

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie = Revue technique suisse des mensurations, du génie rural et de la photogrammétrie

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessungswesen und Kulturtechnik = Société suisse de la mensuration et du génie rural

Band: 66 (1968)

Heft: 10

Artikel: Bodenreflexionen und Messtechnik bei der Mikrowellen-Distanzmessung [Fortsetzung]

Autor: Küpfer, H.P.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-222317>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik

Revue technique Suisse des Mensurations, de Photogrammétrie et du Génie rural

Herausgeber: Schweiz. Verein für Vermessungswesen und Kulturtechnik; Schweiz. Gesellschaft für Photogrammetrie; Fachgruppe der Kulturingenieure des SIA

Editeurs: Société suisse des Mensurations et Améliorations foncières; Société suisse de Photogrammétrie; Groupe professionnel des Ingénieurs du Génie rural de la SIA

Nr. 10 • LXVI. Jahrgang

Erscheint monatlich

15. Oktober 1968

Fortsetzung

DK 528.021.6.088.24

Bodenreflexionen und Meßtechnik bei der Mikrowellen-Distanzmessung

H. P. Küpfer

5. Distanzfehler durch Bodenreflexionen in Abhängigkeit der Streckengeometrie

Unter Streckengeometrie wird die räumliche Anordnung der Endpunkte der Meßstrecke *bezüglich der Reflexionsebene* verstanden (Fig. 2), wobei im folgenden für die Höhe über der Reflexionsebene der arithmetische Mittelwert

$$h = \frac{h_A + h_B}{2}$$

eingesetzt wird. Das Ziel dieses Abschnittes besteht in der Bestimmung des durch den Bodeneinfluß verursachten, maximal möglichen Fehlers für jede beliebige Streckengeometrie unter Berücksichtigung der Antennendiagramme.

Die Extremwerte der Swingkurven sind durch die Formeln für ihre Umhüllende auf Seite 300 bestimmt. Für kleine Werte des Signalverhältnisses a vereinfachen sich diese, und man erhält für den absoluten Betrag für $a < 0,1$:

$$\varepsilon_{\text{ext}} = | \varepsilon_{\text{ext } 1,2} | = a \cdot | \sin \varphi_{m\Delta} |$$

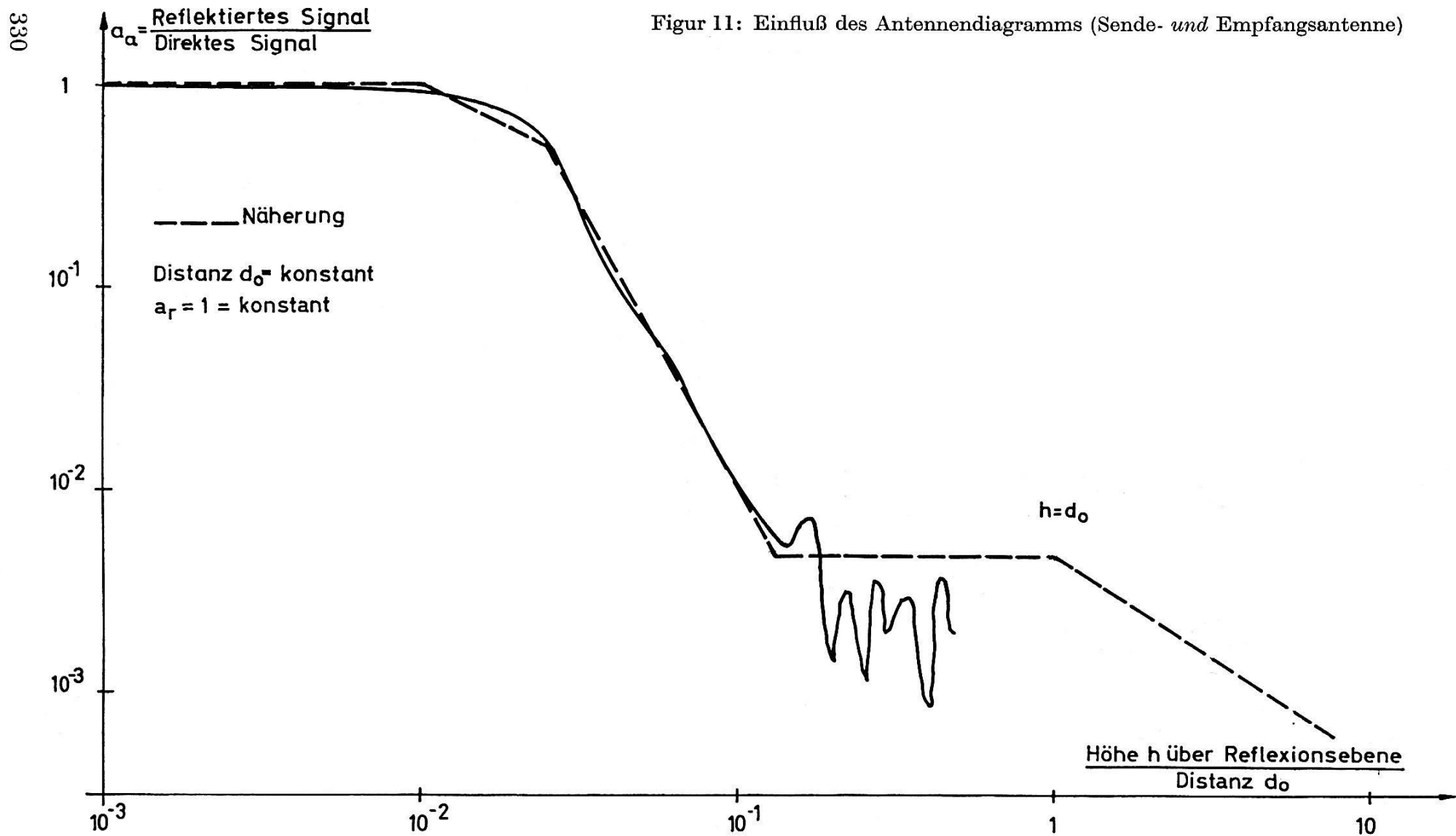
$$e_{\text{ext}} = | e_{\text{ext } 1,2} | = \frac{\lambda_m}{2\pi} \cdot a \cdot \left| \sin \left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda_m} \right) \right|$$

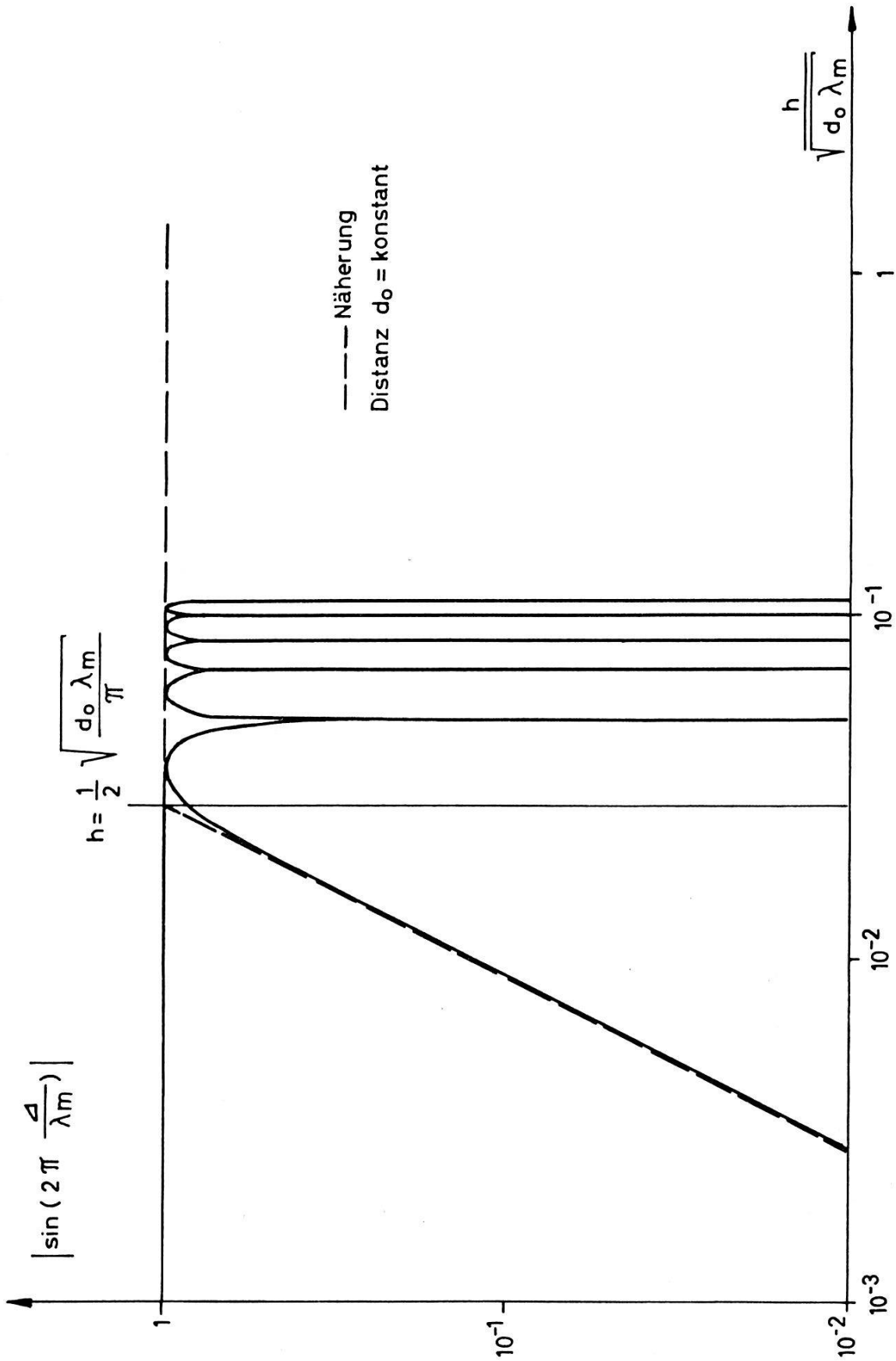
Das Signalverhältnis a wird entsprechend den beiden Haupteinflüssen aufgeteilt in a_a und a_r , wobei

