

Z u m E i n s a t z d e r R a d i o s o n d e i n d e r M e t e o r o l o g i e

I. M i t t e i l u n g

Aufgaben und Forderungen, Typisierung

Von Prof. Dr. Rudolf S c h u l z e, Hamburg (Met.Amt f.NW-Deutschl.)

Annalen der Meteorologie
Herausgeber: Dr.G.Pogade, Hamburg-Blankenese
Druck: Gebr.Sülter, Hamburg 24
Im Selbstverlag des Met.Amtes f.NW-Deutschland, Hamburg

Zum Einsatz der Radiosonde in der Meteorologie

I. Mitteilung (Aufgaben und Forderungen. Typisierung)

von Rudolf Sch ul z e, Hamburg

- I. Problemstellung
- II. Aufgaben und Forderungen
 - 1. Meßbereich
 - 2. Genauigkeit
 - 3. Registrierung
- III. Typisierung
 - 1. Temperatursonden
 - 2. Windsonden
 - 3. Wettersonden
 - 4. Raketensonden
 - 5. Wetterfernmeldegeräte
- IV. Schlußbetrachtung

DK 551.508.812

Die Radiosonde - ein in die Atmosphäre aufsteigendes physikalisches Meßinstrument zum punktwisen Erfassen von atmosphärischen Zuständen und drahtlosen Übertragen der Meßergebnisse zu einer Bodenstation - hat seit 1927 in die Meteorologie zur Bestimmung von Temperatur, Feuchte, Druck und Wind in Abhängigkeit von der Höhe über der Erdoberfläche Eingang gefunden.

Ihr Aufbau wurde schon mehrfach zusammenfassend dargestellt ¹⁾, noch nicht behandelt wurde ihre Meßgenauigkeit und die Grenzen, die der Radiosonde physikalisch gesetzt sind. Dies ist die Aufgabe der folgenden Berichte.

Zur Erlangung der Grundlagen für eine derartige Betrachtung war es notwendig, sämtliche mit dem Einsatz der Radiosonden für meteorologische Zwecke zusammenhängenden Fragen zu bearbeiten; sie werden von den einzelnen Sachbearbeitern als selbständige Teilgebiete erörtert werden. So werden nach einer Besprechung der Aufgaben der Radiosonde, der Forderungen an sie und der verschiedenen Typen die Meßverfahren und ihre Fehlergrenzen eingehend besprochen. Das grundsätzliche Vorgehen bei der Prüfung einer Radiosonde wird an einem im Masseneinsatz befindlichen Typ als Beispiel behandelt, die Ursachen der Temperaturträgheit, der Temperatureinfluß auf Druckmeßgeräte, Batteriefragen, Antennenfragen, Gewichtsfragen und anderes besprochen, schließlich werden neue oder weiter entwickelte Sondenmodelle, besonders eine zum Eicheln anderer Typen geeignete „Eichsonde“, beschrieben werden, um letztlich in einer Zusammenstellung das Hauptthema: die erreichbare physikalische Meßgenauigkeit beim Einsatz der Radiosonde für meteorologische Zwecke noch einmal abschließend zu besprechen.

I. Aufgaben und Forderungen

Die Meteorologie fordert von dem aerologischen Aufstieg in erster Linie

Temperatur

Feuchte

sämtliche 4 Größen in Abhängigkeit

Druck

von der Höhe.

Wind

Die Forderungen an Meßbereich, Genauigkeit und Registrierung sind in den Tabellen 1, 2 und 9 zusammengestellt.

Unter der Rubrik „tragbar“ sind die Werte zusammengestellt, die in gemeinsamen Besprechungen mit führenden deutschen Aerologen und Radiosondenphysikern ²⁾ als dem der-

- 1) P. Duckert, Telemeteorometrie (Kleinschmidt, Hdb.d.Met.Instrum.556, 1935.)
 L. Weickmann u. K. Keil, Über Radiosondenkonstruktionen. Denkschrift d. Int. Met. Org. u. Int. Aerolog. Komm., 1937 und 1939.
 K. O. Lange, Bulletin Amer. Met. Society; Vol. 16, Vol. 17 und 1937.
 G. Loeser, Die drahtlosen aerolog. Meßmethoden (Linke, Met. Taschenbuch V; 127, 1937).
- 2) Besonderer Dank gebührt den Herren: Dr. Becker, Dr. Duckert, Prof. Dr. Kölzer, Dr. Müller, Dr. Nagel, Prof. Dr. Plötze, Dr. Reichert, Dr. Scherhag und Dr. Schröder.

Meßbereich	tragbar ¹⁾	erstrebenswert ²⁾
Temperatur	+40 bis -70°C	+50 bis -90°C
Feuchte	0 bis 100 %	0 bis 100 %
Druck	1100 bis 15 mb	1100 bis 5 mb
Windrichtung und -geschwindigkeit		
a) Azimut	0 bis 360°	0 bis 360°
b) Höhenwinkel	0 bis 90°	0 bis 90°
c) Schrägentfernung	0 bis 150 km	0 bis 180 km
1) Für das Gebiet „Europa“ - dem derzeitigen Stand der Entwicklung entsprechend		
2) Für zonenunabhängigen Einsatz		

Tabelle 1: Forderungen der Meteorologie an den Meßbereich der Radiosonde

Genauigkeit	tragbar	erstrebenswert
Temperatur	$\pm 0,5^\circ\text{C}$	$\pm 0,4^\circ\text{C}$
Feuchte	$\pm 5\%$	$\pm 3\%$
Druck	± 5 mb	± 100 m Höhe
Windrichtung und -geschwindigkeit		
a) Azimut	$\pm 5^\circ$ ($\pm 1^\circ$)	$\pm 1^\circ$ ($\pm 0,2^\circ$)
b) Höhenwinkel	$\pm 5^\circ$ ($\pm 1^\circ$)	$\pm 1^\circ$ ($\pm 0,2^\circ$)
c) Schrägentfernung	± 200 m	± 100 m
Werte in Klammern: Azimut f. Entfernungsberechnung Höhenwinkel für Höhenberechnung		

Tabelle 2: Forderungen der Meteorologie an die Meßgenauigkeit der Radiosonde

Klasse	Anzeigefehler
0,2 } Feinmeßgeräte	$\pm 0,2 \%$
0,5 }	$\pm 0,5 \%$
1,0 } Betriebsmeßgeräte	$\pm 1,0 \%$
1,5 }	$\pm 1,5 \%$
2,5 }	$\pm 2,5 \%$

Tabelle 3: Klassifizierung der elektrischen Meßgeräte nach den VDE-Regeln

Lage, Feder, Eichung, Skalenteilung und Ablesung. Einflußgrößen wie Temperatur, Frequenz, Spannung, Fremdfeld und Leistungsfaktor fallen nicht unter den Anzeigefehler.

Beim Studium der zusätzlichen Forderungen und Bauanweisungen erkennt man, mit welcher großer Sorgfalt bei der Herstellung vorgegangen werden muß, um die geforderte Genauigkeit zu erzielen. Auf die Radiosonde übertragen, die für meteorologische Zwecke im wesentlichen einen Temperaturbereich von 100° und einen Druckbereich von 1000 mb messend umfassen muß, würde eine Genauigkeitsforderung von $\pm 0,5^\circ$ bzw. ± 5 mb einen Anzeigefehler von $\pm 0,5\%$ bedeuten. Hieraus ergäbe sich, daß die Radiosonde als „Feinmeßgerät“ in obigem Sinne hergestellt und behandelt werden müßte: eine Forderung, die nicht nur herstellungsmäßig wegen der hohen benötigten Stückzahlen, sondern auch einsatzmäßig wegen

zeitigen Entwicklungsstand der Sonden entsprechend für das Gebiet „Europa“ unbedingt gefordert werden müssen. Sie stellen also Minimalbedingungen dar.

Unter der Rubrik „erstrebenswert“ hat der Verfasser die Werte zusammengestellt, die nach seiner Ansicht für einen allgemeinen, zonenunabhängigen Einsatz unter Berücksichtigung der besonderen Gegebenheiten des atmosphärischen Aufbaus gefordert werden müssen.

Die einzelnen Zahlenwerte wurden auf Grund folgender Überlegungen gewonnen:

1. Meßbereich. Die Grenzen (s.Tab.1) ergeben sich in einfacher Weise aus den Gipfelhöhen der Sonden, den Eigenschaften der Meßverfahren und den Zuständen der Atmosphäre.

2. Genauigkeit. Die Forderungen an die Radiosonde (s.Tab.2) als ein in großer Stückzahl herzustellendes und einzusetzendes Meßgerät sind streng und technisch nur sehr schwer zu erfüllen.

Dies werde am technisch durchgebildeten, elektrischen Meßgerät erläutert, für das die Genauigkeitsforderungen auf Grund jahrzehntelanger Erfahrung im Bau derartiger Instrumente in den VDE-Regeln festgelegt wurden. Die elektrischen Meßgeräte wurden in 5 Klassen aufgeteilt (s.Tab.3), deren „Anzeigefehler“ den angegebenen Prozentsatz vom Skalenendwert nicht überschreiten darf. Unter dem Anzeigefehler wird der Unterschied zwischen dem angezeigten und dem wahren Wert der Meßgrößen verstanden. Er wird hervorgerufen durch Reibung,

Er wird hervorgerufen durch Reibung,

Wahrer Zustand			Abweichung vom wahren Zustand							
			-0,5° +5 mb				+0,5° -5 mb			
Temp. °C	Druck mb	Höhe gm	Temp. °C	Druck mb	Höhe gm	Δgm	Temp. °C	Druck mb	Höhe gm	Δgm
15,0	1022	0	15,0	1022	0	--	15,0	1022	0	--
1,0	785	2129	0,5	790	2076	-53	1,5	780	2183	+54
-3,0	759	2395	-2,5	764	2339	-56	-3,5	754	2452	+57
-21,0	457	6239	-21,5	462	6143	-96	-20,5	452	6336	+97
-49,0	265	9962	-49,5	270	9805	-157	-48,5	260	10122	+160
-53,0	245	10462	-53,5	250	10293	-169	-52,5	240	10632	+170
-48,0	160	13183	-48,5	165	12940	-243	-47,5	155	13431	+248
-41,0	50	20811	-41,5	55	20130	-681	-40,5	45	21561	+750

Betrachtet man die Temperaturwerte in festen Höhenstufen, so erhält man:

bei 3000 m	1,4°	2,1°	+0,7°	3,1°	+1,7°
bei 5000 m	-14,4°	-13,5°	+0,9°	-12,5°	+1,9°
bei 9000 m	-43,2°	-41,5°	+1,7°	-40,3°	+2,9°

Berechnet man aus den vorher angegebenen Aufstiegen die absoluten und relativen Topographien, so ergeben sich folgende Werte in gm:

Absolute Topographie					
1000 mb	170	170		170	
500 mb	5580	5570	-10	5600	+20
225 mb	11000	10960	-40	11040	+40
96 mb	16520	16470	-50	16560	+40
41 mb	22140	22090	-50	22180	+40

Relative Topographie					
1000-500 mb	5420	5400	-20	5430	+10
500-225 mb	5420	5390	-30	5440	+20
225-96 mb	5520	5510	-10	5520	00
96-41 mb	5620	5620	00	5620	00

Tabelle 4. Einfluß einer Meßgenauigkeit von $\pm 0,5^\circ$ und ± 5 mb auf das Auswertungsergebnis eines Radiosondenaufstieges.

der vielfältigen Transporte und der rauhen Behandlung im Aufstiegsbetrieb in keiner Weise zu erfüllen ist. Die für die Radiosonde angegebenen Genauigkeitsforderungen können sich deshalb nur auf den „relativen“ Fehler beziehen; die „absolute“ Genauigkeit liegt selbstverständlich viel niedriger. Dies ist auch von untergeordneter Bedeutung, wenn für die großen mit einem Radiosondennetz überzogenen Räume jeweils eine einheitliche Sondentypen verwendet wird, da dann deren systematische Fehler automatisch aus den Topographien herausfallen. Ein Vergleich zweier Radiosondennetze, die mit verschiedenen Radiosondentypen arbeiten, ist wegen der notgedrungen geringen absoluten Genauigkeit der Sonden nur unter großem Vorbehalt möglich.

Die einzelnen Zahlenwerte der Tabelle 2 (Genauigkeitsforderungen, S.4) wurden auf Grund folgender Überlegungen gewonnen:

a. Temperatur.

In der Rubrik „tragbare“ Genauigkeit wurde jeweils 0,5% des Gesamtbereiches angegeben. Es wurde dabei vorausgesetzt, daß der Verstrahlungsfehler nach dem Vorgang von VÄISÄLÄ¹⁾ als Korrektur am Aufstieg angebracht wird. Die Größe der Auswirkung einer

1) V. Väisälä, Der Strahlungsfehler der Radiosonde, Ann. Acad. Scient. Fennicae, Ser. A. Tom. LVII. Nr.1

Ungenauigkeit von $\pm 0,5\%$ zeigt folgendes Beispiel, in dem ein als richtig angenommener Aufstieg einmal unter der Annahme betrachtet wird, daß die Temperatur um $0,5^\circ$ zu kalt und der Druck um 5 mb zu hoch gemessen worden ist, im anderen Falle entsprechend $0,5^\circ$ zu warm und 5 mb zu niedrig (s. Tab. 4)¹⁾.

In der absoluten Topographie beträgt die größte Abweichung 5 Dekameter, in der relativen Topographie 3 Dekameter. Erfahrungsgemäß sind diese Fehler tragbar, obwohl die Isohypsen beim Kartenzeichnen in einem Abstand von nur 4 Dekametern gewählt werden.

Es kann also festgestellt werden, daß die für die Temperatur als tragbar bezeichnete Genauigkeitsforderung von $\pm 0,5\%$ des Gesamtbereichs den derzeitigen Forderungen der Meteorologie gerecht wird.

Als erstrebenswert wird jedoch besonders von meteorologischer Seite gefordert, daß der Fehler bei der absoluten Topographie nicht mehr als ± 2 Dekameter beträgt. Dies hat zur Folge, daß in der Rubrik „erstrebenswerte“ Genauigkeit $\pm 0,3\%$ des Gesamtbereiches gefordert werden muß. Nach dem Stand der Technik ist diese Forderung zur Zeit unerfüllbar, besonders, wenn bedacht wird, daß der Einfluß des Verstrahlungsfehlers selbst bei erfolgter Korrektur nicht unter ein gewisses Maß herabgedrückt werden kann, auch wenn die Forderungen an Gewicht und geringem Transportvolumen in Zukunft wesentlich herabgesetzt werden.

