HEINRICH-HERTZ-INSTITUT FÜR SCHWINGUNGSFORSCHUNG
BERLIN-CHARLOTTENBURG

# Technischer Bericht Nr. 87

## Korrelationsuntersuchungen an Ultrakurzwellen

von

Dr.-Ing. P. LANGNER

H 87

Berlin
1966

Technischer Bericht Nr. 87

# Korrelationsuntersuchungen an Ultrakurzwellen


Zusammenfassung:

Nach Erläuterung der mathematischen Grundlagen der Korrelationsanalyse und der Beschreibung der verwendeten Meßapparatur werden Ergebnisse, die mit der Korrelationsanalyse erhalten wurden, diskutiert.



Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Der Bearbeiter

gez. Langner

(Dr.-Ing. P. Langner)

Der Abteilungsleiter

gez. Gundlach

(Prof.Dr.-Ing. F.W. Gundlach)

Der Institutsdirektor

gez. Rothert

(Prof.Dr.-Ing. G. Rothert)


Berlin-Charlottenburg, den 23. Juni 1966


Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik GmbH * Bibliothek Nr. 3605

Inhaltsverzeichnis


| | | |
|---|---|---|
| 1. | Einleitung | 1 |
| 2. | Mathematische Grundlagen der Korrelationsanalyse | 2 |
| 3. | Praktische Dimensionierung | 8 |
| 4. | Signalspeicherung | 9 |
| 4. 1 | Chopperverstärker | 9 |
| 4. 2 | Modulator | 10 |
| 4. 3 | Schleifenanordnung | |
| 5. | Wiedergabe | 11 |
| 5. 1 | Demodulator | 11 |
| 5. 2 | Multiplikation | 11 |
| 5. 3. | Der vorzeichenrichtige Chopperverstärker | 12 |
| 5. 4. | Der Integrator | 13 |
| 6. | Wirkungsweise | 13 |
| 6. 1. | Aufnahme | 13 |
| 6. 2. | Korrelation | 13 |
| 6. 3. | Abgleichvorschrift, Mittelwertvorgabe und Normierung | 15 |
| 6. 4. | Fehlerursachen | 17 |
| 7. | Zur Theorie des Fadingsignales | 19 |
| 7. 1. | Die Autokorrelationsfunktion | 19 |
| 7. 2 | Zusammenhang mit der Fadingrate | 21 |
| 7. 3 | Leistungssprektrum | 24 |
| 8. | Meßergebnisse | 24 |
| 8. 1 | Messungen der Autokorrelationsfunktion ( $\Psi$ -Auswertung) | 24 |
| 8. 2 | Messungen der Kreuzkorrelationsfunktion ( $\tau$ -Auswertung) | 29 |
| 9. | Abbildungen | |
| Schrifttum | | 32 |

## 1. Einleitung

Seit einigen Jahren ist bekannt, daß bei der Ultrakurzwellenausbreitung außerhalb des optischen Horizontes eine ständige Feldstärke anzutreffen ist, die weder als van der Pol-Bremmerschen Beugungsfeldstärke, noch nach der Sommerfeld'schen Lösung gedeutet werden kann. Diese Überreichweiten werden durch die inhomogene Troposphäre verursacht. Inhomogenitäten ausreichender Stärke sind immer vorhanden z.B.: Dichteschwankungen durch atmosphärische Turbulenz, Temperaturschwankungen, verursacht durch atmosphärische Konvektionsvorgänge, Schwankungen des Wasserdampfgehaltes etc.

Die Entfernungsabhängigkeit der Feldstärke bei den unterschiedlichsten meteorologischen Bedingungen ist schon oft Gegenstand ausführlichster Betrachtungen gewesen. Im folgenden sollen nicht die kilometrische Dämpfung, sondern die zeitlichen Fluktuationen der Feldstärke untersucht werden. Es soll der Informationsgehalt des Ultrakurzwellenfadings analysiert bzw. die meteorologische Aussagekraft einer UKW-Fadingstatistik abgeschätzt werden. Dabei werden wir von folgender - auf der Maxwell'schen Theorie basierenden - Modellvorstellung (vgl. hierzu /1/) des Überreichweitenempfangs ausgehen:

Die atmosphärische Dielektrizitätskonstante ist ein vierdimensionales Zufallsfeld und verursacht alle Überreichweiteneffekte und Feldstärkefluktuationen. Die am Empfangsort ankommende Feldstärke enthält einen makroturbulenten Anteil, der durch die relativ langsamen Schwankungen des Brechungsindexgradienten (partielle Reflexionen an freien Inversionen) hervorgerufen wird, und einen mikroturbulenten Anteil (Szintillationsfading), verursacht durch schnellere Brechungsindexfluktuationen.

Registriert wird die gleichgerichtete Zwischenfrequenz eines UKW-Empfängers, die regellos schwankende Meßgröße q(t).

Gefragt wird nach den meteorologischen Parametern, die sich in den Fluktuationen der Größe q(t) wiederspiegeln, bzw. inwieweit mit Hilfe einer Korrelationsanalyse quantitative Aussagen möglich sind. Bevor wir diese Fragen untersuchen, zunächst einige Grundlagen und Begriffe aus der mathematischen Statistik.

## 2. Mathematische Grundlagen der Korrelationsanalyse

Die am Empfängerausgang registrierte Meßgröße q(t) ist im mathematischen Sinne eine "Zufallsfunktion" bzw. ein eindimensionaler stochastischer Prozeß. Der Begriff der Zufallsfunktion geht über den Rahmen der klassischen Wahrscheinlichkeitsrechnung hinaus. Zu seiner Charakterisierung gibt es verschiedene Definitionsmethoden.

In der klassischen Wahrscheinlichkeitsrechnung heißt eine Größe x Zufallsgröße, wenn sie bei verschiedenen Versuchen verschiedene Zahlenwerte annehmen kann; d.h. mit anderen Worten, sie ist eine Funktion des Punktes e (Elementarereignis) aus der Gesamtheit aller möglichen Ereignisse. Es wäre also besser $x = x(e)$ zu definieren. Weiterhin ist die Zufallsfunktion x(t) die Gesamtheit aller Zufallsgrößen x für jedes Argument t aus einem vorgegebenen Zeitintervall. Jedem Argument t ist somit ein zufälliger Funktionswert zugeordnet. Also ist x im Grunde genommen eine Funktion zweier Variabler:
$x = x(t,e)$.

Wird e als konstant angesehen, dann ist $x = x_e(t) = x(t)$ eine reine Zeitfunktion, abhängig vom Zufallsparameter e. Jedem Ergebnis e eines Versuches entspricht also eine Zeitfunktion (sog. "Realisation" eines Prozesses). x kann andererseits als die Gesamtheit der von einem Parameter t abhängigen Zufallsgrößen $x = x_t(e) = x_t$ angesehen werden.

Beide Auffassungen überschneiden sich beim praktischen Gebrauch, was nicht zuletzt die Ursache für die Existenz des Ergodentheorems ist.

Ist der Prozeß invariant gegenüber einer Zeitverschiebung; d.h. sind alle die sie charakterisierenden Parameter (Momente) der Verteilungsfunktion zeitunabhängig, dann heißt der Prozeß "stationär". Damit man eine Zufallsfunktion als stationär betrachten kann, ist es keineswegs erforderlich, daß sich die charakteristischen Größen der die Zufallsfunktion erzeugenden Erscheinung gar nicht ändern. Praktisch genügt es, daß sie während der ganzen Beobachtungszeit für x(t) konstant bleiben. Eine Theorie, welche lediglich die Eigenschaft von Zufallsfunktionen behandelt, die durch ihre ersten beiden Momente (Mittelwert, Korre-

lationsfunktion) bestimmt werden, heißt Korrelationstheorie (s. Jaglom /2/). In der Praxis ist die Beobachtung des Prozesses und die parallele Auswertung gewöhnlich recht kompliziert. Darum ist es wünschenswert, mit einer möglichst kleinen Anzahl von Realisationen auszukommen.

Der besondere praktische Wert der Korrelationstheorie gerade der stationären Prozesse liegt darin, daß es gewöhnlich keine Schwierigkeiten bereitet, für stationäre x(t) den Mittelwert und die Korrelationsfunktion aus einer einzigen Realisation zu bestimmen.

Die Möglichkeit, die erwähnten Momente einer stationären Zufallsfunktion zu berechnen, ergibt sich daraus, daß man auf derartige Funktionen den sogenannten Ergodensatz anwenden kann. Nach dem Ergodentheorem ist der zeitliche Mittelwert einer Realisation x(t) (erste - "spektrale" - Auffassung) gleich dem Ensemblemittelwert der Zufallsvariablen $x_t$ (zweite - "statistische" - Auffassung).

$$E(x_t) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x_t) \cdot x_t \, dx_t = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t)dt = \overline{x(t)}$$

$$(1)\quad E(x_t \cdot x_{t+\tau}) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} x_t \, x_{t+\tau} \, p(x_t \, x_{t+\tau}) \, dx_t \, dx_{t+\tau} =$$

$$\lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t)x(t+\tau)dt = \Psi_x(\tau)$$

Für die praktische mathematische Handhabung wünscht man sich eine explizite Darstellung der Zufallsfunktion. Das erreicht man durch die Entwicklung der Zufallsfunktion nach einem vollständigen System orthonomierter Funktionen (s. Obuchow/3/), wobei die Koeffizienten reine Zufallsvariable sind und sich aus der Orthogonalitätsrelation errechnen lassen. Insbesondere lassen sich dann stationäre Prozesse als eine Linearkombination von harmonischen Schwingungen auffassen. Die physika-

lische Bedeutung dieser Spektralzerlegung wird durch die Möglichkeit einer experimentellen Aussiebung entsprechender Spektralkomponenten über passend gewählte (Ideal-) Filter bestätigt. Ein stationärer Prozeß läßt sich also darstellen (existent nur für zeitlich begrenzte Vorgänge):

$$(2) \quad x(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} a(\omega) e^{i\omega t} d\omega \,, \quad a(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt$$

Setzen wir Gl. (2) in (1) ein und unterscheiden die Fälle $\tau \neq 0$ so folgt

a) für den Fall $\tau = 0$ :

$$E\left(x_t^2\right) = \int_{-\infty}^{+\infty} \lim_{T\to\infty} \frac{a(\omega)\, a^{*}(\omega)}{2T}\, d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega)\, d\omega = \overline{x^2}$$

mit der Definition

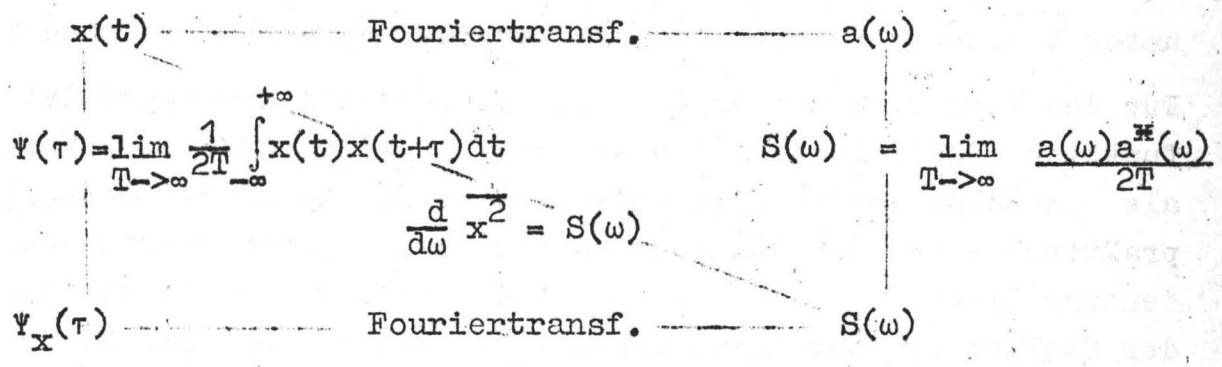
$$S(\omega) = \lim_{T\to\infty} \frac{a(\omega)\, a^{*}(\omega)}{2T} = \text{spektrale Leistungsdichte}$$

b) für den Fall $\tau \neq 0$:

$$\Psi_x(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega, \quad S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(\tau) e^{-i\omega\tau}$$

das sog. "Wiener-Chintschin-Theorem".

Das letzte Theorem ist nach dem Ergodentheorem eine zweite Brücke zwischen der statistischen und spektralen Betrachtungsweise einer Zufallsfunktion. Für die spektrale Auffassung ergeben sich folgende Zusammenhänge:




d.h. für die Definition der Korrelationsfunktion stehen drei Darstellungen zur Verfügung:

$$(3) \qquad \Psi_x(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\, x(t+\tau)\, dt$$

$$\Psi_x(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} x_t\, x_{t+\tau}\, p(x_t, x_{t+\tau})\, dx_t\, dx_{t+\tau}$$

$$\Psi(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$$

In der ersten Darstellung muß der Zeitvorgang in analytischer Form darstellbar und damit sein zukünftiger Verlauf bekannt sein, während das in den anderen beiden Fällen nicht der Fall sein braucht. Die zweite Darstellung ist für Vorgänge vorteilhaft, von denen nur die Verbundwahrscheinlichkeit bekannt ist, um daraus spektrale Eigenschaften des Prozesses zu ermitteln.

Die Korrelationsfunktion ist ähnlich wie die Kovarianz ein Maß für die statistische Verwandschaft zweier Vorgänge. Sie liefert für ein und denselben Vorgang als Autokorrelationsfunktion (AKF) Aussagen über die innere Beziehung verschiedener Abschnitte eines Prozesses, d.h. sie gibt an, welche Struktur der Vorgang hat, ob er vollkommen regellos verläuft oder ob eine gewisse "Erhaltungstendenz" vorhanden ist.

Jede Periodizität kehrt im Verlauf der Autokorrelationsfunktion

unter Verlust der Phasenlage im Verzögerungsbereich $\tau$ wieder.

Für den Vergleich zweier Prozesse liefert die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) ein Aehnlichkeitsmaß, inwieweit der eine Vorgang als Zuordnung des anderen aufgefaßt werden kann. Sie entspricht praktisch einer Regression höherer Ordnung. Ihre praktische Bedeutung liegt vor allem in der $\tau$ -Auswertung, der Auswertung der Stellen größter Aehnlichkeit, während für die AKF in der Regel eine $\Psi$-Auswertung, d.h. also ihre spektrale Eigenschaft, verwendet wird.

Für die nachfolgenden Ausführungen - ein kurzer Ueberblick über einige Bezeichnungen aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung:

1) Zufallsvariable x

$p(x)$ = Wahrscheinlichkeitsdichte

$E(x^k) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k p(x)\,dx = m_k$ : Moment k'ter Ordnung

$E((x-m_1)^k) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x-m_1)^k p(x)\,dx = \mu_k$: zentrales Moment k'ter Ordnung

spezielle Bezeichnungen:

$m_1$ = (Ensemble-) Mittelwert

$m_2$ = quadratischer (Ensemble-) Mittelwert

$\mu_2 = \sigma^2 = m_2 - m_1^2 = \mathrm{Var}(x) = D(x)$ = Varianz, Dispersion von x

$\sqrt{\mu_2} = \sigma$ = Standardabweichung, Streuung

2) Zweidim. Zufallsvektor mit den Komponenten x und y

$p(x,y)$ = zweidim. Wahrscheinlichkeitsdichte

$E(x^l y^k) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} x^l y^k p(x,y)\,dx\,dy = m_{lk}$ : zweidim. Moment der Ordnung l,k

$E((x-m_{10})^l (y-m_{01})^k) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} (x-m_{10})^l (y-m_{01})^k p(x,y)\,dx\,dy =$

$= \mu_{lk}$ : zweidim. zentrales Moment

spezielle Bezeichnungen:

$$/u_{1o} = E\big((x-m_{1o})\big) = 0, \quad /u_{o1} = E\big((y-m_{o1})\big) = 0$$

$$/u_{2o} = E\big((x-m_{1o})^2\big) = \sigma_x^2 = \mathrm{Var}(x)$$

$$/u_{o2} = E\big((y-mo1)^2\big) = \sigma_y^2 = \mathrm{Var}(y)$$

$$/u_{11} = E\big((x-m_{1o})(y-m_{o1})\big) = m_{11} - m_{1o}m_{o1} = \mathrm{Cov}(x,y) :$$
$$= \text{Kovarianz von } x,y$$

$$\rho_{xy} = \frac{E\big((x-m_{1o})(y-m_{o1})\big)}{\Big[E\big((x-m_{1o})^2\big)\big((y-m_{o1})^2\big)\Big]^{\frac{1}{2}}} = \frac{/u_{11}}{/u_{2o}\ /u_{o2}} = \text{Korrelations-koeffizient}$$

3) Zweidim. Zufallsvektorfunktion mit den Komponenten x(t) und y(t)

$$\overline{x^k} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x^k(t)\,dt \quad : \text{(zeitl.) Mittelwert k'ter Ordnung}$$

$$\overline{y^l} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} y^l(t)\,dt \quad : \text{(zeitl.) Mittelwert l'ter Ordnung}$$

$$\overline{x(t)y(t+\tau)} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t)y(t+\tau)\,dt = \Psi_{xy}(\tau)$$

$$= \text{(Kreuz-) Korrelationsfunktion}$$

$$\overline{x(t)x(t+\tau)} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t)x(t+\tau)\,dt = \Psi_x(\tau)$$

$$= \text{Autokorrelationsfunktion}$$

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{\Psi_{xy}(\tau) - \overline{x}\cdot\overline{y}}{\sigma_x\sigma_y} = \text{normierte Kreuzkorrelations-funktion}$$

$$\rho_x(\tau) = \frac{\Psi_x(\tau) - \overline{x^2}}{\sigma_x^2} \quad \text{normierte Autokorrelations-funktion}$$

## 3. Praktische Dimensionierung

Die Wahrscheinlichkeitsdefinition der Autokorrelationsfunktion beruht auf der Beobachtung eines Ensembles und läßt sich nur auf dem Umweg über den Ergodensatz auf Zeitvorgänge anwenden. Daher kommt für die direkte Messung der Korrelationsfunktion nur ein Verfahren nach der Zeitintegraldefinition (3) in Frage.

Das zu untersuchende Signal muß für eine Analyse genügend oft reproduzierbar sein, da es sich im betrachteten Falle um UKW-Fading und nicht um einen stationären Schwankungsvorgang handelt. Derartige Signale können nur als kurzfristig stationär innerhalb eines gewissen Beobachtungsintervalles 2T angesehen werden. Die Speicherung auf ein Magnettonband ist die technisch einfachste Lösung.

Die zweite Aufgabe, die der Korrelator lösen muß, ist ein im Zeitmaßstab um $\tau$ verzögertes Signal $q(t - \tau)$ zu bilden. Das läßt sich entweder durch einen beweglich angebrachten Tonkopf erreichen, oder durch zwei starre Tonköpfe mit einem variablen Tonbandweg günstig mit der Signalspeicherung kombinieren. Letztere Auslegung hat den Vorteil, daß zwei fest angeordnete Halbspurtonbandgeräte verwendet werden können und die kritische mechanische Bewegung eines Tonkopfes vermieden wird.

Die maximale Verzögerung $\tau_{max}$ muß so ausgelegt werden, daß mindestens eine volle Periodenlänge der Grundharmonischen des Fadingsignales erfaßt wird. Darüberhinaus muß die äquidistante Unterteilung des gesamten $\tau$ -Intervalles so gewählt werden, daß nach dem "Samplingtheorem" mindestens drei Meßpunkte auf die höchste Oberwelle entfallen.
Also muß gelten:

$$\tau_{max} \geq \frac{1}{f_{min}}, \qquad 3\Delta\tau \geq \frac{1}{f_{max}}, \qquad n = \frac{\tau_{max}}{\Delta\tau}$$

dabei muß, wegen der Zeitintegraldefinition der AKF $\tau_{max}$ klein sein gegenüber dem Beobachtungsintervall 2T.

Hieraus resultiert die Dimensionierungsvorschrift:

$$\frac{1}{f_{min}} \leq \tau_{max} \ll 2T$$

Das Beobachtungsintervall 2T, $\tau_{max}$ und $f_{min}$ werden durch die Länge des Speicherbandes festgelegt.

Der Länge der Bandschleife wird dadurch eine obere Grenze gesetzt, daß der Gesamtantrieb der Schleife und der Umlenkrollen durch die beiden Andruckrollen der Tonbandgeräte verursacht wird (falls kein zusätzlicher synchroner Antrieb für die Umlenkrollen vorgesehen wird). Je länger das Band wird, um so empfindlicher wird, da die Asynchronmotoren der Tonbandgeräte stark belastungsabhängig sind, die Anlage gegen Spannungsschwankungen der Schleifenvorrichtung.