a_a = Antennenfaktor (Amplitudenverhältnis des nur durch die Antennenstrahlungsdiagramme gedämpften reflektierten Signales zum direkten Signal)

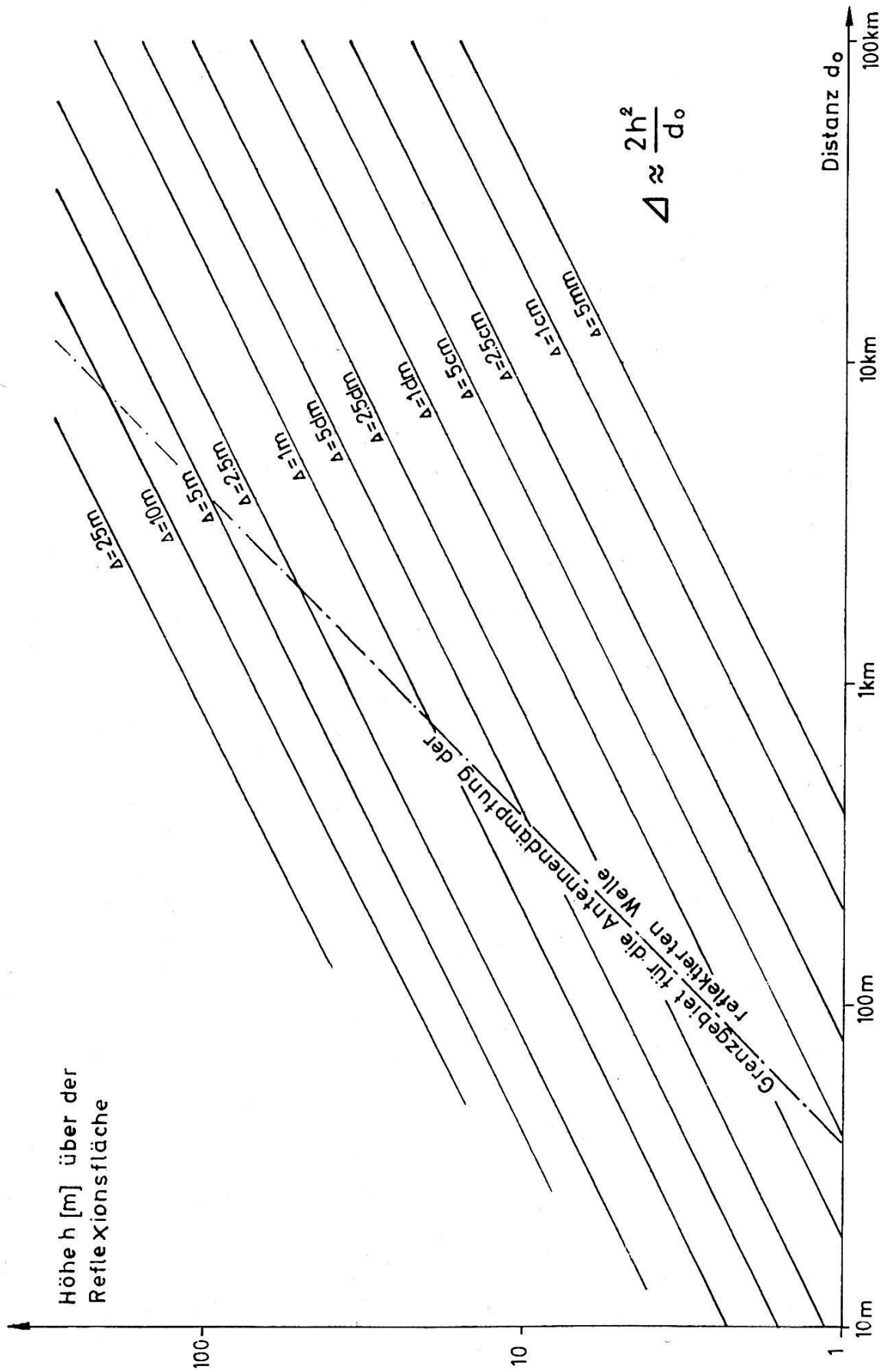
a_r = Reflexionsfaktor (Amplitudenverhältnis des nur durch Reflexionsverluste gedämpften reflektierten Signales zum direkten Signal),

also: $a = a_a \cdot a_r$





Figur 12: Einfluß des Umweges, ausgedrückt durch die Wegdifferenz Δ



Figur 13:
Bestimmung der Wegdifferenz Δ bei gegebener Streckengeometrie (d_0 und h)

und
$$e_{\text{ext}} = \frac{\lambda_m}{2\pi} \cdot a_a \cdot a_r \cdot \left| \sin \left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda_m} \right) \right|$$
 beziehungsweise

$$\log e_{\text{ext}} = \underbrace{\log a_a}_{\text{Antennenfaktor}} + \underbrace{\log a_r}_{\text{Reflexionsfaktor}} + \underbrace{\log \left| \sin \left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda_m} \right) \right|}_{\text{Wegdifferenz}} + \underbrace{\log \frac{\lambda_m}{2\pi}}_{\text{Konstante}}$$

Bei gegebener Meßanordnung ist der extreme Fehler e_{ext} dem Reflexionsfaktor a_r proportional und erreicht sein Maximum bei idealer Reflexion, das heißt $a_r = 1$ beziehungsweise $\log a_r = 0$. Wir bezeichnen diesen maximalen Extremwert des Fehlers mit E .

Für $a_r = 1$ gilt:

$$E = e_{\text{ext}} \Big|_{a_r = 1} = \frac{\lambda_m}{2\pi} \cdot a_a \cdot \left| \sin \left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda_m} \right) \right|$$

für $\log a_r = \log 1 = 0$:

$$\log E = \log e_{\text{ext}} \Big|_{a_r = 1} = \underbrace{\log a_a}_{\text{Antennenfaktor}} + \underbrace{\log \left| \sin \left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda_m} \right) \right|}_{\text{Wegdifferenz}} + \underbrace{\log \frac{\lambda_m}{2\pi}}_{\text{Konstante}}$$

Diese Formel erlaubt eine getrennte Betrachtung der Einflüsse des Antennenstrahlungsdiagramms, das den Antennenfaktor bestimmt, und der Wegdifferenz, welche sich im Reflexionsfaktor auswirkt.

Die Figur 11 zeigt die Abhängigkeit des Antennenfaktors a_a vom Verhältnis h/d_o bei idealer Reflexion ($a_r = 1$) unter Berücksichtigung der Sende- und der Empfangsantenne. Die Kurve basiert auf dem Antennenstrahlungsdiagramm des Distomat DI 50. Dabei ist vorausgesetzt, daß beide Antennenachsen mit der Verbindungsgeraden zwischen den Meßpunkten übereinstimmen, so daß das Umwegsignal stets schwächer als das direkte Signal ist, das heißt $a_a < 1$ beziehungsweise $\log a_a < 0$. (Bei Fehlweisung der Antennen sind Antennenfaktoren $a_a > 1$ ohne weiteres möglich, zum Beispiel wenn die Antennenachsen auf den indirekten Strahl ausgerichtet werden.)

Der Einfluß der Wegdifferenz Δ auf den Fehler E ist durch den Ausdruck

$$\left| \sin \left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda_m} \right) \right|$$

gegeben und wird in der Figur 12 dargestellt, der die dimensionslose Größe

$$\frac{h}{\sqrt{d_o \lambda_m}} \quad \text{zugrunde liegt.}$$

Der lineare Anstieg gehorcht der Näherungsgleichung

$$\Delta \approx \frac{2 h^2}{d_o} \quad \text{für } h < 0,1 d_o.$$

In diesem Bereich ist die Sinusfunktion linear und durch ihr Argument ersetzbar. Bei wachsender Höhe h über dem Boden wird die Sinusfunktion bestimmend und führt zu einer amplitudenmäßigen Begrenzung. Nimmt die Höhe weiter zu, so tritt die Periodizität der Sinusfunktion in Erscheinung. Aus der Figur 13 kann für eine beliebige Streckengeometrie die zugehörige Wegdifferenz Δ abgelesen werden.