Die Angabe eines für sämtliche Höhenstufen gleichbleibenden zulässigen Fehlers ist für die Temperatur angängig, weil die Temperatur mit der Höhe bis zur Stratosphären-grenze im wesentlichen linear abfällt und oberhalb der Stratosphären-grenze an Bedeutung verliert.

b. Feuchte.

Als „tragbar“ wird von den Fachleuten eine Genauigkeit von $\pm 5\%$ der relativen Feuchte angegeben. Bei den stattgehabten Besprechungen wurde immer wieder hervorgehoben, die Meßergebnisse wiesen darauf hin, daß die geforderte Genauigkeit von $\pm 5\%$ von den bisher eingesetzten Radiosonden nicht erreicht werde. Aus diesem Grunde wurde auch als „erstrebenswerte“ Genauigkeit nur $\pm 3\%$ gefordert. Für sämtliche meteorologischen Zwecke reicht diese Genauigkeit vollständig aus. Außerdem sind die physikalischen Möglichkeiten, die Feuchte mit einer Radiosonde genau zu messen, sehr gering. Besonders die Trägheit beeinflußt das Ergebnis zur Zeit noch sehr, und es ist wenig Anlaß zur Hoffnung vorhanden, daß sich dies in Zukunft ändert. Es sei hier noch darauf hingewiesen, daß die Genauigkeit mit steigender Feuchtigkeit wachsen sollte.

c. Druck.

Für den Druck fordert man eine Meßgenauigkeit von $\pm 0,5\%$ des Gesamtmeßbereichs, also ± 5 mb für eine normale Radiosonde. Die Auswirkungen dieser Forderung auf das Ergebnis eines Radiosondenaufstieges wurde bereits bei der Besprechung der Genauigkeitsforderungen für die Temperatur mitbehandelt. Man erkennt, daß sich die gleichbleibende Genauigkeit für den gesamten Aufstieg in der relativen Topographie praktisch gleichmäßig über den gesamten Aufstieg auswirkt. In der absoluten Topographie wie auch besonders bei der Berechnung der Höhe hat die gleichbleibende mb-Genauigkeit dagegen zur Folge, daß die aus dem Aufstieg errechneten Werte laufend mit der Höhe unsicherer werden (s. Tab. 4, S. 5). Aus diesem Grunde wurde unter „erstrebenswert“ eine gleichbleibende Genauigkeit nicht in mb sondern in „Höhenstufen“ gefordert. Dies hat zur Folge, daß das angewandte Meßverfahren nach kleiner werdenden Druckwerten immer genauer werden muß (s. Tab. 5). Es ist allerdings sehr die Frage, ob sich diese Forderung in der Praxis durchsetzen wird, da die Mehrzahl der bisher angewandten Druckmeßverfahren eine lineare Auflösung mit dem Druck besitzt und die wenigen bisher bekannt gewordenen Methoden mit steigendem Auslauf bei fallendem Druck sich nur schwierig mit den bekannten Radiosondenverfahren koppeln lassen.

1) Obiges Rechenbeispiel wurde mir liebenswürdigerweise von Herrn Dr. Schröder zur Verfügung gestellt.

d. Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

Die Forderungen nach „tragbarer“ Genauigkeit waren sehr unterschiedlich, z.T. überstiegen sie die in der Praxis auch in Zukunft erreichbaren Genauigkeiten bei weitem. Die in der Tab.2 zusammengestellten Werte sind deshalb mit Vorbehalt zu betrachten; sie stellen jedoch Werte dar, die mit den bekannt gewordenen Verfahren erreicht werden können. Die geforderten Werte bezogen sich auch meist nicht auf die direkt zur Messung anstehenden Ortungsgrößen, sondern bereits auf das Endresultat für Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Nach längeren Besprechungen gelang es in Deutschland schließlich, für Windgeschwindigkeit und Windrichtung folgende Genauigkeitsgrenzen als „tragbar“ anerkennen zu lassen:

Windgeschwindigkeit:	unter 10 m/s	±1 m/s
	über 10 m/s	±2 m/s
Windrichtung:		±5°

H ö h e in km	Genauigkeit für ±100 m - Höhen- stufen in mb
0 - 5 km	±3 mb
5 - 10 km	±2 mb
10 - 15 km	±1 mb
15 - 20 km	±0,4 mb
20 - 25 km	±0,2 mb

Tabelle 5: Abhängigkeit der Druckmeßgenauigkeit von der Höhe für gleichbleibenden Fehler von ±100 m Höhe

Zu ihrer Bestimmung ist die Kenntnis folgender Größen notwendig:

- Azimut - Richtung gegen Nord,
- Entfernung - Strecke des auf den Erdboden projizierten Ballonortes¹⁾ von der Startstelle,
- Höhe - Ballonort über NN.

Sie werden entweder aus den Ortungsgrößen

Azimut - Höhenwinkel - Schrägentfernung

oder unter Hinzunahme der mittels Temperatursonde u.ä. gemessenen Höhe berechnet (s.Tab.6).

Nach Logarithmierung und Differenzierung setzt sich der relative Fehler in folgender Weise aus den einzelnen Ortungsgrößen zusammen:

I	$E = H \cdot \text{ctg } \beta$	$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta H}{H} + \frac{2 \Delta \beta}{\sin 2\beta}$
II	$E = \sqrt{E_S^2 - H^2}$	$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta E_S}{E_S} + \frac{\Delta H}{H} \cdot \text{tg}^2 \beta$ 2)
III ^a	$E = E_S \cdot \cos \beta$	$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta E_S}{E_S} + \text{tg } \beta \cdot \Delta \beta$
III ^b	$H = E_S \cdot \sin \beta$	$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta E_S}{E_S} + \text{ctg } \beta \cdot \Delta \beta$
IV	$H = E \cdot \text{tg } \beta$	$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta E}{E} + \frac{2 \Delta \beta}{\sin 2\beta}$
V	$E = P \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}$	$\frac{\Delta E}{E} = \text{ctg } \alpha_2 \cdot \Delta \alpha + 2 \cdot \text{ctg}(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \Delta \alpha$

Der relative Fehler der Entfernungsbestimmung aus dem Schnittpunkt der verschiedenen Azimutwerte $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ läßt sich nicht in so einfacher Weise formulieren. Seine Größe und seine Abhängigkeit von der Basislänge können aus Tabelle 7 (s.S.8) entnommen werden. Die unter V angegebene Berechnung von E gilt für gleichseitiges Peildreieck und Start an einer der Peilstellen. Außerdem wird auf die ausgezeichneten Betrachtungen von DIECKMANN³⁾ und LOESER⁴⁾ hingewiesen.

1) Zur Vereinfachung der Ausdrucksweise wird im folgenden von „Ballonort“ gesprochen und darunter auch der Ort von Sendern oder Reflektoren u.ä. verstanden.

2) Direkte Differentiation ergibt: $\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{E^2} (E_S \Delta E_S - H \Delta H)$.

Für die vorkommenden kleinen Höhenwinkel kann man E und E_S als nahezu gleich ansehen (bei 15°: 4% Unterschied). Der Höhenwinkel β ist zur Diskussion herangezogen worden, da er das Ergebnis anschaulicher deuten läßt, obgleich er bei diesem Verfahren nicht gemessen wird.

3) M.Dieckmann, Schriften d.Dtsch.Akad.d.Luftfahrtforschung, Heft 46, p.117

4) G.Looser, Beitr.z.Phys.d.f.Atm.27,85,1941; siehe auch: G.Stüve, Arb.d.preuß.aer.Obs. XII,1929; J.Kölzer u. K.F.Möller. Met.Zs.50.1933; P.Duckert, Dtsch.Forschung 21,1934 und Corriez u. Perlat, La Météor. 11,1935.

Einfachanschnitt	geortet	Azimut	Entfernung	Höhe
I optisch	Azimut α Höhenwinkel β	gemessen	$E = H \cdot \operatorname{ctg} \beta$ (± 2000 m) ¹⁾	aus Aufstiegsge- schwindigkeit (± 500 m)
II elektrisch (Phasen- messung)	Azimut α Schrägent- fernung E_S	gemessen	$E^2 = E_S^2 - H^2$ (± 250 m)	gemessen mittels Tem- peratursonde (± 170 m)
III elektrisch (Laufzeit- messung)	Azimut α Höhenwinkel β Schrägent- fernung E_S	gemessen	$E = E_S \cdot \cos \beta$ (± 240 m)	$H = E_S \cdot \sin \beta$ (± 180 m)
Mehrfachanschnitt				
IV optisch	$\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$ $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$	gemessen	Schnittpunkt $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n$ (± 240 m) ²⁾	$H = E \cdot \operatorname{tg} \beta$ (± 200 m)
V elektrisch	$\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$	gemessen	Schnittpunkt $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n$ (± 240 m) ²⁾	gemessen mittels Tem- peratursonde (± 170 m)
<p>1) Die Zahlen in () sollen einen Anhalt zum Vergleich der verschiedenen Meßverfahren bieten; sie stellen die Streuung für Entfernung und Höhe dar, wenn das Azimut und der Höhenwinkel mit $\pm 0,2^\circ$ Genauigkeit gemessen werden und die wahre Entfernung 40000 m und die Höhe 10000 m betragen.</p> <p>2) Für symmetrischen Fall (Peilbasislänge: 40000 m)</p>				

Tabelle 6: Die durch Einfach- und Mehrfachanschnitte georteten Größen und die Berechnungsart von Azimut, Entfernung und Höhe aus diesen.

Wahrer Wert der Entfernung in Peilbasislängen P	Streuung der Entfernung ¹⁾ bei			
	$\pm 1^\circ$ -Peilgenauigkeit		$\pm 0,1^\circ$ -Peilgenauigkeit	
	in %	(in km) ²⁾	in %	(in m) ²⁾
2 P	± 10 %	(± 2 km)	$\pm 0,15$ %	(± 30 m)
3 P	± 17 %	(± 5 km)	$\pm 0,23$ %	(± 70 m)
4 P	± 22 %	(± 9 km)	$\pm 0,27$ %	(± 110 m)
5 P	± 26 %	(± 13 km)	$\pm 0,34$ %	(± 170 m)
6 P	± 30 %	(± 18 km)	$\pm 0,42$ %	(± 250 m)
1) für Peilstände 2) für 10 km-Peilbasislänge				

Tabelle 7: Einfluß der Peilbasislänge und der Peilgenauigkeit auf die Entfernungsbestimmung mittels Dreifachanschnitt.

Für die Festlegung der Genauigkeitsforderungen in der Tabelle 2 war noch folgendes zu berücksichtigen.

Azimut. Die der endgültigen Auswertung des Azimuts vorausgehende graphische Mittelung durch Auftragen der georteten Winkelwerte über der Zeitachse und Einzeichnen einer mittleren Kurve, aus der dann die zur Auswertung zu benutzenden Azimute entnommen werden, erniedrigt die Genauigkeitsforderung. Die der elektrischen Peilung eigentümliche Fehlweisung (Funkbeschickung der Richtantennensysteme, auch A-Werte genannt) erhöht die Genauigkeitsforderungen. Andererseits hängt die zu fordernde Genauigkeit davon ab, ob aus dem gemessenen Azimutwert lediglich auf die Windrichtung (Einfachanschnitt) geschlossen, oder ob durch das graphische Leitstrahlverfahren auch die Entfernung des Ballonortes vom Startplatz (Mehrfachanschnitt) gewonnen werden soll. Zur Ermittlung der Windrichtung in den einzelnen vorgegebenen Höhenschichten genügt eine Peilgenauigkeit, die den Forderungen der Meteorologie ($\pm 15^\circ$ bzw. $\pm 2^\circ$) entspricht. Für die Bestim-

mung der Entfernung müssen die Genauigkeitsforderungen mindestens um den Faktor 5 gesteigert werden. Dies veranschaulicht Tabelle 7. Sie soll verdeutlichen, in welcher Weise der Fehler der Entfernungsmessung ansteigt, wenn der Ballon vom Peildreieck abgetrieben wird. Weiterhin erkennt man, daß die Erhöhung der Peilgenauigkeit von $\pm 1^\circ$ auf $\pm 0,1^\circ$ die Entfernungsbestimmung um das Einhundertfache verbessert.

Als Genauigkeitsforderungen sind deshalb zwei Werte angegeben, der erste für die Richtungsbestimmung allein, der zweite in Klammern für die Entfernungsbestimmung. Die Erfahrung lehrt, daß die Genauigkeit der Azimutpeilung mit wachsender Entfernung laufend geringer wird; die angegebenen Werte können deshalb nur als Mittelwerte betrachtet werden. Unter diesem Gesichtspunkt ist auch die hohe geforderte Genauigkeit unter der Rubrik „erstrebenswert“ zu betrachten. Sie wird in Zukunft ohne weiteres erreicht werden, wenn die Leistungen der Sender erhöht und die Erfahrungen auf dem Gebiete der Ortung voll ausgenutzt werden.

Höhenwinkel. Für die Festlegung der Meßgenauigkeit des Höhenwinkels muß berücksichtigt werden, daß aus diesem wieder zwei Bestimmungsgrößen (Höhe und Entfernung, siehe Tab.6) berechnet werden können. Bei der Berechnung der Höhe wirkt sich ein Peilfehler um eine Größenordnung stärker aus als bei der Berechnung der Entfernung. Dies verdeutlicht die auf Seite 7 angestellte Fehlerbetrachtung (III^b und IV) und das folgende kurze Rechenergebnis für einen Höhenwinkel ¹⁾ von 15° und einen Peilfehler von $\pm 1^\circ$:

Genauigkeit der Höhe	($\beta = 15^\circ \pm 1^\circ$)	6 % der Höhe
Genauigkeit der Entfernung	($\beta = 15^\circ \pm 1^\circ$)	0,5 % der Entfernung

In der Zusammenstellung der Genauigkeitsforderungen (Tab.2, S.4) wurden deshalb wieder zwei Werte angegeben: für Entfernungsberechnung und in Klammern für Höhenberechnung.

Im weiteren gelten für den Höhenwinkel die gleichen Überlegungen wie für das Azimut.