Für $\tau_{max} \approx 20$ sec ist z.B. $f_{min} \approx 0{,}05$ Hz die kleinste erfaßbare Frequenz. Alle Frequenzen kleiner als 0,05 Hz gehen als Mittelwert in die Auswertung ein. Da der Ultrakurzwellenschwund vollkommen instationär abläuft (er zeigt Stunden - , Tages- und Jahresgänge) wird also Kurzzeitkorrelation betrieben, d.h. die Korrelationsfunktion zeigt von Beobachtungsintervall zu Beobachtungsintervall einen anderen Verlauf.

Die Frage nach dem "repräsentativen" Beobachtungsintervall beim Ultrakurzwellenfading ist also dahingehend zu beantworten, daß das kleinste - nach der Zeitintegraldefinition eben noch zulässige - Beobachtungsintervall eine optimale Änderung der AKF von 2T zu 2T liefert. Je länger das Beobachtungsintervall gewählt wird, umso kleiner sind die den Mittelwert bestimmenden Frequenzen und umso geringer ist die Änderung der AKF gegenüber einem Nachbarintervall.

## 4. Die Signalspeicherung

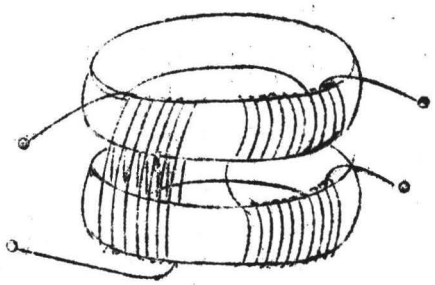
Die von zwei UKW-Empfängern gelieferten Gleichspannungsfadingsignale (gleichgerichtete, gefilterte Zwischenfrequenz) werden über zwei Chopperverstärker verstärkt und anschließend, moduliert auf zwei Halbspuren eines Tonbandes, gespeichert (vergl. Abb. 1 und 2).

### 4.1 Der Chopperverstärker

Die gepaarten Choppertransistoren (2 TF 66) werden über einen Transformator [1]) an der Basis mit einem astabilen Multivibrator ( 5 bis 10 KHz ) angesteuert. Durch das wechselseitige Durch-

schalten der beiden Zerhackertransistoren erhält man eine pulsierende Gleichspannung, die über drei Stufen verstärkt wird. Die Verstärker sind wegen der geforderten thermischen Stabilität relativ stark gegengekoppelt. Die Endverstärkung erfolgt mittels Silizium - npn - Leistungstransistoren im Gegentakt, die gegenüber Germaniumtransistoren eine bessere thermische Konstanz aufweisen. Vorhandene Temperatureinflüsse werden durch "thermisch negative Widerstände" kompensiert. Der Zweiweggleichrichtung auf der Sekundärseite des Ausgangstransformators ist eine Siebkette zur Unterdrückung der Zerhackerfrequenz nachgeschaltet.

4.2 Der Modulator



Das verstärkte Gleichspannungssignal wird auf die Primärwicklung zweier Ferritringkerne (vergl. Zeichn.) gegeben. Die beiden Sekundärwicklungen (gegeneinandergeschaltet zur Kompensation des Transformatoreffektes) verkörpern die Induktivität eines Oszillatorschwingkreises in Franklinschaltung (150 KHz). Aus Linearitätsgründen werden die Ringe vormagnetisiert und über einen "Thernewid"-Widerstand thermisch stabilisiert.

Ändert sich die angebotene Gleichspannung, so ändert sich der magnetische Fluß in den Ringkernen, wodurch die Frequenz des Oszillators entsprechend gewobbelt wird.

Ein zweiter quarzgesteuerter Oszillator in Colpitts-Schaltung (Grundwellenquarz als induktiver Blindwiderstand) schwingt auf 150 KHz. Die beiden Oszillatorfrequenzen gemischt, gesiebt und über zwei Transistorstufen verstärkt, ergeben am Ausgang eine

---

[1]) Zwischen Primär- und Sekundärwicklung dieses Transformators ist eine an Masse gelegte dünne Kupferfolie angeordnet. Dadurch wird eine kapazitive Kopplung zwischen den Wicklungen vermieden und das Störsignal verkleinert (vergl. /4/).

Wechselspannung von 0 ... 20 KHz. Die RC-Kombination am Ausgang sorgt dafür, daß mit steigender Frequenz die Amplitude den Tonbandverstärker nicht übersteuert.

Für die Aussteuerkontrolle wird die am Ausgang stehende Wechselspannung über drei Stufen verstärkt und durch einen Schmitt-Trigger mit nachfolgender Differentiation und Integration demoduliert auf ein geeichtes µA-Meter gegeben.

Der so modulierte Ultrakurzwellenschwund wird mit zwei Magnetophongeräten auf je einer Halbspur einer ca. 5 m langen Tonbandschleife gespeichert.

Chopperverstärker und Modulator werden durch stabilisierte Netzgeräte gespeist.

## 5. Die Wiedergabe

Zur Bildung eines Korrelationskoeffizienten werden die Signale über zwei Demodulatoren und zwei Chopperverstärker mit Mittelwertvorgabe einem Hallmultiplikator zugeführt. Hieran anschließend wird das Produkt vorzeichenrichtig verstärkt und integriert (vgl. Abb. 1 und 3).

### 5.1 Der Demodulator

Die von einer Halbspur der Tonbandschleife abgenommenen modulierten Signale werden über drei Transistorstufen verstärkt und stoßen einen Schmitt/Trigger an. Nach einem Emitterfolger werden die entstandenen Rechtecke differenziert, alle negativen Anteile durch eine Diode kurzgeschlossen und alle positiven Impulse über ein RC-Glied ausgezählt.

Das demodulierte Gleichspannungssignal wird von einem Chopperverstärker aufgenommen, an dessen Ausgang von Hand die dem Mittelwert des Schwundes entsprechende Gleichspannung abgezogen werden kann (s. Mittelwertvorgabe).

### 5.2 Die Multiplikation

Für die Multiplikation wird ein Hallmultiplikator (Siemens MB 26/El 28 Mü) verwendet. Die Felderregung des Multiplikators wird durch den Anodenstrom einer Pentode verursacht, während die Steuerseite des Halbleiters als Emitterwiderstand eines

Leistungstransistors fungiert. Sowohl die Feldseite als auch die Steuerseite des Hallmultiplikators sind als Brücken von Kompensationsschaltungen ausgelegt, wodurch eine vorzeichenrichtige Multiplikation ermöglicht wird.

Der Hallspannung (Produkt) ist im allgemeinen ein Ohmscher Spannungsanteil überlagert, der auch beim Steuerfeld B = 0 vorhanden ist. Dieser Anteil muß durch einen äußeren Spannungsteiler kompensiert werden.

Die beiden Nullinstrumente sind zur Nullpunkts- und Aussteuerungskontrolle notwendig.

Daten des Multiplikators:

| | | |
|---|---|---|
| $I_{F,max}$ | (Steuerfeld) | $= \pm$ 10 mA |
| $i_{St,max}$ | (Steuerstrom) | $= \pm$ 500 mA |
| $u_{H,max}$ | (Hallspannung) | $= \pm$ 200 mV |
| Linearitätsfehler | | $<$ 1% |

## 5.3 Der vorzeichenrichtige Chopperverstärker

Die vorzeichenrichtige Multiplikation hat den Vorteil des doppelten Aussteuerbereiches, aber den Nachteil, daß anschließend vorzeichenrichtig verstärkt werden muß.

Zunächst muß der nachfolgende Zerhacker erdfrei arbeiten, da die Hallelektroden nicht auf Erdpotential liegen. Die gechoppte Gleichspannung wird daher über einen Transformator ausgekoppelt und über drei Transistorstufen verstärkt. Für die vorzeichenrichtige Wiedergabe ist eine Endstufe in der Wirkungsweise eines Ringmodulators notwendig. Sie besteht aus zwei Gegentaktendstufen. Die erste Gegentaktstufe verstärkt das zerhackte Gleichspannungssignal. Die zweite Stufe verstärkt die Rechtecke des astabilen Multivibrators und schafft auf der Sekundärseite des zugehörigen Ausgangstransformators eine Vergleichsspannung, zu der je nach Phasenlage das zerhackte Gleichspannungssignal der ersten Endstufe addiert oder subtrahiert wird.

Anschließend wird gleichgerichtet (Verdopplerschaltung) und gesiebt. Die Ausgangsspannung ist erdfrei und wird von einem Nullinstrument angezeigt.

### 5.4 Der Integrator

Als Integrator wird ein Millerintegrator verwendet. Er hat gegenüber dem einfachen RC-Glied den Vorteil, daß sich infolge der Rückkopplungsspannung zur Signalspannung eine mitlaufende Ladespannung (Kathodenspannung) addiert und der Ladestrom für den Integrationskondensator über einen längeren Bereich konstant bleibt.

Das Ergebnis der Integration wird von einem X-Y-Schreiber in Brückenschaltung als Korrelationskoeffizient aufgezeichnet. Durch die Multiplikation über alle vier Quadranten sind positive und negative Koeffizienten möglich.

Die Integrationszeitkonstante muß so gewählt werden, daß während der Beobachtungszeit 2T noch keine Sättigung auftritt.

## 6. Wirkungsweise

### 6.1 Die Aufnahme

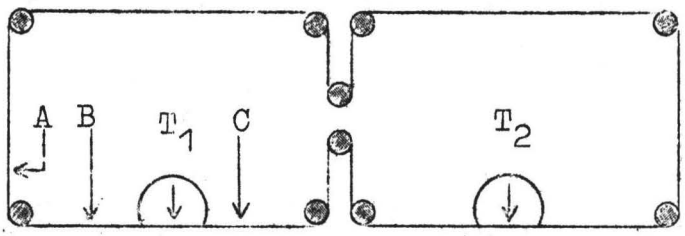
Die gleichgerichtete Zwischenfrequenz zweier Ultrakurzwellenempfänger, deren Dipole um 5,7 m auseinanderstehen, wird gefiltert und auf die beiden Modulatoren übertragen.

Die Modulatoren erzeugen analog zu der ihnen angebotenen Gleichspannung eine Wechselspannung von 0 ... 20 KHz. Zwei Magnetbandgeräte speichern die Wechselspannung auf je einer Halbspur einer ca. 5 m langen Tonbandschleife. Die Länge der Schleife entspricht bei einer Aufnahmebandgeschwindigkeit von 4,75 cm/sec einer Beobachtungszeit 2T von ca. 100 sec. Falls größere Beobachtungszeiten notwendig werden, muß das Fadingsignal zunächst auf ein Doppelspurband aufgenommen und später gerafft auf die Schleife übertragen werden. Durch vierfaches Raffen erhält man z.B. schon einen Beobachtungsbereich von 400 sec.

### 6.2 Die Korrelation

Die gespeicherten Signale werden zur Bildung eines Korrelationskoeffizienten von beiden Halbspuren bei einer Wiedergabegeschwindigkeit von 19 cm/sec abgenommen und über zwei Demodulatoren und Chopperverstärker mit vorgewähltem Mittelwert (s. Mittelwertvor-

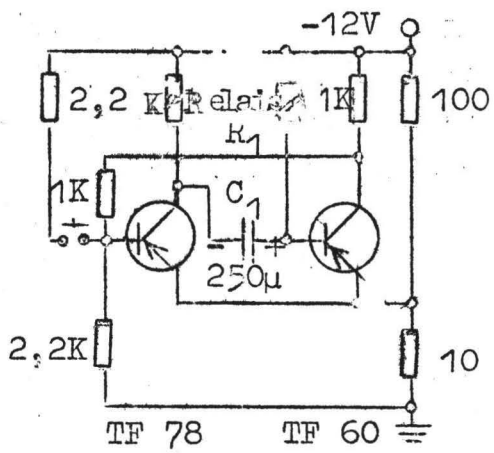
gabe) einem Hallmultiplikator zugeführt. Das Produkt wird vorzeichenrichtig verstärkt, integriert und nach einem Bandumlauf als Punkt auf einem X-Y-Schreiber registriert (vgl. Abb. 4). Der Tonbandweg zwischen den Wiedergabeköpfen der Tonbandgeräte wird nach jedem Koeffizienten um einen $\Delta\tau$ entsprechenden Schritt verlängert. Die für den Umweg des Tonbandes verantwortlichen Umlenkrollen befinden sich auf einem Schlitten, der von einer Motorspindel bewegt wird (vgl. Abb. 4). Die Größe der $\Delta\tau$ - Schritte ist durch ein Getriebe regelbar. Eine Potentiometerwendel überträgt synchron die Bewegung des Schlittens auf die X-Ablenkung des X-Y-Schreibers. Die Aneinanderreihung aller als Punkte aufgezeichneten Korrelationskoeffizienten ergibt die Korrelationsfunktion. Abb. 5 zeigt als Beispiel die typische Aufnahme einer Kreuzkorrelationsfunktion.




Die Schleifenanordnung

Im einzelnen werden pro Bandumlauf folgende Arbeitsgänge von einer Schaltfolie auf der Bandschleife ausgelöst:

Kontakt A bewirkt über ein Relais den Anschluß des X-Y-Schreibers an den Millerintegrator, der bisher nicht vorhanden war. Das Relais haftet infolge einer Abfallverzögerung bis die Schaltfolie Kontakt B passiert hat und fällt dann ab. Kontakt B löst einen "Punkt-Impuls" zum Aufzeichnen des Korr.-Koeffizienten auf dem X-Y-Schreiber aus und schaltet den Motor der Spindel für einen $\Delta\tau$ - Schritt mit einer Relaisabfallverzögerung eine definierte Zeit lang ein.



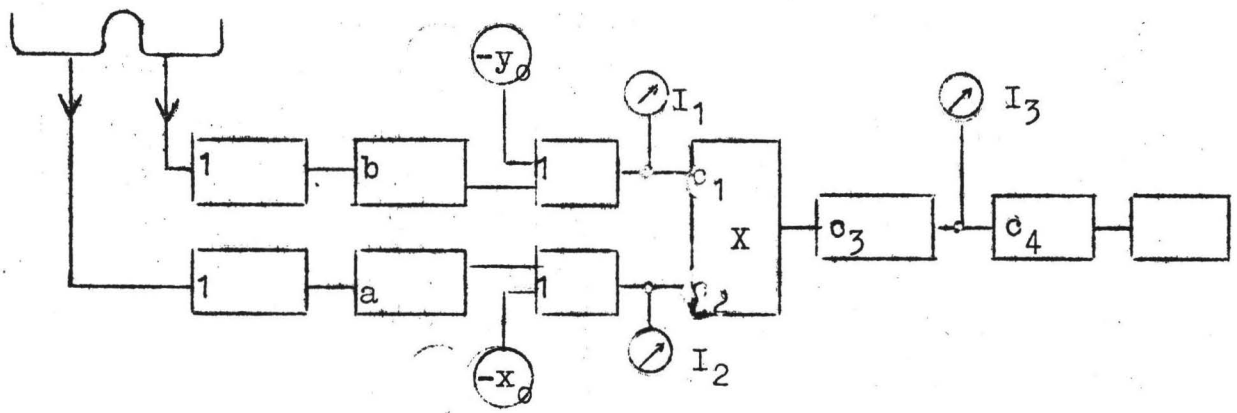

$R_1$ : 2...25 K

Die Relaisabfallverzögerung

Kontakt C verursacht einen Kurzschluß des Integrationskondensators. Eine Verzögerungsschaltung sorgt dafür, daß dieser Kurzschluß so lange bestehen bleibt, bis die Schaltfolie den letzten Tonkopf ($T_2$) passiert hat. Hierdurch werden die Störimpulse der Schaltfolie von der Integration aus-

geschlossen. Außerdem wird erreicht, daß die Integrationszeit für jeden Koeffizienten konstant bleibt, auch wenn der Tonbandweg zwischen den Köpfen $T_1$ und $T_2$ sehr groß geworden ist.

6.3 Abgleichvorschrift, Mittelwertvorgabe, Normierung.




Demodulatoren | Chopperverst. | Mittelwertvorgabe | Multiplikator | Chopperverst. | Integrator | X-Y-Schreiber

Es seien:

$a,b,c$ = Verstärkungsfaktoren

$f_{1,2,3}$ = Additive konst. Spannungen (Nullpunktsfehler)

$x_o, y_o$ = Mittelwertkompensationsspannungen,

dann erhält man nach der Demodulation die Größen $x(t)$ und $y(t+\tau)$. Daraus wird

nach den Chopperverst. : $by$ ; $ax$

nach der Mittelwertvorgabe : $by-y_o$ ; $ax-x_o$

nach dem Multiplikator : $c_1c_2(by-y_o)(ax-x_o) + f_1$

nach dem Chopperverst. ($c_3$) : $c_1c_2c_3(by-y_o)(ax-x_o) + c_3f_1 + f_2$

nach dem Integrator : $\underbrace{c_1c_2c_3c_4}_{c}\overline{(by-y_o)(ax-x_o)} + \underbrace{c_4c_3f_1+c_4f_2+f_3}_{f}$

Am X-Y-Schreiber wird also der Korrelations-Koeffizient

$$(4) \qquad \rho_{xy} = c\,\overline{(by - y_o)(ax - x_o)}^{t} + f$$

ausgedruckt.

a) Nullpunktsabgleich

1. Der Integrationskondensator wird kurzgeschlossen und die Brücke im Integrator eingepegelt bis $f_3 = 0$ ist.
2. Die Balance der vorzeichenrichtigen Verstärkung wird nachgestimmt, bis das Nullinstrument $I_3$ $f_2 = 0$ anzeigt.
3. Die Multiplikatorfaktoren werden (bei offenen Multiplikatoreingängen) mit Hilfe der Nullinstrumente $I_1$ und $I_2$ auf Null abgeglichen (Kompensationsspannungen der Feld- und Steuerseite).
4. Der Ohmsche Spannungsanteil des Hallmultiplikators wird mit Hilfe des "äußeren Spannungsteilers" (s.Abb. 3) kompensiert, indem jeweils für den einen Faktor die Spannung 0 und für den anderen Faktor eine beliebige andere Spannung auf die Multiplikatoreingänge gegeben werden. Das Nullinstrument muß das Produkt Null anzeigen ($f_1 = 0$).

Ein Nullpunktsfehler hat eine vertikale Verschiebung der Korrelationsfunktion zur Folge - beeinflußt aber sonst nicht den Charakter der Kurve. Insbesondere für eine $\tau$ -Auswertung hat eine derartige Verschiebung keine Bedeutung.

Nach der Korrektur erhält man somit:

$$\frac{\rho_{xy}}{c} = \overline{(by - y_o)(ax - x_o)} = ab\overline{xy} - a\bar{x}y_o - b\bar{y}x_o + x_o y_o$$

$$(5)\quad \frac{\rho_{xy}}{abc} = \overline{xy} + \frac{y_o}{b}\left(\frac{x_o}{a} - \bar{x}\right) + \frac{x_o}{a}\left(\frac{y_o}{b} - \bar{y}\right) - \frac{x_o y_o}{ab} = \rho_{xy}$$

b) Mittelwertvorgabe

Die Kompensationsspannungen $x_o$, $y_o$ sind so zu wählen, daß die beiden mittleren Summanden aus Gl.(5) verschwinden.

1. Von der Schleife wird abgenommen: $x(t) = 0$, $y(t) \neq 0$.
   $x_o$ wird möglichst groß vorgegeben. $y_o$ wird so eingestellt, daß der Korrelationskoeffizient nach einem Bandumlauf verschwindet.
2. Von der Schleife wird abgenommen: $x(t) \neq 0$, $y(t) = 0$.
   $y_o$ bleibt unverändert. $x_o$ wird so einreguliert, bis der Korrelationskoeffizient nach einem Bandumlauf ebenfalls verschwindet.

Nachdem der Mittelwert als $x_o = a\bar{x}$ und $y_o = b\bar{y}$ vorgegeben ist, wird aus Gl.(5):

(6) $$\rho'_{xy} = \overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y} = \Psi_{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y} = Cov(x,y)$$

c) Normierung

Der Ausdruck (6) stellt die Kovarianz von x,y dar. (vgl. 2) Somit wird die Bildung der normierten Korrelationsfunktion zur Maßstabsfrage, die durch die Verstärkungsregelung des X-Y-Schreibers festgelegt werden kann. Hierbei ergeben sich zwei Sonderfälle:

1. Die Autokorrelationsfunktion, Autokovarianz:
   Für diesen Fall erhält man aus Gl(6)

(7) $$\rho'_x = \Psi_x(\tau) - \bar{x}^2$$

   also bis auf eine multiplikative Konstante die normierte Autokorrelationsfunktion. Die experimentelle Normierung erhalten wir, indem $\rho_x(0) = 1$ durch die Y-Verstärkung des X-Y-Schreibers festgelegt wird. Da die Einstellung unabhängig ist von der Größe der Verstärkungsfaktoren a,b,c, können diese zur optimalen Aussteuerung von AKF entsprechend gewählt werden.

