HEINRICH-HERTZ-INSTITUT FÜR SCHWINGUNGSFORSCHUNG
BERLIN-CHARLOTTENBURG

Technischer Bericht Nr. 7

Bodenleitfähigkeitsmessungen

Oberpostrat a. D. Dipl.-Ing. F. EPPEN

1 9 5 7

Technischer Bericht Nr. 7

Bodenleitfähigkeitsmessungen

Zusammenfassung

Zur Messung der Bodenleitfähigkeit für Hochfrequenz wurde ein Meßgerät gebaut, das nach einem von R. L. Smith-Rose und R. H. Barfield angegebenen und von Großkopf und Vogt verbesserten Verfahren die Bodenleitfähigkeit und die Dielektrizitätskonstante mittels eines in allen Richtungen im Raum drehbaren Dipols aus dem Achsenverhältnis der Zenneck'schen Drehfeldellipse und der Neigung der großen Achse gegen die Vertikale zu bestimmen gestattet. Auf verschiedenen Flächen am Rande von Westberlin wurden Messungen mit dem Gerät durchgeführt, deren Ergebnis mitgeteilt wird.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Der Bearbeiter

gez. Eppen

(Oberpostrat a. D. Dipl.-Ing. F. Eppen)

Der Abteilungsleiter

gez. Gundlach

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

Der Institutsdirektor

gez. Rothert

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

Berlin-Charlottenburg, den 27. März 1957

Die Kenntnis der Bodenleitfähigkeit für Hochfrequenz ist für verschiedene Aufgaben der Funktechnik von Bedeutung. Im Senderbau, besonders für Mittel - und Langwellensender, verringert gute Bodenleitfähigkeit die Kosten der Erdung. Bei schlechter Bodenleitfähigkeit ist gute Schwundminderung bei Mittelwellensendern nur mit sehr grossem Aufwand für die Erdung zu erreichen. Wesentlich für diese Sender ist auch, dass das Gelände in seinem vertikalen Aufbau nach den verschiedenen Richtungen gleichförmig ist, was durch Bodenleitfähigkeitsmessungen in einem breiteren Frequenzbande festgestellt werden kann. Die gleiche Forderung nach Gleichförmigkeit besteht auch für Peil-und Richtsenderanlagen, da bei Ungleichförmigkeit des Bodens Missweisungen auftreten können.

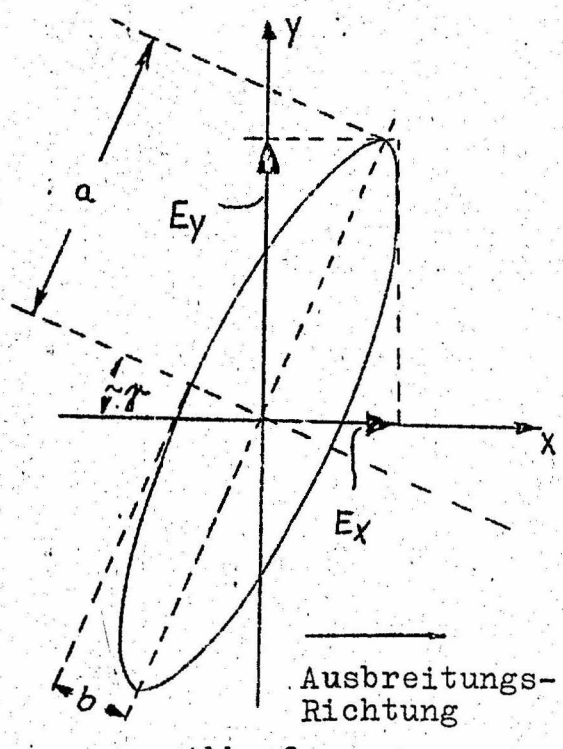


Abb. 1

Es erschien daher erwünscht, dass das Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung in der Lage wäre, Bodenleitfähigkeitsmessungen durchzuführen. Im Rahmen eines Forschungsauftrages wurde daher ein Gerät für diese Messungen aufgebaut und mit ihm eine Anzahl von Messungen durchgeführt. Hierüber wird im folgenden berichtet.