Schrägentfernung. Die bisher eingesetzten Verfahren für die Bestimmung der Schrägentfernung (Phasenmeß- oder Zweiwellenverfahren und Laufzeitmeß- oder Funkmeßortung) messen diese mit gleichbleibender Genauigkeit unabhängig von der Größe der Entfernung (Tab.8).

Höhenstufen m	Flugzeit bei 300 m/ min. Auf- stiegsge- schwindig- keit	Abtritt bei 10 m/s Wind- geschwin- digkeit	Streuung der Windgeschw. bei Meßgenauigkt ± 100 m	Abtritt bei linear an- steigender Windgeschwin- digkeit von 5 auf 65 m/s	Streuung der Windgeschw. bei Meßgenauigkt ± 100 m
0 - 500	100 s	1000 m	± 1 m/s	550 m	± 1 m/s
500 - 1000	100 s	1000 m	± 1 m/s	650 m	± 1 m/s
1000 - 1500	100 s	1000 m	± 1 m/s	750 m	± 1 m/s
1500 - 2500	200 s	2000 m	$\pm 0,5$ m/s	1800 m	$\pm 0,5$ m/s
2500 - 3500	200 s	2000 m	$\pm 0,5$ m/s	2200 m	$\pm 0,5$ m/s
3500 - 4500	200 s	2000 m	$\pm 0,5$ m/s	2600 m	$\pm 0,5$ m/s
4500 - 6000	300 s	3000 m	$\pm 0,33$ m/s	4650 m	$\pm 0,33$ m/s
6000 - 8000	400 s	4000 m	$\pm 0,25$ m/s	7600 m	$\pm 0,25$ m/s
8000 - 10000	400 s	4000 m	$\pm 0,25$ m/s	9200 m	$\pm 0,25$ m/s
10000 - 14000	800 s	8000 m	$\pm 0,13$ m/s	23200 m	$\pm 0,13$ m/s
14000 - 18000	800 s	8000 m	$\pm 0,13$ m/s	29600 m	$\pm 0,13$ m/s
18000 - 24000	1200 s	12000 m	$\pm 0,08$ m/s	56400 m	$\pm 0,08$ m/s
24000 - 30000	1200 s	12000 m	$\pm 0,08$ m/s	70800 m	$\pm 0,08$ m/s

Tabelle 8: Einfluß der Entfernungsmeßgenauigkeit auf die Windgeschwindigkeit für die einzelnen Höhenstufen und für verschiedene Windgeschwindigkeiten. Entfernungsmeßgenauigkeit: $\Delta E_S = \pm 100$ m, Abtritt in Richtung des Peilstrahles.

1) Im Mittel treibt der Ballon unter 15° -Höhenwinkel von der Bodenstation ab (300 m/min-Aufstiegsgeschwindigkeit u. 20 m/s-Windgeschwindigkeit).

Die unter „tragbar“ zusammengestellten Werte entsprechen den bisher technisch erzielten Genauigkeiten, die unter „erstrebenswert“ aufgeführten werden sich in Zukunft ohne weiteres erreichen lassen.

3. Registrierung. Bei den vielfältigen Besprechungen ist immer wieder eine automatische Registrierung gefordert worden, meist mit der Begründung, ein Protokoll zu erhalten und vom subjektiven Fehler des Beobachtungspersonals frei zu sein. Dies ist eine berechnete Forderung.

Dagegen stellt die Forderung nach „kontinuierlicher“ Registrierung sämtlicher Meßwerte eine Aufgabe dar, die nicht erfüllt werden kann. Die technischen Schwierigkeiten, z.B. für die Temperatursonden, sind in der Hauptsache darin zu sehen, daß aus Gründen des Gewichts der Radiosonde die Meßwerte für Temperatur, Feuchte und Druck mit Hilfe nur eines Senders übertragen werden müssen, und somit eine zeitliche Aufeinanderfolge der Meßwerte für diese drei Bestimmungsgrößen zwangsläufig gegeben ist.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der Bodenstation, die für kontinuierliche Registrierung mit drei getrennten Empfangsgeräten ausgerüstet werden müßte. Es sind deshalb in der Praxis auch nur zwei Radiosonden bekannt geworden, die wenigstens die Temperatur kontinuierlich zu registrieren gestatten: die englische Sonde von Thomas und die Marine-Radiosonde RS 3 von Becker und Hey. Feuchte und Druck werden auch bei der letzten diskontinuierlich registriert. In den aufgestellten Forderungen für die Temperatursonden ist deshalb lediglich für die Temperatur eine kontinuierliche Registrierung vorgesehen worden, für Feuchte und Druck dagegen nur einzelne Stufen. Auch die laufende Registrierung des Azimuts, die technisch ohne besondere Schwierigkeiten möglich wäre, hat sich in der Praxis nicht bewährt, da das Einspielen auf das Peilminimum Zeit erfordert und nur der Wert registriert werden darf, der tatsächlich dem Peilminimum entspricht. Die Mitregistrierung des jeweiligen Suchvorganges würde bei der Auswertung nur Anlaß zu Fehlern geben. Das gleiche gilt für die Bestimmung des Höhenwinkels und der Entfernung. (S. Tabelle 9).

Im einzelnen sei zu den wiedergegebenen Werten wie folgt Stellung genommen:

a) Temperatur.

Berechtigt ist die Forderung nach kontinuierlicher Registrierung für die Temperatur, da die Feinstruktur der Temperaturschichtungen vom Aerologen gewünscht wird. Bei den Sondentypen, die durch ihre Eigenart dies nicht gestatten, muß dafür Sorge getragen werden, daß die Temperaturwerte möglichst kurzzeitig, mindestens alle $0,2^\circ$, und außerdem wesentlich öfter als die Werte für Feuchte und Druck abgestrahlt werden. Dieser Wert von $0,2^\circ$ wurde allgemein als „tragbar“ bezeichnet, wenn er auch die Wünsche der Aerologen nicht voll erfüllt. Deshalb wurde unter „erstrebenswert“ eine Zeichenfolge aller $0,1^\circ$ gefordert. Den Werten $0,2^\circ$ und $0,1^\circ$ entsprechen bei einer Aufstiegsgeschwindigkeit von 300 m/min die Zeichenfolgen von 6 bzw. 3 sec und Höhenstufen von 33 m und 17 m. Diese Zahlen (außer für die Höhenstufen) wachsen umgekehrt proportional zur Aufstiegsgeschwindigkeit; man erkennt also, daß die Aufstiegsgeschwindigkeit nicht zu hoch gewählt werden darf. ¹⁾

b) Feuchte.

Eine zeitlich engliegende Meßfolge der Feuchte hat in den meisten Fällen nur ober- und unterhalb von Inversionen Bedeutung. In den dazwischenliegenden Gebieten ändert sich die Feuchte nicht sprunghaft. Trotzdem wurde von den Fachleuten eine Folge der Meßwerte von 10 sec bei 300 m/min Aufstiegsgeschwindigkeit gefordert. Der Verfasser hält diese Forderung für zu scharf und hat deshalb auch als „erstrebenswert“ nur einen 10 sec-Abstand angegeben.

c. Druck.

Da der Druck sich niemals un stetig mit der Höhe ändert - man kann z.B. aus der Unste-

1) Für hohe Aufstiegsgeschwindigkeit spricht dagegen: niedrigere Trägheit ($\alpha = \frac{1}{\sqrt{v}}$); geringere Verstrahlung; Platzen des Ballons in größerer Höhe; geringeres Gewicht der Batterien.

tigkeit einer aufgenommenen Druckkurve auf die Fehlerhaftigkeit des Aufstieges schließen - kann die Messung des Druckes in weit größeren Abständen durchgeführt werden. Von einigen Aerologen wurde die Bestimmung für jede 1000 m-Höhenstufe (also aller 180 sec bei 300 m/min Aufstiegs geschwindigkeit) als ausreichend bezeichnet. Von anderer Seite wurde dem entgegengehalten, daß die Erzielung eines niedrigen mittleren Fehlers nur mittels graphischer Mittelung möglich sei und deshalb eine engere Zeichenfolge gefordert werden müsse. Tragbar wie auch erstrebenswert wird deshalb eine Zeichenfolge von 150 m Höhenstufe (aller 30 sec für 300 m/min Aufstiegs geschwindigkeit) sein.

d) Azimut, Höhenwinkel und Entfernung.

Die Erfahrung hat gelehrt, daß die Bestimmung von Azimut, Höhenwinkel und Schrägentfernung alle 30 sec vollständig ausreichend ist. Eine Verkürzung dieser Zeit würde auch die Anforderung an das Personal unerträglich gestalten.

II. Typisierung

Aus Gründen der Vereinfachung der späteren Darstellungen wird eine Aufteilung der Radiosondenmodelle in Typen und Klassen vorgenommen, wobei bezüglich der Einzelheiten auf die ausgezeichneten Darstellungen von DUCKERT¹⁾ und LOESER²⁾ wie auch auf die Denkschrift der Int. Aer. Kommission von WEICKMANN - KEIL³⁾ verwiesen werden kann.

Das Wort „Radiosonde“ beinhaltet lediglich die Eigenschaft der punkweisen Messung physikalischer Größen und deren drahtloser Übermittlung; es sagt nichts über die Art der Größen aus. Dies können u.a. sein: Temperatur, Feuchte, Druck, Strahlung, Ozongehalt, Potentialgradient oder auch nur der Ort, wie z.B. bei den Windsonden.

Aus diesem Grunde hat die Deutsche Radiosondenkommission beschlossen, die Radiosonden nach ihren besonderen Aufgaben zu benennen. Wir schließen uns hier diesen Vorschlägen an, weil wir sie für sehr geeignet halten, Klarheit in die Vielzahl der Radiosondenbezeichnungen zu bringen: ⁴⁾

Bezeichnung	Meßgrößen
Temperatursonde	Temperatur, Feuchte, Druck
Windsonde	Windwerte
Wettersonde	Temperatur, Feuchte, Druck und Windwerte

Die Bezeichnung „Temperatursonde“ für die Messung von Temperatur, Feuchte und Druck wurde gewählt, weil die Bestimmung der Temperaturverhältnisse an Wichtigkeit die der beiden anderen Meßgrößen bei weitem überwiegt. Die Bezeichnung „Wettersonde“ soll den Radiosonden zugesprochen werden, die eine Vereinigung von Temperatur- und Windsonde

1) Duckert: l.c.

2) Loeser: l.c.

3) Über Radiosondenkonstruktionen, l.c.

4) Diese Typisierung bezieht sich aus Gründen der Übersichtlichkeit nur auf Radiosonden für die Messung von Temperatur, Feuchte, Druck und Wind. Die übrigen Sonden, die größtenteils nach den gleichen Prinzipien der Übertragung auf den Sender arbeiten, müssen einer späteren Darstellung vorbehalten bleiben.

Registrierung	tragbar	erstrebenswert
Temperatur	kontinuierlich, falls unmöglich: 0,2°-Stufen	kontinuierlich, falls unmöglich: 0,1°-Stufen
Feuchte	jede 10.Sek.	jede 10.Sek.
Druck	150 m-Höhenstufe	150 m-Höhenstufe
Windrichtung und -geschwindigkeit		
a) Azimut	jede 30.Sek.	jede 30.Sek.
b) Höhenwinkel	jede 30.Sek.	jede 30.Sek.
c) Schrägentfernung	jede 30.Sek.	jede 30.Sek.

Tabelle 9: Forderungen der Meteorologie an die Registrierung beim Empfang der Radiosonde.

in einem Gerät darstellen, allerdings mit dem Zusatz, daß diese Vereinigung organisch sein muß. Ein einfaches Aneinanderhängen zweier geeigneter Sonden entspricht dieser Forderung nicht.

Weiterhin soll zwischen

aktiven Sonden mit eingebautem Sender

und

passiven Sonden ohne eingebauten Sender

unterschieden werden.

Die aktiven Sonden entsprechen den allgemein bekannten Radiosonden mit selbständigen Sendern zum Zwecke der Nachrichtenübermittlung zur Bodenstation, die passiven Sonden dagegen stellen lediglich Reflektoren zur Rückspiegelung elektromagnetischer Strahlungen dar¹⁾, die meist zum Zwecke der Entfernungsmessung von den Bodenstationen ausgestrahlt und auch wieder empfangen werden.

Die Aufgabe der passiven Sonden besteht dann ausschließlich darin, die empfangenen Impulse entsprechend den zu messenden Werten zu beeinflussen.

1. Temperatursonden

Die aktiven Temperatursonden unterscheiden sich im wesentlichen durch die Art der Steuerung des Senders; die meteorologischen Meßelemente dagegen gleichen sich weitgehend. Aus diesem Grunde soll die Aufteilung der aktiven Temperatursonden nach der Art der Steuerung des Senders durch die meteorologischen Meßelemente²⁾ geschehen in:

Mechanische Übertragung

Elektrische Übertragung

diese wieder in:

Steuerung
der
„Zeitangabe“

Steuerung
der
„Zeichenangabe“

Steuerung
der
„Amplituden-
modulation“

Steuerung
der
„Sender-
frequenz“

als Namen werden vorgeschlagen:

Zeitsonden

Zeichensonden

Modulations-
sonden

Frequenz-
sonden

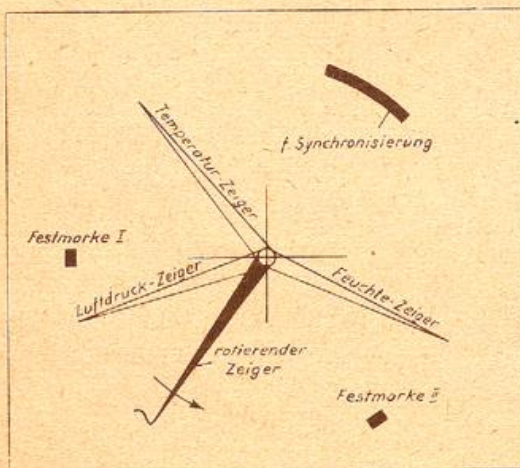


Abb. 1: Konstruktionsschema und Aufbaubeispiel der Zeitsonde. Rotierender Zeiger greift Abstand zwischen Festmarke u. meteorologischem Zeiger ab. Zeitspanne: Festmarke - meteorologischer Zeiger ist Maß für Temperatur, Druck oder Feuchte.