Für die weiteren Betrachtungen sind die Kurven von Figur 11 und 12 durch Streckenzüge angenähert worden (gestrichelt eingetragen). Bei einer bestimmten Distanz d_o und einer gegebenen Modulationswellenlänge λ_m läßt sich den beiden Darstellungen der maximale Fehler E (bei einem Reflexionsfaktor $a_r = 1$) in Abhängigkeit von der Höhe h über der Reflexionsebene entnehmen. Wiederholt man dieses Verfahren für verschiedene Meßstrecken d_o über den ganzen interessierenden Distanzbereich, so erhält man eine Kurvenschar mit der Ordinate E , der Abszisse h und dem Parameter d_o . Anschaulicher ist jedoch die räumliche Darstellung gemäß Figur 14, in welcher der Parameter d_o auf der dritten, in der Horizontalebene liegenden Achse des kartesischen Koordinatensystems aufgetragen ist. Sie beruht auf dem Antennendiagramm und der Modulationsfrequenz 15 MHz des Distomat DI 50 und gestattet, für jede beliebige Streckengeometrie, das heißt für jede Distanz d_o und Höhe h über der Reflexionsebene, den entsprechenden, maximal möglichen Fehler E abzulesen. Das Modell der Figur 14 besitzt die durch folgende Eigenschaften gekennzeichneten Begrenzungsflächen:

Fläche A: Der reflektierte Strahl wird durch das Antennenstrahlungsdiagramm kaum merklich abgeschwächt. Der Fehler E ist ausschließlich durch die Wegdifferenz Δ bestimmt (siehe auch Figur 13).

Fläche B: Die Abschwächung des reflektierten Strahles durch das Antennenstrahlungsdiagramm beider Stationen setzt ein und reduziert den Fehler E .

Fläche C: Die maximale Abschwächung des reflektierten Strahles durch das Antennenstrahlungsdiagramm und der maximale Einfluß der Wegdifferenz Δ (Maximum der Sinusfunktion) sind erreicht.

Fläche D: Die Höhe h wird größer als die Distanz d_o . Zusätzliche Dämpfung durch die große Wegdifferenz Δ (praktisch nicht von Bedeutung).

Die meisten Streckengeometrien, das heißt Kombinationen von d_o und h , liegen leider in der Nähe des «Bergkammes» der Figur 14, welcher mit zunehmender Distanz d_o ansteigt. *Dementsprechend wird, statistisch betrachtet, der durch Bodeneinflüsse verursachte maximal mögliche, absolute Fehler E mit der Distanz proportional zunehmen.*

Kann die Größe des Reflexionsfaktors a_r abgeschätzt werden, so ergibt sich aus der Darstellung in Figur 14 sofort der maximale Distanzfehler e_{ext} , wenn der abgelesene Wert E mit a_r multipliziert wird, da

$$e_{\text{ext}} = E \cdot a_r.$$

Mögliche Werte des Reflexionsfaktors a_r (auch etwas vom Reflexionswinkel α abhängig):

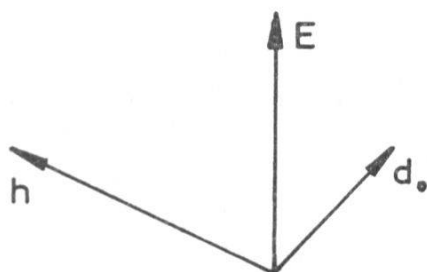
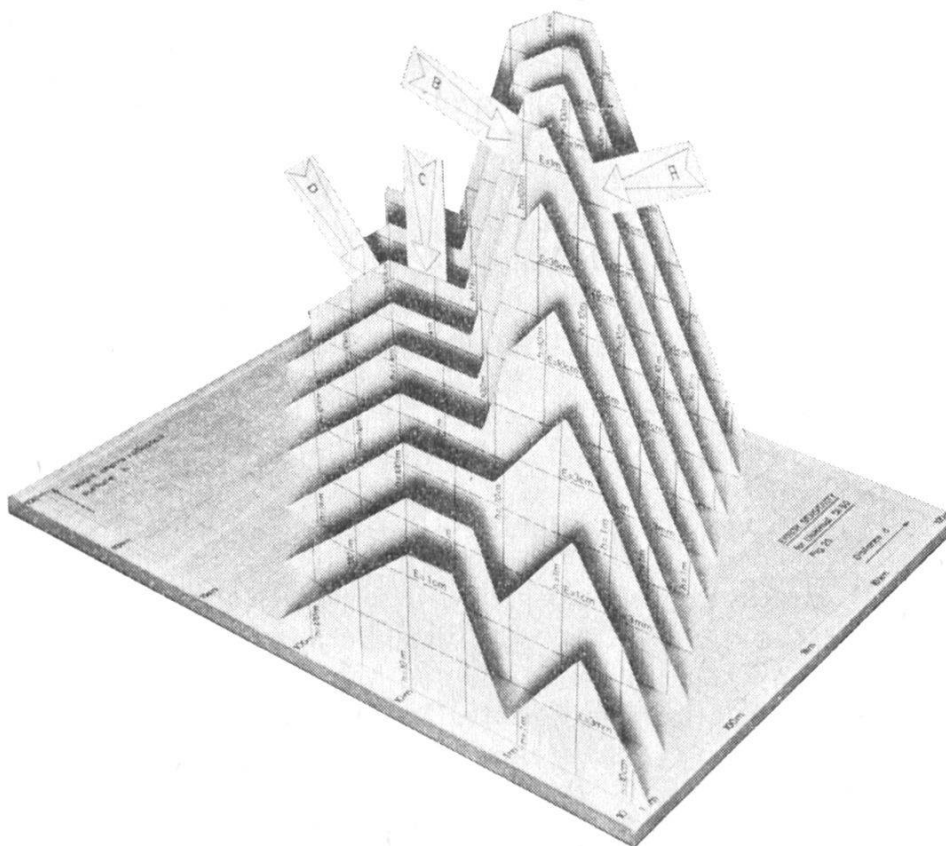
Wasser, ebene Schneeflächen	≈ 1
Offenes, flaches Land, gemischte Vegetation	0,2 ... 0,8
Wald	$< 0,1$
Durch Bergspitzen gebrochene Reflexionsfläche	$< 0,1$

Die Figur 14 erklärt auch, warum gewisse Kombinationen von Distanz und Höhe gefährlich sind, während andere harmlos bleiben.

Die Ableitung der Figur 14 erfolgte unter der Voraussetzung

$$a = a_a \cdot a_r < 0,1.$$

Mit Ausnahme der Fläche A ist diese Bedingung auf allen Flächen erfüllt, weil $a_a < 0,1$. Für die Fläche A hingegen ist $a_a \approx 1$, das heißt $a = a_a \cdot a_r \approx a_r$, und die Darstellung ist nur gültig falls $a_r < 0,1$. Liegt der Reflexionsfaktor a_r in der Nähe von 1, so gibt A lediglich das qualitative Verhalten des Fehlers an.



Figur 14: Maximal möglicher Fehler E des Distomat DI 50

für $a = a_a \cdot a_r < 0,1$
und $a_r = 1,0$

6. Verbesserung der Meßtechnik

6.1 Wahl des Höhenwinkels

Üblicherweise erfolgt das Ausrichten der Antennenachsen durch Variieren des Horizontal- und des Höhenwinkels, bis das maximale Empfangssignal erreicht ist. Was den Horizontalwinkel betrifft, ist gegen dieses Verfahren nichts einzuwenden, sofern keine seitlichen Reflexionen vorliegen. Anders verhält es sich mit dem Höhenwinkel. Sind Bodenreflexionen vorhanden, so kann der durch sie verursachte Fehler oft wesentlich reduziert werden, wenn die Antenne um einen kleinen Winkel δ höher gerichtet wird, als dem maximalen Empfangssignal entspricht. Diese Maßnahme wollen wir Elevation nennen.

Wie Figur 15 zeigt, weist das Antennendiagramm ein verhältnismäßig flaches Leistungsmaximum und steil abfallende Flanken auf. Bei einer Elevation der Antenne um den Winkel δ wird der auf der Flanke liegende Strahl erheblich gedämpft, während der direkte Strahl nur einen geringen Leistungsverlust erleidet, der bis zu größeren Entfernungen keine Rolle spielt. Immerhin wird man bei sehr großen Meßdistanzen, bei denen jeder Signalverlust zu vermeiden ist, auf diese Methode verzichten.

Die Auslenkung der Strahlungskeule vermindert den Antennenfaktor a_a , was in der räumlichen Darstellung (Fig. 14) einer Verschiebung der Begrenzungsfläche B gegen die Fläche A hin gleichkommt. Die Höhe des «Bergkammes» wird reduziert, da die Fläche A sich kaum ändert. Es darf also in vielen Fällen mit einer Verkleinerung des Distanzfehlers gerechnet werden.