Nach der Theorie von Z e n n e c k steht der elektrische Vektor eines von einem Sender ausgestrahlten Feldes bei der Ausbreitung über Gelände mit unendlich guter Leitfähigkeit senkrecht, während er bei Ausbreitung über Boden mit endlicher Leitfähigkeit eine horizontale Komponente in der Ausbreitungsrichtung bekommt. Die horizontale Komponente eilt der vertikalen um den Winkel φ voraus, daher rotiert der Vektor des elektrischen Feldes auf einer Ellipse (Abb. 1), deren grössere Achse in der Ausbreitungsrichtung etwas gegen die Vertikale geneigt ist. Aus dem Achsenverhältnis der Drehfeldellipse und der Neigung der grösseren Achse gegen die Vertikale kann man die Bodenkonstanten ermitteln, nämlich die Bodenleitfähigkeit und die Dielektrizitätskonstante. Das Achsenverhältnis

und der Neigungswinkel gegen die Vertikale werden mittels eines Dipols bestimmt, der in horizontaler und vertikaler Ebene drehbar ist. Das für die Messungen benutzte Gerät zeigt die Abbildung 2.

Abb. 2

Es besteht im wesentlichen aus einem batteriegespeisten Zwischenfrequenzempfänger mit Rückkopplung, auf dem die Vorrichtung, die die Drehung des Dipols in vertikaler und horizontaler Ebene ermöglicht, aufgebaut ist. Die Drehwinkel sind an Skalen mit Nonius mit genügender Genauigkeit ablesbar. Um den Einfluss des Körpers des Messenden möglichst klein zu halten, ist der Dipol an einer etwa 3/4 m langen horizontalen Achse befestigt. Bei angezogener Rückkopplung kann der vom Dipol aufgenommene Sender am Ausgang des Empfängers neben der Messung mit einem empfindlichen Drehspulinstrument mit dem Kopfhörer als Ton gehört werden, was zur Feststellung etwaiger die Messungen beeinflussender Störsender wichtig ist. Bei dem Aufbau des Gerätes, das weitgehend dem gleicht, das im früheren Sachgebiet des Verfassers im RPZ als Weiterentwicklung der von Grosskopf und Vogt[1] benutzten Anordnung gebaut war, wurde peinlichst auf grösste Symmetrie der Dipolarme und der Zuführungen zum Empfänger sowie auf gute Abschirmung der letzteren geachtet.

Zur Messung wird der Dipol zunächst horizontal eingestellt (es ist dann nur noch der Empfang der Horizontalkomponente des elektrischen Feldes möglich) und in dieser Lage so weit um die vertikale Achse gedreht, bis am Empfängerausgang ein absolutes Empfangsnull erreicht ist. Der Dipol steht dann genau senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Wellen. Von dieser Stellung ausgehend wird er um 90° um die vertikale Achse in die Ebene der Drehfeldellipse gedreht. In der Ellipsenebene stellt man ihn jetzt durch Drehen um die horizontale Achse auf minimalen

[1] Großkopf und Vogt, Ueber die Messung der Bodenleitfähigkeit, TFT 1940, Heft 6, S. 164
R. L. Smith-Rose und R. H. Barfield, E.W.W.E. II (1925), S. 737

Empfang ein. Dieser ist gegeben, wenn der Dipol in Richtung der kleinen Ellipsenachse steht und somit um den Winkel γ gegen die Horizontale geneigt ist. Der Dipol wird dann wieder in die Peilstellung, also in die Lage des absoluten Empfangsnulls zurück und bei unverändertem Verstärkungsfaktor des Empfängers um die horizontale Achse so weit gedreht, bis das Anzeigeinstrument denselben Ausschlag zeigt, wie vorher bei Stellung des Dipols in Richtung der kleinen Ellipsenachse. Der Dipol ist hierbei um einen Winkel α gegen die Horizontale geneigt. Dieser Winkel α ist ein Mass für das Achsenverhältnis auf Grund folgender Ueberlegungen. Die Empfangscharakteristik eines Dipols bei Drehung in einer Ebene senkrecht zur Einfallsrichtung der Wellen ist, wenn der Dipol sauber aufgebaut ist, ein genaues Doppelkreis-Diagramm. Steht der Dipol senkrecht ($\alpha = 90^\circ$), so ist die in ihm induzierte Spannung proportional der Feldstärke $\mathfrak{E}$ am Empfangsort, bei Drehung um den Winkel α gegen die Horizontale ist sie proportional $\mathfrak{E} \cdot \sin \alpha$. Nach der Messvorschrift ist die $\mathfrak{E} \cdot \sin \alpha$ entsprechende Dipolspannung gleich der gemacht, die bei Stellung des Dipols in Richtung der kleinen Ellipsenachse gefunden wurde, somit verhalten sich näherungsweise die Spannungen in Richtung der grossen und kleinen Achse: $a : b = \mathfrak{E} : \mathfrak{E} \cdot \sin \alpha = 1/\sin \alpha$, für kleine Winkel also wie $1/\alpha$. Der Wert $1/\sin \alpha$ gilt genau nur dann, wenn der Winkel $\gamma = 0$ ist, ist er gross, so muss $1/\sin \alpha$ noch mit $1/\cos \gamma$ multipliziert werden. Bleibt γ unberücksichtigt, so ergibt sich bei $\gamma = 8^\circ$ ein Fehler von 1%, bei 18° von 5%. In den meisten Fällen der Praxis wird man also das Achsenverhältnis $a/b = 1/\alpha$ setzen können.