Die Steuerung der Zeitangabe geht auf ein von OLLAND schon um das Jahr 1875 angewandtes Verfahren zur Fernübermittlung meteorologischer Meßwerte durch den elektrischen Draht zurück. Hierbei tastet ein mit gleichbleibender Geschwindigkeit umlaufender Zeiger die Stellung verschiedener meteorologischer Meßinstrumente ab; als Maß gilt die Zeit, die zwischen dem Berühren einer festen Nullmarke und dem der meteorologischen Zeiger verstreicht (s. Abb. 1).

Dieses Verfahren ist ohne wesentliche Änderung bei den verschiedenen auf Zeitangabe beruhenden Radiosondenmodellen angewandt worden, im Moment des Ab tastens wird meist das Gitter des Senderohres freigegeben oder gesperrt, so daß am Erdboden auf drahtlosem Wege zeitlich aufeinanderfolgende Zeichen empfangen werden können. Die verschiedenen in der Tabelle 10 und Tabelle 11 (Anhangtafel) aufgeführten Sonden unterscheiden sich meist nur im Antrieb des Ab tastzeigers und in der Art

1) Meist elektrische Impulse (Funkmeßortungsgeräte).

2) Die Aufteilung geschieht nach der Art der Temperaturmessung, da die Temperatur mit bevorzugter Genauigkeit und Häufigkeit bestimmt werden muß.

Mechanische Übertragung		Elektrische Übertragung	
Steuerung der Zeitangabe	Steuerung der Zeichengabe	Steuerung der Amplitudenmodulation	Steuerung der Senderfrequenz
Bureau (1) Askania-Moltschanoff (5) Lang (9) Blue Hill Met. Observat. (12) Gugg.Aer.Labor.(15) U.S.Weather Bureau (17) Amer.Instrum. Comp. (19) Italien (20)	Raethjen (2) Moltschanoff (6) Graw (10) Holland (13)	Kew-Thomas (3) Diamond-Hinman-Dunmore (7) Kindermann-Schulze (21)	Duckert (4) Väisälä (8) Becker-Hey (11) Kölzer-Graw (14) Jenssen (16) Schulze-Becker-Sittel-Menzer (18)
<p>(1) Die französische Sonde - im Einsatz. (2) Morsezeichensonde - nicht im Einsatz. (3) Die englische Sonde - im Einsatz. (4) Erste Frequenzsonde - nicht mehr im Einsatz. (5) Nicht mehr im Einsatz. (6) Die russische Sonde - im Einsatz. (7) In USA im Einsatz. (8) Die finnische Sonde - im Einsatz. (9) Deutsche Sonde (ehem.Luftwaffensonde) - im Einsatz. (10) Deutsche Sonde (ehem. Heeressonde) - im Einsatz seit 1944; z. Zt. in Westdeutschland. (11) Deutsche Sonde (ehem. Marinesonde) - im Einsatz gewesen. (12) In USA im Einsatz (13) im Einsatz. (14) Deutsche Sonde (ehem. Heeressonde) - im Einsatz gewesen bis 1944. (15) In USA im Einsatz. (16) Die norwegische Sonde - im Einsatz. (17) In USA im Einsatz. (18) Neue deutsche Einheitssonde - Einsatz geplant gewesen. (19) In USA im Einsatz. (20) Im Einsatz. (21) Noch nicht zum Einsatz gelangt.</p>			

Tabelle 10: Schematische Zusammenstellung der wesentlichen aktiven Temperatursonden.

der Registrierung beim Empfang. Zur Klasse der Sonden mit mechanischer Übertragung gehört dieser Sondentyp, weil die Übertragung der meteorologischen Meßwerte (Bimetall, Vidiodose oder Bourdonrohr, Haar) mit Hilfe eines mechanischen Gestänges geschieht.

Die Steuerung der Zeichengabe geschieht auf zweierlei Art. Ein Mal wird durch die meteorologischen Meßgeräte der elektrische Strom über eine Mehrzahl verschieden gestalteter „Zeichenräder“ geschaltet - je nach der Stellung des Meßgerätes auf das erste, zweite oder weitere Zeichenrad (s.Abb.2). Die Zeiger der Meßgeräte überstreichen hierbei zum Zwecke der mehrmaligen Benutzung der gleichen Zeichenräder „Kämme“, d.h. gezahnte, gegeneinander elektrisch isolierte Blechstreifen, weshalb dieses Verfahren auch „Kammgerät“ genannt wird. Es wurde von RAETHJEN und auch von MOLTSCHANOFF entwickelt.

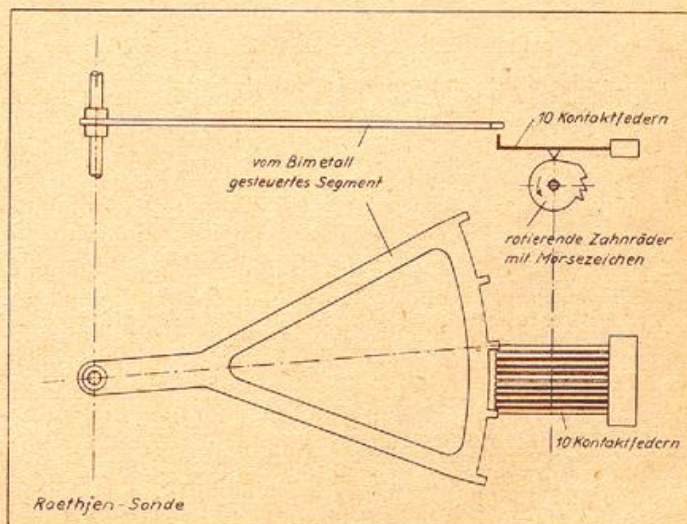


Abb.2: Schema des Temperaturteils der Raethjen-sonde. Ein Bimetall dreht ein Zahnradsegment, das über 10 Kontaktfedern läuft; elektrischen Kontakt finden nur die unter einem Zahn des Segmentes befindlichen Federn. Die Federn werden durch Morsezeichenräder gehoben. Die Zahl der möglichen Morsezeichen beträgt 20, da zwei benachbarte Federn beim gleichzeitigen Berühren des Segmentes ein weiteres Morsezeichen tasten. Antrieb: Windrad.

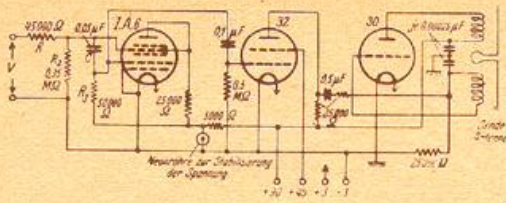


Abb. 3: Schaltschema der Diamond-Sonde. Veränderliche elektrische Widerstände steuern Modulation des Senders.

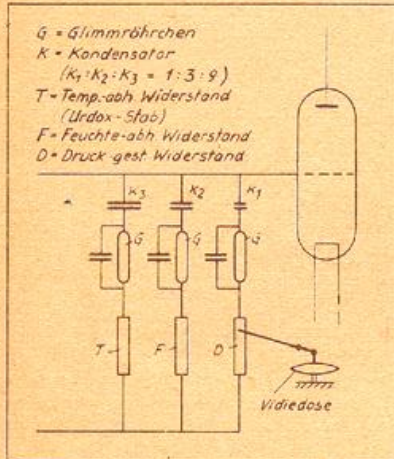


Abb. 4: Schaltschema der Kindermann-Schulze-Sonde. Veränderliche elektrische Widerstände steuern Kippkreis-Frequenz.

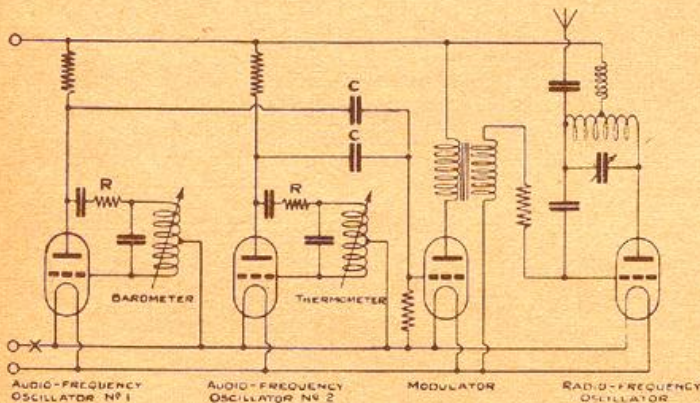


Abb. 5: Schaltschema und Aufbau der Thomas-Sonde.

Das andere Verfahren läßt einen Sektor rotieren, der aus übereinander geschichteten, elektrisch isolierten Blechsegmenten besteht, die ihrerseits am äußeren Kreisabschnitt Zähne in Form von Morsezeichen besitzt. Die Zeiger der meteorologischen Meßgeräte tasten dann je nach ihrer Stellung eines dieser Blechsegmente ab und geben durch den morsezeichenmäßig erfolgenden Stromfluß den Sender frei. Am Erdboden werden dann lediglich Morsezeichen abgehört und mittels vor dem Aufstieg gewonnener Eich Tabellen in Temperatur, Druck und Feuchte umgedeutet. Dieses Verfahren wurde von RAETHJEN, später von GRAW und vom Heer zu einer einsatzfähigen Radiosonde ausgebildet.

Beide Verfahren zählen ebenfalls zu den mechanischen, weil die Übertragungen der meteorologischen Messungen auf die rotierenden Zeichenträger wieder mittels mechanischer Gestänge geschieht.

Zur Vermeidung dieser mechanischen Übertragungssysteme wie auch der Antriebsmotoren (Uhrwerke, Windräder, Elektromotoren u.ä.) lassen THOMAS, DIAMOND und Mitarbeiter wie auch Verfasser und KINDERMANN die Meßgeräte auf die Modulation des Senders einwirken. DIAMOND und Mitarbeiter wählten hierfür die Veränderung des elektrischen Widerstandes im Modulationskreis, in dem sie diese temperatur-, feuchte- und lichtabhängig ausbildeten.

Diese drei Widerstände wie auch ein konstanter Vergleichswiderstand werden dann durch ein Vidiedosen-schaltwerk zeitlich nacheinander an den Modulationsgenerator angeschlossen, der der Sendung eine dem meteorologischen Zustand entsprechende Modulation aufzwingt (s. Abb. 3). Durch die Zwischenschaltung des Vidiedosen-schaltwerkes, das zu gleicher Zeit zur Druckmessung herangezogen wird, wird allerdings ein mechanisches Übertragungsteil in die Sonde ge-

bracht.

Verfasser und KINDERMANN benutzen ebenfalls meteorologisch gesteuerte elektrische Widerstände, ihre Schaltung jedoch, die mit Glimmröhrchen (Kippkreis) arbeitet (s. Abb. 4), gestattet den dauernden und gleichzeitigen Empfang der Temperatur, Feuchte und des Druckes. Auch sie benötigen eine mechanische Übertragung für den druckabhängigen Widerstand.

THOMAS dagegen gelingt eine vollelektrische Übertragung, indem er die Meßsysteme für Temperatur und den Druck direkt auf die Induktionsspulen der Modulationskreise einwirken läßt (s. Abb. 5).

Der Gedanke, die Frequenz zur Sendung selbst durch die meteorologischen Elemente zu steuern - den Nachrichtenübermittler also zugleich als Meßinstrument zu verwenden -, stammt von DUCKERT ¹⁾. Die hierdurch erzielte Einfachheit im Aufbau der gesamten Sonde führte in der Folgezeit zu einer vielgestaltigen Aufnahme dieses Gedankens bei der Entwicklung verschiedener Radiosondenmodelle.

DUCKERT läßt durch ein Bimetall eine der beiden Platten eines Schwingkreis-Kondensators bewegen und steuert damit die Frequenz der Sendung; der Druck wird mittels eines Bourdonrohrmeßwerkes, das die Sendung bei bestimmten Druckstufen auf eine Vergleichskapazität umschaltet, gemessen. Die zeitliche Länge dieser Umschaltung ist ein Maß für die mittels Haar gemessene Feuchte (s.Abb.6). Die Sonde arbeitet demnach unter Zwischenschaltung mechanischer Übertragungssysteme.

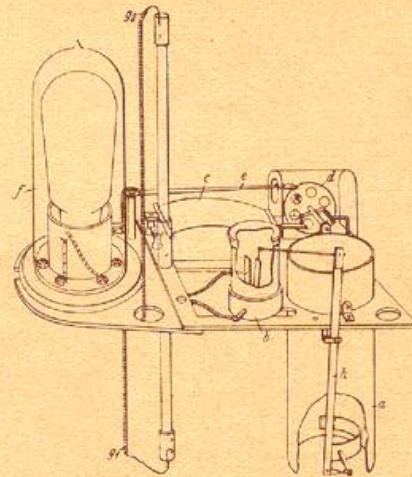


Abb.6: Aufbau der Duckert-Sonde.

Grundlegend den gleichen Aufbau wählten KÖLZER und GRAW, indem sie wieder für die Temperatur den Schwingkreis-Kondensator steuern und durch ein Vidiedosenschaltwerk die Sendung bei bestimmten Druckwerten unterbrechen lassen. Ihre Konstruktion weist jedoch den Vorteil auf, daß der temperaturgesteuerte Kondensator als ein mehrere Umdrehungen ausführender Drehkondensator ausgebildet ist. Hierdurch steigt und fällt die Frequenz, und eine eindeutige von sonstigen frequenzverschiebenden Einflüssen freie Zuordnung ist möglich.

BECKER und HEY wählen für die Temperaturmessung Kondensatoren aus festem, temperaturabhängigem Dielektrikum und steuern so die Frequenz eines Senders. Zur Eichung dieses Frequenzganges schalten sie ein Quecksilberthallium-Kontaktthermometer parallel, dessen Kontakte mit einer Induktionsspule verbunden sind. Die Druck- und Feuchtemessung geschieht über einen zweiten Sender mittels Gasbarometer und angefeuchteten Quecksilberthermometern (psychrometrische Differenz) in der gleichen induktiven Ankopplung.

VÄISÄLÄ bildet dagegen sämtliche meteorologischen Meßelemente als Kondensatoren aus und läßt diese durch einen umlaufenden Hochfrequenzschalter mit noch zwei Vergleichskondensatoren zeitlich nacheinander an den Schwingkreis des Senders anschalten (s.Abb.7). Die Übertragung der Bewegungen des Bimetalls, der Vidiedose und des Haares geschieht ohne Zwischenschaltung einer mechanischen Übersetzung, so daß diese Sonde als vollelektrisch bezeichnet werden kann.

