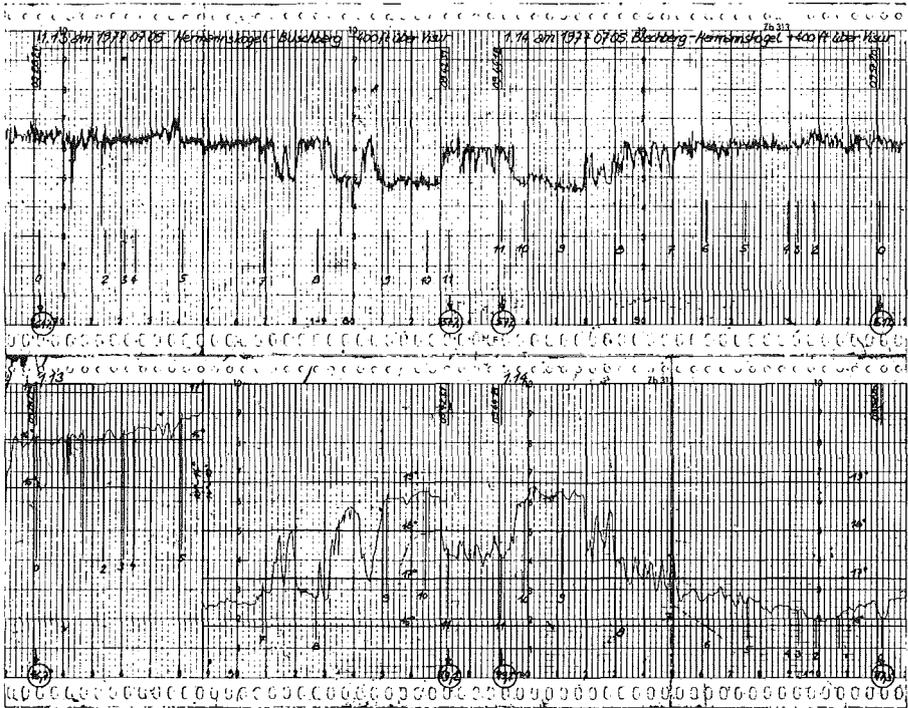


Abb. 6.1: Flugstrecke Hermannskogel - Buschberg und zurück, 1977 07 05, 9.28 - 9.57 Uhr.

	Mittelwert \bar{D} der Bahnkurvenlänge	mittlerer Fehler $m_{\bar{D}} \quad \frac{m_{\bar{D}}}{\bar{D}}$		Differenz Flug - Boden $\bar{D}_f - \bar{D}_b \quad \frac{\bar{D}_f - \bar{D}_b}{\bar{D}}$	
1977 08 25, Hundsheimer Berg - Buschberg, 14 Messungen von 11 bis 16 Uhr					
Flugwerte	63576,764 m	$\pm 0,005$ m	$\pm 0,08 \cdot 10^{-6}$	+0,170 m	$+2,7 \cdot 10^{-6}$
Bodenwerte	63576,594 m	$\pm 0,010$ m	$\pm 0,16 \cdot 10^{-6}$		
1977 08 26, Hermannskogel - Buschberg, 11 Messungen von 9 bis 14 Uhr					
Flugwerte	34727,162 m	$\pm 0,003$ m	$\pm 0,09 \cdot 10^{-6}$	+0,087 m	$+2,2 \cdot 10^{-6}$
Bodenwerte	34727,084 m	$\pm 0,006$ m	$\pm 0,17 \cdot 10^{-6}$		