Dieses von Grosskopf und Vogt angegebene Messverfahren hat grosse Vorzüge. Der Empfänger dient bei ihm nur als Indikator, braucht also nicht geeicht zu werden und muss in seiner Verstärkung nur während der Messung konstant sein. Die bei der Bestimmung der Winkel γ und α auftretenden Spannungen sind gleich, man braucht also zur Bestimmung des Achsenverhältnisses nicht zwei Werte sehr verschiedener Grösse - die Spannungen in Richtung der grossen und der kleinen Achse - sondern nur einen Winkel zu messen, was relativ genau möglich ist.

Mit den Werten α und γ der Drehfeldellipse erhält man die Dielektrizitätskonstante und die Bodenleitfähigkeit, die die Ausbreitung der Wellen in der Nähe des Messpunktes beeinflussen, die sogen. "effektive" Dielektrizitätskonstante und die "effektive" Boden-

leitfähigkeit nach folgenden aus der Theorie sich ergebenden Beziehungen:

$$\varkappa_{eff} = \varkappa_o \frac{4\,\gamma/\alpha}{(\gamma^2/\alpha^2 + 1)^2}$$

$$\varkappa_o = \frac{\omega\varepsilon_o}{2\alpha^2}; \quad \frac{\varkappa_o}{[mS/m]} = \frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{f}{[Hz]} \cdot \frac{10^{-6}}{36}$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\alpha^2} \frac{(\gamma^2/\alpha^2 - 1)}{(\gamma^2/\alpha^2 + 1)^2}$$

Ferner ist $tg\ \varphi = \alpha/\gamma$.

$\varkappa_o$ ist die Bodenleitfähigkeit bei $\gamma/\alpha = 1$. Dieses ist der Fall bei homogenem Boden und niedrigen Frequenzen.

Im folgenden sind die Werte der Bodenleitfähigkeit in Millisiemens pro Meter [mS/m] angegeben. Für die Umrechnung der früher häufig in elektromagnetischen [EME] oder elektrostatischen [ESE] Einheiten angegebenen Werte besteht folgende Beziehung:

$$1\ mS/m = 10^{-14}\ EME = 9 \cdot 10^6\ ESE.$$

Da in der Mehrzahl aller Fälle der Boden in seinem vertikalen Aufbau nicht homogen ist, sondern mehrere übereinander gelagerte Schichten mit verschiedenen Werten von $\varkappa$ und ε aufweist, setzen sich $\varkappa_{eff}$ und ε_{eff} aus den Werten der einzelnen Schichten zusammen, sofern die Wellen in sie noch eindringen. Infolge des Skin-Effektes sind die effektiven Werte von $\varkappa$ und ε bei hohen Frequenzen durch die oberen Bodenschichten bestimmt, mit niedriger werdenden Frequenzen sind die tieferliegenden Schichten in zunehmendem Masse bestimmend. Für die Eindringtiefe (Abfall der Amplitude auf das 1/e-fache) der Wellen ergibt sich zwischen Frequenz und Bodenleitfähigkeit folgender Zusammenhang bei homogenem Boden:

Frequenz kHz	Eindringtiefe in m bei $\varkappa_o$ = 10 mS/m	$\varkappa_o$ = 5 mS/m	$\varkappa_o$ = 1 mS/m
150	13	18,5	41
800	5,7	7,5	17
1500	4,1	5,8	13

Zur genauen Kenntnis der Bodenverhältnisse ist es somit nötig, Bodenleitfähigkeitsmessungen in einem grösseren Frequenzbereich, etwa 100 kHz bis 10 MHz, durchzuführen. Aus dem Verlauf der Kurve der Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz erhält man dann sichere Unterlagen über den vertikalen Aufbau des Bodens.