JENSSEN übernimmt dieses Verfahren mit der Änderung, daß er statt zweier Vergleichskondensatoren nur einen benutzt und die bodenmäßige Frequenzmessung außerordentlich genau gestaltet.

SCHULZE, BECKER, SITTEL und MENZER bemühen sich, die Meßge-

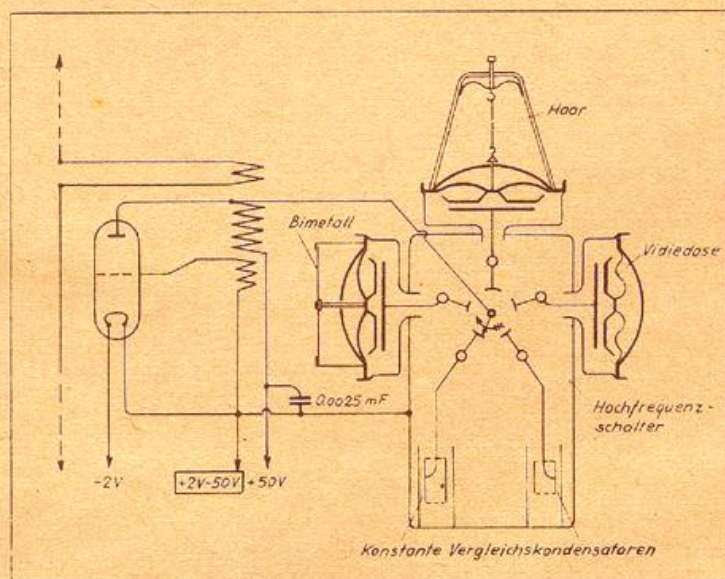


Abb.7: Schaltbild und Aufbau der Väisälä-Sonde.

1) DUCKERT gebührt ganz grundsätzlich das Verdienst, als Erster Radiosonden entwickelt und wesentliche Gedanken hierzu gegeben zu haben.

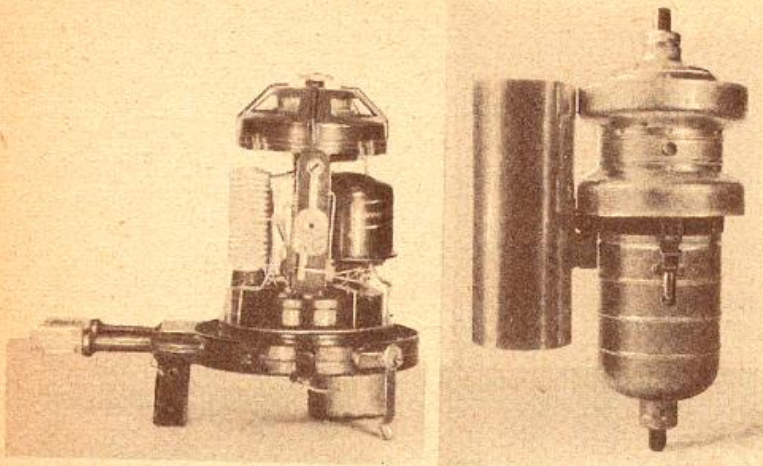


Abb. 8: Innenaufbau und Außenansicht der Sonde von Schulze, Becker, Sittel und Menzer.

naugigkeit der Väisälä-Sonde zu erhöhen, indem sie das Bimetall-Plattenkondensator-Aggregat durch einen Kondensator mit festem, temperaturempfindlichem Elektrum ersetzen, die Schaltkapazitäten und besonders die Schaltinduktivitäten für sämtliche 5 Schwingkreise auf Gleichheit abstimmen, die Vergleichskapazitäten und die gesamte Sonderschaltung überhaupt der Einwirkung der Außentemperatur aussetzen. Weiterhin geschieht bei ihnen die Messung der Feuchte in Form einer Temperaturbestimmung (psychrometrische Differenz) mittels eines zweiten, mit einem feuchten Strumpf überzogenen Temperaturkon-

densators aus festem Dielektrikum. Wegen der erstrebten vollautomatischen Registrierung wird der Hochfrequenzschalter durch einen Elektromotor angetrieben (s. Abb. 8).

Dieser Aufteilung der aktiven Temperatursonden haften sämtliche Fehler jeder Schematisierung an. So arbeiten z. B. die unter elektrischer Übertragung aufgeführten Sonden nicht immer ausschließlich „vollelektrisch“, sondern greifen oft in Einzelheiten auf mechanische Übertragungen zurück.

Weiterhin sind in diese Betrachtung nur die Sondenmodelle einbezogen, die für die Bauart typisch sind und sich bewährt haben.

Weitere Unterschiede, die wegen der Übersichtlichkeit bei Tabelle 10 (s. S. 13) in Fortfall kamen, gibt die Zusammenstellung Tabelle 11 (Anhangtafel), die die Art der Temperatur-, Druck- und Feuchtemessung wie auch die der Aufnahme und Registrierung näher erläutert.

Als „passive“ Temperatursonde wurde von BECKER (ehem. Marineobservatorium) vorgeschlagen und erprobt ein Raumkreuz aus $\lambda/2$ Dipolen, das an der Kreuzungsstelle der Dipole, also in deren Mitte, mit Hilfe eines Schalters elektrisch aufgetrennt werden kann (s. Abb. 9). Hierdurch wird die Rückstrahlungsfähigkeit der Dipole sehr stark herabgesetzt. Der Hochfrequenzschalter wird von einer Morsezeichensonde für Temperatur, Feuchte und Druck betätigt. Selbstverständlich lassen sich sämtliche bekannten Temperatursonden mit mechanischer Übertragung - sei es nun Steuerung der Zeitgabe oder der Zeichengabe - an dieses Dipolkreuz anschließen. Der Empfang geschieht mit Funkmeßgeräten, deren in Richtung Sonde abgestrahlten elektrischen Impulse im Takte der Morsezeichen für Temperatur, Feuchte und Druck von der Sonde zu ihnen zurückgesandt werden. Die Sonde besitzt also keinen eigenen Sender, sie zählt zu den „passiven“ Sonden.

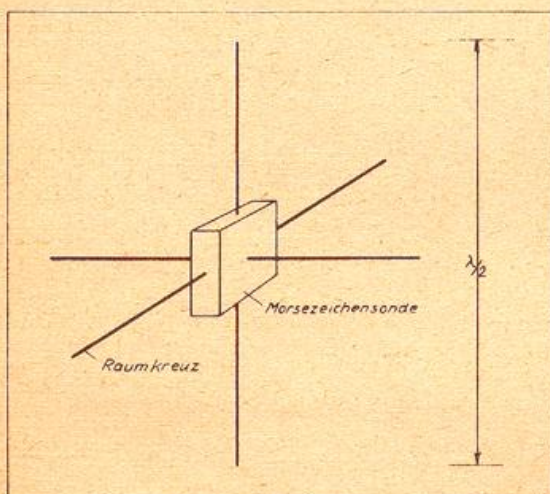


Abb. 9: Raumkreuz-Sonde nach Becker. Die 3 senkrecht zueinander stehenden $\lambda/2$ Dipole werden von der Sonde im Takte der Morsezeichen elektrisch getrennt.

2. Windsonden

Die Windsonden können grundsätzlich wieder in „aktive“ Windsonden mit eingebautem Sender und

„passive“ Windsonden ohne eingebauten Sender aufgeteilt werden.

Die aktiven Windsonden strahlen mittels eige-

nem Sender elektrische Energie ab, den Bodenstationen fällt dann die Aufgabe zu, den Ort der Energieabstrahlung einzupeilen. Für den Fall der direkten Entfernungsbestimmung bestückt man oft zusätzlich die Bodenstationen ebenfalls mit einem Sender, dessen Signale vom Sondensender verstärkt wieder zurückgestrahlt werden. Als Maß für die Entfernung Bodenstation - Sonde („Schrägentfernung“ genannt) wird entweder die Phasenverschiebung oder die Laufzeit der Signale benutzt. Man kann also zwischen Sonden „ohne“ und „mit“ direkter Entfernungsbestimmung unterscheiden.

Die passiven Windsonden dagegen besitzen keinerlei eigenen Sender, sondern reflektieren lediglich elektromagnetische Strahlung zur Bodenstation. Hierbei ist wieder zwischen Sonden „ohne“ und „mit“ direkter Entfernungsmessung zu unterscheiden. Die ersten erhalten die zu reflektierende Strahlung von irgendeiner nicht zum Meßsystem gehörenden Strahlenquelle (z.B. der Sonne), für die zweiten jedoch wird wieder die Bodenstation mit einem zusätzlichen Sender ausgerüstet; die Entfernungsbestimmung geschieht dann wieder durch Phasen- oder Laufzeitmessung.

a. Aktive Windsonden.

1. Peilsender (ohne direkte Entfernungsbestimmung)

Sonde zur Bestimmung vom Azimut;

ein mit dem Ballon festverknüpfter Sender wird von mehreren Bodenstellen aus mittels richtungsabhängiger elektrischer Empfangsanlage eingepilt.

Berechnet wird:

Entfernung - aus den Schnittpunkten der Azimute $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$.

Höhe - aus Temperatursondenaufstieg oder aus den Meßwerten eines mitgegebenen Druckanzeigergerätes.

Die Zahl der hierfür vorgeschlagenen Radiosonden ist groß; ihre Besprechung im einzelnen erübrigt sich, da sie sich im wesentlichen gleichen. Ein einfacher Radiosondensender - meist moduliert in einer Frequenz, die vom Ohr gut abgehört werden kann - stellt die Sonde dar. Die Entwicklung ging aus Gründen der Erhöhung der Peilgenauigkeit zur Wahl immer kürzerer Wellenlängen über, da bei kürzer werdender Wellenlänge und gleichbleibender räumlicher Ausdehnung des Antennensystems am Boden die Richtcharakteristik des Empfangssystems immer schärfer und damit besser wird.

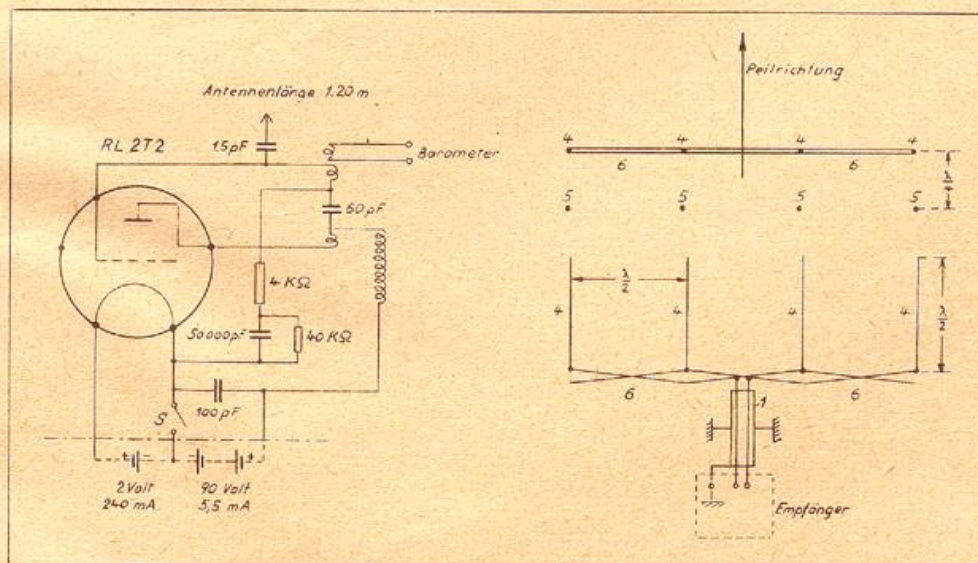


Abb.10: Schaltschema der Windpeil-Sonde; Aufbau der Empfangsanlage und Schaltschema des Empfangssystems. (1 - drehbarer Mast; 4 - kreuzweise an den Empfänger geschaltete $\lambda/2$ Dipole; 5 - elektrisch freie Reflektordipole in $\lambda/4$ Abstand von den Empfangsdipolen; 6 - Leitung Dipol - Empfänger.)

Als Empfangsanlagen am Boden dienten bisher:

Peilrahmen	(80 - 100 m Wellenlänge)
Adcockantenne	(80 - 100 m ")
Dipolrichtempfangssystem	(1 - 5 m ")

Diese Anlagen lassen sich leicht automatisieren und mit Registriervorrichtungen versehen. Meist geschieht der Einsatz jedoch durch Handbedienung und Peilung auf abgehörtes Minimum, weil die Automatisierung des Empfangs, z.B. mit Doppelkanalsystem, die geforderte Genauigkeit nicht erreichte.

Die erzielten Reichweiten hängen lediglich von der Leistung des SONDENSENDERS, der Basislänge des Peilvielecks ¹⁾ und der Höhe der Sonde über der Kimm ab.

Mit dem MW2-Verfahren der ehem. deutschen Marine von Becker (ehem. Marineobservatorium) konnten ohne Schwierigkeiten Reichweiten von 180 km erreicht werden (s. Abb. 10).

2. Phasensonde (mit direkter Entfernungsbestimmung)

Sonde zur Bestimmung von Azimut - Schrägentfernung; eine mit dem Ballon festverknüpfte Kombination aus Empfänger und Sender wird von einer Bodenstation aus mittels richtungsabhängiger elektrischer Sendeanlage und Empfangssystem mit Rundcharakteristik eingepilt.

Berechnet wird:

Entfernung	- aus Schrägentfernung und Höhe ($E^2 = E_S^2 - H^2$)
Höhe	- aus Temperatursondenaufstieg.

Die Entfernung E_S wird durch Phasenmessung ermittelt. Die Bodenstation sendet z.B. dauernd eine niederfrequentmodulierte 1 m-Welle aus, die von der Sonde empfangen und nach Transformation der Trägerwelle auf 10 m-Wellenlänge wieder abgestrahlt wird. Der Phasenunterschied zwischen vom Boden ausgesandter und dort wiederempfangener niederfrequenter Modulation ist ein Maß für die Schrägentfernung. Die genannte Transformation der Wellenlänge ist erforderlich, um eine gegenseitige Beeinflussung der Sende- und Empfangsteile im Bodengerät zu vermeiden.