2. Die Kreuzkorrelationsfunktion, Kovarianz:
   Der Ausdruck (6) stellt bis auf einen konstanten Faktor die Kreuzkorrelationsfunktion dar. Hier läßt sich jedoch nicht so leicht normieren, da sich die maximale Korrelation sowie der multiplikative Faktor von Fall zu Fall ändern und kein bekannter Korrelationswert für eine experimentelle Normierung zur Verfügung steht.

   Da die Aufnahmen der Kreuzkorrelogramme ohnehin für eine $\tau$ -Auswertung benötigt werden, ist eine genaue Größe des Maximums auch von sekundärer Bedeutung.

6.4 Fehlerursachen

Um den Einfluß des "Bandflatterns" bei der Speicherung zu umgehen, wurde keine Amplitudenmodulation, sondern eine Frequenzmodulation gewählt. Wegen dieser Modulationsart reagiert

der Korrelationskoeffizient auf Spannungsschwankungen der Tonbandschleife. Die ca. 5 m lange Schleife und die zugehörigen 10 Umlenkrollen werden lediglich durch die Andruckrollen der Magnetophongeräte (Asynchronmotoren!) angetrieben. Ein solcher Antrieb ist stark belastungsabhängig. Daher ist z.B. darauf zu achten, daß die Schaltfolie ohne Stoßstellen (Schrägschnitte) verklebt wird. Weiterhin werden für die Schleife Umlenkrollen mit relativ großer Schwungmasse notwendig. Die Rollen sind so angebracht, daß die richtige Höhe und Senkrechtlage einjustiert werden kann. Die Gesamtspannung des Bandes wird durch "Fühler" reguliert. Für jede neue Bandschleife muß die Konstanz eines Korr.-Koeffizienten längere Zeit überprüft werden, da auftretende Stöße Spannungsschwankungen auslösen können, die sich aufschaukeln.

Wichtig ist die Verwendung eines Tonbandes mit geringem Dehnungskoeffizienten [1]). Eine Bandschleife ist für ca. vier Korrelogramme (200 Umläufe) verwendbar.

Die Schichtseite der Schaltfolie muß die dem Tonkopf abgewandte Seite passieren, um Stöße und Beschädigungen der Köpfe zu vermeiden. Bei längerem Betrieb sind die Tonköpfe "nachzuwippen", da sonst die Empfindlichkeit im oberen Frequenzbereich stark nachläßt. Die $\Delta\tau$ -Schritte werden klein gewählt, um die Bandausgleichskräfte nicht zu beeinflussen. Aus diesem Grunde beginnt auch die Integration (Ende des Kurzschlusses am Integrationskondensator) nachdem sich das Gleichgewicht in der Bandspannung wieder eingestellt und die Schaltfolie den letzten Tonkopf passiert hat.

Um ein mehrmaliges Prellen der über die Schaltfolie angeregten Relais zu vermeiden, werden die Arbeitsrelais durch den Entladestrom eines Kondensators betrieben.

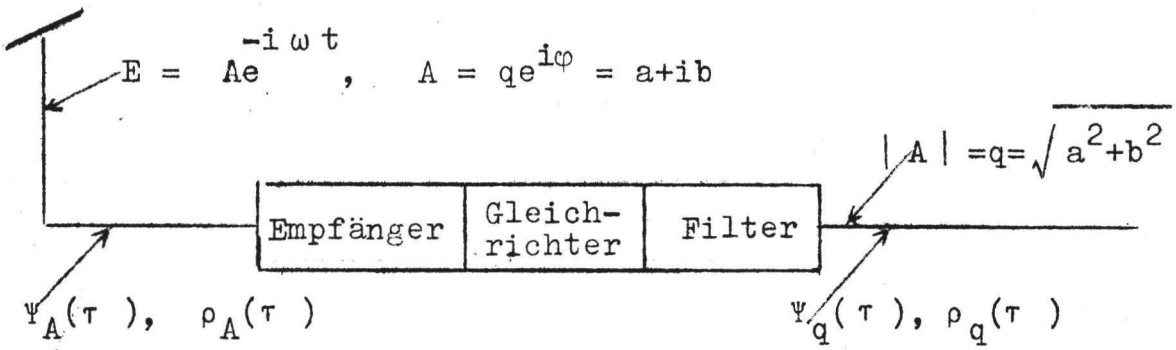
Alle Nullpunktsfehler des Multiplikators können relativ leicht durch den Nullpunkt des X-Y-Schreibers kompensiert werden.

---

[1]) Fa. Scotch: Brand Sandwich Instrumentation Tapes Nr. 458, 488

## 7. Zur Theorie des Fadingsignales

### 7.1 Die Autokorrelationsfunktion




An der UKW-Antenne wird von einer ebenen Welle eine Wechselspannung induziert, die infolge von troposphärischen Inhomogenitäten statistisch in der Amplitude (q) und Phase ($\varphi$) schwankt. Analysiert wird die Registriergröße q.

Dann gilt für die normierten Autokorrelationsfunktionen der komplexen Amplitude A und der Größe q :(vgl. 2):

$$(8) \qquad \rho_A = \frac{\Psi_A(\tau) - m_{1A}^2}{m_{2A} - m_{1A}^2} \qquad \rho_q = \frac{\Psi_q(\tau) - m_{1q}^2}{m_{2q} - m_{1q}^2}$$

mit $\quad m_{1A} = E(A) = 0$ [1] $\qquad m_{1q} = E(q) \neq 0$

$\quad m_{2A} = E\left((A-m_{1A})^2\right) = \sigma_A^2 \qquad m_{2q} = E(q^2) = \overline{q^2}$

Weiterhin gilt zu zwei Zeitpunkten t und $t+\tau$ :

$$A_1 = A(t), \qquad q_1 = q(t) = \sqrt{a_1^2(t) + b_1^2(t)},$$

$$A_2 = A(t+\tau), \qquad q_2 = q(t+\tau) = \sqrt{a_2^2(t+\tau) + b_2^2(t+\tau)}.$$

---

[1]) Es wird angenommen, daß $\varphi$ eine gleichverteilte Zufallsgröße im Intervall $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ist.

Mit der Voraussetzung

$$E(a_1 \cdot a_2) = E(b_1 \cdot b_2) = \sigma_a^2 \rho_a$$
$$E(a_1^2) = E(b_1^2) = \sigma_a^2$$
$$E(a_1 \cdot b_2) = E(a_2 \cdot b_1) = 0$$

erhält man:

$$\Psi_A(\tau) = E(A_1 A_2^*) = E((a_1 + ib_1)(a_2 - ib_2))$$
$$\Psi_A(\tau) = E(a_1 a_2) + E(b_1 b_2)$$
$$\Psi_A(\tau) = 2\sigma_a^2 \rho_a$$

$$\Psi_q(\tau) = E(q_1 q_2)$$

(vgl./ 1/ )

$$\Psi_q(\tau) = 4\sigma_a^4 \, {}_2F_1(-1,-1; 1; \rho_a^2)$$

$$m_{2A} = E(AA^*) = E(a^2 + b^2)$$
$$m_{2A} = 2\sigma_a^2$$

(vgl./1/)

Aus (8) folgt also:

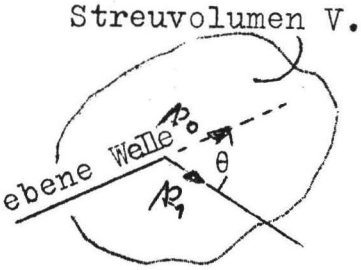
$$\rho_A(\tau) = \rho_a(\tau) \qquad \rho_q(\tau) = \rho_a^2(\tau)$$

(9) $$\rho_q(\tau) = \rho_A^2(\tau)$$

Die normierte Autokorrelationsfunktion der komplexen Amplitude A läßt sich aus der Theorie der Wellenausbreitung für den Fall reiner Streuausbreitung mit schnell fluktuierenden Feldanteilen angeben /1/:

(10) $$\rho_A(\tau) = \frac{\Phi(\not{p}, \tau) \cdot F(\tau)}{\Phi(\not{p}, 0)} \quad ,$$

Streuvolumen V.




mit:

$$\Phi(\kappa,\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_{n1}(\rho,\tau)\, e^{i(\kappa,\vec{\rho})}\, d^3\rho$$

$$F(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i(\kappa,\vec{v})\tau}\, p\left(\frac{\vec{v}-\vec{m}_{1v}}{\sigma_v}\right) d^3v$$

| | | |
|---|---|---|
| $\Psi_{n1}(\vec{\rho},\tau)$ | : | zweidim. Autokorrelationsfunktion des modifizierten Brechungsindex $n_1$ |
| $\Phi(\kappa,\tau)$ | : | semitranformierte Autokorrelationsfunktion von $n_1$ |
| $p\left(\frac{\vec{v}-\vec{m}_{1v}}{\sigma_v}\right)$ | : | standardisierte Verteilungsdichte des Windgeschwindigkeitsvektors $\vec{v}$ |
| $\vec{m}_{1v}$, $\sigma_v$ | : | Mittelwert und Dispersion von $\vec{v}$ |
| $\kappa = k_0 - k_1$ | : | Streuwellenvektor |
| $k_0$, $k_1$ | : | Wellenvektor der in das Streuvolumen einfallenden - und der gestreuten ebenen Welle |
| $\theta$ | : | Streuwinkel, |

In erster Näherung erhält man aus (10) vgl. /1/):

$$\rho_A(\tau) = e^{-\frac{\kappa^2\sigma_v^2\tau^2}{2}} \cos(\kappa, \vec{m}_{1v}\tau) \qquad (11)$$

Die Varianz der Windgeschwindigkeit bestimmt also den Abfall und das erste Moment die Welligkeit der Autokorrelationsfunktion der komplexen Amplitude des Ultrakurzwellenfadings.

## 7.2 Zusammenhang mit der Fadingrate

In der Wellenausbreitung ist es üblich, die Fadingrate R als die Anzahl der Nulldurchgänge des Schwundes durch einen Mittelwert (abhängig von der Länge des Beobachtungsintervalls) zu definieren.

Hier besteht folgender Zusammenhang mit der Autokorrelationsfunktion: R ist offensichtlich proportional $\dot{q}(t)$[1]. Je steilere Tangenten innerhalb eines Beobachtungsintervalls auftreten, umso stärker die Fluktuation. Also gilt:

$$R \sim \dot{q}\,, \quad R \sim \sum \dot{q}_i\,, \quad R \sim E(\dot{q}^2)$$

---

[1]) $\dot{q}(t) = \frac{d}{dt}(q(t))$

Da R positivdefinit ist, setzt man besser an:

$$R^2 \sim \dot{q}^2, \quad R^2 \sim \sum_i \dot{q}_i, \quad R \sim E\left(\dot{q}^2\right)$$

Nach Kaden /5/ gilt:

$$E\left(\dot{q}(t)\cdot\dot{q}(t+\tau)\right) = -\frac{d^2}{d\tau^2}\ \rho_q(\tau)$$

Somit läßt sich die Fadingrate R darstellen als:

(12) $$R = C \cdot \sqrt{\frac{d^2}{d\tau^2}\ \rho_q(\tau)/_{\tau=0}}$$

Für die AKF der Registriergröße q folgt daraus:

$$\rho_q = \rho_A^2 \cdot \frac{d^2}{d\tau^2}\ \rho_q(\tau) = 2\left(\frac{d\rho_A}{d\tau} + \rho_A \frac{d^2\rho_A}{d\tau^2}\right)$$

$$\rho_A = \rho_a = \frac{\Phi(\Phi,\tau)\cdot F(\tau)}{\Phi(\Phi,0)}$$

(13) $$\frac{d^2}{d\tau^2}\ \rho_q(\tau) = \frac{2}{\Phi^2(\Phi,0)}\left(\left[\frac{\partial\Phi}{\partial\tau}\cdot F+\Phi\frac{dF}{d\tau}\right]^2 + \Phi\cdot F\left[\frac{\partial^2\Phi}{\partial\tau^2}\cdot F+2\frac{\partial\Phi}{\partial\tau}\cdot\frac{dF}{d\tau}+\frac{d^2F}{d\tau^2}\Phi\right]\right)$$

Wird $\Phi(\Phi,\tau)$ als die Semifouriertransformierte des Turbulenzspektrums $\chi(\Phi,\omega)$ aufgefaßt (vgl. /1/, gilt:

$$\Phi(\Phi,\tau) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\chi(\Phi,\omega)e^{-i\omega\tau}d\omega$$

$$\Phi(\Phi,0) = \sigma_A^2$$

$$\frac{\partial}{\partial\tau}\ \Phi(\Phi,\tau)/_{\tau=0} = -\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\chi(\Phi,\omega)\omega\ d\omega = 0, \text{ falls } \chi(\Phi,\omega) = \chi(\Phi,-\omega) \text{ vorausgesetzt wird)}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial\tau^2}\ \Phi(\Phi,\tau)/_{\tau=0} = -\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\chi(\Phi,\omega)\omega^2 d\omega$$

$$F(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} p\left(\frac{v-m_{1v}}{\sigma_v}\right) e^{i(\vec{\rho},\vec{v})\tau} d^3v$$

$$F(0) = 1$$

$$\frac{dF(\tau)}{d\tau}\Big|_{\tau=0} = i \int_{-\infty}^{+\infty} (\vec{\rho}, \vec{v}) p\left(\frac{v-m_{1v}}{\sigma_v}\right) d^3v = i(\vec{\rho}, \vec{m}_{1v})$$

$$\frac{d^2}{d\tau^2} F(\tau)_{\tau=0} = -\int_{-\infty}^{+\infty} (\vec{\rho}, \vec{v})^2 \, p\left(\frac{\vec{v}-\vec{m}_{1v}}{\sigma_v}\right) d^3v = -\overline{(\vec{\rho}, \vec{v})^2}$$

Gl.(13) eingesetzt in (12) liefert somit:

$$(14) \qquad R = C \sqrt{(\vec{\rho}, \vec{m}_{1v})^2 + \overline{(\vec{\rho}, \vec{v})^2} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \chi(\vec{\rho},\omega)\omega^2 d\omega}$$

Mit anderen Worten - die Fadingrate ist nicht nur vom Turbulenzspektrum $\chi(\vec{\rho},\omega)$ abhängig, sondern auch von den ersten beiden Momenten der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung, dem Streuwinkel $\theta$ und ist umgekehrt proportional zur Wellenlänge $\lambda$.

Letzteres drückt die Tatsache aus, daß mit größer werdender Frequenz die Schwundrate zunimmt. Dieser Effekt wird tatsächlich beobachtet (s./6/). Im Dezimeter- und Zentimeterbereich sind die Fadingfluktuationen wesentlich stärker.

## 7.3 Das Leistungsspektrum

Nach dem Wiener-Chintschin-Theorem ist das Leistungsspektrum die Fourier-transformierte Autokorrelationsfunktion.
Demnach gilt für das Spektrum der komplexen Amplitude A:

$$s_A(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_A(\tau) e^{i\omega\tau}\, d\tau = \frac{1}{\Phi(\vec{\rho},0)} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(\vec{\rho},\tau) F(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau \;,$$

$$s_A(\omega) = \frac{1}{2\pi\sigma_A^2} \iiint_{-\infty}^{+\infty} d\tau\, d^3v\, d\omega'\, p\left(\frac{\vec{v}-\vec{m}_{1v}}{\sigma_v}\right) \chi(\vec{\rho},\omega')\, e^{i\left[(\vec{\rho},\vec{v})+\omega-\omega'\right]\tau},$$

$$s_A(\omega) = \frac{1}{2\pi\sigma_A^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} d^3v\, d\omega'\, p\left(\frac{v-m_{1v}}{\sigma_v}\right) \chi(\vec{\rho},\omega')\, \delta(\omega-\omega'+(\vec{\rho},\vec{v})),$$

$$s_A(\omega) = \frac{1}{\sigma_A^2} \int_{-\infty}^{+\infty} p\left(\frac{\vec{v}-\vec{m}_{1v}}{\sigma_v}\right) \chi\left(\vec{\rho},\omega+(\vec{\rho},\vec{v})\right) d^3v \;,$$

$$s_A(\omega) = \frac{1}{\sigma_A^2} E\left\{ \chi(\vec{\rho},\omega+(\vec{\rho},\vec{v}) \right\}.$$

Das normierte Leistungsspektrum der Amplitude ist hiernach der Erwartungswert des Turbulenzspektrums.
Für das Spektrum der Registriergröße q erhält man analog /1/:

$$s_q(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} s_A(\omega') a_A(\omega-\omega') d\omega' \qquad \text{(vgl./1/)}$$

$$s_q(\omega) = \frac{1}{2\pi\sigma_A^2} E\left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \chi\left(\vec{\rho},\omega'+(\vec{\rho},\vec{v})\right) \chi\left(\vec{\rho},\omega-\omega'+(\vec{\rho},\vec{v})\right) d\omega' \right\}$$

## 8. Meßergebnisse

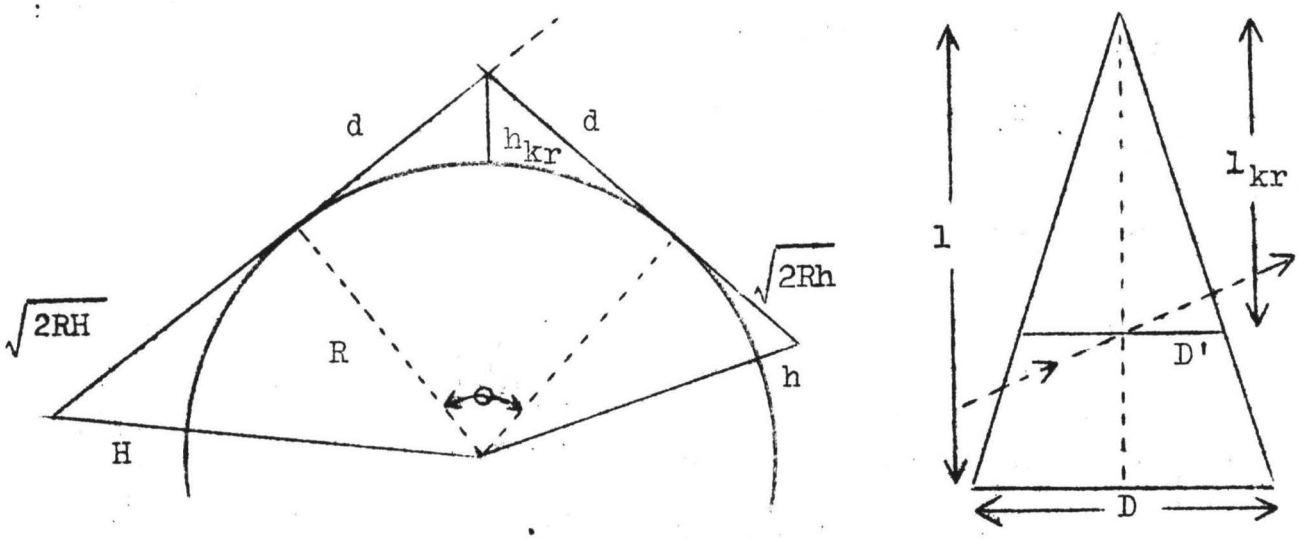
### 8.1 Messungen der Autokorrelationsfunktion (φ - Auswertung)

Für die Überreichweitenverbindungen Berlin - Torfhaus (Harz West, NDR, 89,9 MHz, 98,0 MHz) und Berlin - Ochsenkopf (BR, 96,0 MHz) (vgl. hierzu Geländeschnitt Abb. 6) wurden im Zeitraum Nov. 1963 bis M$rz 1964 mit Hilfe des eben beschriebenen Korrelators

ca. 800 Kreuz- und Autokorrelationsfunktionen von Ultrakurzwellenschwund aufgenommen.

Beispiele dieser Messungen sind in den Abb. 7,8,9,14,15 und 17 wiedergegeben.