Gewisse Schlüsse kann man auch schon aus der Messung bei nur einer mittleren Frequenz ziehen. Je nach dem, ob α kleiner, gleich oder grösser als γ ist, wird ε_{eff} positiv, null oder negativ. Wird es gleich Null oder sehr klein, so heisst das, dass der Verschiebungsstrom gegen den Leitungsstrom vernachlässigt werden kann. Wird α grösser als γ, was sehr häufig der Fall ist, so ist stets mit einer vertikalen Schichtung zu rechnen, und zwar mit einer besser leitenden unteren Schicht. Für homogenen Boden muss α kleiner γ, tg φ kleiner als 1 sein. Aber auch bei diesem Verhältnis von $\alpha : \gamma$ ist Schichtung des Bodens möglich, man hat es dann meistens mit einer schlechter leitenden unteren Schicht zu tun.

Rückschlüsse aus Messungen bei einer Frequenz sind nur dann mit gewisser Sicherheit möglich, wenn die Feldstärke am Empfangsort nicht durch Rückstrahlung an Geländeerhöhungen usw. gefälscht ist. Dieses ist aber nicht ohne weiteres bemerkbar. In allen Fällen, in denen der Verdacht auf schädliche Einflüsse durch Rückstrahlung besteht, empfiehlt es sich stets, die Messungen bei mehreren Frequenzen durchzuführen.

Für die Durchführung der Messungen seien noch einige allgemeine Bemerkungen gemacht. Bei der Wahl der Messpunkte muss man bestrebt sein, soweit wie möglich von Gegenständen, die das Feld der zur Messung benutzten Sender stören können, wie Leitungen, hohe Bäume, Gebäude und Bodenerhebungen, fern zu bleiben. Das den Dipol tragende obere Teil des Empfängers wird mittels der an ihm angebrachten Libelle genau wagerecht gestellt. Sofern der Empfänger nicht völlig dicht ist, also ohne den Dipol noch etwas aufnimmt, muss er so gedreht werden, dass der Eigenempfang null wird. Bei den Messungen ist wichtig, dass der Messende möglichst symmetrisch zu den Dipolarmen steht, da auf diese Weise der Einfluss des Körpers am geringsten ist. Die Fehler, die durch die Anwesenheit des Messenden verursacht werden können, sind im all-

gemeinen bei der Bestimmung des Winkels γ grösser als bei der von α. Da α^2 von der Frequenz abhängig ist, werden die Werte von α bei niedrigen Frequenzen - auf homogenem Boden oder bei schlechtleitenden unteren Schichten - ziemlich klein, so dass Messfehler stärker ins Gewicht fallen.

Messungen wurden vorerst in 7 verschiedenen Gebieten Westberlins durchgeführt, nämlich im Tiergarten, auf den Rieselfeldern bei Gatow, auf der Haveldüne am Weinmeisterhorn, in dem Gelände bei Tiefwerder, in dem Ackerland beim Johannisstift nördlich Spandau, in dem Wiesengelände bei Lübars und auf einem Sportplatz an der Tauernallee in Mariendorf, da für dieses Gelände ein Bohrprofil vorliegt. Bei der Auswahl der Gebiete für die Messungen war der Gesichtspunkt massgebend, Plätze mit möglichst verschiedenartigem Aufbau des Bodens zur Erprobung des Gerätes und der Messmethode zu bekommen, ohne Rücksicht auf praktische Verwertbarkeit der Messungen. Durch Fühlungnahme mit dem Hauptamt für Vermessung des Senats von Berlin wurde versucht, soweit möglich, geologische Unterlagen über die untersuchten Geländestücke zu bekommen, jedoch waren trotz bereitwilligen Entgegenkommens seitens des Amtes nur wenige für uns wertvolle Anhaltspunkte zu erhalten, da sich die Unterlagen des Amtes vorwiegend auf die Eignung der Plätze für bauliche Zwecke erstrecken, während für uns in erster Linie, schon mit Rücksicht auf geringe Störungen der hochfrequenten Senderfelder, möglichst freigelegene Flächen in Frage kommen.