Besonders bewährt hat sich hierfür die Radiosonde „Mücke“, die von MÜLLER (ehem. Reichsamt für Wetterdienst) entwickelt wurde. Sie gestattet eine Kombination mit der Langsonde und stellt dann eine „Wettersonde“ dar (s. Abb. 11).

Die Bodenstation besteht aus einem 1 m-Sender mit Dipolrichtsystem und einem 10 m-Empfänger mit Rundcharakteristik. Der Phasenunterschied zwischen abgestrahlter und empfangener Welle wird mit Hilfe eines Phasenschiebers bestimmt, der mittels elektrischem Nachlaufwerk eine automatische Registrierung betätigt. Weitere Einzelheiten können aus dem Bericht des Reichsamts für Wet-

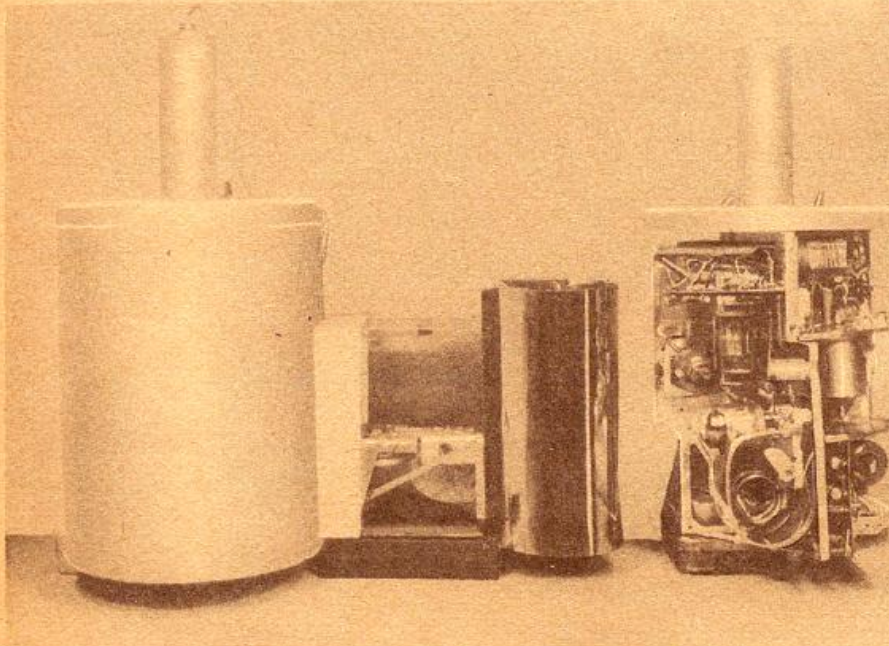


Abb. 11: Innenansicht der Mücke und Außenansicht der Kombination Mücke + Langsonde.

1) Eine Peilauswertung für Entfernungsbestimmung über die 5-fache Basislänge hinaus führt ganz allgemein zu unsicheren Werten (s. Seite 9, Tab. 7).

terdienst von DUCKERT ¹⁾ entnommen werden. Die erzielten Reichweiten liegen bei 120 km.

3. Laufzeitsonde (mit direkter Entfernungsbestimmung).

Sonde zur Bestimmung von Azimut - Schrägentfernung - Höhenwinkel;
eine mit dem Ballon festverknüpfte Kombination aus Empfänger und Sender wird von einer Bodenstelle aus mittels richtungsabhängiger elektrischer Sender- und Empfangsanlage eingepilt.

Berechnet wird

Entfernung - aus Schrägentfernung und Höhenwinkel ($E = E_S \cdot \cos \beta$)

Höhe - aus Schrägentfernung und Höhenwinkel ($H = E_S \cdot \sin \beta$).

Die Entfernung E_S wird durch Laufzeitmessung der von der Bodenstation abgestrahlten und auf gleicher Wellenlänge wieder empfangenen kurzzeitigen Impulse bestimmt.

Als Radiosonde muß eine Kombination aus einem Empfänger und einem Sender benutzt werden, um die empfangenen Impulse wieder an die Bodenstation verstärkt zurückzustrahlen; man rechnet mit dem Faktor 100 000. Es sind hierfür mehrere Vorschläge gemacht worden, bewährt hat sich besonders die Sonde „Biene“, die wieder von MÜLLER (ehem. Reichsamt für Wetterdienst) gemeinsam mit der Fa. WEGA entwickelt worden ist und mit einem einzigen Rohr auskommt. Man kann sie als Pendelrückkopplungssystem bezeichnen, die Fachbezeichnung lautet „Relaissonde“. Ihre Kombinationsmöglichkeiten mit Temperatursonden werden unter den Wettersonden besprochen werden.

Als Bodengerät kann jedes der bekannten Funkmeßgeräte dienen. Es sind dies Geräte, die in stark gebündelter Form außerordentlich kurzzeitige (10^{-5} sec) wie auch energiereiche Impulse auszusenden und in den Sendepausen zu empfangen gestatten. Die starke Bündelung der Strahlung mittels Spiegel oder strahlungsgekoppelten Dipolen läßt die Bestimmung des Azimuts und des Höhenwinkels zu, die Verwendung von Impulsen gestattet die Bestimmung der Laufzeit vom Zeitpunkt der Abgabe des Signals bis zum Zeitpunkt seines Empfanges. Aus der Laufzeit kann in einfacher Weise auf die Schrägentfernung zwischen Funkmeßgerät und Relaissonde geschlossen werden.

Die erzielten Reichweiten lagen bei Verwendung der Biene und des Funkmeßgerätes (FuMo) Würzburg-Dora bei 80 km.

b. Passive Windsonden.

1. Ballon.

Sonde zur Bestimmung von Azimut - Höhenwinkel;
der Ballon selbst wird von einer Stelle aus mittels Theodolit eingepilt. ²⁾

Berechnet wird:

Entfernung - aus Höhenwinkel und Höhe ($E = H \cdot \text{ctg } \beta$)

Höhe - aus Aufstiegsgeschwindigkeit, unter der Annahme, daß die durch den Auftrieb gegebene Aufstiegsgeschwindigkeit während des Aufstieges konstant bleibt.

Die Reichweite wird begrenzt durch Sicht und optische Auflösung des Theodoliten (optimal : 50 km, Mittel : 25 km).

Dasselbe von mehreren Bodenstellen aus:

Gemessen wird wieder: Azimut - Höhenwinkel

Berechnet wird:

Entfernung - aus den Schnittpunkten der Azimute $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$

Höhe - aus Entfernung und Höhenwinkel ($H = E \cdot \text{tg } \beta$).

Die Reichweite wird wieder begrenzt durch Sicht und optische Auflösung des Theodoliten, jedoch auch durch die Basislänge des Peilvielecks. Im Mittel kann mit Reichweiten von

1) Duckert, Berichte des Reichsamtes für Wetterdienst.

2) Die Bezeichnung des Ballons als „passive Windsonde“ erscheint zunächst nicht sehr naheliegend; nach der Definition auf S.11 ist sie jedoch berechtigt. Wir werden uns sowieso in Zukunft daran gewöhnen müssen, den Unterschied zwischen optischer Strahlung und kurzwelliger Hochfrequenzstrahlung zu vergessen.- Beim Nachteinsatz der Ballone unter Verwendung von Glühlampen erscheint die Bezeichnung „aktive Windsonde“ noch glaubhafter.

25 km gerechnet werden, wenn auch in Einzelfällen Angaben von 50 km und weit mehr berichtet wurden. ¹⁾

2. Hochfrequenzreflektor.

Sonde zur Bestimmung von Azimut - Schrägentfernung - Höhenwinkel; ein mit dem Ballon festverknüpfter Strahlungsreflektor wird von einer Bodenstelle aus mittels richtungsabhängiger elektrischer Sende- und Empfangsanlage eingepellt.

Berechnet wird:

Entfernung - aus Schrägentfernung und Höhenwinkel ($E = E_S \cdot \cos \beta$)

Höhe - aus Schrägentfernung und Höhenwinkel ($H = E_S \cdot \sin \beta$).

Die Schrägentfernung E_S wird durch Laufzeitmessung der von der Bodenstation abgestrahlten und auf gleicher Wellenlänge wieder empfangenen kurzzeitigen Impulse bestimmt.

Als passive Windsonden wurden vorgeschlagen und erprobt:

nicht abgestimmt:

einfache metallische Drähte

geschlossene metallische Flächen

metallische Netze

abgestimmt:

isolierende Netze mit eingewebten $\lambda/2$ -Dipolen

metallische Raumkreuze.

Besondere Verdienste auf diesem Gebiete hat sich BECKER ²⁾ erworben. Seine Ergebnisse sind umfassend und sollen deshalb hier als richtungweisende Beispiele aufgeführt werden.

Als Material für die geschlossenen metallischen Flächen benutzte er mit Aluminiumfolie versehenes Gewebe und gab ihm die Form eines Kegelmantels von 3 m Länge und einem oberen Durchmesser von 2,5 m, einem unteren Durchmesser von 1,5 m. Durch die Wahl dieses Kegelstumpfes hoffte er, das vom Boden ankommende Signal wieder zum Bodenempfangsgerät zurückzereflektieren. Für die metallischen Netze benutzte er in dünne Kunstseidenkordel eingewebte Aluminiumdrähte und gab dem Netz eine Maschenweite von $1/40$ Wellenlänge, wie sie sich aus seinen Versuchen als genügend undurchlässig für die elektromagnetische Strahlung ergeben hatte. Aus praktisch gleichem Material baute er seine Netze mit eingewebten $\lambda/2$ -Dipolen auf, nur mit dem Unterschied, daß die Maschenweite ein wenig mehr als $\lambda/2$ betrug und die eingewebte Aluminiumseele rund um den Netzknoten zerschnitten wurde. Durch dieses Zerschneiden erhielt er waagerechte und senkrechte Dipole in großer Zahl bei außerordentlich geringem Gewicht (300 Dipole bei 3 g/m^2 für $\lambda = 0,5 \text{ m}$).

Die Dipolnetze wurden in folgenden Formen verwendet:

Zylinder (s. Abb. 12)

2 senkrecht zueinander stehende vertikale Flächen

3 senkrecht zueinander stehende Flächen (Tripelspiegel)

1 vertikale Fläche mit aerodynamischen Schaufeln zum Drehen um Längsachse und gleichzeitigem Schwenken auf einem Kegelmantel (günstige Reflexion zur Bodenstation).

Auf gleiche Fläche bezogen waren die Unterschiede unerheblich, hervorzuheben ist, daß die Aufstiegsgeschwindigkeit des Tripelspiegels sehr niedrig lag.

Überraschend günstige Ergebnisse ließen sich bei der Verwendung von Einzeldipolen erzielen. Vereintigt man drei derartige Dipole zu einem Raumkreuz in der Art, daß sämtliche drei Dipole zueinander senkrecht stehen und in ihrer Mitte miteinander fest verbun-

1) Die Grenze der optischen Auflösung ergibt sich aus der Formel: $E_S \ll \frac{d \cdot r}{\lambda}$, worin E_S = Schrägentfernung, d = Linsendurchmesser ($\sim 30 \text{ mm}$), r = Radius des Ballons ($\sim 0,3 \text{ m}$ in 10 km Höhe), λ = Wellenlänge des Lichtes ($\sim 500 \text{ m}\mu$). Alles in Metern ausgedrückt

ergibt: $E_S \ll \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3}{5 \cdot 10^{-7}}$ oder $E_S \ll 20 \text{ km}$.

2) G. Becker, Zum Einsatz der Radiosonde in der Meteorologie: Passive meteorologische Sonden.

den sind, dann erhält man einen Reflektor, der nach allen Richtungen des Raumes vollständig gleichmäßig die ankommende Strahlung reflektiert (Kugelcharakteristik) (s.Abb.12).

Als Bodengerät kann wie für die Relaissonde (Laufzeitsonde) jedes der bekannten Funkmeßgeräte dienen.

Die Reichweiten sind selbstverständlich von der abgestrahlten Energie und der Empfangsempfindlichkeit der Funkmeßgeräte wie auch von der Größe der Reflektionsflächen oder der Zahl der Dipole abhängig. Die in der Praxis erzielten Reichweiten können aus folgender Zusammenstellung entnommen werden:

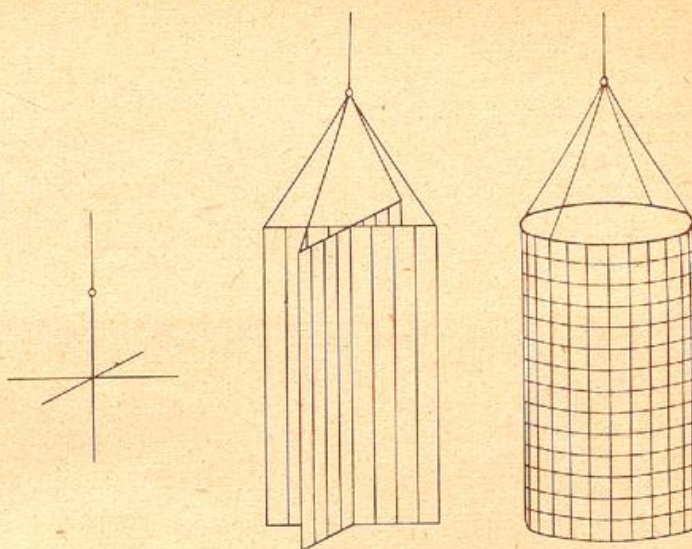


Abb.12: Windsonden für Funkmeßempfang

Passive Sonden	Mittlere Reichweite (in Klammern: maximale Reichweite)		
	FuMo Würzburg-Dora 550 Mhz	FuMo Würzburg-Riese 550 Mhz	FuMo Freya 125 Mhz
NICHT ABGESTIMMT			
Metallische Drähte Länge : 40 m Ø : 2 mm	20 km	40 km	50 km
Metallischer Kegelstumpf Länge : 2,5 m ob. Ø : 2,5 m unt.Ø : 1,5 m	40 km	80 km	100 km
Metallisches Netz Maschenweite : $1/40\lambda$ Länge : 2,5 m Ø : 2,5 m	40 km	80 km	100 km
ABGESTIMMT			
Dipolnetz Maschenweite : $\lambda/2$ Zahl d.Dipole : 300 Ø : 2,5 m Länge : 2,6 m	40 km (55 km)	80 km (105 km)	Dipolzahl:60 100 km (155 km)
Metallisches Raumkreuz Zahl der Dipole: 3 Draht-Ø : 1 mm Dipollänge : $\lambda/2$	6 km (8,5 km)	18 km (25 km)	25 km (35 km)

Die Eigenschaften der einzelnen Windsonden sind in Tabelle 12 (s.folg.S.) noch einmal zusammengestellt.