Für die Antennencharakteristik des Distomat DI 50 führten theoretische Überlegung und praktische Messungen auf einen optimalen Wert der Elevation von

$$\delta \text{ empfohlen} = + 2^\circ.$$

Zahlreiche Feldmessungen über verschiedene Distanzen und Geländeformationen bestätigten die theoretischen Überlegungen und ergaben, daß für die meisten Strecken eine Reduktion des durch Bodenreflexionen verursachten Fehlers erzielt werden konnte. In einigen Fällen war keine nennenswerte Verbesserung festzustellen. Eine Verschlechterung ist in keinem einzigen Fall aufgetreten.

Die einfachste Methode zum Einstellen dieses Winkels besteht im gegenseitigen Ausrichten der beiden Stationen auf das Signalmaximum und anschließender Korrektur des Höhenwinkels jeder Station um $+2^\circ$. Dieses Vorgehen ist nicht ganz korrekt, da je nach Trägerphase des reflektierten Strahles sich der Winkel für das Signalmaximum etwas verschieben kann (siehe Fig. 3). Bei kleinem Signalverhältnis ist diese Verschiebung gering, so daß das Verfahren empfohlen werden kann.

Eine genauere Methode besteht im optischen Ausrichten. Sie setzt jedoch eine Visiereinrichtung und ungestörte Sicht (nebelfrei) voraus.

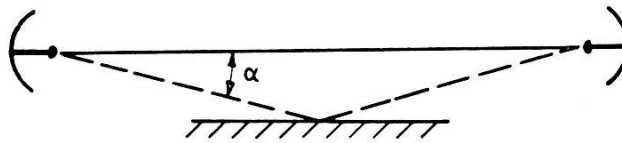
Die empfohlene neue Meßtechnik mit vergrößertem Höhenwinkel ergibt nach der Wellenoptik eine Verschiebung des Phasenzentrums in bezug auf den Antennen-Fokuspunkt, und zwar in dem Sinne, daß eine kleinere

Distanz gemessen wird. Es entspricht dies einem konstanten Nullpunktfehler e_0 , der aus der Brennweite b der beiden Antennen berechnet werden kann:

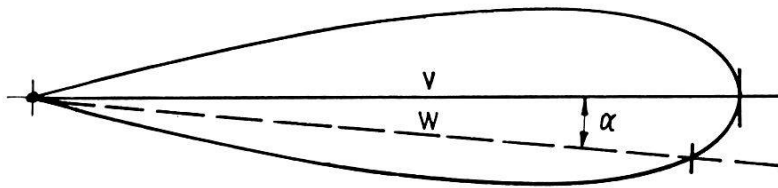
$$e_0 = -2 b | \delta |$$

Für den Distomat DI 50 mit $b = 14$ cm erhält man für $\delta = + 2^\circ$ einen Nullpunktfehler von $e_0 \approx - 1$ cm. Feldmessungen haben diesen Wert bestätigt.

Wird die neue Meßtechnik durchwegs – also auch für die Eichung der Geräte – verwendet, so ist e_0 bereits eliminiert. Für den gleichen Gerätetyp ist der Nullpunktfehler e_0 konstant, da er allein durch die Antennenabmessungen und den Elevationswinkel δ festgelegt ist.

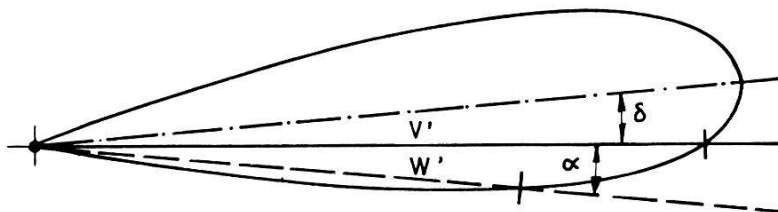


Streckengeometrie



Fall A : $\frac{V}{W} = \alpha_a$

Übliches Ausrichten



Fall B : $\frac{V'}{W'} = \alpha_a$

Vorgeschlagenes Ausrichten :

Elevation δ

Figur 15: Ausrichten der Antenne, Prinzip der Elevation

6.2 Erzeugung von Swingkurven

Die Erzeugung von Swingkurven, das heißt die systematische Variation des Poderfehlers durch Trägerfrequenzänderung, ist bekannt und nützlich für gewisse Streckenkonfigurationen. Es sollen hier die Grenzen dieser klassischen Methode und eine neue Methode der Swingerzeugung behandelt werden. Die Notwendigkeit, Swingkurven zu erzeugen, besteht nur, wenn der durch Reflexionen am Boden verursachte Fehler bestimmt werden soll oder sich störend bemerkbar macht. Wie bereits dargelegt, führt in den meisten Fällen die Mittelwertbildung zu guten Resultaten. Hingegen muß für große Swingwerte die Poderfehlermethode angewendet werden. Für Details siehe [3].

Die Swingkurve bedeutet physikalisch eine kontinuierliche Verschiebung der Trägerphase im Umweg bezüglich der Trägerphase des direkten Strahles. Bei der Methode der Trägerfrequenzänderung interessiert vor allem, wie viele ganze Swingperioden q mit dem zur Verfügung stehenden Variationsbereich der Trägerfrequenz erzielt werden können. Diese Zahl q ist von der Länge des Umweges abhängig gemäß folgender Formel:

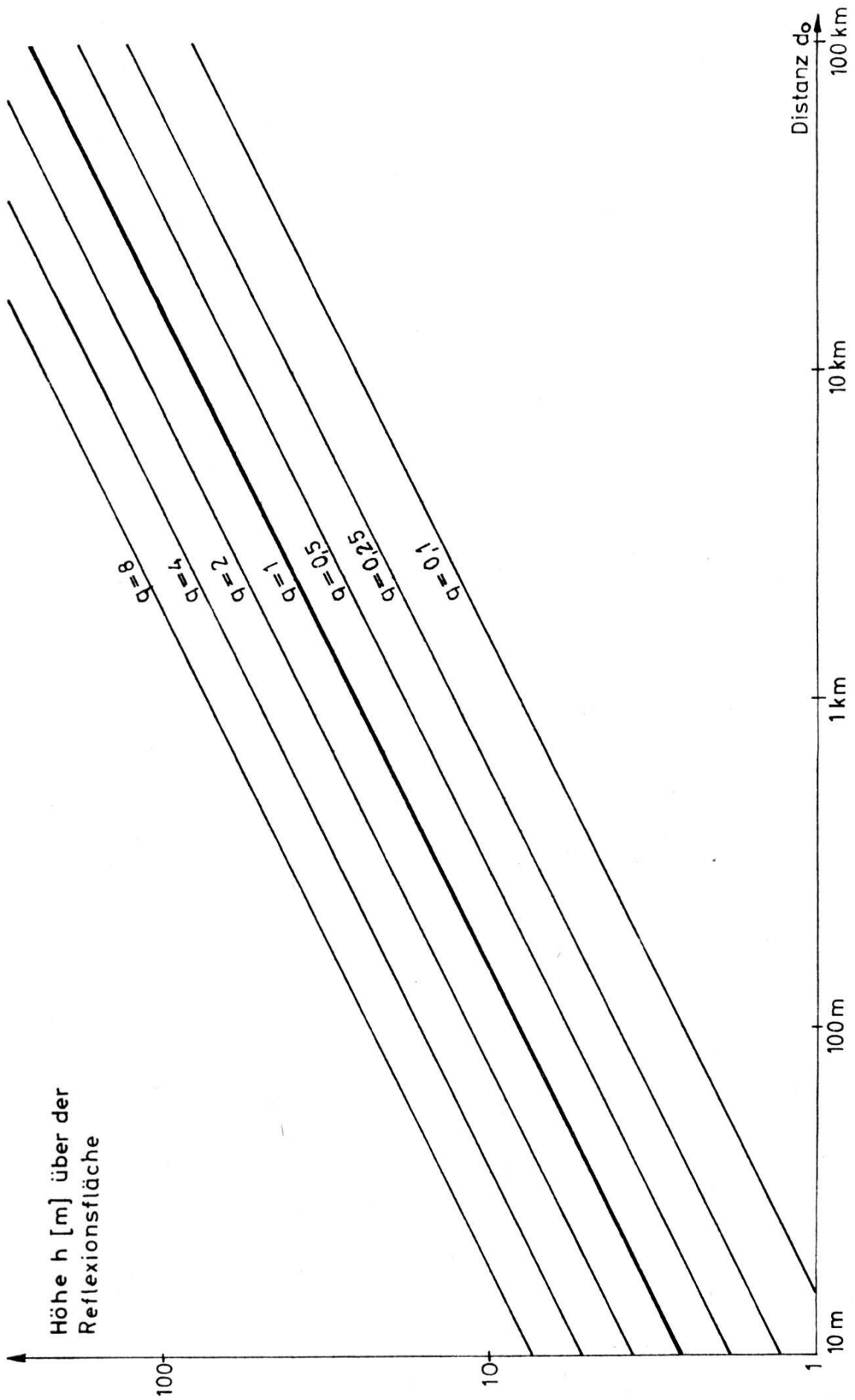
$$q = \frac{\Delta f_t}{f_t} \cdot \frac{\Delta}{\lambda_t} = \frac{\Delta f_t}{c} \cdot \Delta$$

Für den Distomat DI 50 mit einem Variationsbereich von $\Delta f_t = 225$ MHz ergibt sich eine Wegdifferenz von $\Delta = 1,3$ m, welche für die Erzielung einer ganzen Swingperiode erforderlich ist. Figur 16 stellt den Zusammenhang dar zwischen der Anzahl Swingperioden q , der Höhe h über der Reflexionsfläche und der Distanz d_o für alle Geräte mit gleichen Daten.