Abbildung 3 zeigt als Beispiel die an einem Messpunkt bei den Frequenzen 263, 398, 566, 683, 782, 881, 989, 1484 kHz gefundenen Werte von α und γ und die daraus errechneten Werte von $\varkappa_{eff}$, $\varkappa_0$, ε_{eff} und φ. Man sieht, dass die Werte von γ stärker streuen als die von α. $\varkappa_0$, das wesentlich einfacher zu errechnen ist als $\varkappa_{eff}$, liegt im vorliegenden Falle im Mittel etwa 18 % unter $\varkappa_{eff}$, dürfte also für schnelle überschlägliche Leitfähigkeitsbestimmungen häufig ausreichen. ε_{eff} ist nur am letzten Messpunkt positiv, bei allen anderen und besonders stark bei den niedrigen Frequenzen negativ, was daher rührt, dass die tieferen Schichten wesentlich besser leiten als die obere. φ, die Phasenvoreilung der horizontalen Komponente des elektrischen Feldes ändert sich, wie zu erwarten, in dem verhältnismässig engen Frequenzbereich nur wenig

und beträgt, abgesehen vom letzten Messpunkt, 50 bis 55°.

Die Werte des besprochenen Beispiels wurden an einem Punkte des Tiergartens gemessen, sie wurden an verschiedenen Tagen bestätigt gefunden, mit Ausnahme der Messungen bei der höchsten Frequenz, die nach Regen eine bessere Leitfähigkeit ergab, ein Beweis für den überwiegenden Einfluss der oberen Bodenschicht.

Auf dem Gebiet der Rieselfelder bei Gatow wurde auf einer Fläche von etwa 2,2 x 1,44 km an 37 Punkten gemessen. Die folgende Tabelle zeigt die bei den einzelnen Frequenzen gefundenen höchsten und niedrigsten Werte der Bodenleitfähigkeit.

f [kHz]	185	263	398	566	683	989	1484
$\varkappa_{max}$ [mS/m]	60	45	37	48	52	32	58
$\varkappa_{min}$ [mS/m]	4	4	4	4	4	5	4

Die Werte von $\varkappa_{min}$ rühren von Messungen an einem Punkt her, die über das ganze Frequenzband eine fast gleiche, ziemlich niedrige Leitfähigkeit ergaben.

In Abb. 4, A ... F, ist der Verlauf von $\varkappa$ an 6 Punkten der Rieselfelder dargestellt. Man sieht, dass selbst bei einem verhältnismässig so kleinen Gelände der Boden in seinem vertikalen Aufbau an verschiedenen Stellen völlig unterschiedlich sein kann. Bei A ist die Leitfähigkeit im ganzen ziemlich niedrig, der Boden ist bis zu einer Tiefe von etwa 15 m elektrisch homogen. Die Kurve B weist auf schlecht leitende tiefere und besser leitende obere Schichten hin, während bei C die Verhältnisse umgekehrt liegen. In der Gegend, in der die Kurve D aufgenommen ist, liegt zwischen schlechter leitenden unteren und oberen Schichten eine etwas besser leitende mittlere Schicht. Bei E sind die Verhältnisse ähnlich, nur ist die Leitfähigkeit der gut leitenden Schicht wesentlich höher. Bei F liegt eine sehr gut leitende Schicht ziemlich tief und ist offenbar nicht sehr mächtig, während die Leitfähigkeit weiter nach oben abnimmt.

In Abb. 5 und 6 sind in Kartenausschnitten der Rieselfelder Kurven gleicher Bodenleitfähigkeit für die Frequenzen 398 und 683 kHz eingezeichnet. Da die einzelnen Messpunkte im allgemei-

nen nicht mehr als 350 m auseinander liegen, ist man wohl berechtigt, derartige Kurven auf Grund der Messungen an einzelnen Punkten zu zeichnen.