Tabelle 6.1

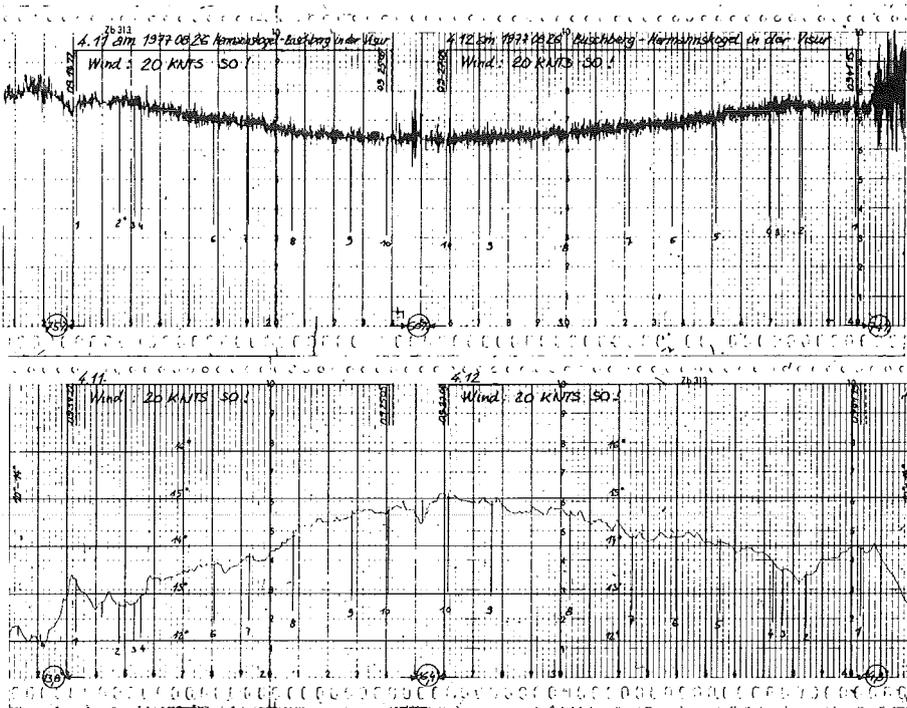


Abb. 6.2: Flugstrecke Hermannskogel - Buschberg und zurück, 1977 08 26, 9.14 - 9.41 Uhr.

Refraktionskoeffizienten, die aus den mittleren Brechungsindizes verschiedener Flughöhen berechnet wurden, variieren innerhalb eines Tages nur wenig, unterscheiden sich aber oft wesentlich vom üblicherweise verwendeten $k = 0,25$. Werte zwischen 0,13 und 0,39 wurden ermittelt.

7. Vergleiche

Interessant ist ein Vergleich der vorliegenden Meßergebnisse mit Resultaten, die auf gänzlich andere Art und Weise hergeleitet sind.

Es kann gezeigt werden [3], daß der Unterschied zwischen dem Brechungsindex, wie er aus dem Mittel der Endpunktwerte folgt, und dem repräsentativen Wert entlang des Meßstrahles eine Funktion des jährlichen Klimarhythmus im Meßgebiet ist. Diese Funktion läßt sich in einen jährlich-periodischen und einen konstanten Anteil aufspalten. Ersterer schwankt zwischen +3 und -2 ppm, letzterer folgt aus umfangreichen Untersuchungen über den vertikalen Verlauf von Luftdruck, Temperatur und Feuchte für den Raum Niederösterreich (und topographisch-klimatisch gleichartige Gebiete) zu etwa +2,5 ppm.

Nach dieser Arbeit ergibt sich zu den Zeitpunkten der Streckenbefliegung der zu erwartende Unterschied zwischen Endpunkts- und integralem Wert des Brechungsindex mit

Flugtag	Strecke	ΔN
1977 07 14	Hermannskogel–Buschberg	+ 4,8 ppm
1977 08 25	Hundsheimer Berg–Buschberg	+ 2,2 ppm
1977 08 26	Hermannskogel–Buschberg	+ 2,1 ppm

Aus der Befliegung ergeben sich die ΔN mit + 4,6, + 2,7 und + 2,2 ppm, die mittlere Differenz zu obigen Werten beträgt also nur 0,3 ppm.

Ein zweiter quasi absoluter Vergleich läßt sich mit der Strecke Hermannskogel–Buschberg ziehen, die im System ED 79 [1] direkt enthalten ist. In diesem modernen Netzausgleich ist die in unmittelbarer Nähe liegende „Wiener Basis“ (Jäderin-Drahtmessung, 1941) maßstabsbestimmend. Der Vergleich

ED 79 [1]	34 728,379 m
Ausgleichung Testnetz Wien [3]	34 728,333 m
Befliegung 1977 08 26	34 728,329 m

zeigt hervorragende Übereinstimmung innerhalb 1,4 mm/km.

Die Ergebnisse beider Vergleiche bestätigen die Auffassung, daß die Messung langer Distanzen mit Mikrowellen Genauigkeiten von 10^{-6} ermöglicht.