Zunächst eine Abschätzung der Parameter aus (11):




$R_{ä}$ = 8500 $10^3$ m (Äquivalenter Erdradius, $R_{ä}$ = 4/3 R)
$l_1$ = 200 $10^3$ m (Entfernung Berlin-Torfhaus)
$l_2$ = 300 $10^3$ m (Entfernung Berlin-Ochsenkopf)
H = $10^3$ m (Sendeantennenhöhe)
h = 10 m (Empfangsantennenhöhe)
$l_{kr}$ : kritische Entfernung
$h_{kr}$ : kritische Höhe
$\vartheta$ : Streuwinkel

Den Streuwellenvektor erhält man aus:

$$|\mathfrak{p}| = |\mathfrak{p}_0 - \mathfrak{p}_1| = k \cdot \sqrt{2-2\cos\vartheta} = k \cdot \frac{2d}{R_{ä}} = \frac{k}{R_{ä}}\left(1 - \sqrt{2R_{ä}H} - \sqrt{2R_{ä}h}\right)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \lambda = 3 \text{ m}, \quad \mathfrak{p}_1^2 \approx 2 \cdot 10^{-4}\left[\frac{1}{m^2}\right], \quad \mathfrak{p}_2^2 \approx 1{,}5 \cdot 10^{-3}\left[\frac{1}{m^2}\right]$$

Für die Glockenkurve gilt:

$$e^{-\frac{1}{2}\beta^2} \approx 0 \rightarrow \Phi^2 \sigma_v^2 \tau_N^2 \approx \frac{9}{2}$$

$$\text{für } \sigma_v \approx 10 \text{ m/sec und } k = k_1 \rightsquigarrow \tau_N \approx 6 \text{ sec}$$

Der Kosinusterm aus (11) hat die erste Nullstelle bei $\frac{\pi}{2}$:

$$(\Phi, \vec{m}_{1v})\, \tau_{\frac{\pi}{2}} = \frac{\pi}{2}, \text{ für } m_{1v} \approx 20 \text{ m/sec}, \Phi = \Phi_1 \rightsquigarrow \tau_{\frac{\pi}{2}} \approx 2 \text{ sec}$$

Die normierte Autokorrelationsfunktion hat also die Form

$$(15) \qquad \rho_q(\tau) = e^{-a\tau^2} \cos^2 b\tau$$

wobei für $0 \leq \sigma_v \leq 10$ m/sec; $0 \leq m_{1v}$ 20 m/sec - a,b aus dem Intervall $0 \leq a \leq 0{,}15$ sec$^{-2}$; $0 \leq b \leq 0{,}8$ sec$^{-1}$ zu nehmen sind.

In Abb. 10 ist (15) dargestellt. Die Abbildungen 7,8,9 zeigen zum Vergleich gemessene Kurven. Zum Verlauf der Korrelationsfunktionen ist noch folgendes zu bemerken: Da Kurzzeitstatistik getrieben wird, ist nicht (15) sondern besser

$$\rho_q(\tau) = (1 - \frac{|\tau|}{T} e^{-a\tau^2}) \cos^2 b\tau, \quad T = \text{Beobachtungszeit},$$

als Ergebnis experimenteller Messungen zu erwarten (eine mathematische Begründung finden man bei Davenport /7/). Abb. 11 zeigt den Einfluß dieser Kurzzeitkorrektur auf den Verlauf der Gaußfunktion. Der lineare Abfall der Autokorrelationsfunktion in der Umgebung von $\tau = 0$ ist also kein Grund, die Gaußform der Kurven anzuzweifeln.

Die Steilheit des Abfalls wird von der Dispersion $\sigma_v^2$ der Windgeschwindigkeit bestimmt, während das zweite Maximum durch den Erwartungswert verursacht wird. Für grobe quantitative Abschätzungen ist das Maximum wenig repräsentativ, besser läßt sich dafür die erste Nullstelle des Kosinus bei $\frac{\pi}{2}$ verwenden.

Nachfolgende Tabelle zeigt einige so berechnete Windgeschwindigkeiten:

| | | $\tau_{\frac{\pi}{2}}$ (sec) | v (m/sec) |
|---|---|---|---|
| 31.1.64 | $12^{30}$ MEZ | 10,88 | 3,68 |
| | | 16,32 | 2,48 |
| | | 17,92 | 2,25 |
| | $16^{00}$ MEZ | 12,16 | 3,32 |
| | | 11,84 | 3,44 |
| | | 12,48 | 3,24 |
| | | 12,48 | 3,24 |
| | | 12,80 | 3,17 |
| | $19^{30}$ MEZ | 11,20 | 3,62 |
| | | 15,68 | 2,58 |
| | | 8,00 | 5,06 |

Nicht alle Korrelationsfunktionen zeigen das typische zweite Maximum, da $m_{1v}$ zu klein war, bzw. die Zeitverzögerung der Apparatur nicht ausreichte. Oft sind durch überlagerte Störungen (alle Störungen überlagern sich additiv) auch die Nullstellen nicht eindeutig festzulegen. Die tabellierten Geschwindigkeiten erscheinen zu niedrig gegenüber den zur gleichen Zeit gemessenen Windgeschwindigkeiten der meteorologischen Bodenstationen (vgl. Abb. 18). Zu berücksichtigen ist jedoch, daß $\Phi$ im wesentlichen eine z-Komponente und $\vec{m}_{1v}$ eine x-y-Komponente haben. Das heißt, der Richtungskosinus ist bei der Abschätzung noch nicht mit einbezogen, so daß sich zu niedrige Geschwindigkeiten ergeben.

Aus dem Abfall der Korrelationsfunktion auf ihren 0,6-fachen Wert ($1/\sqrt{e}$) kann weiterhin $\sigma_v$ grob abgeschätzt werden:

$$\Phi^2 \sigma_v^2 \tau_{0,}{}^2 = \frac{1}{2} \quad \rightarrow \quad \sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}\, \tau_{0,6}\, \Phi}$$

Beispiele für gemessene Werte:

| | | $\tau_{0,6}$ (sec) |
|---|---|---|
| 2.2.64 (89,9 MHz) | $3^{20}$ MEZ | 4,0 |
| | | 5,6 |
| | | 6,0 |
| | | 5,6 |
| | | 6,4 |
| | | 8,0 |
| | | 8,0 |
| | | 10,0 |

$E(\tau_{0,6}) = 6,72$ sec

$\sigma_v \approx 7,5$ m/sec

| | | $\tau_{0,6}$ (sec) |
|---|---|---|
| 31,1.64 (96,0 MHz) | $12^{30}$ MEZ | 2,72 |
| | | 2,88 |
| | | 3,52 |
| | | 3,84 |
| | | 3,84 |
| | | 4,96 |
| | | 5,60 |
| | | 8,00 |
| | | 8,00 |
| | | 8,48 |
| | | 9,60 |

$E(\tau_{0,6}) = 5,58$ sec

$\sigma_v \approx 3,2$ m/sec

Zum Vergleich die von den meteorologischen Bodenstationen entlang der Strecken gemessenen Windgeschwindigkeiten und die daraus berechnete Standardabweichung:

2.2.64 $3^{00}$ MEZ (89,9 MHz)

| | v(m/sec) |
|---|---|
| Bln.-Dahlem | 8,00 |
| Bln.-Tempelhof | 12,50 |
| Lindenberg | 11,75 |
| Magdeburg | 16,50 |
| Wernigerode | 17,00 |

$\bar{v} = 13{,}15$

$\overline{v}^2 = 172{,}92$

$\overline{v^2} = 183{,}91$

$\sigma_v = 3{,}31$ m/sec

31.1.64 $12^{30}$ MEZ (96,0 MHz)

| | v(m/sec) |
|---|---|
| Bln.-Dahlem | 4,5 |
| Bln.-Tempelhof | 6,0 |
| Lindenberg | 6,0 |
| Wittenberge | 6,0 |
| Leipzig | 7,0 |
| Gera | 4,0 |
| Plauen | 3,0 |
| Hof | 3,0 |

$\bar{v} = 4{,}19$; $\overline{v}^2 = 17{,}55$

$\overline{v^2} = 26{,}4$; $\sigma_v = 3$ m/sec

Aus den am 2.2.64 $3^{00}$ Uhr MEZ über Kreuzkorrelationsfunktionen berechneten Windgeschwindigkeiten (Abb. 16,17) wurde eine Standardabweichung von $\sigma_v \approx 9$ m/sec ermittelt.

Auch hier sind die Ergebnisse nur sehr grobe Abschätzungen! Der Abfall der Gaußkurve wird vom Kosinus bereits stark beeinflußt, auch wenn sich noch keine Welligkeit zeigt (vgl. Abb. 10). Jedoch auch hier stimmt die Größenordnung der Ergebnisse recht gut mit meteorologischen Messungen überein.

Die Form der Korrelationsfunktionen wird sehr stark von örtlichen Störungen verändert. Wie bereits erwähnt, addieren sich dann die Autokorrelationsfunktion von Störung und UKW-Fading. Die AKF von Flugzeugfading ist in erster Näherung kosinusförmig /1/. Überlagern sich Flugzeugschwund und UKW-Fading, so erhält man die charakteristische Autokorrelationsfunktion eines verrauschten Sinussignales. Die Abb. 12 und 13 zeigen typische Aufnahmen.

## 8.2 Messungen der Kreuzkorrelationsfunktion

Um quantitative Aussagen aus der Kreuzkorrelationsfunktion zu gewinnen, verwenden wir folgende Anschauung: Betrachtet man zwei um D auseinanderstehende Dipole senkrecht zur Verbindungslinie Empfänger-Sender (Abb. 14 und 6) so wird ein beide Antennen überstreichendes Interferenzrelief ähnliche Fadingsignale an den Empfängerausgängen liefern. Obwohl sich beim Überstreichen der Antennen die Schwunderscheinung zeitlich ändert, wird mit einem Kreuzkorrelator der Zeitabstand $\tau_o$ größter Ähnlichkeit bestimmbar sein. Kennt man die durchlaufene Wegstrecke S der Fluktuationen, so kann daraus die Windgeschwindigkeit berechnet werden. Dabei wird angenommen, daß das elektromagnetische Feld nur im Streuvolumen beeinflußbar ist.

Für die Geometrie gilt (vgl. Zeichnung auf S. 28 und Abb. 14):

$$D' = \frac{l_{kr}}{l} D, \qquad d = \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{2RH}-\sqrt{2Rh}\right)$$

$$l_{kr} = d+\sqrt{2RH}, \quad h_{kr} = \frac{1}{2}\frac{d^2}{R}, \quad \frac{l_{kr}}{l} = \frac{1}{2}\left(1+\frac{\sqrt{2RH}-\sqrt{2Rh'}}{l}\right)$$

Bei Berücksichtigung der Strahlenkrümmung ist R durch $R_{ä} = 4/3\ R$ zu ersetzen. Der durchlaufende Weg S für die Windrichtung $\alpha$ ist also:

$$S = \frac{D'}{\cos\alpha} = \frac{D}{\cos\alpha} \cdot \frac{l_{kr}}{l}, \qquad v = \frac{S}{\tau_o}$$

Bei bekanntem $\alpha$ läßt sich daraus die Windgeschwindigkeit ermitteln.

Abb. 15 zeigt die typische Aufnahme einer Kreuzkorrelationsfunktion. $\tau_0$ ist der Abszissenabstand des Maximums vom Ursprung. In Abb. 16 sind gemessene Kreuzkorrelationsfunktionen wiedergegeben, die im Zeitraum von zwanzig Minuten aufgenommen worden sind. Die entsprechenden $\tau_0$ Fluktuationen zeigt Abb. 17. Der Erwartungswert der Windgeschwindigkeit beträgt $\overline{v}$ = 14 m/sec, die zugehörige Standardabweichung $\sigma_v$ = 9 m/sec. Aus Abb. 18 läßt sich ablesen, welche Geschwindigkeiten die Meteorologen zur gleichen Zeit registriert haben. Es sind die von den meteorologischen Bodenstationen entlang der Meßstrecke Berlin-Ochsenkopf und die über die Kreuzkorrelationsfunktion ermittelten Windgeschwindigkeiten für insgesamt vier Tage eingezeichnet. Die über den Korrelator gemessenen Geschwindigkeiten liegen im allgemeinen über den Bodenwerten. Das erscheint plausibel, da die kritische Höhe des Streuvolumens ca. 400 m beträgt (vgl. Streckenprofil Abb. 6) und die wiedergegebenen meteorologischen Daten keine Sondenmessungen sind. Zum Vergleich wurden Windgeschwindigkeiten für ca. 600 m Höhe (interpoliert aus Sondenmessungen der Station Berlin-Tempelhof) eingezeichnet. Sie liegen eindeutig darüber.

Abb. 19 zeigt nochmal eindrucksvoll das Zusammenspiel zwischen der Windgeschwindigkeit und den Korrelationsfunktionen. Eine Windbö verursachte nacheinander die dargestelltem Auto- und Kreuzkorrelationsfunktionen. Der Zeitabstand zwischen den Messungen beträgt ca. 50 sec. Die mittlere Autokorrelationsfunktion zeigt das charakteristische zweite Maximum für größere Windgeschwindigkeiten; die zum gleichen Zeitpunkt aufgenommene Kreuzkorrelationsfunktion hat entsprechend ein kleines $\tau_0$. Die anderen Autokorrelationsfunktionen zeigen kein zweites Maximum und einen weniger steilen Abfall, dafür aber die zugehörigen Kreuzkorrelationsfunktionen ein größeres $\tau_0$.

Inwieweit die Ergebnisse einer Fadingstatistik als "meteorologische Parameter" zur ständigen Abschätzung charakteristischer Größen der atmosphärischen Turbulenz verwendet werden können soll hier nicht erörtert werden. (Auf jeden Fall ist das Fading im m-, dm- und cm-Bereich - möglicherweise die "Szintillation der Sterne" - für die Meteorologen eine, wenn nicht die einzige, Informationsquelle über die Turbulenz der bodennahen Schichten der Atmosphäre.) Die Untersuchungen sind als Beitrag zum Verständnis der UKW-Streuausbreitung anzu-

## 8.2 Messungen der Kreuzkorrelationsfunktion

Um quantitative Aussagen aus der Kreuzkorrelationsfunktion zu gewinnen, verwenden wir folgende Anschauung: Betrachtet man zwei um D auseinanderstehende Dipole senkrecht zur Verbindungslinie Empfänger-Sender (Abb. 14 und 6) so wird ein beide Antennen überstreichendes Interferenzrelief ähnliche Fadingsignale an den Empfängerausgängen liefern. Obwohl sich beim Überstreichen der Antennen die Schwunderscheinung zeitlich ändert, wird mit einem Kreuzkorrelator der Zeitabstand $\tau_o$ größter Ähnlichkeit bestimmbar sein. Kennt man die durchlaufene Wegstrecke S der Fluktuationen, so kann daraus die Windgeschwindigkeit berechnet werden. Dabei wird angenommen, daß das elektromagnetische Feld nur im Streuvolumen beeinflußbar ist.

Für die Geometrie gilt (vgl. Zeichnung auf S. 28 und Abb. 14):

$$D' = \frac{l_{kr}}{l} D, \qquad d = \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{2RH}-\sqrt{2Rh}\right)$$

$$l_{kr} = d+\sqrt{2RH}\,, \quad h_{kr} = \frac{1}{2}\,\frac{d^2}{R}\,, \quad \frac{l_{kr}}{l} = \frac{1}{2}\left(1+\frac{\sqrt{2RH}-\sqrt{2Rh}}{l}\right)$$

Bei Berücksichtigung der Strahlenkrümmung ist R durch $R_{\ddot{a}} = 4/3\ R$ zu ersetzen. Der durchlaufende Weg S für die Windrichtung $\alpha$ ist also:

$$S = \frac{D'}{\cos\alpha} = \frac{D}{\cos\alpha}\cdot\frac{l_{kr}}{l}\,, \qquad v = \frac{S}{\tau_o}$$

Zum Vergleich die von den meteorologischen Bodenstationen entlang der Strecken gemessenen Windgeschwindigkeiten und die daraus berechnete Standardabweichung:

2.2.64 $3^{00}$ MEZ (89,9 MHz)

| | v(m/sec) |
|---|---|
| Bln.-Dahlem | 8,00 |
| Bln.-Tempelhof | 12,50 |
| Lindenberg | 11,75 |
| Magdeburg | 16,50 |
| Wernigerode | 17,00 |

$\bar{v} = 13,15$

$\overline{v}^2 = 172,92$

$\overline{v^2} = 183,91$

$\sigma_v = 3,31$ m/sec

31.1.64 $12^{30}$ MEZ (96,0 MHz)

| | v(m/sec) |
|---|---|
| Bln.-Dahlem | 4,5 |
| Bln.-Tempelhof | 6,0 |
| Lindenberg | 6,0 |
| Wittenberge | 6,0 |
| Leipzig | 7,0 |
| Gera | 4,0 |
| Plauen | 3,0 |
| Hof | 3,0 |

$\bar{v} = 4,19$; $\overline{v}^2 = 17,55$

$\overline{v^2} = 26,4$; $\sigma_v = 3$ m/sec

Aus den am 2.2.64 $3^{00}$ Uhr MEZ über Kreuzkorrelationsfunktionen berechneten Windgeschwindigkeiten (Abb. 16,17) wurde eine Standardabweichung von $\sigma_v \approx 9$ m/sec ermittelt.

Auch hier sind die Ergebnisse nur sehr grobe Abschätzungen! Der Abfall der Gaußkurve wird vom Kosinus bereits stark beeinflußt, auch wenn sich noch keine Welligkeit zeigt (vgl. Abb. 10). Jedoch auch hier stimmt die Größenordnung der Ergebnisse recht gut mit meteorologischen Messungen überein.

Die Form der Korrelationsfunktionen wird sehr stark von örtlichen Störungen verändert. Wie bereits erwähnt, addieren sich dann die Autokorrelationsfunktion von Störung und UKW-Fading. Die AKF von Flugzeugfading ist in erster Näherung kosinusförmig /1/. Überlagern sich Flugzeugschwund und UKW-Fading, so erhält man die charakteristische Autokorrelationsfunktion eines verrauschten Sinussignales. Die Abb. 12 und 13 zeigen typische Aufnahmen.

## 8.2 Messungen der Kreuzkorrelationsfunktion

Um quantitative Aussagen aus der Kreuzkorrelationsfunktion zu gewinnen, verwenden wir folgende Anschauung: Betrachtet man zwei um D auseinanderstehende Dipole senkrecht zur Verbindungslinie Empfänger-Sender (Abb. 14 und 6) so wird ein beide Antennen überstreichendes Interferenzrelief ähnliche Fadingsignale an den Empfängerausgängen liefern. Obwohl sich beim Überstreichen der Antennen die Schwunderscheinung zeitlich ändert, wird mit einem Kreuzkorrelator der Zeitabstand $\tau_o$ größter Ähnlichkeit bestimmbar sein. Kennt man die durchlaufene Wegstrecke S der Fluktuationen, so kann daraus die Windgeschwindigkeit berechnet werden. Dabei wird angenommen, daß das elektromagnetische Feld nur im Streuvolumen beeinflußbar ist.

Für die Geometrie gilt (vgl. Zeichnung auf S. 28 und Abb. 14):

$$D' = \frac{l_{kr}}{l} D, \qquad d = \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{2RH}-\sqrt{2Rh}\right)$$

$$l_{kr} = d+\sqrt{2RH}\,, \quad h_{kr} = \frac{1}{2}\,\frac{d^2}{R}\,, \quad \frac{l_{kr}}{l} = \frac{1}{2}\left(1+\frac{\sqrt{2RH}-\sqrt{2Rh}}{l}\right)$$

Bei Berücksichtigung der Strahlenkrümmung ist R durch $R_{ä} = 4/3\ R$ zu ersetzen. Der durchlaufende Weg S für die Windrichtung $\alpha$ ist also:

$$S = \frac{D'}{\cos\alpha} = \frac{D}{\cos\alpha}\cdot\frac{l_{kr}}{l}\,, \qquad v = \frac{S}{\tau_o}$$

Bei bekanntem $\alpha$ läßt sich daraus die Windgeschwindigkeit ermitteln.

Abb. 15 zeigt die typische Aufnahme einer Kreuzkorrelationsfunktion. $\tau_0$ ist der Abszissenabstand des Maximums vom Ursprung. In Abb. 16 sind gemessene Kreuzkorrelationsfunktionen wiedergegeben, die im Zeitraum von zwanzig Minuten aufgenommen worden sind. Die entsprechenden $\tau_0$ Fluktuationen zeigt Abb. 17. Der Erwartungswert der Windgeschwindigkeit beträgt $\bar{v}$ = 14 m/sec, die zugehörige Standardabweichung $\sigma_v$ = 9 m/sec. Aus Abb. 18 läßt sich ablesen, welche Geschwindigkeiten die Meteorologen zur gleichen Zeit registriert haben. Es sind die von den meteorologischen Bodenstationen entlang der Meßstrecke Berlin-Ochsenkopf und die über die Kreuzkorrelationsfunktion ermittelten Windgeschwindigkeiten für insgesamt vier Tage eingezeichnet. Die über den Korrelator gemessenen Geschwindigkeiten liegen im allgemeinen über den Bodenwerten. Das erscheint plausibel, da die kritische Höhe des Streuvolumens ca. 400 m beträgt (vgl. Streckenprofil Abb. 6) und die wiedergegebenen meteorologischen Daten keine Sondenmessungen sind. Zum Vergleich wurden Windgeschwindigkeiten für ca. 600 m Höhe (interpoliert aus Sondenmessungen der Station Berlin-Tempelhof) eingezeichnet. Sie liegen eindeutig darüber.