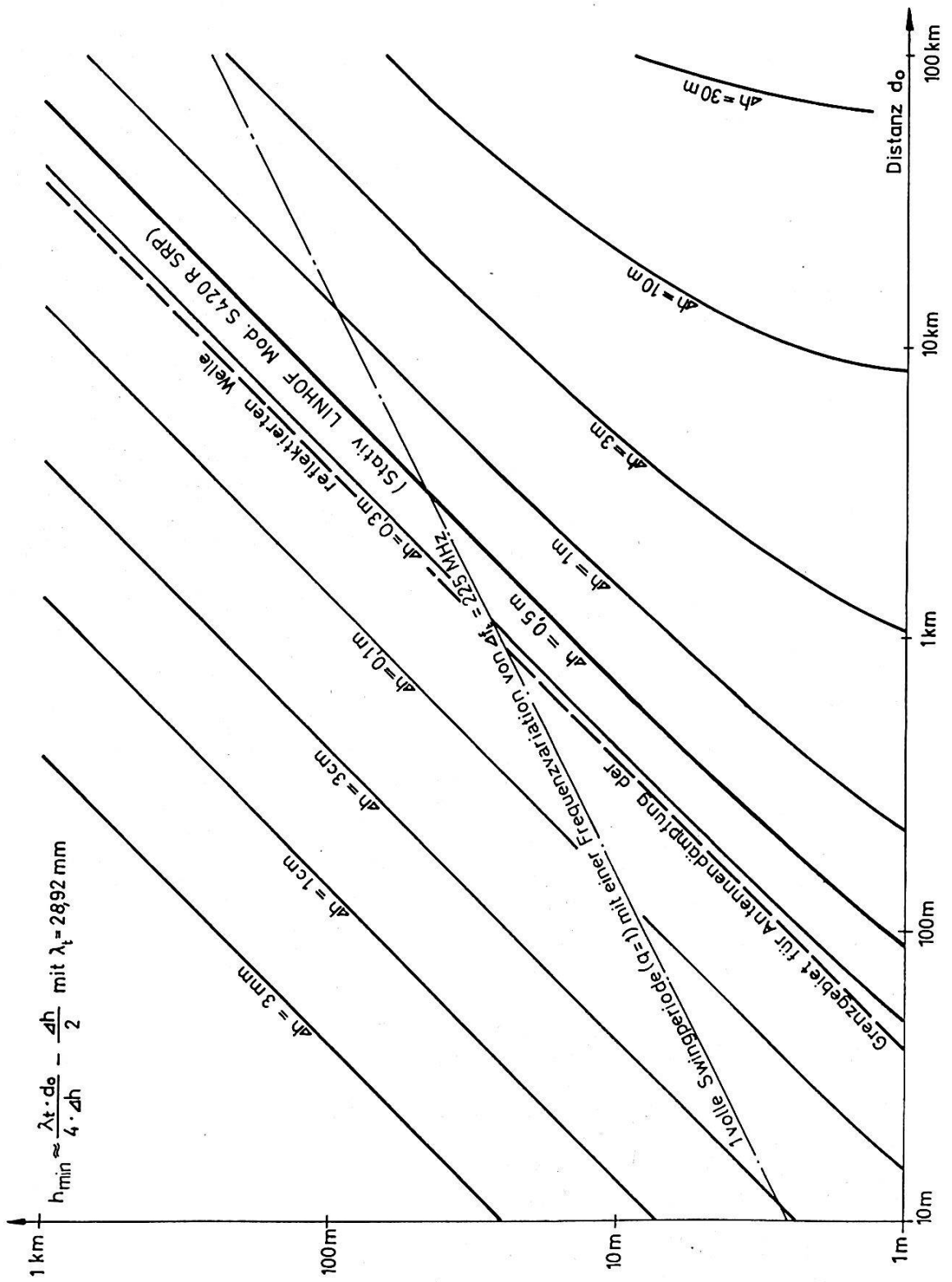
Eine Swingkurve kann auch durch *Änderung der Höhe* über der Reflexionsebene bei gleichbleibender Trägerfrequenz hervorgerufen werden. Für jede Höhenvariation Δh gibt es eine minimale Höhe h_{\min} über der Reflexionsebene, womit eine ganze Swingkurve ($q = 1$) erreicht wird:

$$h_{\min} \approx \frac{\lambda_t \cdot d_o}{4 \Delta h} - \frac{\Delta h}{2}$$

Figur 17 ist die graphische Auswertung dieser Formel für $\lambda_t = 2,892$ cm. Aus der Figur 16 ist vergleichshalber die Gerade für $q = 1$ bei einer Frequenzvariation $\Delta f_t = 225$ MHz übernommen worden. Eine Höhenvariation beider Stationen von $\Delta h = 0,5$ m läßt sich ohne Schwierigkeiten (zum Beispiel mit dem Stativ Linhof Mod. S420 R SRP) erreichen. Für einen Vergleich der beiden Methoden können wir uns auf die Kurven $q = 1$ und $\Delta h = 0,5$ m beschränken. Ihr Schnittpunkt liegt bei etwa 3 km, das heißt, unterhalb von 3 km ist das Verfahren mit Höhenvariation günstiger, oberhalb dasjenige mit Frequenzvariation, und zwar günstiger insofern, als jeweils bereits mit kleinerer Höhe h_{\min} über der Reflexionsebene eine volle Swingperiode erzielt werden kann. Für sehr kurze Distanzen ist überhaupt nur noch das Höhenvariationsverfahren anwendbar, weil das Frequenzvariationsverfahren bei einer Distanz von beispielsweise 100 m eine Höhe h_{\min} von 8 m erfordert.



Figur 16: Anzahl der Frequenz-Swingperioden q , erzeugt durch Frequenzvariation $\Delta f_t = 225 \text{ MHz}$



Figur 17: Minimale Höhe h_{\min} zur Erzeugung einer vollen Swingperiode für verschiedene Höhenvariationen Δh

Bei Swingerzeugung durch Höhenvariation bei fester Trägerfrequenz muß eine allfällige geräteinterne Trägerfrequenzabhängigkeit der Distanzmessung (sogenannter interner Swing) für diese gewählte Frequenz berücksichtigt werden.

Ist eine vollständige Aufnahme einer Swingkurve unmöglich, sei es weil der Trägerfrequenz-Variationsbereich nicht genügt oder eine Höhenvariation zu umständlich ist, so kann zunächst anhand der Figur 14 der maximal mögliche Fehler durch die Bodenbeeinflussung abgeschätzt werden. Für die Begrenzungsfläche A versagt dieses Vorgehen, falls die Bedingung für das Signalverhältnis $a < 0,1$ nicht erfüllt ist. In solchen Fällen läßt sich die Trägerphase φ_{tA} berechnen:

$$\varphi_{tA} \approx \pi \left(\frac{2 \Delta}{\lambda_t} + 1 \right)$$

Die Figur 8 macht deutlich, daß eine in der Nähe von 180° liegende Trägerphase φ_{tA} große negative Swingwerte erzeugt und damit unzuverlässige und zu kleine Resultate liefert. Nun kann aber die unerwünschte Trägerphase $\varphi_{tA} \approx 180^\circ$ durch entsprechende Wahl der Höhe h sehr leicht vermieden werden. Für jede Distanz lassen sich die zu vermeidenden kritischen Höhen ableiten:

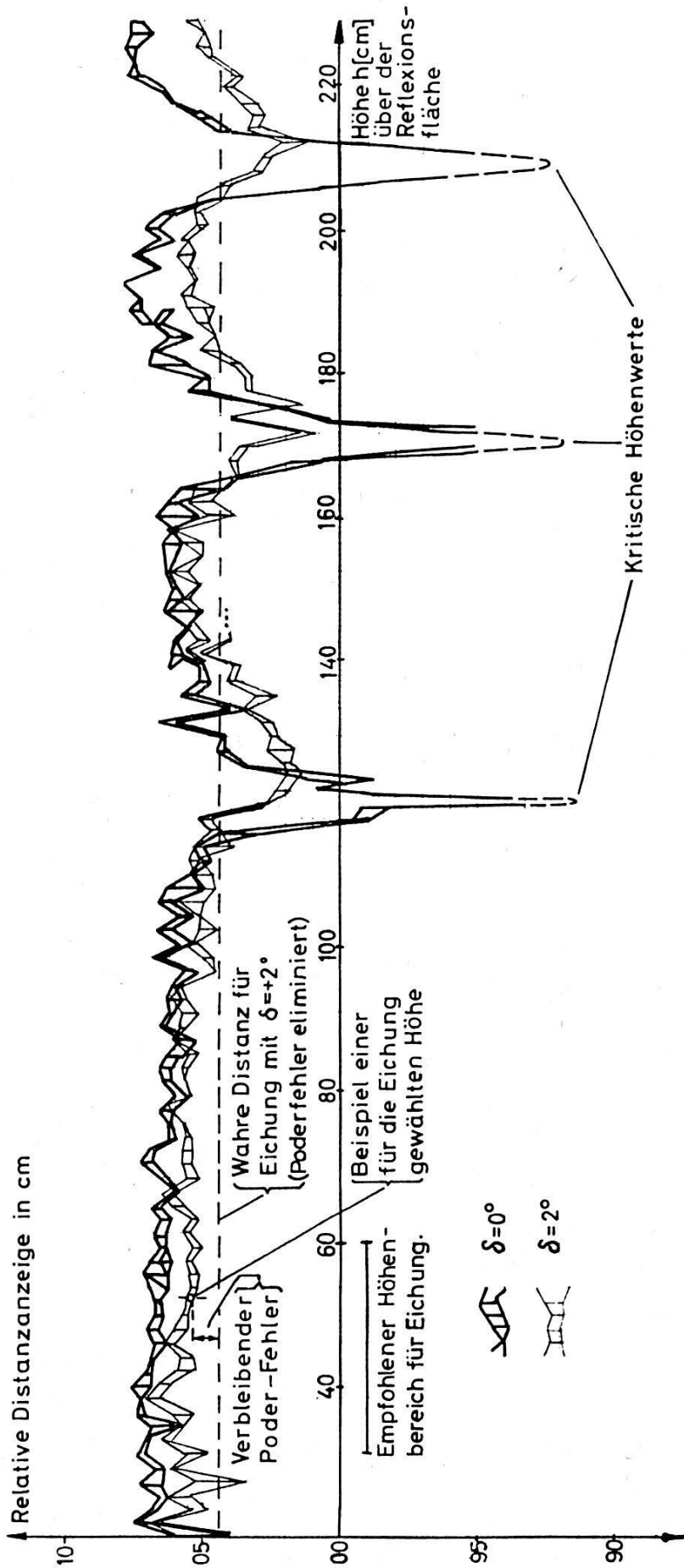
$$h_{\text{krit}} = \sqrt{\frac{d_o \cdot \lambda_t \cdot n}{2}} \quad \text{mit } n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Für eine Distanz $d_o = 100$ m und eine Trägerwellenlänge $\lambda_t = 3$ cm ergeben sich zum Beispiel folgende kritische Höhen:

$$\begin{aligned} h_{\text{krit } 0} &= 0 \text{ m} \\ h_{\text{krit } 1} &= 1,2 \text{ m} \\ h_{\text{krit } 2} &= 1,7 \text{ m} \\ h_{\text{krit } 3} &= 2,1 \text{ m} \\ h_{\text{krit } 4} &= 2,4 \text{ m} \end{aligned}$$

6.3 Eichmethode für kurze Distanzen

Für jeden Anwender elektronischer Distanzmeßgeräte ergibt sich das Problem der Eichung beziehungsweise der Kontrolle der Eichung seiner Geräte. Üblicherweise wird diese auf einer genau vermessenen, kurzen Eichstrecke (rund 100 m) durchgeführt. Über den Endpunkten werden die Geräte auf den Stativen, das heißt etwa 2 m über dem Boden, aufgestellt und die Antennen auf Signalmaximum ausgerichtet. Sodann wird eine Swingkurve über den ganzen zur Verfügung stehenden Variationsbereich der Trägerfrequenz aufgenommen und ihr arithmetischer Mittelwert als Eichwert benutzt. Untersuchungen haben ergeben, daß bei dieser Meßanordnung sehr oft Eichfehler von einigen Zentimetern entstehen, welche durch Bodenreflexionen verursacht sind. Über diese kurze Distanz ist gemäß Figur 16 durch Änderung der Trägerfrequenz keine volle Swingkurve möglich. Die Eichmethode ist also nicht befriedigend. Demgegenüber lassen sich mittels Höhenvariation sehr gute und für die Eichung



Figur 18: Höhenvariation bei einer Distanz von etwa 100 m (Beobachtung des Höhen-Swing). $f_r = 10,300$ GHz Distomat DI50

geeignete Swingkurven erzielen. Eine solche Meßanordnung mit speziellen Stativen dürfte jedoch für den durchschnittlichen Anwender zu aufwendig sein. Schließt man die Höhenvariation als Lösungsmöglichkeit aus, so kann die Eichung durch Wahl der optimalen Höhe entscheidend verbessert werden.

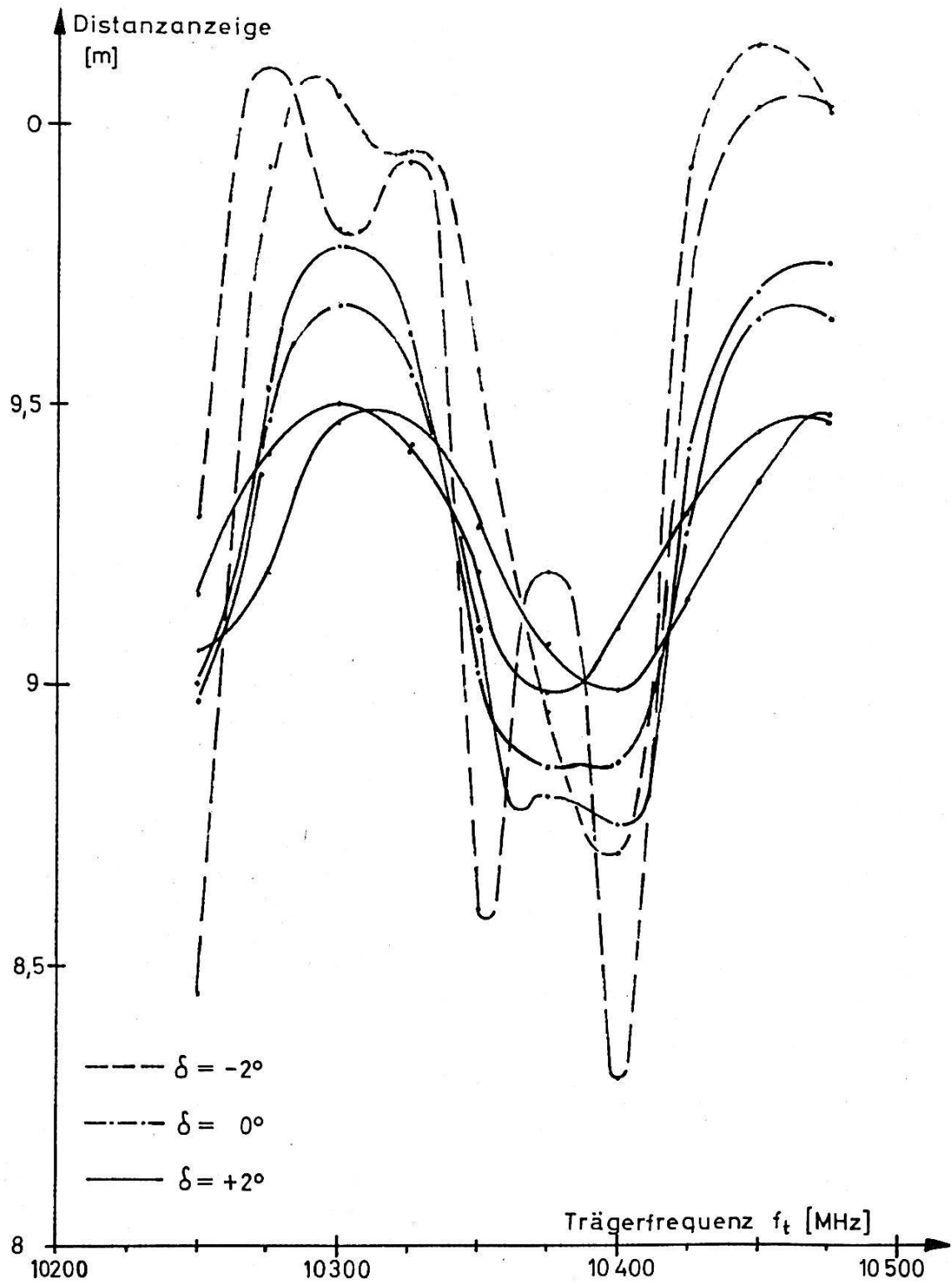
Für die Bestimmung dieser optimalen Höhe bestehen drei Kriterien:

1. Minimalisierung des Einflusses der Bodenreflexionen. Aus Figur 14 geht hervor, daß für eine Distanz von 100 m die Höhe möglichst zu reduzieren, das heißt der Umweg zu verkürzen ist (Begrenzungsfläche A). Die andere Möglichkeit der Verbesserung durch die Antennencharakteristik (Begrenzungsfläche B) scheidet aus praktischen Gründen meistens aus, da sie eine Höhe von über 4 m verlangt.
2. Kritische Höhen
Die kritischen Höhen ($h_{\text{krit}} = 0; 1,2; 1,7 \dots$ m, siehe Seite 341) sind zu vermeiden.
3. Extrem kleine Höhen sind wegen der eventuell unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen in Bodennähe ungünstig.