Abb.7 zeigt oben 2 Kurven, die im Gebiet von Tiefwerder aufgenommen sind. Im südlichen Teil des Geländes, der bei hohem Wasserstand der Havel häufig überschwemmt wird, wurde eine recht hohe Leitfähigkeit gefunden, und zwar leiten,wie zu erwarten, die oberen sehr feuchten, wie auch die tiefer liegenden, möglicherweise aus Faulschlamm bestehenden Schichten gut, während zwischen ihnen eine schlechter leitende Schicht,vermutlich Sand und Ton, liegt. Ganz anders sind die Verhältnisse im nördlichen Teil des Gebietes, auf den sogen. Freiheitswiesen. Hier ergab sich eine sehr niedrige Leitfähigkeit, die in der Tiefe noch etwas besser als oben ist. Wahrscheinlich wurde hier in früheren Zeiten schlechter Boden, z.B. Schutt, aufgefahren.

Im unteren Teil von Abb. 7 sind 2 Kurven vom Gelände des Johannesstiftes nördlich von Spandau dargestellt, von denen die untere charakteristisch für die Leitfähigkeitsverhältnisse im nördlichen Teil des Geländes - Ackerland mit ziemlich leichtem Boden - ist, während sich durch den südwestlichen Teil des Geländes ein kleiner Bach zog. Dieser wurde, wahrscheinlich mit Boden aus dem nördlichen Teil, zugeschüttet, so dass die oberen Schichten die gleiche schlechte Leitfähigkeit wie im nördlichen Teil haben, während die, vermutlich moorigen, tieferen Schichten hohe Leitfähigkeit zeigen.

Völlig aus dem Rahmen fallen die in dem Wiesengelände westlich und nördlich von Lübars aufgenommenen Kurven, da die Leitfähigkeit wesentlich höher als an den anderen untersuchten Punkten ist. Durch das Gelände fliesst das Tegeler Fliess, dessen Bett früher sehr viel breiter war, vor etwa 200 Jahren war die ganze Gegend ein See, aus dem einzelne Inseln herausragten. Die Kurve A der Abb.8 wurde an einem etwas höher gelegenem sandigen Punkt aufgenommen. Der Punkt B lag am Rande des Wiesengeländes, in der Nähe der Beneckendorffstrasse. Die Punkte C und D lagen in den sehr feuchten Wiesen, in unmittelbarer Nähe des Fliesses. Nach Anggbe des Vermessungsamtes liegt in diesem Gelände oben eine Torfschicht von etwa 3 m Mächtigkeit, darunter eine mehrere Meter

dicke Faulschlammschicht über einer Schicht von Ton bezw. Mergel.

Als letzte wurde eine Kurve (Abb.9) auf dem Sportplatz der Deutschen Bank in der Tauernallee in Mariendorf aufgenommen, weil von einem Punkt dieses Geländes ein Bohrprofil vorhanden ist. Die Kurve weist starke Schwankungen der Leitfähigkeit auf, die man auf Grund des Bohrprofils erwarten kann. Nach ihm baut sich der Boden folgendermassen auf:

m	
0,0	Mutterboden
0,4	Lehm, Geschiebelehm und Mergel
9,2	Ton (Geschiebemergel ?)
11,3	Grobsand mit Steinen
12,3	Ton (Geschiebemergel)
15,1	Geschiebemergel
29,4	Toniger Sand
30,7	Feinsand
34,4	Grobsand
38,5	Feinsand
40,8	

Um einen Zusammenhang zwischen Bohrprofilen und aufgenommenen Leitfähigkeitskurven herleiten zu können, müsste die Leitfähigkeitm der einzelnen Bodensorten bekannt sein. Rückschlüsse aus Leitfähigkeitskurven auf den genaueren Aufbau des Bodens liessen sich erst ziehen, wenn eine grössere Zahl von Messungen der Leitfähigkeit an Punkten, für die Bohrprofile vorliegen, durchgeführt würden, wobei wesentlich ist, dass an diesen Punkten die elektrischen Messungen nicht durch in der Nähe liegende Gegenstände gestört werden.

Das Gerät für die Messungen der Bodenleitfähigkeit wurde von Herrn Dipl.-Ing. Klaus Schunke aufgebaut, die Messungen führte Herr cand.ing. Karl Burwick aus. Beiden Herren möchte ich an dieser Stelle Dank und Anerkennung für die geleistete Arbeit aussprechen.