Abb. 19 zeigt nochmal eindrucksvoll das Zusammenspiel zwischen der Windgeschwindigkeit und den Korrelationsfunktionen. Eine Windbö verursachte nacheinander die dargestelltem Auto- und Kreuzkorrelationsfunktionen. Der Zeitabstand zwischen den Messungen beträgt ca. 50 sec. Die mittlere Autokorrelationsfunktion zeigt das charakteristische zweite Maximum für größere Windgeschwindigkeiten; die zum gleichen Zeitpunkt aufgenommene Kreuzkorrelationsfunktion hat entsprechend ein kleines $\tau_0$. Die anderen Autokorrelationsfunktionen zeigen kein zweites Maximum und einen weniger steilen Abfall, dafür aber die zugehörigen Kreuzkorrelationsfunktionen ein größeres $\tau_0$.

Inwieweit die Ergebnisse einer Fadingstatistik als "meteorologische Parameter" zur ständigen Abschätzung charakteristischer Größen der atmosphärischen Turbulenz verwendet werden können soll hier nicht erörtert werden. (Auf jeden Fall ist das Fading im m-, dm- und cm-Bereich - möglicherweise die "Szintillation der Sterne" - für die Meteorologen eine, wenn nicht die einzige, Informationsquelle über die Turbulenz der bodennahen Schichten der Atmosphäre.) Die Untersuchungen sind als Beitrag zum Verständnis der UKW-Streuausbreitung anzu-

sehen, und als Aussage darüber, inwieweit aus der Fadingstatistik eine Modellvorstellung bestätigt werden kann, bzw. welche meteorologischen Daten sich in den Feldstärkefluktuationen wiederspiegeln.

Schrifttum

/1/ Langner, P.
Beitrag zur Statistik der UKW-Ausbreitung.
Dissertation, Techn. Universität Berlin, 1965

/2/ Jaglom, A.M.
Einführung in die Theorie stationärer Zufallsfunktionen.
Akademie-Verlag Berlin 1950

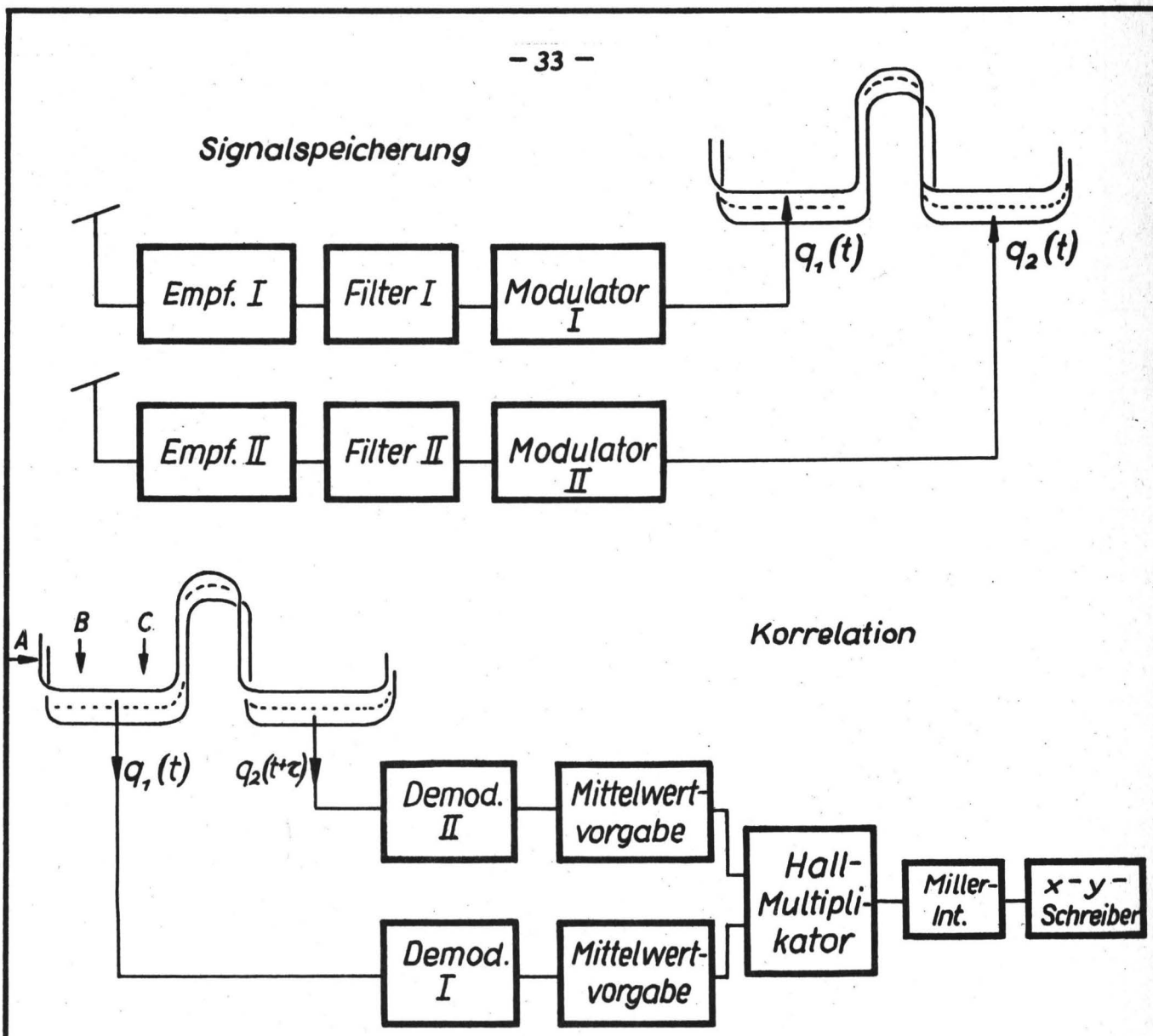
/3/ Obuchow, A.M.
Statistische Beschreibung stetiger Felder.
Enthalten in: Sammelband zur statistischen Theorie
der Turbulenz, Akademie-Verlag Berlin 1958.

/4/ Siemens Halbleiter, Schaltbeispiele 1960.

/5/ Lange, F.H.
Korrelationselektronik
VEB Verlag Technik Berlin 1959.

/6/ Großkopf, J.
Schwunduntersuchungen im Höchstfrequenzbereich.
Techn. Bericht des FTZ Nr. 5572, 1961.

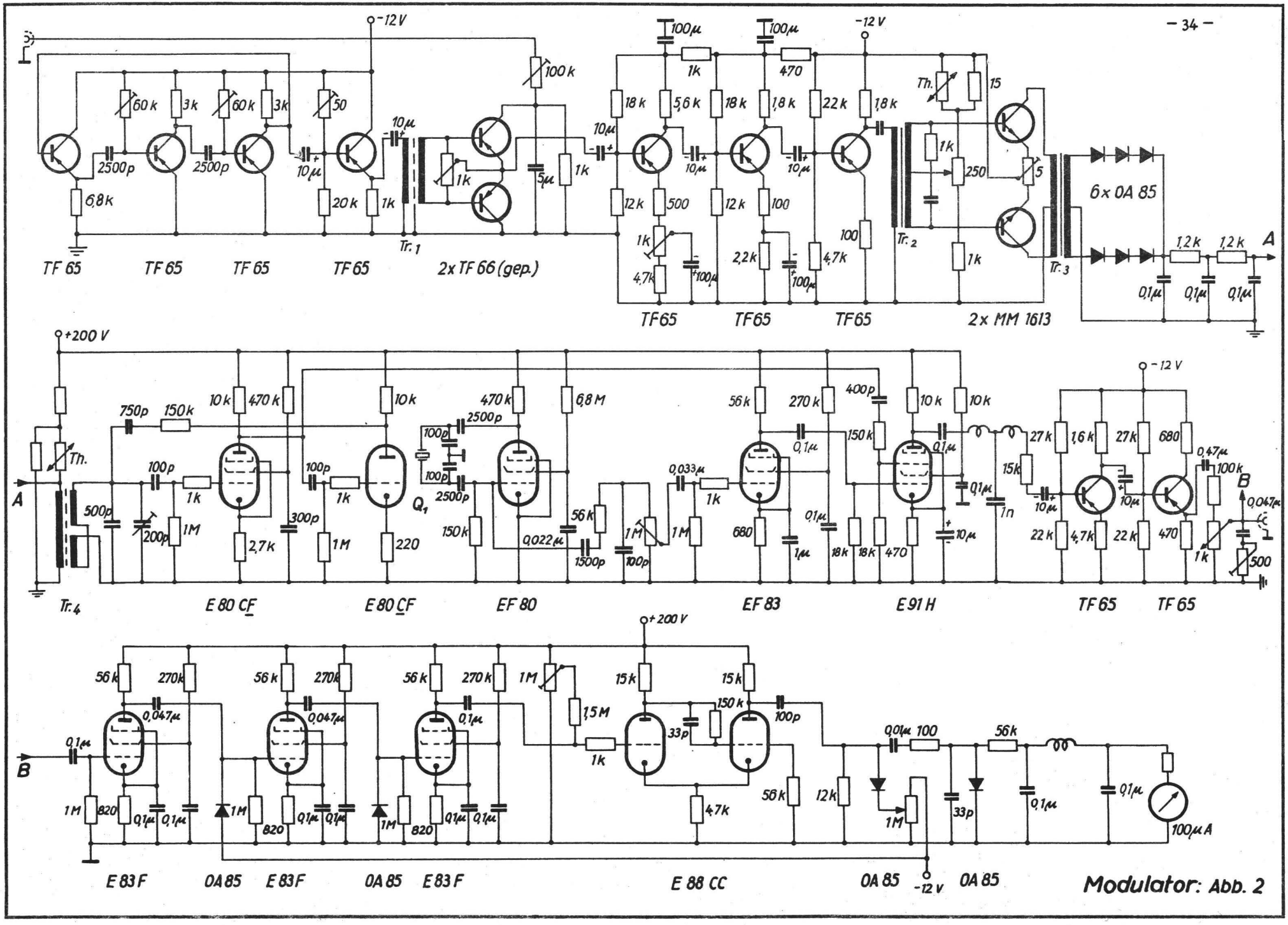
/7/ Davenport, W.B. und Root, W.L.
Random Signals and Noise.
McGraw-Hill Book Company, New York 1958.




Blockschaltbild des Korrelators

Abb. 1

J.64




**Modulator: Abb. 2**

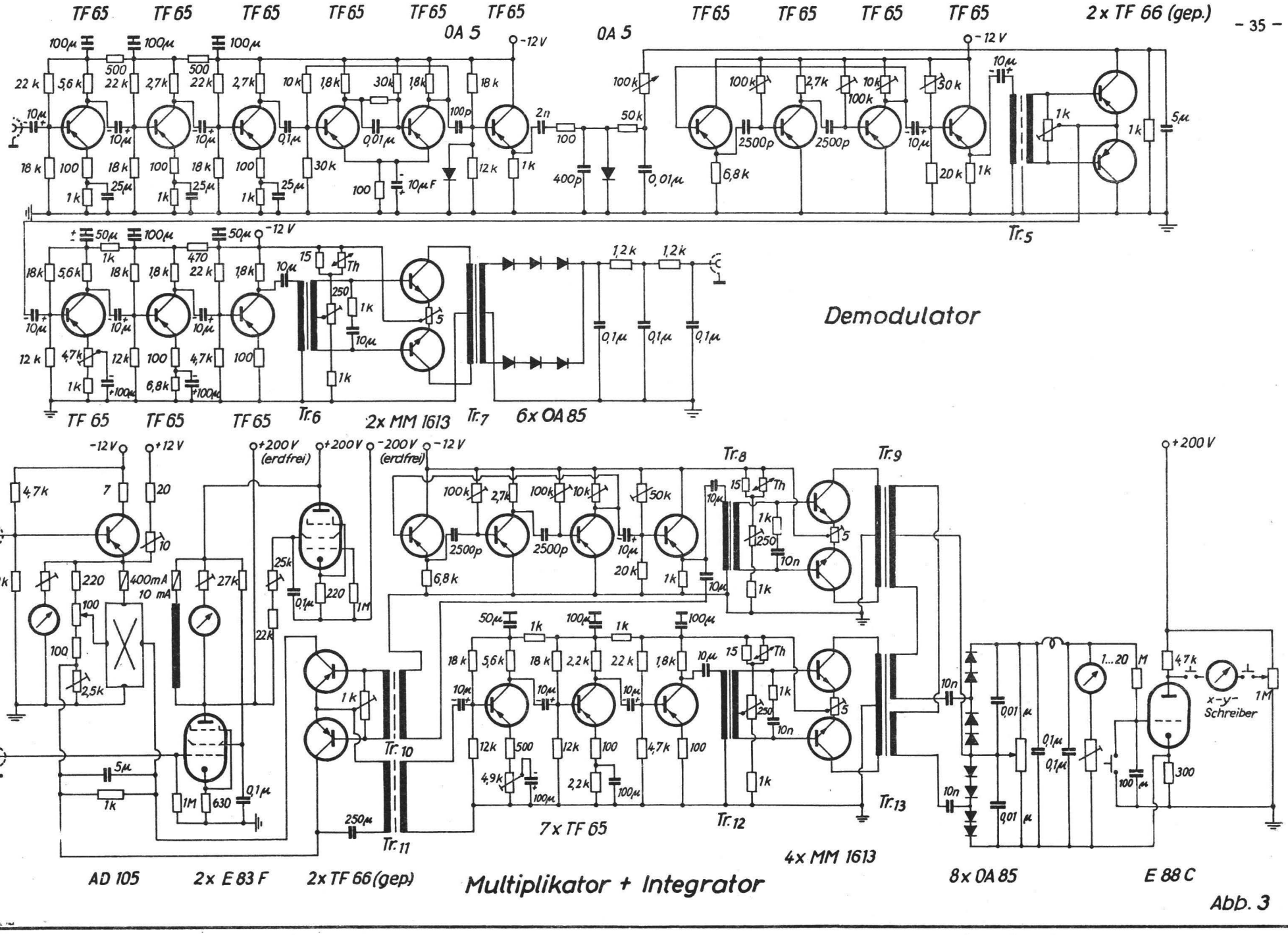

TF 65
TF 65
TF 65
TF 65
TF 65
TF 65
OA 5
OA 5
TF 65
TF 65
TF 65
TF 65
2 x TF 66 (gep.)
-12 V
Tr. 5
Demodulator
TF 65
TF 65
TF 65
Tr. 6
2x MM 1613
Tr. 7
6x OA 85
-12 V
+12 V
+200 V (erdfrei)
-200 V (erdfrei)
Tr. 8
Tr. 9
Tr. 10
Tr. 11
Tr. 12
Tr. 13
7 x TF 65
4x MM 1613
x-y-Schreiber
AD 105
2x E 83 F
2x TF 66 (gep)
Multiplikator + Integrator
8x OA 85
E 88 C