Diese drei Kriterien führen zum Schluß, daß eine Höhe von etwa 0,5 m am geeignetsten und bedeutend besser als eine Höhe von etwa 2 m ist. Die Verhältnisse wurden auf einer glatten Asphaltstraße über eine Distanz von 100 m durch Höhenvariation von 0,2 bis 2,2 m ausgemessen. Die Resultate sind in Figur 18 festgehalten. Sie sind eine glänzende Bestätigung der Podertheorie. Die kritischen Höhen stimmen mit den berechneten überein. Auch sind die Verkleinerung des Fehlers durch Bodenreflexionen als Folge der Elevation um $+2^\circ$ und der Nullpunktfehler von etwa 1 cm klar ersichtlich. Die Wahl der günstigen Höhe in der Gegend von 0,5 m ist völlig unkritisch.

Es ergeben sich folgende *Empfehlungen für die Eichmessungen*:

1. Man wähle eine genau vermessene Strecke zwischen 50 und 150 m in flachem Gelände.
2. Die Geräte sind mit ihren Antennenzentren in einer Höhe zwischen 30 und 60 cm vom Boden zu montieren.
3. Das Ausrichten soll mit einem um 2° vergrößerten Höhenwinkel gemäß 6.1 erfolgen, sofern auch die Feldmessungen mit demselben Verfahren geplant sind. Andernfalls ist auf Signalmaximum auszurichten.
4. Man messe die Frequenz-Swingkurve über den vollen zur Verfügung stehenden Variationsbereich der Trägerfrequenz. Man bilde den arithmetischen Mittelwert der Swingkurve, subtrahiere davon einen Wert von ungefähr 0,5 cm zur Elimination des mittleren verbleibenden Poderfehlers. Die so berechnete Distanz ist als Eichdistanz zu verwenden. Die Beeinflussung der Eichung durch Bodenreflexionen liegt unter 1 cm. Der Verlauf der gemessenen Frequenz-Swingkurve ist nicht auf Bodenreflexionen, sondern auf geräteinterne Reflexionen zurückzuführen (sogenannter interner Swing).



Distanz	$d_o = 2449,25 \text{ m}$
Mittlere Höhe der Stationen über dem See (konstant)	$h = 48 \text{ m}$
Wegdifferenz	$\Delta = 1,8 \text{ m}$
Reflexionswinkel	$\alpha = 2^\circ 15'$

Figur 19: Beobachteter Frequenz-Swing über dem Zürichsee (Strecke Nr. 1)

7. Meßresultate zweier Strecken über den Zürichsee

Jede Theorie bedarf ihrer Bestätigung und Erhärtung durch Messungen. In diesem Sinne sind eine Anzahl von Messungen durchgeführt worden. Die erstaunlich gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis für Kurzdistanzmessungen ist bereits im Abschnitt 6.3 besprochen worden. Als Beispiele mit extrem starken reflektierten Signalen wurden unter anderem zwei Meßstrecken über den Zürichsee mit folgenden geometrischen Abmessungen gewählt:

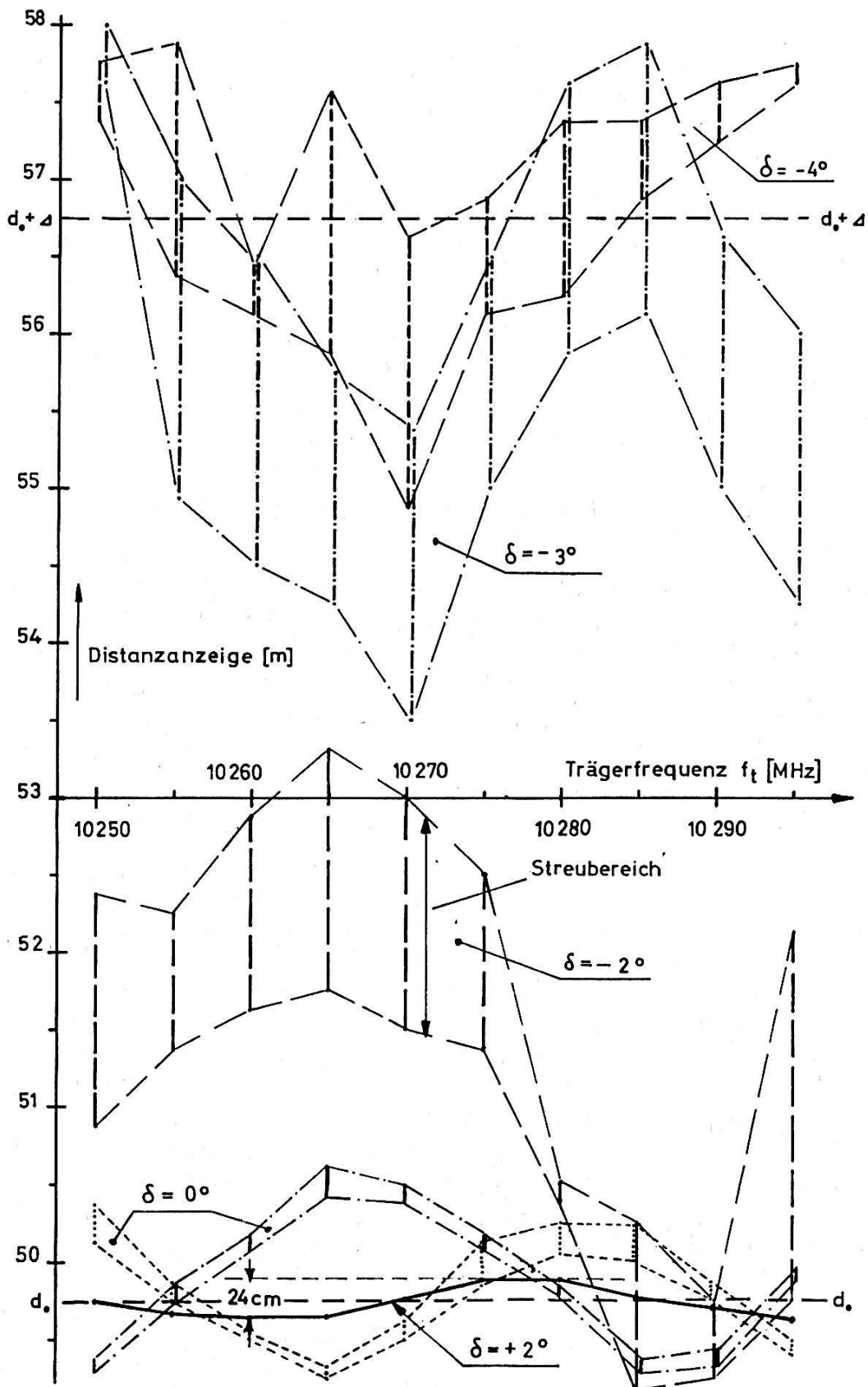
	Strecke Nr. 1	Strecke Nr. 2
Distanz d_o	2449,25 m	3749,75 m
Mittlere Höhe jeder Station über dem See h	48 m	114 m
Wegdifferenz Δ	1,8 m	7 m
Reflexionswinkel α	2° 15'	3° 30'

Die Endpunkte der Meßstrecken wurden so festgelegt, daß keinerlei Behinderung des indirekten, an der Seeoberfläche reflektierten Strahles auftrat. Der Oberflächen-Reflexionsfaktor darf als annähernd eins angenommen werden. Die Meßresultate sind in den Figuren 19–21 aufgezeichnet.

Es ist noch darauf hinzuweisen, daß es sich hier um Meßstandorte handelt, wie sie in der Praxis tunlichst zu vermeiden sind und auch fast immer vermieden werden können. Folglich sind die festgestellten großen Swingwerte in keiner Weise repräsentativ für die in der Praxis durchgeführten Messungen.