Die Entwicklung der Höhenwindmeßverfahren hat das Ziel, die Zahl der notwendigen Peilstellen am Boden möglichst auf Eine zu verringern und den Röhreneinsatz in der Sonde herabzusetzen oder ganz zu vermeiden. Zur Zeit sind sämtliche der genannten Windpeilverfahren als praktisch gleichwertig zu bezeichnen, denn was das eine Verfahren an Mehraufwand fordert, gleicht es durch erhöhte Genauigkeit wieder aus und umgekehrt. Aus den oben genannten Ersparnisgründen ist jedoch mit Sicherheit anzunehmen, daß sich die Funk-

	Aktive Windsonden				Passive Windsonden			
	Name (Beispiel)	Peilsender (RS 7)	Phasensonde (Mücke)	Laufzeitsonde (Biene)	Ballon	Ballon	Flächensonde	Dipolsonde
Röhrenaufwand 1)	1	5	2	0	0	0	0	0
Bodengerät (Beispiel)	Rahmenpeil. Adcockant. Dipolrichtantenne (MW 2-Gerät)	Phasenmeßgerät mit Richtantenne (Pledermaus)	Laufzeitmeßgerät mit Richtantenne (FuMo-Gerät)	Theodolit	Theodolit	Laufzeitmeßgerät mit Richtantenne (FuMo-Gerät)	Laufzeitmeßgerät mit Richtantenne (FuMo-Gerät)	
Zahl der Peilstände	3	1	1	1	3	1	1	
Meßgrößen	Azimuth	Azimuth Schrägentf.	Azimuth Schrägentf. Höhenwinkel	Azimuth Höhenwinkel	Azimuth Höhenwinkel	Azimuth Schrägentf. Höhenwinkel	Azimuth Schrägentf. Höhenwinkel	
Azimuth α	Gemessen	Gemessen	Gemessen	Gemessen	Gemessen	Gemessen	Gemessen	
Entfernung E	aus $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_n$	$E^2 = E_S^2 - H^2$	$E = E_S \cdot \cos \beta$	$E = H \cdot \operatorname{ctg} \beta$	aus $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_n$	$E = E_S \cdot \cos \beta$	$E = E_S \cdot \cos \beta$	
Höhe H	mittels Druckmeßzusatzgerät	mittels Temperatursonde	$H = E_S \cdot \sin \beta$	aus Aufstiegs- geschwindkt.	$H = E \cdot \operatorname{tg} \beta$	$H = E_S \cdot \sin \beta$	$H = E_S \cdot \sin \beta$	
Reichweite	180 km	120 km	80 km	30 km	30 km	100 km	100 km	

1) Unter Röhren werden hier Schwingröhrensysteme verstanden.

β : Gemessener Höhenwinkel.

Tabelle 12. Die Eigenschaften der verschiedenen Windsonden.

meßgeräte und die in Verbindung mit ihnen einzusetzenden röhrenlosen passiven Windsonden durchsetzen werden. Außerdem verläuft die Entwicklung der FuMo-Geräte stürmisch; sie werden für eine Vielzahl anderer Zwecke ebenfalls benötigt.

3. Wettersonden.

Die Mehrzahl der aktiven Wettersonden wird durch die aktiven Temperatursonden erstellt, indem deren Sender vom Boden aus eingepellt wird. Dies setzt jedoch voraus, daß der Sender bezüglich Wellenlänge und Modulation für die Peilung mit den genannten Verfahren geeignet ist. Bei Sonden, bei denen dies grundsätzlich unmöglich ist, - wie z.B. bei den Frequenzsonden - hilft man sich durch Anhängen einer speziellen Windsonde. Diese Kombinationen sollen jedoch nicht als Wettersonden bezeichnet werden.

Bei der Besprechung einzelner Wettersonden wollen wir uns auf diejenigen beschränken, die bereits von Beginn ihrer Entwicklung an als solche geplant waren und eine besonders glückliche Kombination von Temperatur und Windsonde darstellen.

Als aktive Wettersonden sind unter dieser Einschränkung zunächst die Sonde „Mücke“ und die drei geplanten deutschen Wettersonden zu nennen. Die „Mücke“ benutzt zwar als Temperaturteil die Langsonden (Steuerung der Zeitangabe) und würde deshalb zunächst auch nur eine Kombination aus Temperatursonde und Windsonde darstellen. Sie benutzt jedoch die 10 m-Welle der Windsonde - durch Aufdrücken einer besonderen Modulationsfrequenz - als Nachrichtenmittel für Temperatur, Feuchte und Druck und stellt deshalb eine funktionelle Verknüpfung von Temperatur- und Windsonde dar. Weiterhin ist die Langsonde von vornherein so glücklich in das Gesamtgerät eingefügt worden, daß die „Mücke“ auch rein äußerlich als Wettersonde bezeichnet werden muß. Die weiteren Einzelheiten über die beiden Bausteine sind unter den Temperatur- und Windsonden bereits besprochen worden (s.S.12 u.18).

Bei den geplanten Wettersonden wurde eine Vereinigung der unter den aktiven Windsonden beschriebenen Relaissonde (s.S.19) mit der Frequenzsonde und mit der Zeichensonde angestrebt. Bei der Kombination mit der Frequenzsonde gelang es, den Modulationsgenerator in der Frequenzsonde selbst mit unterzubringen unter Beibehaltung eines einzigen Senderohres, das hierfür allerdings zwei Systeme besaß. Der Uk-Teil wurde mit dem Batteriekasten der Frequenzsonde verknüpft, so daß diese Wettersonde als geschlossene Einheit nach Abnahme des Uk-Teiles auch als Temperatursonde eingesetzt werden konnte. Für die Verknüpfung der Zeichensonde (Morsezeichensonde; Tab.10(2)) mit der Relaissonde wurden zwei Wege beschritten, einmal wurde dem Temperaturteil ein eigener Sender auf 3,1 m Welle belassen und zum anderen sollte der Temperaturteil die Relaissonde im Takte der Morsezeichen steuern, so daß im Funkmeßgerät die für Temperatur, Feuchte und Druck verantwortlichen Morsezeichen mitempfangen werden konnten. Diese letzten drei aktiven Wettersonden sind bis jetzt noch nicht zum Einsatz gekommen.

Als passive Wettersonde kann das auf Seite 16 und Seite 20 besprochene Raumkreuz von Becker betrachtet werden, dessen Dipole im Takte einer Zeichen-Temperatursonde elektrisch in ihrer Mitte aufgetrennt werden. Für die Aufstiege, die BECKER bisher durchführte, verwendete er als Gerät für Temperatur, Feuchte und Druck die Morsezeichensonde. Die Erniedrigung der Reflektionseigenschaften der Dipole durch deren elektrische Auftrennung war so intensiv, daß die Morsezeichen bei gleichzeitiger Windpeilung (Azimut, Höhenwinkel und Schrägentfernung) direkt am Braun'schen Rohr des Funkmeßgerätes abgelesen werden konnten. Einem Abhören oder Registrieren der Morsezeichen steht in Zukunft selbstverständlich nichts im Wege. Die erzielten Reichweiten betragen bei Verwendung des Freya-Gerätes im Mittel 25 km.

4. Raketensonden.

Sämtliche bisher geschilderten Sondentypen beziehen sich auf den Start mit Ballonen. Die Zukunft wird die Verwendung der Rakete als Transportmittel der Sonden in die gewünschten großen Höhen bringen, es liegen hierfür schon einige beachtenswerte Ansätze vor¹⁾.

1) z.B.: Kölzer, Die Entwicklung eines Barothermographen, Zs.f.Met.I(1946/47),S.399
 Best,Durand,Gale,Havens: Phys.Review 70(1946) u. 430.
 Best. Havens, La Cour: Phys.Review 71(1947)
 Penndorf, Ann.d.Meteorol. 2.91(1949).

Von meinen Mitarbeitern MENZER und SITTEL ¹⁾ wurden Versuche mit einer Rakete von 10 cm Durchmesser und 3 m Gesamtlänge unternommen, die eine Höhe von 30 km erzielen ließ und nach ihrem Aufbau für wesentlich größere Höhen geeignet war. Als Temperatursondenteil war die vom ehem. Marineobservatorium entwickelte Frequenzsonde vorgesehen, weil sie durch ihren Aufbau - Verwendung von Temperaturkondensatoren aus festem Dielektrikum und einer Druckmeßeinrichtung ohne mechanisches Gestänge (s.S.16) - besonders geeignet erschien, die hohe Startbeschleunigung (40 bis 60 g) ²⁾ zu ertragen.

Zur Bestimmung der Windwerte wurde das auf S.20 beschriebene Dipolnetz gewählt, weil es vollständig beschleunigungsfest und auf kleinstem Raume unterzubringen war.

Der Aufbau der Rakete sah anschließend an die Spitze den Raum für Fallschirm, Windsonde und Frequenzsonde wie auch der für das Ausstoßen dieser Teile notwendigen Vorrichtungen und Geräte vor. Vollkommen getrennt schloß sich der Raketenantrieb an (s.Abb.13). Durch dieses Hintereinanderlegen gelang es, einen Durchmesser von nur 10 cm zu erzielen und den Luftwiderstand niedrig zu halten. Letzteres ist für die zu erzielende Aufstiegshöhe wie auch für die Kosten des Treibstoffes (in der Größenordnung des Ballonpreises) von erheblicher Bedeutung.

Der Raum für die Sondenteile zwischen Spitze und Antrieb wurde von Halbzylinderscha-

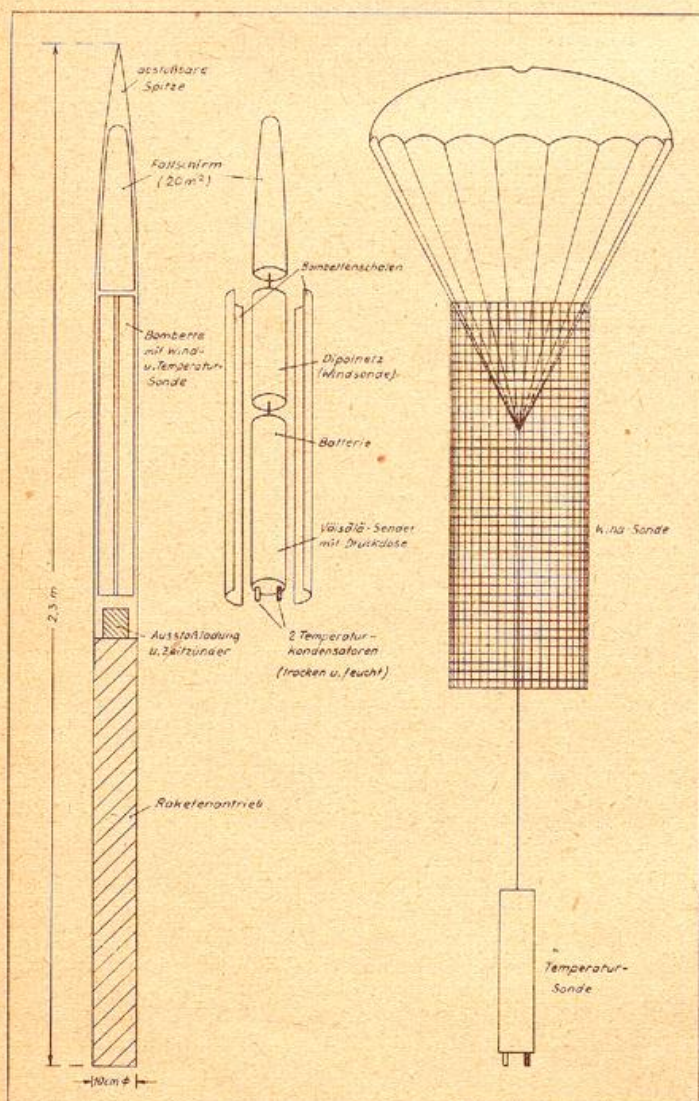


Abb.13: Raketensonde nach Menzer, Sittel und Schulze.

len umschlossen, die durch einen kleinen Sprengsatz kurz unterhalb des Gipfelpunktes der Rakete auseinandergetrieben wurden und anschließend die Sondenteile freigaben. Durch diese Maßnahme wurde von vornherein die Möglichkeit ausgeschaltet, daß die Rakete die am Fallschirm absinkenden Sonden zerstörte. Für die Zündung des Sprengsatzes war ein mechanisches Zeitwerk vorgesehen, das sich automatisch beim Start der Rakete in Tätigkeit setzte.

Wenn sich auch die Raketensonde noch im Stadium der Entwicklung befindet, so muß man ihr doch eine ständig wachsende Bedeutung zusprechen. Es lassen sich mit ihr Höhen erreichen, die nach den neueren Untersuchungen auf dem Gummigebiete ³⁾ dem Ballon für immer versagt bleiben werden. Kostenaufwand wie auch der Aufwand beim Start halten sich die Waage für Ballon und Rakete. Die Aufgabe der Zukunft wird sein, Sonden hoher Beschleunigungsfestigkeit und geringer Temperaturträchtigkeit zu entwickeln. Ansätze sind auch in dieser Richtung bereits vorhanden - es wird hier z.B. auf die Hochsonde des Reichsamts für Wetterdienst und die Raketensonde von Regener und Kölzer verwiesen. Grund-

- 1) Menzer u. Sittel, Über die Entwicklung einer Raketenwettersonde (noch nicht veröff.)
- 2) g = Erdbeschleunigung = 9,8 m/sec
- 3) F.Rössler, Bericht in dieser Reihe, noch nicht veröffentlicht.
H.G.Müller u. W.Utzschneider, Forschungs- und Erfahrungsberichte des Reichswetterdienstes, Reihe A Nr. 24.

sätzliche Schwierigkeiten sind außer beim Strahlungsschutz und der Trägheit der Temperaturmeßkörper bei der Druckmessung zu erwarten. Hier wird man vielleicht auf das Hypsometer zurückgreifen müssen und auf diese Weise die Druckmessung auf eine Temperaturmessung des siedenden Wassers überführen können ¹⁾. Die Hauptschwierigkeit des Hypsometereinsatzes, der Siedeverzug, konnte vom Verfasser und DAUMANN durch Einbau eines Bakterienfilters in das Siedegefaß überwunden werden. Dieses Filter trennt ein Luftpolster vom Wasser, und die beim Absinken des Luftdruckes durch das Filter drückenden Luftbläschen sorgen für die Vermeidung des Siedeverzuges (s.Abb.14). Die Tabelle 13 läßt erkennen, mit welcher hoher Genauigkeit niedrigste Druckwerte gemessen werden können, wenn für die Temperaturmessung eine Streuung von $\pm 0,2^\circ$ vorausgesetzt wird.