Abb. 3

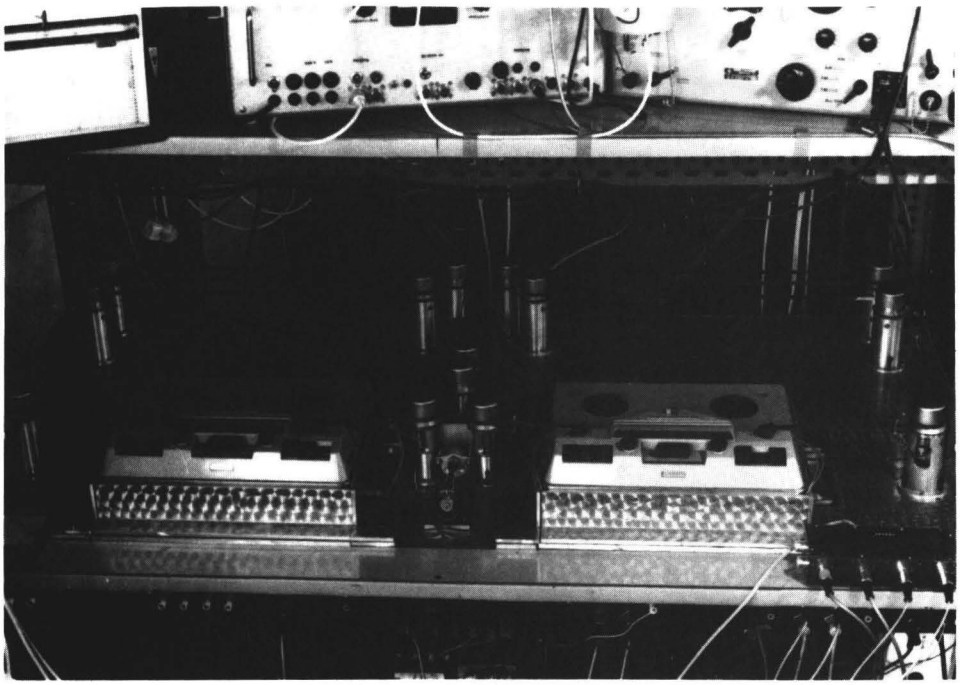


Abb. 4

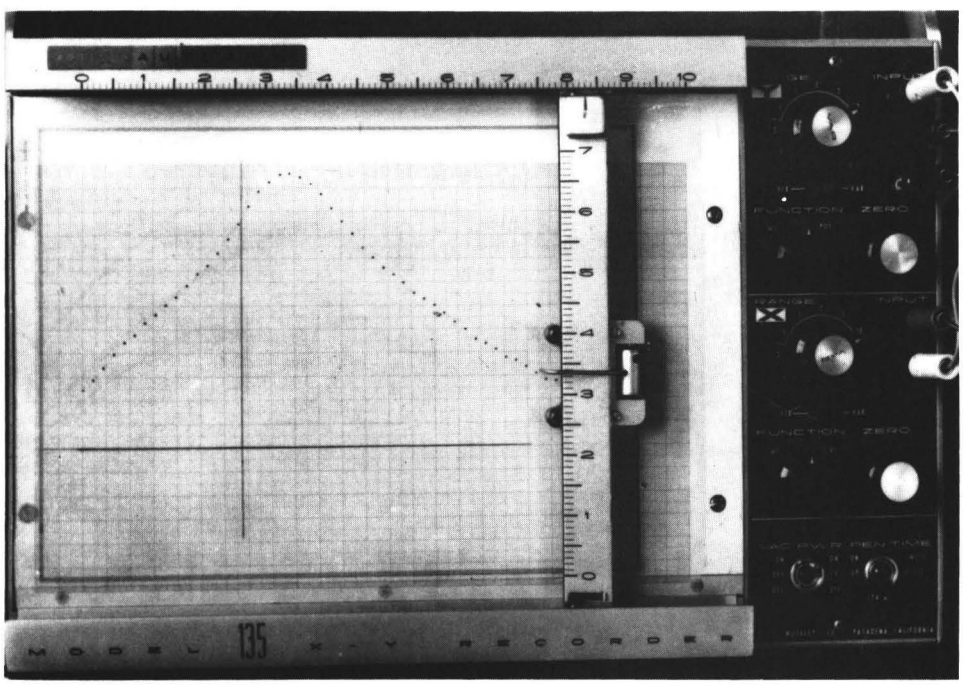



Abb. 5

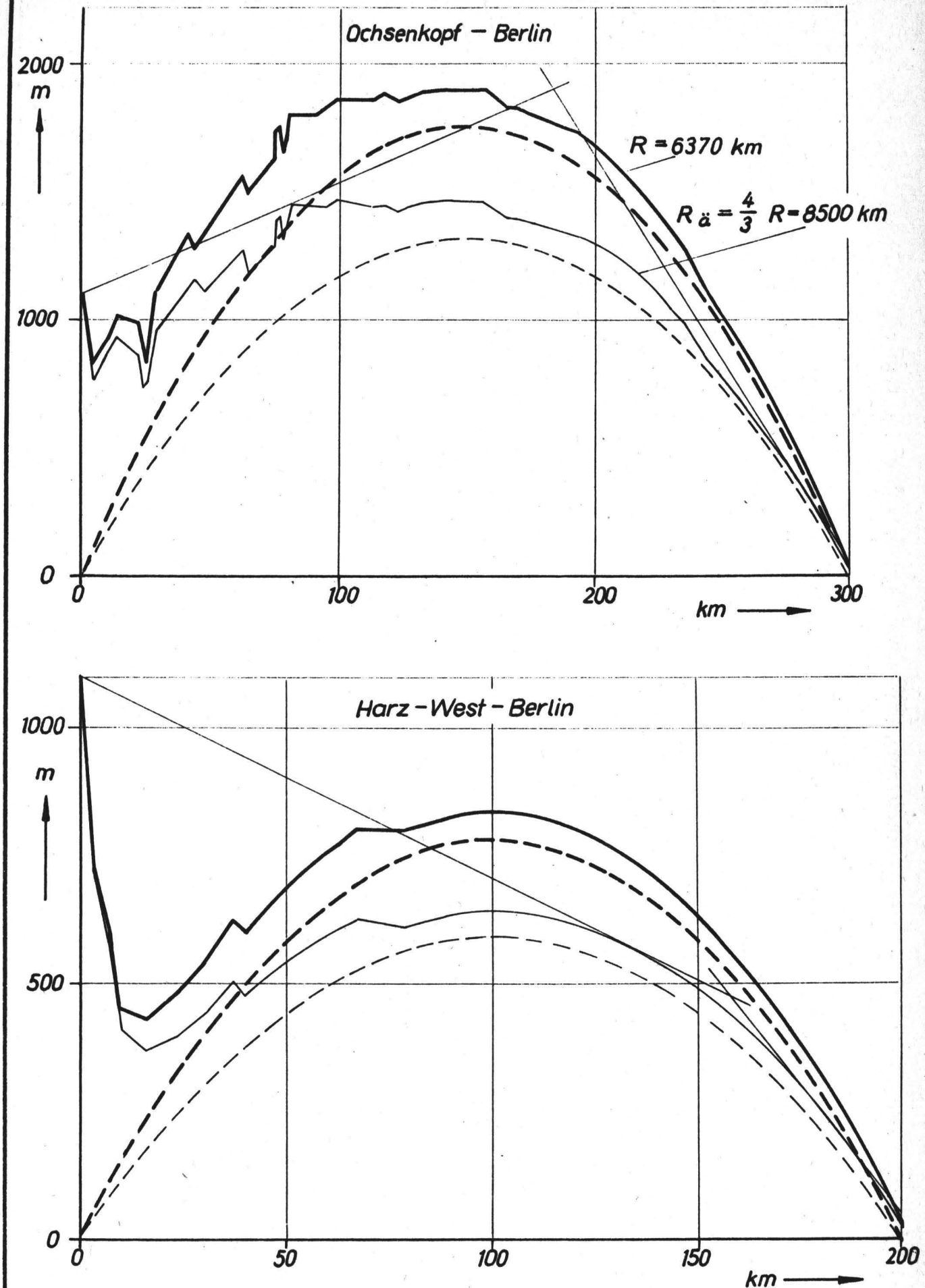
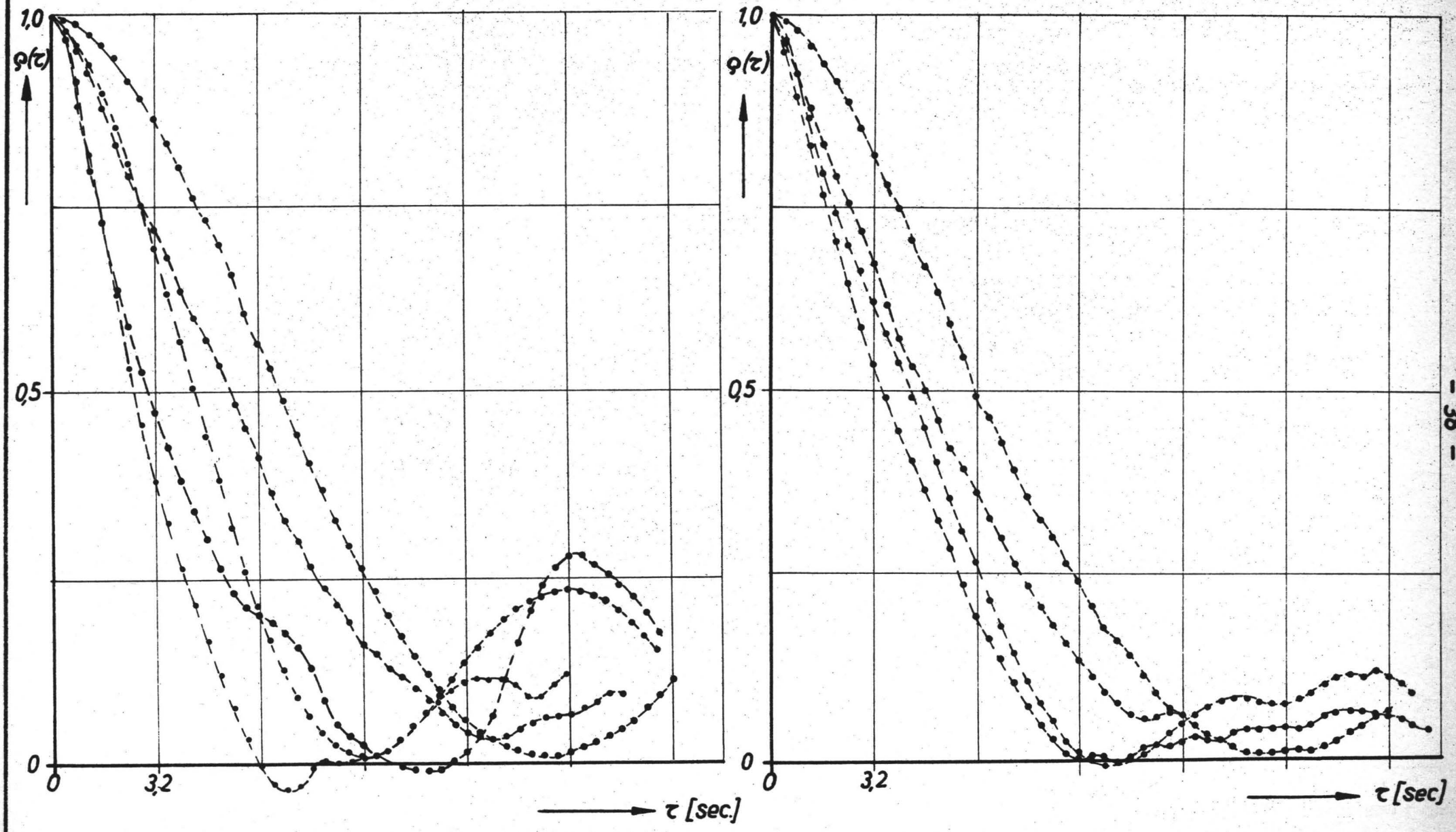
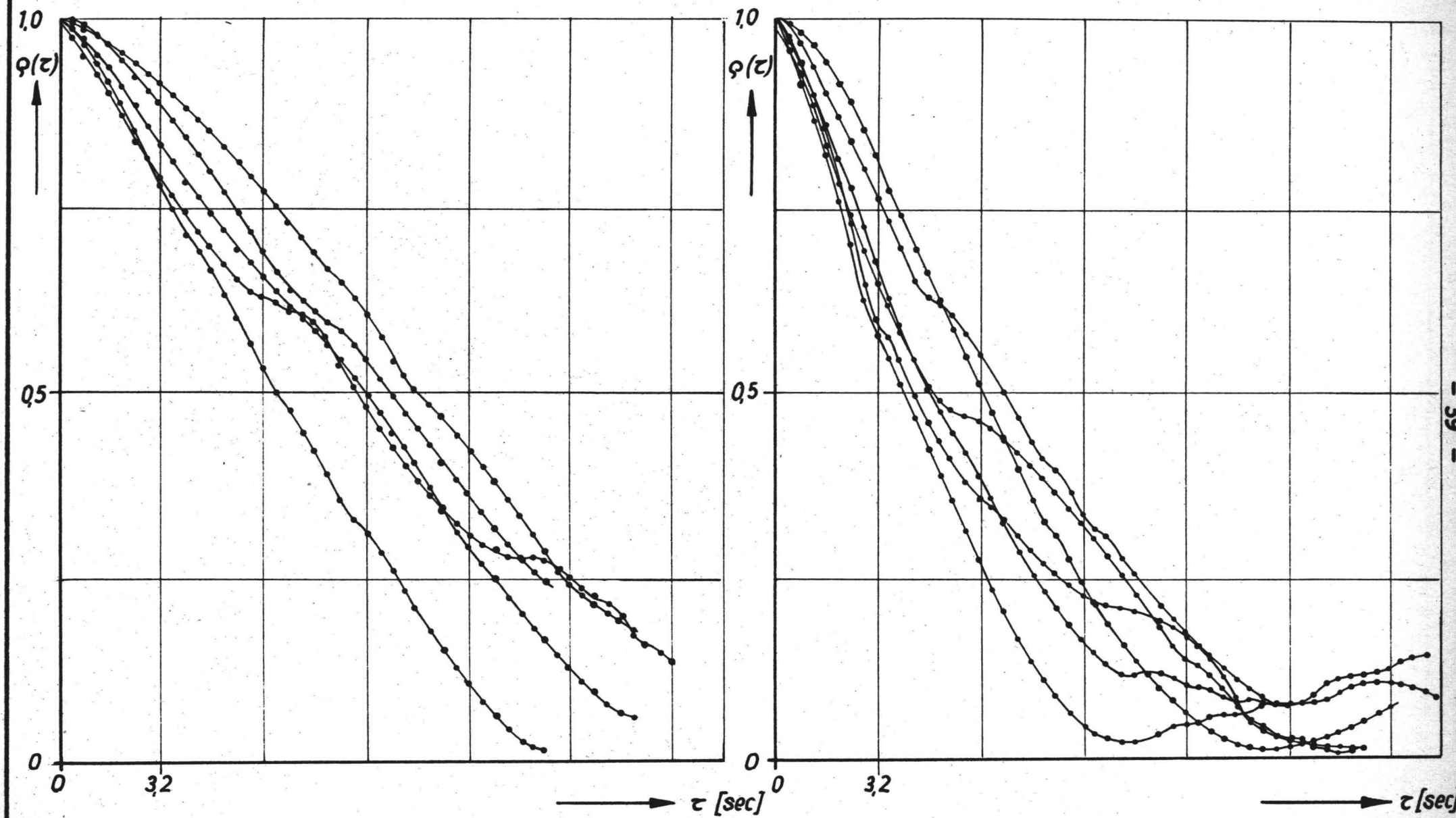



**Abb. 6 :** Geländeschnitte der Strecken Berlin–Harz–West, Berlin–Ochsenkopf



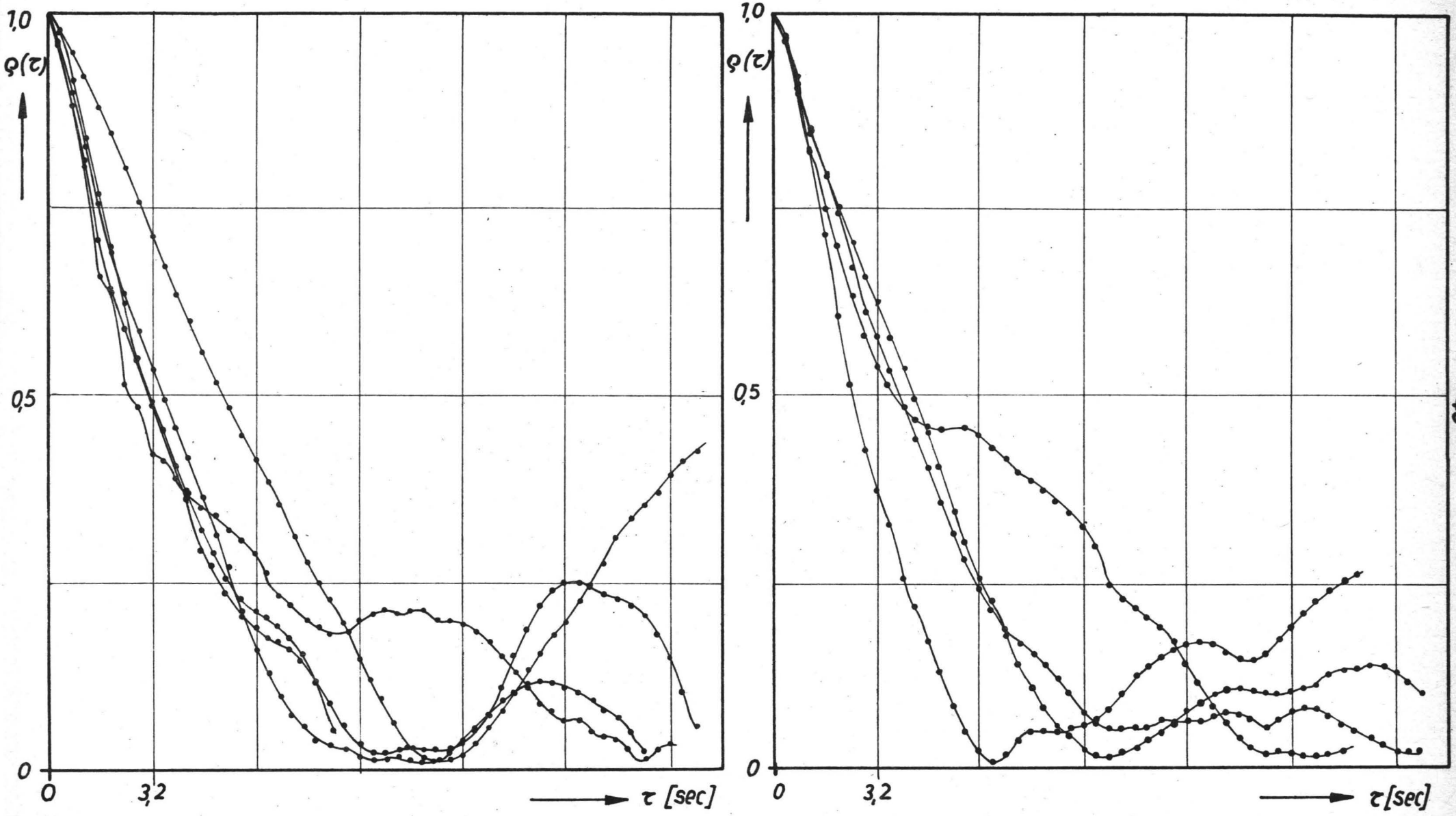

Gemessene Autokorrelationsfunktionen [$\Delta\tau = 0{,}4$ sec]

Abb. 7




Korrelationsfunktionen einer halben Stunde
31. 1. 1964 $12^{30}$ 96,0 MHz $f_0$ = 10 Hz

Abb. 8




Korrelationsfunktionen vom 31. 1. 1964 $16^{00}$ und $19^{30}$

**Abb. 9**

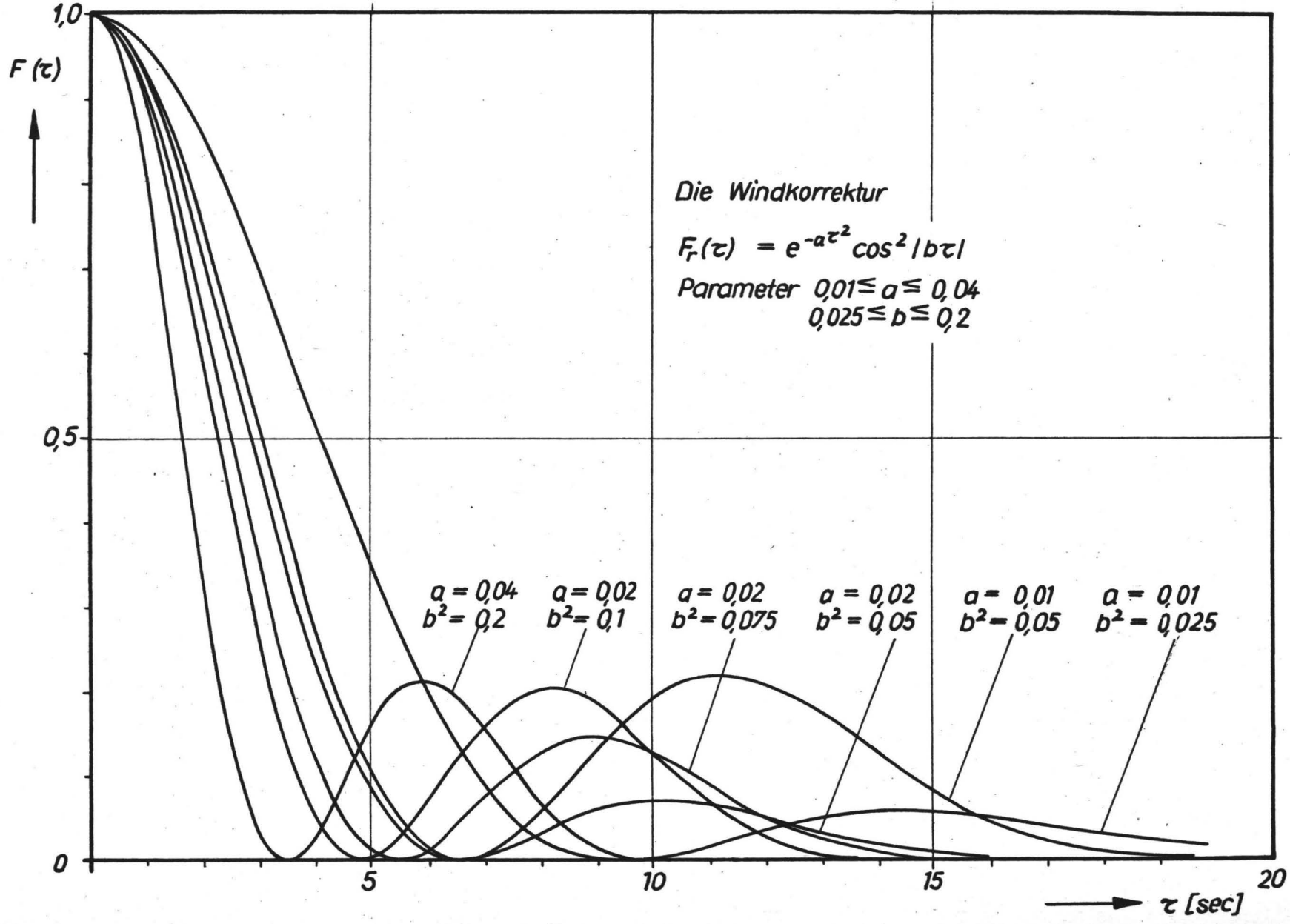

1,0
F (τ)
0,5
0
5
10
15
20
τ [sec]
Die Windkorrektur
$F_r(\tau) = e^{-a\tau^2} \cos^2 |b\tau|$
Parameter $0{,}01 \leq a \leq 0{,}04$
$0{,}025 \leq b \leq 0{,}2$
$a = 0{,}04$ $b^2 = 0{,}2$
$a = 0{,}02$ $b^2 = 0{,}1$
$a = 0{,}02$ $b^2 = 0{,}075$
$a = 0{,}02$ $b^2 = 0{,}05$
$a = 0{,}01$ $b^2 = 0{,}05$
$a = 0{,}01$ $b^2 = 0{,}025$