8. Ausblick

Die herkömmliche Reduktion elektromagnetisch gemessener Strecken mittels meteorologischer Daten der Streckenendpunkte führt zu schwer abschätzbaren systematischen Fehlern, weil der bodennahe Brechungsindex nicht für den Großteil der Meßstrecke typisch ist. Diese Fehler lassen sich durch Befliegen des Meßstrahles wesentlich verkleinern, bei Tellurometermessungen zur Zeit auf 1–2 mm/km. Der kleinere Wert gilt gemäß Tab. 5.2 für Temperaturen unter etwa 20°C, wenn der Dampfdruck – wie in vorliegender Arbeit – über die relative Feuchte ermittelt wird. Lasermessungen werden etwa doppelt so genau, doch muß man oft lange auf günstige Sichtbedingungen warten.

Das zusätzliche Instrumentarium für Befliegungen besteht aus einem handelsüblichen Temperatur- und Feuchtefühler (zusammen ca. S 30.000,-) und x-y-Schreibern. Besondere Navigationsgeräte sind nicht erforderlich, doch ist das Flugzeug von einem Streckenendpunkt höhenmäßig einzuweisen. Die Meßflüge (inkl. 2 Mann Besatzung) erhöhen die Kosten eines üblichen 4-Mann-Meßtrupps um etwa 100%. Durch die Gewißheit der genauen

Streckenreduktion können jedoch Wiederholungsmessungen zu anderen Tagen und Wetterlagen entfallen.

Aus unseren Meßflügen geht hervor, daß der Brechungsindex entlang der Strecke stark schwankt und die Unterschiede zum integralen Wert oft $5 \cdot 10^{-6}$ erreichen. Demnach garantiert ein Ballonsondenaufstieg, der ähnliches wie eine Befliegung kostet, keine Verringerung der systematischen Fehler.

Wird ein Flugzeug mit rund 150 km/h Eigengeschwindigkeit verwendet, ist es günstig, die Meßflüge während der EDM durchzuführen (eventuelle Unterbrechungen des Meßstrahls bringen keine Nachteile). Etwa 5 Minuten lang wird das Flugzeug eingewiesen und dann während des weiteren Hin- und Rückflugs einige Male die Distanz gemessen. Nach Rückkehr des Flugzeugs kann der Vorgang wiederholt werden. Zwischen zwei solchen Serien empfiehlt es sich, zur Bestimmung der Meßstrahlkrümmung „Gradientenflüge“ in konstanter Höhe über der Visur (etwa 150 m) durchzuführen. Die Reichweite der üblichen Flugzeuge erlaubt dies in jedem Fall.

Ist die Strecke kürzer als 25 km (oder das Flugzeug schneller), sind die Distanzen besser während der Gradientenflüge zu messen und die Brechungsindizes aus dem benachbarten Meßstrahlflügen zu interpolieren. Werden auch trigonometrische Höhenmessungen vorgenommen, eignen sich diese Gradientenflüge zusätzlich zur Berechnung der wirksamen Refraktionskoeffizienten.

In Verbindung mit dem beschriebenen Meßflugverfahren liefert die Distanzmessung mit Mikrowellen Genauigkeiten, die jene mit Lichtwellen übertrifft. Außerdem ist die Mikrowellenmessung fast immer anwendbar und nicht auf jene etwa 40 Tage pro Jahr mit ausreichender optischer Sicht beschränkt. Besonders hoch ist die Wirtschaftlichkeit in Netzen oder Traversen. Hier kann auch die Zahl der Meßflüge durch Auswahl typischer Strecken verringert werden.

Literatur

[1] Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen: Der österreichische Anteil am ED 79. Wien 1980.

[2] *Parker, D. E.*: Gleichgewichts- und Orientierungssinn. Spektrum der Wissenschaft, Weinheim, Jan. 1981.

[3] *Rössler, W.*: Der Einfluß des Klimarhythmus auf die Mikrowellendistanzmessung. Unveröff. Dissertation, TU Wien 1978.

[4] *Schreffl, W.*: Die Bestimmung von integralen Brechungsindexwerten entlang von Meßstrahlen des Wiener Testnetzes. Unveröff. Diplomarbeit, TU Wien 1978.

[5] *Winter, H., H. P. Zenz* und *J. Jenschek*: Messung der Vertikalbewegungen eines Flugzeugs. Deutsche Luft- und Raumfahrt, FB 75-41, Braunschweig 1975.