Eine weitere Möglichkeit der Messung niedriger Drucke besteht in der Verwendung von Gas-Entladungsröhren. Nach den Experimenten des Verfassers empfiehlt es sich jedoch, fremdgeheizte Kathoden und Stoßionisation zu verwenden; niedrige Spannung und erhöhte Genauigkeit sind der Gewinn (s.Abb.15).

5. Wetterfernmeldegeräte.

Schließlich sollen noch kurz die Wetterfernmeldegeräte in den Bereich der Übersichtsbetrachtungen einbezogen werden, obwohl sie der am Anfang dieses Berichtes gegebenen Definition für die Radiosonde als ein in die Atmosphäre aufsteigendes physikalisches Meßinstrument nicht entsprechen. Ihr Aufbau wie ihre grundsätzliche Wirkungsweise ähneln jedoch vollständig den Radiosonden, sie besitzen lediglich:

- Sender höherer Leistung
- Batterien größerer Kapazität
- Schaltuhr für zeitweises Ein- und Ausschalten
- Künstliche Belüftung für Temperatur- und Feuchtemessung.

Ihre Aufgabe ist es, Wettermeldungen aus unzugänglichen Gebieten zu übermitteln. Der Gedanke ihres Einsatzes geht bereits auf OLLAND zurück, der in Holland ein System derartiger Stationen - allerdings mit Drahtübermittlung - aufgebaut hatte.

Man unterscheidet zwischen

- Landstationen
- Wetterbojen und
- Abwurfgeräten.

Die Landstationen sind für den Einsatz in der Arktis oder im unzugänglichen Gebirge vorgesehen, die Wetterbojen für das Auslegen auf den Ozeanen und die Abwurfgeräte für den Abwurf über unzugänglichen Wäldern.

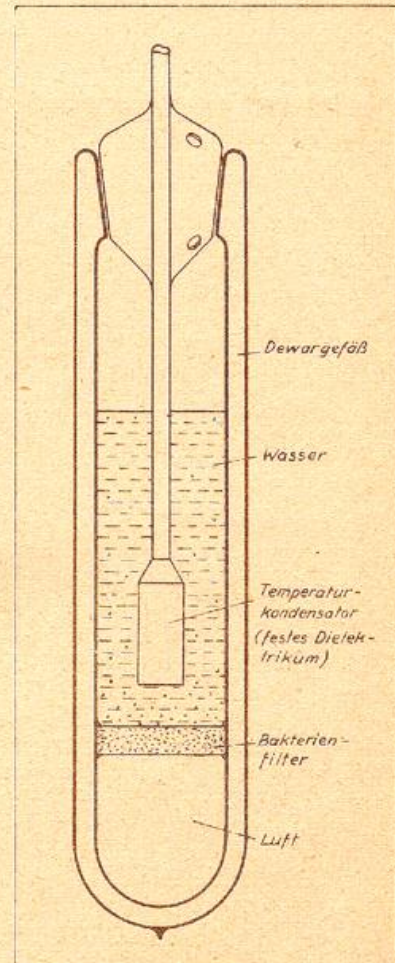


Abb.14: Radiosondendruckmeßgerät nach dem Hypsometer-Prinzip. Die sich beim Aufstieg ausdehnende Luft unter dem Bakterienfilter unterdrückt den Siedeverzug.

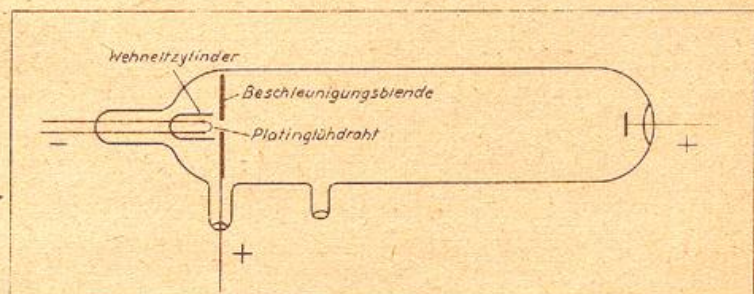


Abb.15: Entladungsröhre zur Messung niedriger Drucke.

1) SCHRÖDER schlug schon 1936 die Verwendung von Hypsometern zur Druckmessung in Radiosonden vor.

Höhe in	Meßgenauigkeit			
	T = $\pm 0,2^\circ$		T = $\pm 0,5^\circ$	
mb	mb	Δ meter	mb	Δ meter
800	5,9	± 60	14,9	± 150
400	3,3	± 58	8,3	± 145
200	1,8	± 60	4,6	± 150
100	1,03	± 63	2,6	± 158
50	0,56	± 70	1,4	± 175
25	0,31	± 78	0,77	± 195
13	0,17	± 83	0,43	± 207
7	0,11	± 96	0,27	± 240

Tab.13. Meßgenauigkeit des Hypsometers in \pm Meter-Höhe für verschiedene Höhenstufen und für $\pm 0,2^\circ$ und $\pm 0,5^\circ$ Temperaturmeßgenauigkeit.

sämtliche meteorologischen Daten (s. Abb. 16). Als Nachrichtenübermittler dient ein 120 Watt-Sender auf dem 40 m-Band. Die Schaltuhr ist so eingestellt, daß alle drei Stunden drei Minuten lang gestrahlt wird. Die Kapazität der Batterien reicht für einen Betrieb von drei Monaten, der mittels eines Windlageaggregates verlängert werden kann. Das von DIAMOND und Mitarbeiter beschriebene Gerät benutzt das Verfahren der Steuerung durch Amplitudenmodulation. Das Marineobservatorium plante die Verwendung der Frequenzvariation.

b. Wetterbojen.

An Wetterbojen sind dem Verfasser bisher nur zwei von der ehem. Marine (PLÖTZE u. Mitarbeiter) entwickelte Typen bekannt geworden.

Bei der ersten Art, die vom Oberdeck der Schiffe ins Wasser abgesetzt werden sollte, wurde die Antenne erst kurz vor dem Aussetzen mit der Boje vereinigt. Diese erste Ausführung ist vielfältig zum Einsatz gelangt und hat sich gut bewährt. In dem zweiten Gerät, das für den Ausstoß aus einem Torpedorohr vorgesehen war, war die Antenne dagegen

zentral in der Boje untergebracht und wurde nach erfolgtem Aufschwimmen mittels Preßluft teleskopartig aus der Boje ausgefahren. Die zweite Ausführung konnte nicht mehr zum Einsatz kommen. Beiden Geräten war gemeinsam, daß im oberen Teil der Boje der meteorologische Meßkopf untergebracht war, anschließend der Sender und die Schaltuhr, schließlich als Stabilisierungsgewicht am unteren Ende die Batterien und die Kabeltrommeln für die Verankerung (s. Abb. 17).

Der meteorologische Meßkopf setzte die Meßwerte wie bei den entsprechenden, bereits geschilderten Temperatursonden in Morsezeichen um und steuerte so über ein Relais den Sender. Der Sender wies eine Leistung von 120 Watt bei 40 m Wellenlänge auf und wurde über einen Zeitraum von sechs Wochen alle drei Stunden für die Dauer von drei Minuten durch die Uhr eingeschaltet. Als Batterien dienten Primärelemente, und zwar für die Heizung Eisennickel-Akkumulatoren, für die Anode Zinkbraunsteinelemente. Die mit dieser Wetterboje überbrückten Entfernungen lagen weit über 1000 km; die abgegebenen meteorologischen Daten waren zuverlässig.

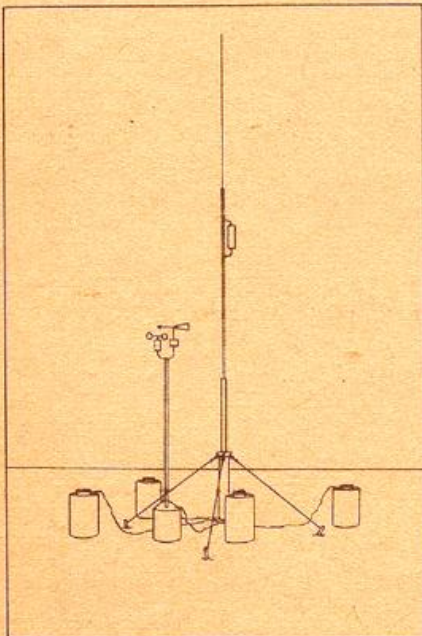


Abb. 16: Automatische Landstation. Morsezeichengeber für Temperatur, Druck, Feuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung.- Batterievorrat für 3 Monate bei Sendung von 3 Minuten im Abstand von 3 Stunden.

c. Abwurfgeräte.

Die Abwurfgeräte müssen neben ihren einwandfreien meteorologischen Eigenschaften außerordentlich stabil aufgebaut sein, damit sie die beim Aufprall auf den Boden auftretenden Bremsbeschleunigungen ohne Beeinträchtigung ihrer Meßgenauigkeit ertragen. Vom ehem. Marineobservatorium wurde hierfür ein Gerät „Baumaffe“ entwickelt, das vom Flugzeug abgeworfen, selbsttätig in bestimmten Zeitabständen Druck-, Temperatur- und Luftfeuchtigkeit in Gestalt von Morsezeichen nach dem Prinzip der geschilderten Wettersonde aussendet. Es wurde ein zweistufiger Sender mit etwa 30 m Wellenlänge benutzt. Die Batterien waren für eine Betriebsdauer von etwa 2 Monaten dimensioniert, das Gerät war in einem stabilen Blechgehäuse von etwa 25 cm Durchmesser und 40 cm Höhe untergebracht, und wog nur 25 kg. Als Antenne diente das halbe Seil zum Fallschirm. Auch von MÜLLER (ehem. Reichsamt für Wetterdienst) sind derartige Geräte entwickelt worden. Sie arbeiteten nach dem Olland-Prinzip und haben sich im Einsatz gut bewährt.

Schlußbetrachtung

Die hier versuchte Zusammenstellung der Aufgaben der Radiosonden, der Forderungen an sie und der verschiedenen Radiosondentypen konnte sich selbstverständlich nur nach dem derzeitigen Stand der Entwicklung wie auch nach den jetzt vorliegenden Aufgaben der Meteorologie richten. Sämtliche Gebiete werden im Laufe der Zeit erweitert werden müssen. Trotz des Wissens um diese Unvollständigkeit und unter Kenntnis der Gefahren, die jede derartige Schematisierung mit sich bringt, wurde der vorliegende Versuch gewagt, schon allein wegen einer Klärung der Begriffe und zur Gewinnung eines Überblicks. Auch sollte der Meteorologe Kenntnis erhalten, welche Mittel zur Bestimmung der von ihm gewünschten Werte für Temperatur, Feuchte, Druck, Windrichtung und Windgeschwindigkeit in der Atmosphäre zur Verfügung stehen, und in welcher Richtung er seine Wünsche erweitern darf.

Auf einen Mangel dieser Darstellung muß noch hingewiesen werden: dem Verfasser war es aus verständlichen Gründen nicht möglich, die gesamte ausländische Literatur zu verfolgen. Er ist jedoch überzeugt, daß wesentliche Lücken lediglich in der Zusammenstellung der einzelnen Radiosonden zu finden sein werden, nicht in der Typisierung, zumal der Verfasser laufend Gelegenheit hatte, die von den einzelnen Ländern eingesetzten Sonden anhand von Fundsonden eingehend zu studieren - immer wieder wurden in verschiedener Abwandlung die geschilderten Grundverfahren angewandt.

Die Arbeit wurde im Sommer 1945 abgeschlossen.

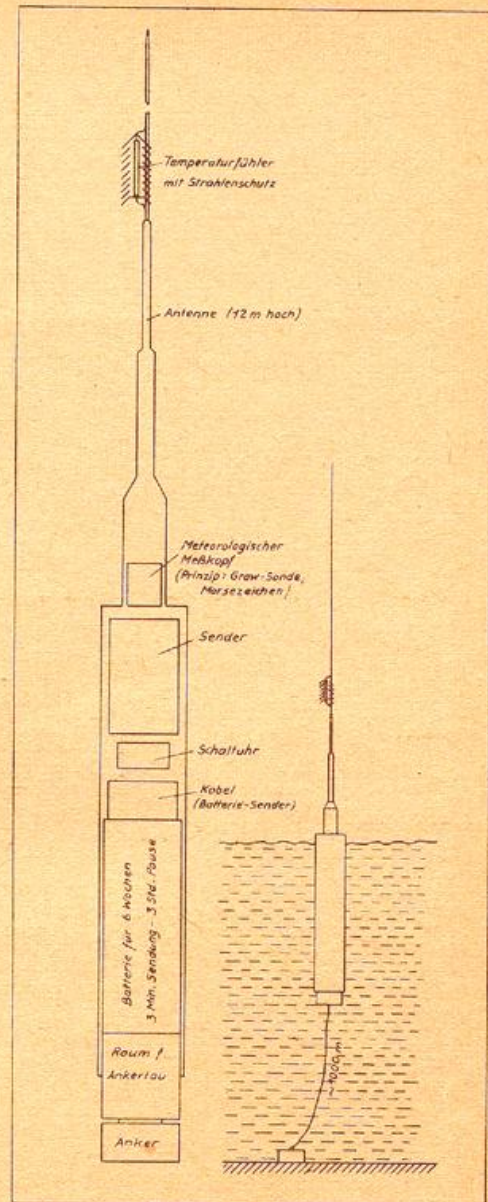


Abb.17: Aufbau der Wetterboje nach PLÖTZE und Mitarbeiter.