Abb. 10

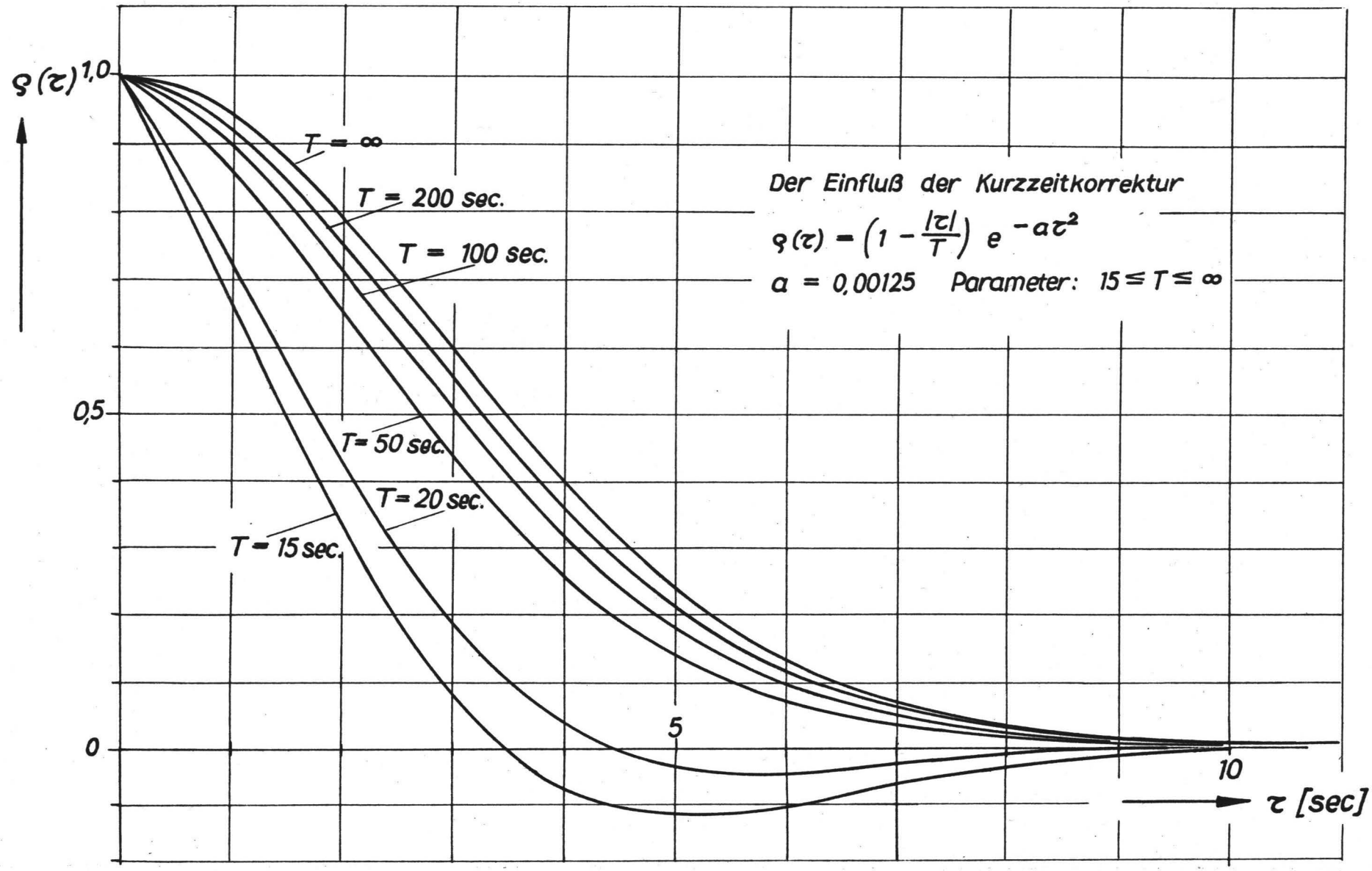
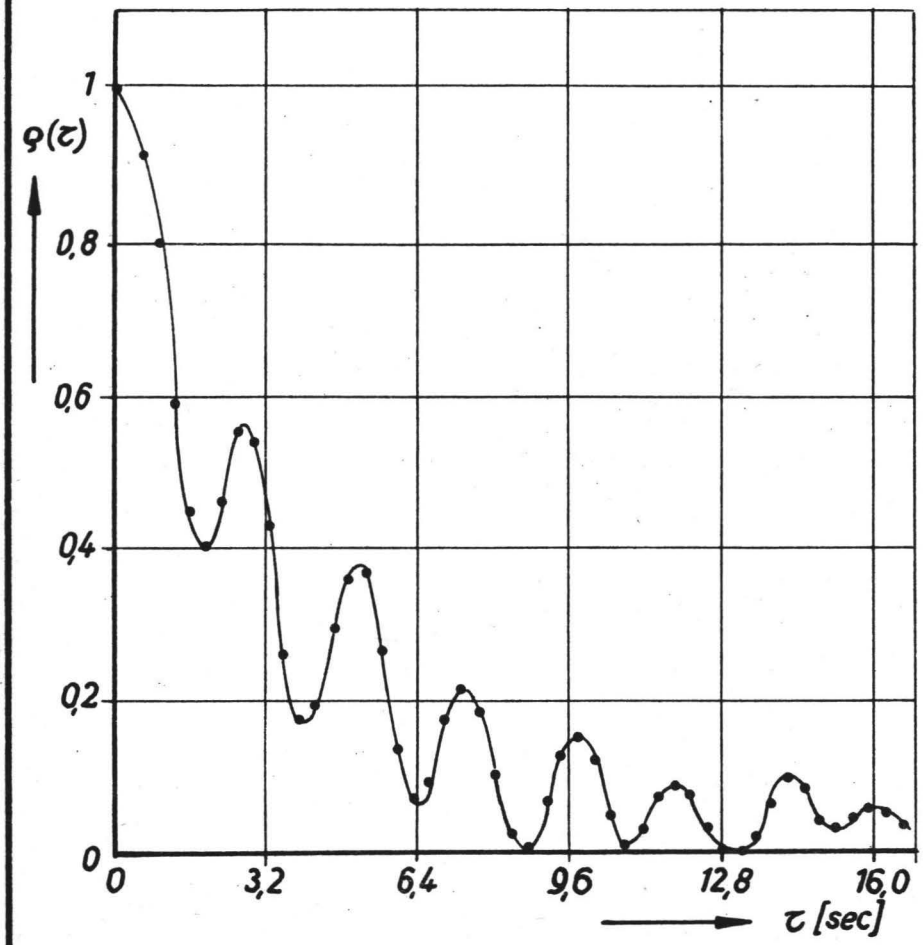
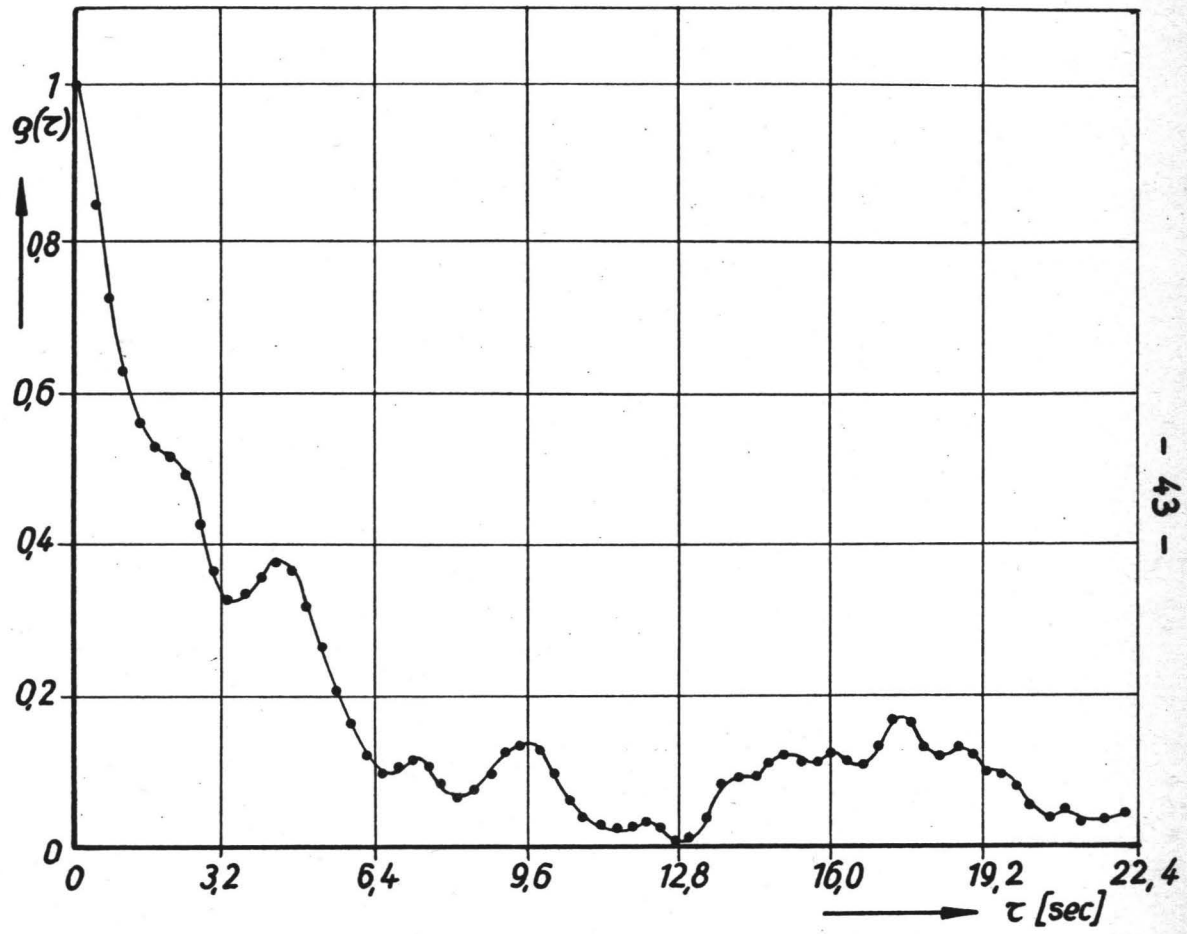

ϱ(τ)
1,0
0,5
0
T = ∞
T = 200 sec.
T = 100 sec.
T = 50 sec.
T = 20 sec.
T = 15 sec.
5
10
τ [sec]
Der Einfluß der Kurzzeitkorrektur
ϱ(τ) = (1 − |τ|/T) e^{−aτ²}
a = 0,00125 Parameter: 15 ≤ T ≤ ∞

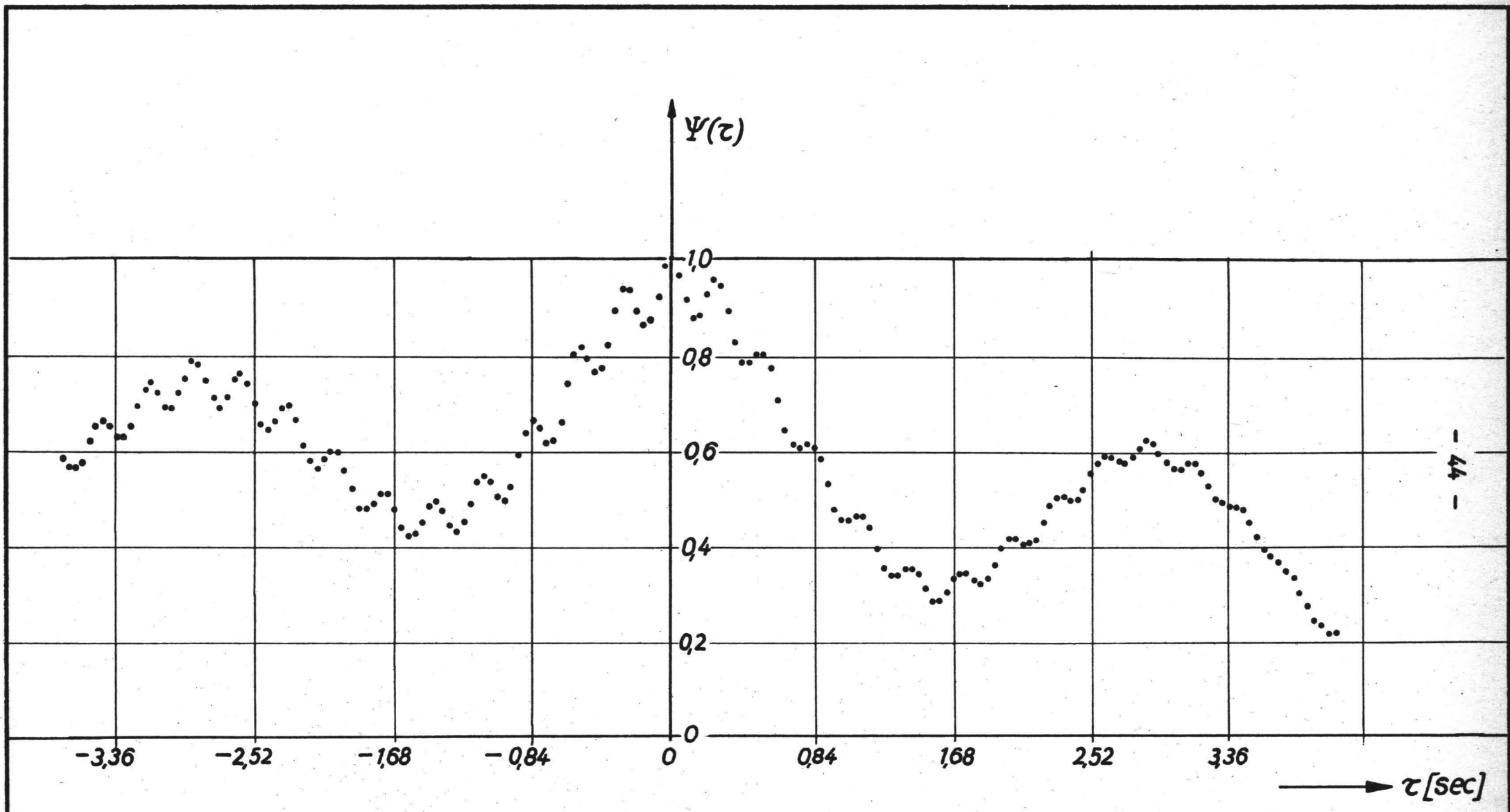
Abb. 11



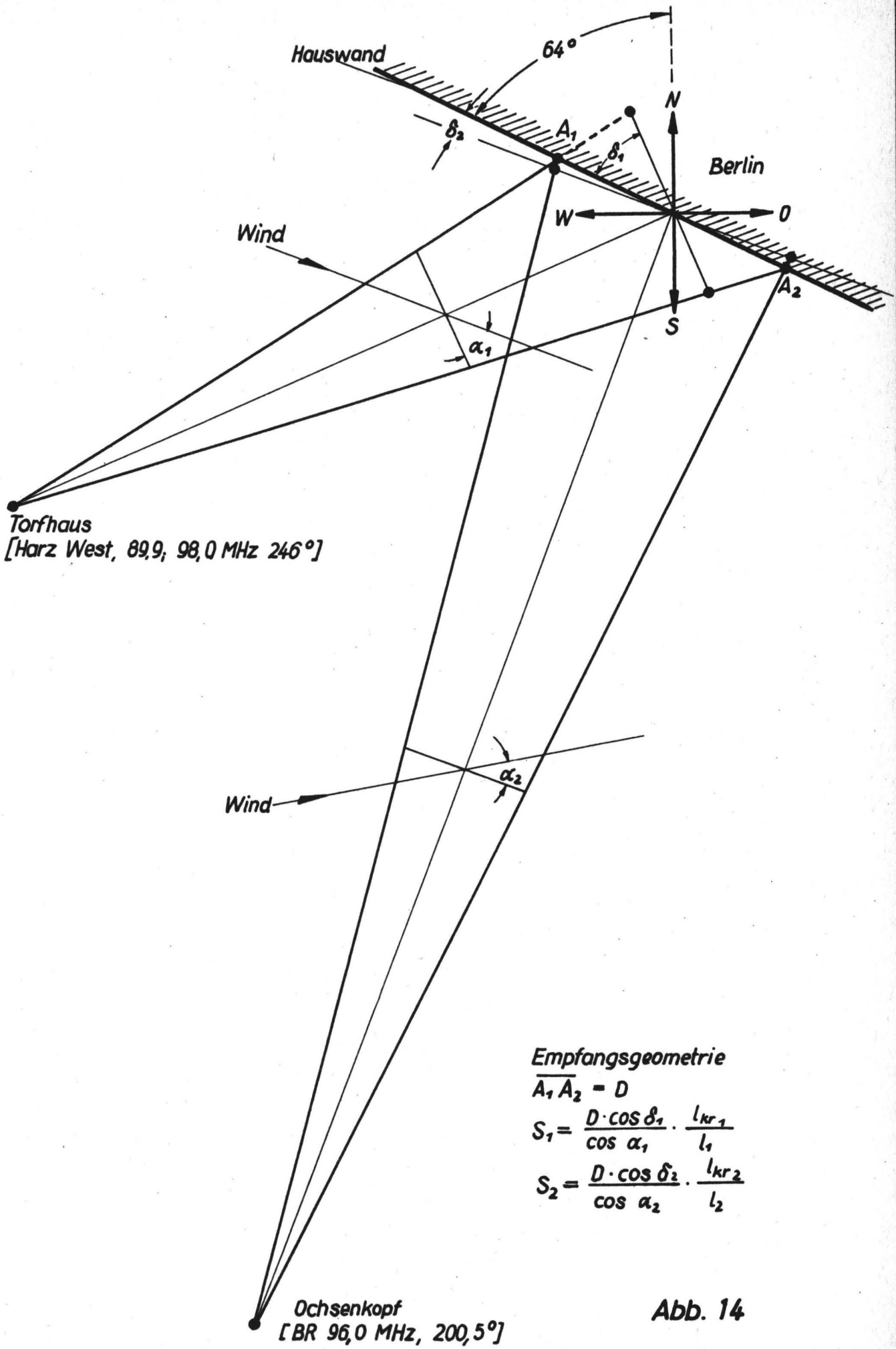

Gemessene Korrelationsfunktionen
mit Flugzeugfading [$\Delta\tau$ = 0,32 sec]

Abb. 12




Autokorrelationsfunktion von Flugzeugfading
[$\Delta\tau$ = 0,042 sec]

Abb.: 13




*Empfangsgeometrie*

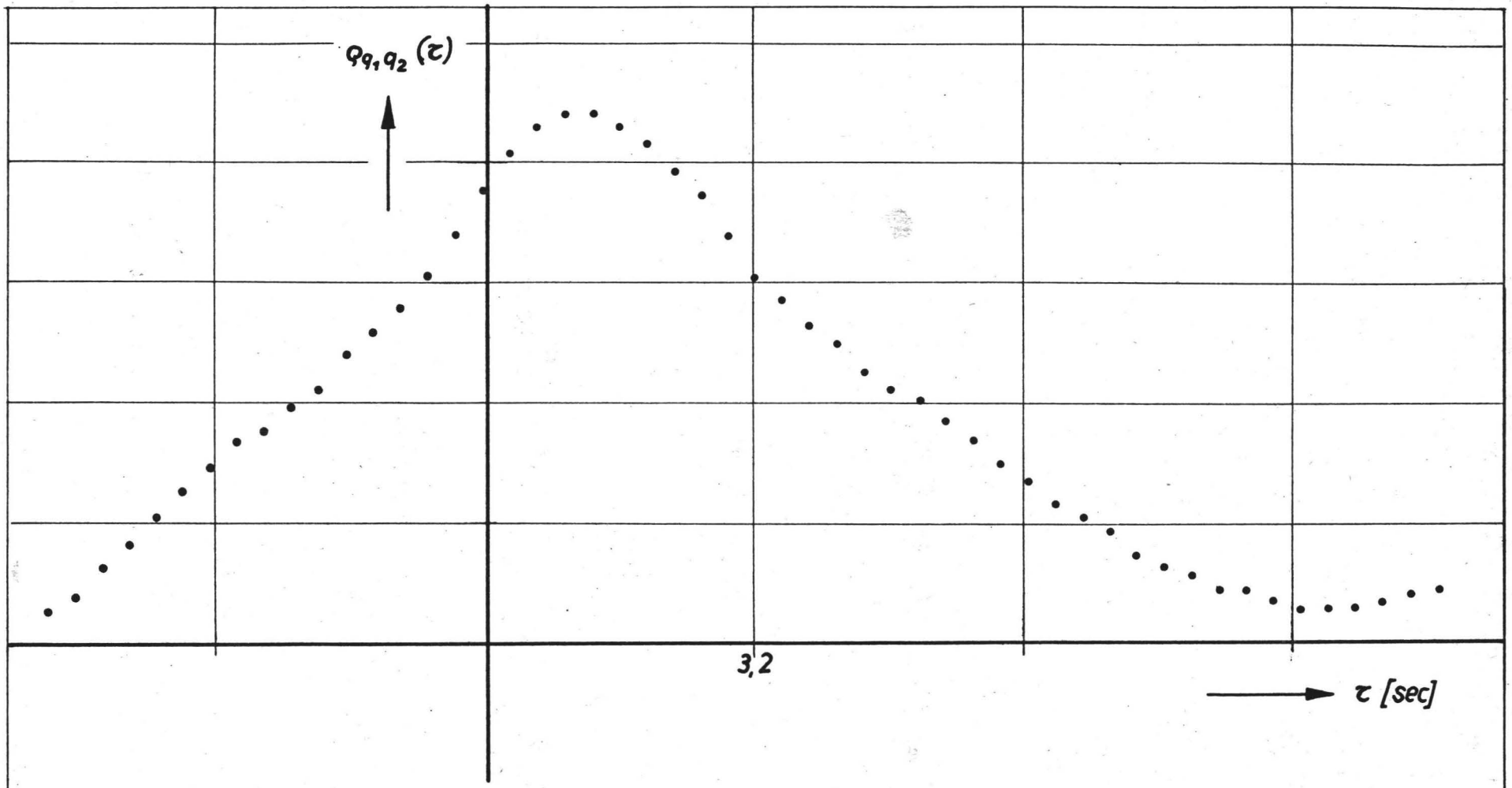
$\overline{A_1 A_2} = D$

$$S_1 = \frac{D \cdot \cos \delta_1}{\cos \alpha_1} \cdot \frac{l_{kr1}}{l_1}$$

$$S_2 = \frac{D \cdot \cos \delta_2}{\cos \alpha_2} \cdot \frac{l_{kr2}}{l_2}$$

**Abb. 14**

J.64




*Beispiel einer gemessenen Kreuzkorrelationsfunktion*
*[$\Delta\tau$ = 0,32 sec]*