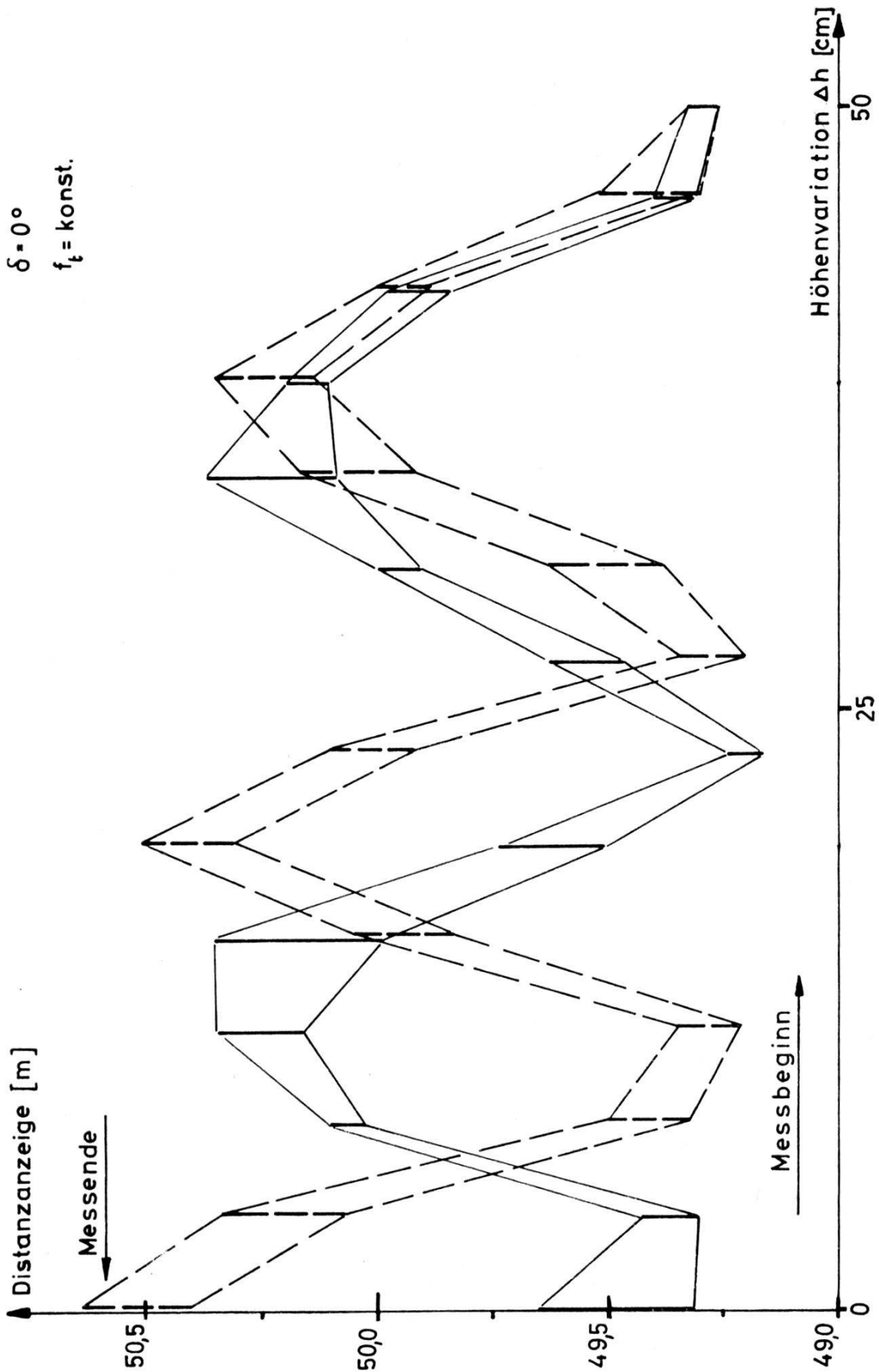
Nachstehend wird anhand einiger Punkte die gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Messung gezeigt und auf ein interessantes, die Reflexionsstelle auf der Seeoberfläche betreffendes Phänomen hingewiesen.

- Die auf Grund theoretischer Überlegungen empfohlene Elevation um $\delta = + 2^\circ$ ergibt auch in diesen Extremfällen sehr gute Resultate. Die erhaltenen Swingkurven sind sinusförmig mit Amplituden von 12 beziehungsweise 25 cm. Die korrekten Distanzen ergeben sich durch Mittelwertbildung aus den Swingkurven.
- Bei Ausrichtung der Antennen auf Signalmaximum, das heißt $\delta \cong 0^\circ$, treten erhebliche Abweichungen der Swingkurven von der Sinusform auf. Die Mittelwertbildung führt nicht mehr zum korrekten Ergebnis. Die Swingamplituden betragen bereits etwa 50 cm.
- Das Signalverhältnis a und damit auch die Swingkurven zeigen bei beiden Strecken die von der Theorie her bekannte Abhängigkeit vom Elevationswinkel. In Figur 20 wird das Signalverhältnis $a = 1$ zwischen den Werten $\delta = - 2^\circ$ und $\delta = - 3^\circ$ erreicht. Für $\delta = - 3^\circ$ und $\delta = - 4^\circ$ ist $a > 1$, und damit pendeln die Swingkurven in Übereinstimmung mit der Theorie um den Wert $d_o + \Delta$ (Länge des Umweges) und weisen positive Spitzen auf. Für $\delta = - 2^\circ$ mit $a < 1$ sind die Spitzen negativ.
- Die Strecke 2 zeigt eine viel größere Empfindlichkeit gegenüber dem Elevationswinkel δ als die Strecke 1. Übertragen wir die geometrische Anordnung der Strecken in die Figur 14, so kommt die Strecke 1 in



Distanz	$d_0 = 3749,75 \text{ m}$
Mittlere Höhe der Stationen über dem See (konstant)	$h = 114 \text{ m}$
Wegdifferenz	$\Delta = 7,0 \text{ m}$
Reflexionswinkel	$\alpha = 3^\circ 30'$

Figur 20: Beobachteter Frequenz-Swing über dem Zürichsee (Strecke Nr. 2)



Distanz	$d_o = 3749,75 \text{ m}$
Mittlere Höhe der Stationen über dem See	$h = 114 \text{ m}$
Wegdifferenz	$\Delta = 7,0 \text{ m}$
Reflexionswinkel	$\alpha = 3^\circ 30'$

Figur 21: Höhen-Swing über dem Zürichsee (Strecke Nr. 2)

die Begrenzungsfläche A und die Strecke 2 in die Fläche B zu liegen. Im Abschnitt 6.1 wurde dargelegt, daß eine Änderung des Elevationswinkels δ vor allem eine Verschiebung der Fläche B bewirkt und nur in der Nähe des «Bergkammes» einen gewissen Einfluß auf die Fläche A ausübt. Theorie und Messung führen also zu denselben Aussagen.

- Der Theorie entsprechend erzeugen Frequenz- und Höhenvariation dieselben Swingkurven für gleiche Elevationswinkel (Fig. 20 und Fig. 21 für $\delta = 0^\circ$; verschiedene Distanzmaßstäbe beachten).
- In der Figur 21 tritt ein interessantes Phänomen besonders deutlich in Erscheinung. Im Verlauf einer Meßreihe wurde die Höhe variiert von $\Delta h = 0$ bei Meßbeginn auf $\Delta h = 50$ cm und wieder zurück auf $\Delta h = 0$ (Meßende). Die angezeigten Distanzwerte sind chronologisch dargestellt; der ganze Zyklus dauerte etwa 15 Minuten. In dieser Zeit hat sich die Phase der Swingkurve für $\Delta h = 0$ um 180° verschoben, nämlich vom Minimum zum Maximum. Die Amplitude des Höhengwings beträgt etwa 24 cm. Im Verlauf der 15 Minuten hat sich also die Reflexionsebene um ungefähr 12 cm gehoben. Der gleiche Effekt ist in Figur 20 festzustellen. Die verschiedenen Swingkurven decken sich nicht in der Phase, weil sie nicht gleichzeitig, sondern in der Reihenfolge $\delta = 0^\circ, -2^\circ, -3^\circ, -4^\circ, 0^\circ$ und $+2^\circ$ gemessen wurden. Nun liegt es auf der Hand, daß sich die Höhe des Seespiegels nicht um diesen Betrag von 12 cm geändert hat. Vielmehr muß angenommen werden, daß dicht über dem Wasserspiegel Luftschichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes liegen, welche eine virtuelle Reflexionsebene über dem Seespiegel bilden, die vertikalen Bewegungen thermischen Ursprungs unterworfen ist. Die Witterungsbedingungen während den Messungen – gemäß Protokoll «Intensive Sonnenbestrahlung, Windstille» – dürften solche Schichtbildungen begünstigt haben. Es könnte von Interesse sein, die beschriebenen Ergebnisse mit den Gezeiten-Beobachtungen nach [2] zu vergleichen.

Literatur:

- [1] *Knud Poder und Ole Bedsted Andersen: Microwave Reflection Problems. EDM. Symp., Oxford, Sept. 1965.*
- [2] *Major R. C. Gardiner-Hill B.A., R.E.: Refinements of Precise Measurements by Tellurometer. Conference of Commonwealth Survey Officers 1963, Paper No. 30.*
- [3] *H. P. Küpfer: How to Increase Accuracy in EDM. XIVth General Assembly of the IUGG, Lucerne 1967.*