**Abb. 15**

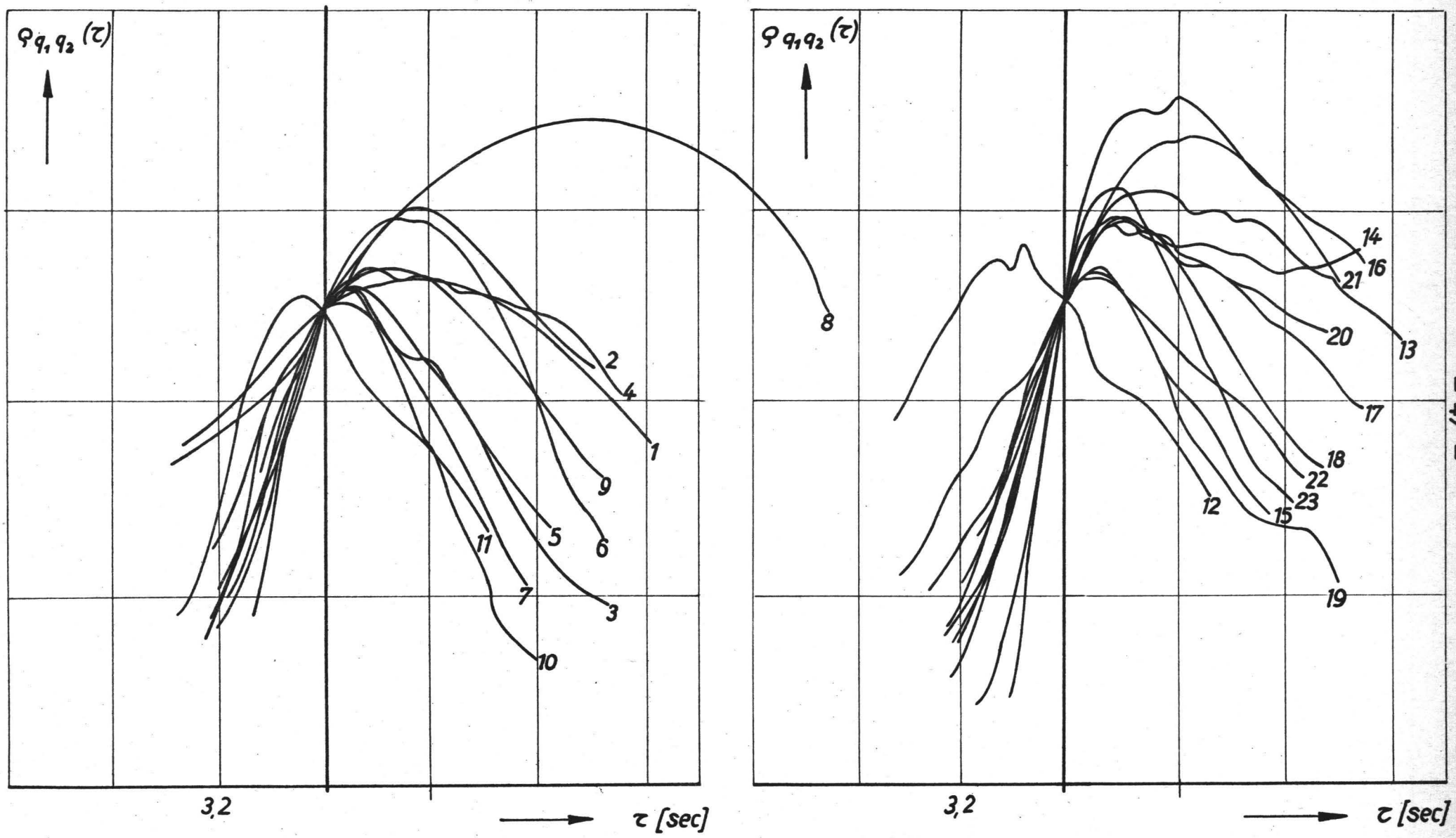



**Abb.16:** Im Zeitraum von 20 Minuten gemessene Kreuzkorrelationsfunktionen
2.2.1964 $3^{20} - 3^{40}$ Uhr 89,9 MHz

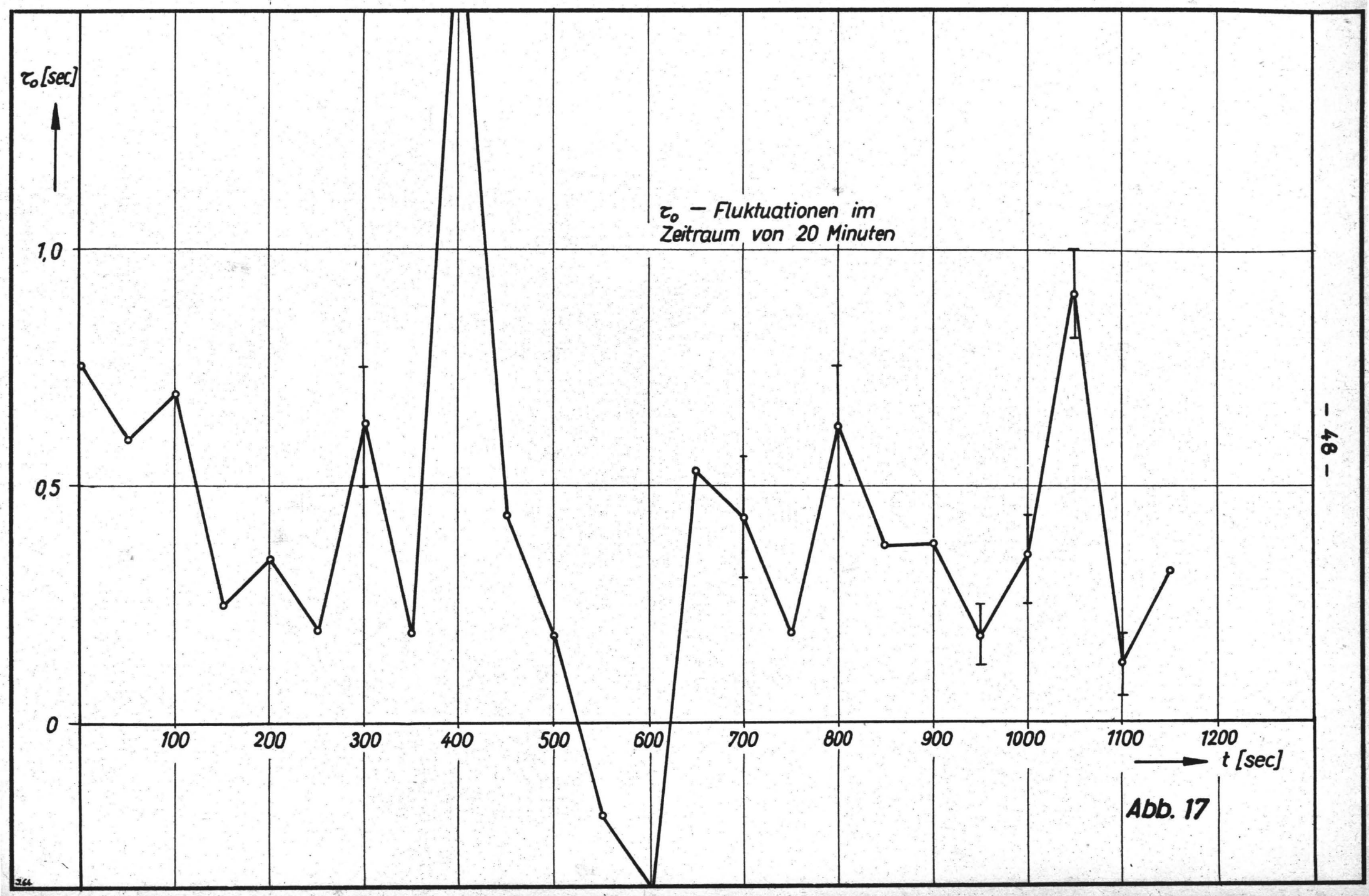

$\tau_o$ [sec]
1,0
0,5
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
t [sec]
$\tau_o$ – Fluktuationen im Zeitraum von 20 Minuten

Abb. 17

## Windgeschwindigkeiten Berlin – Ochsenkopf 31.1.64 bis 3.2.64

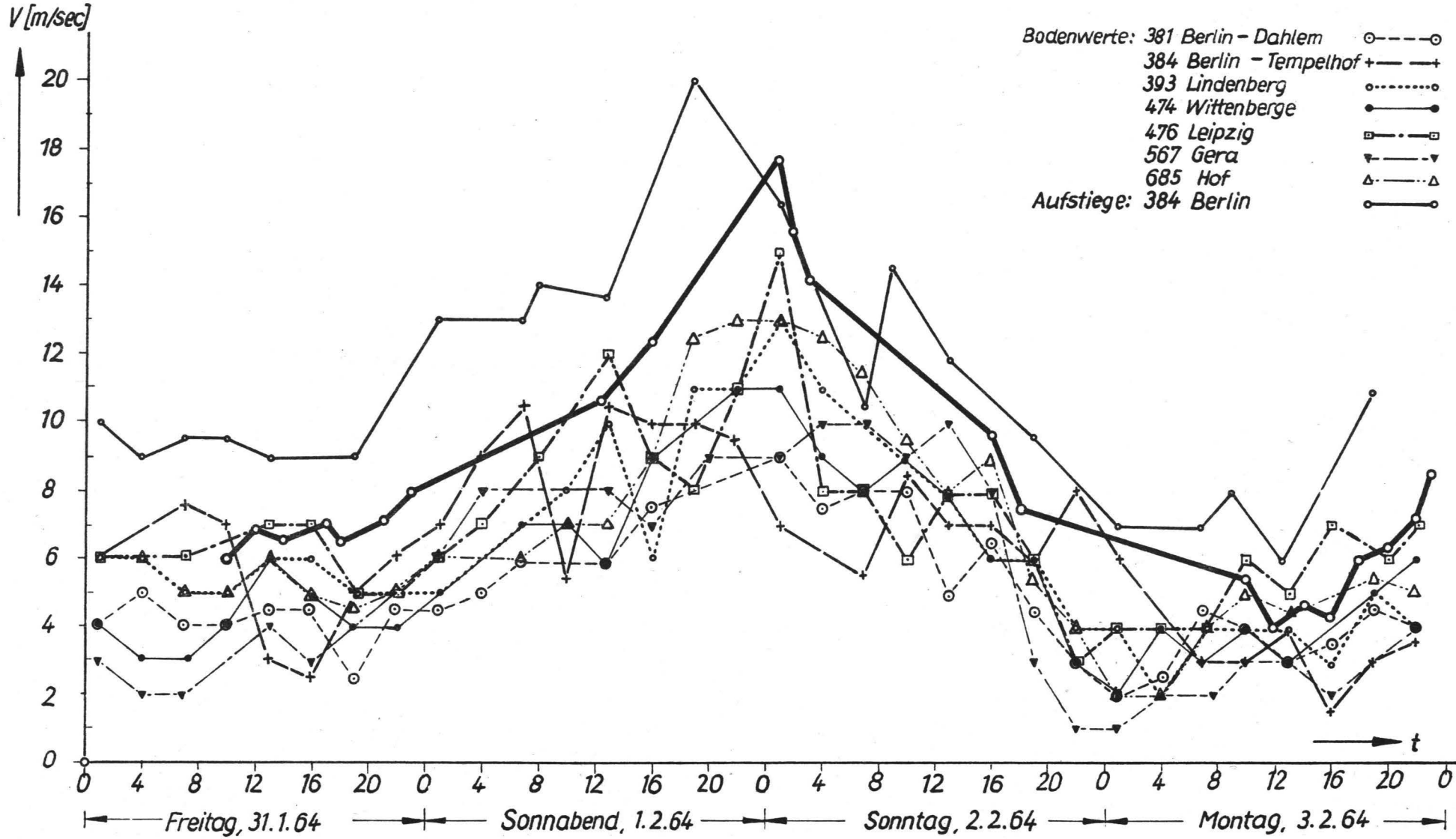
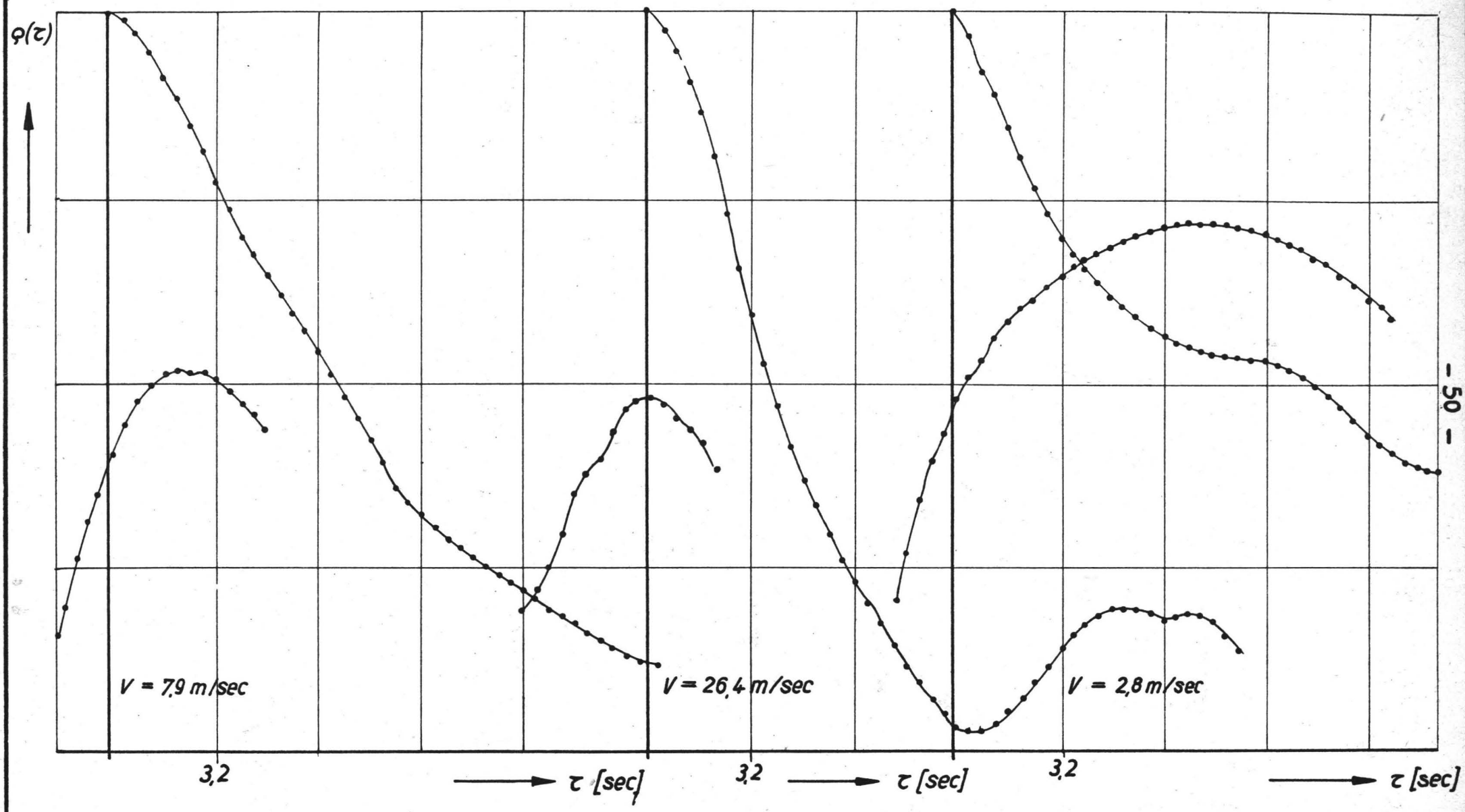



Abb. 18



3-64




Kreuz- und Autokorrelation einer Windböe [2mm ≙ 0,32 sec]

Abb. 19

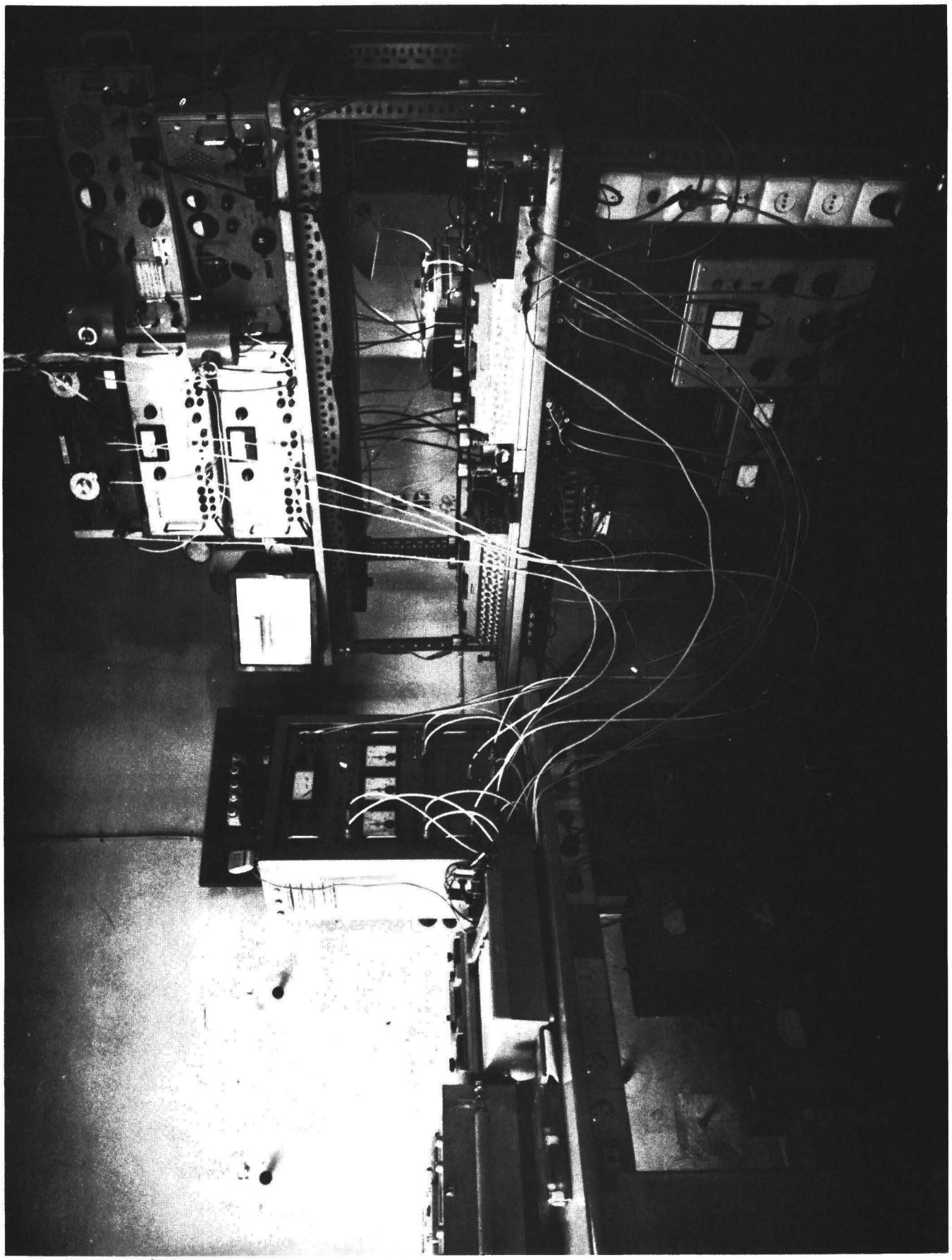


Abb. 20