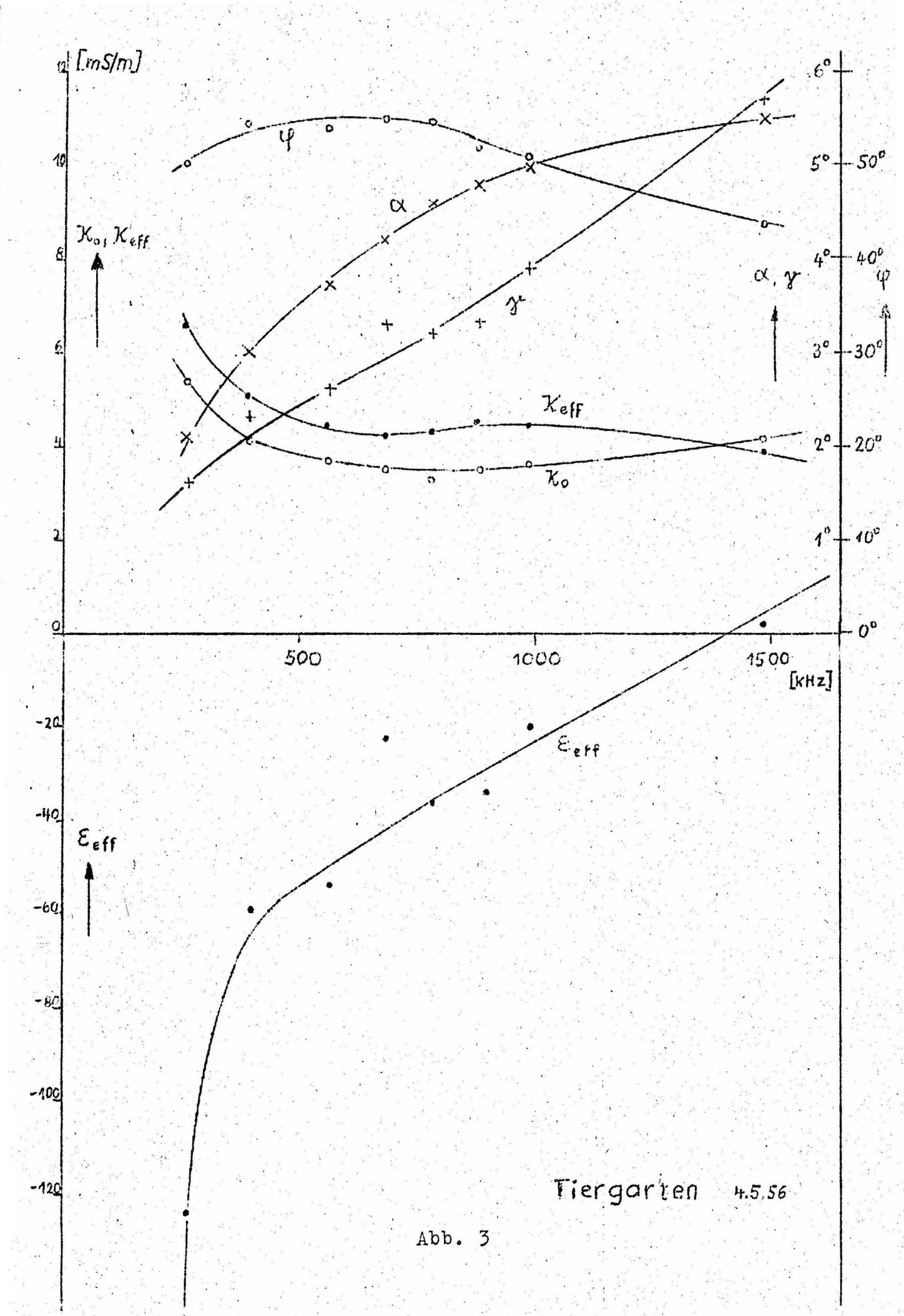

[mS/m]
12
10
8
6
4
2
0
$\varkappa_o, \varkappa_{eff}$
φ
α
γ
$\varkappa_{eff}$
$\varkappa_o$
α, γ
6°
5°
4°
3°
2°
1°
0°
50°
40°
30°
20°
10°
φ
500
1000
1500
[kHz]
-20
-40
-60
-80
-100
-120
ε_{eff}
ε_{eff}
Tiergarten 4.5.56

Abb. 3

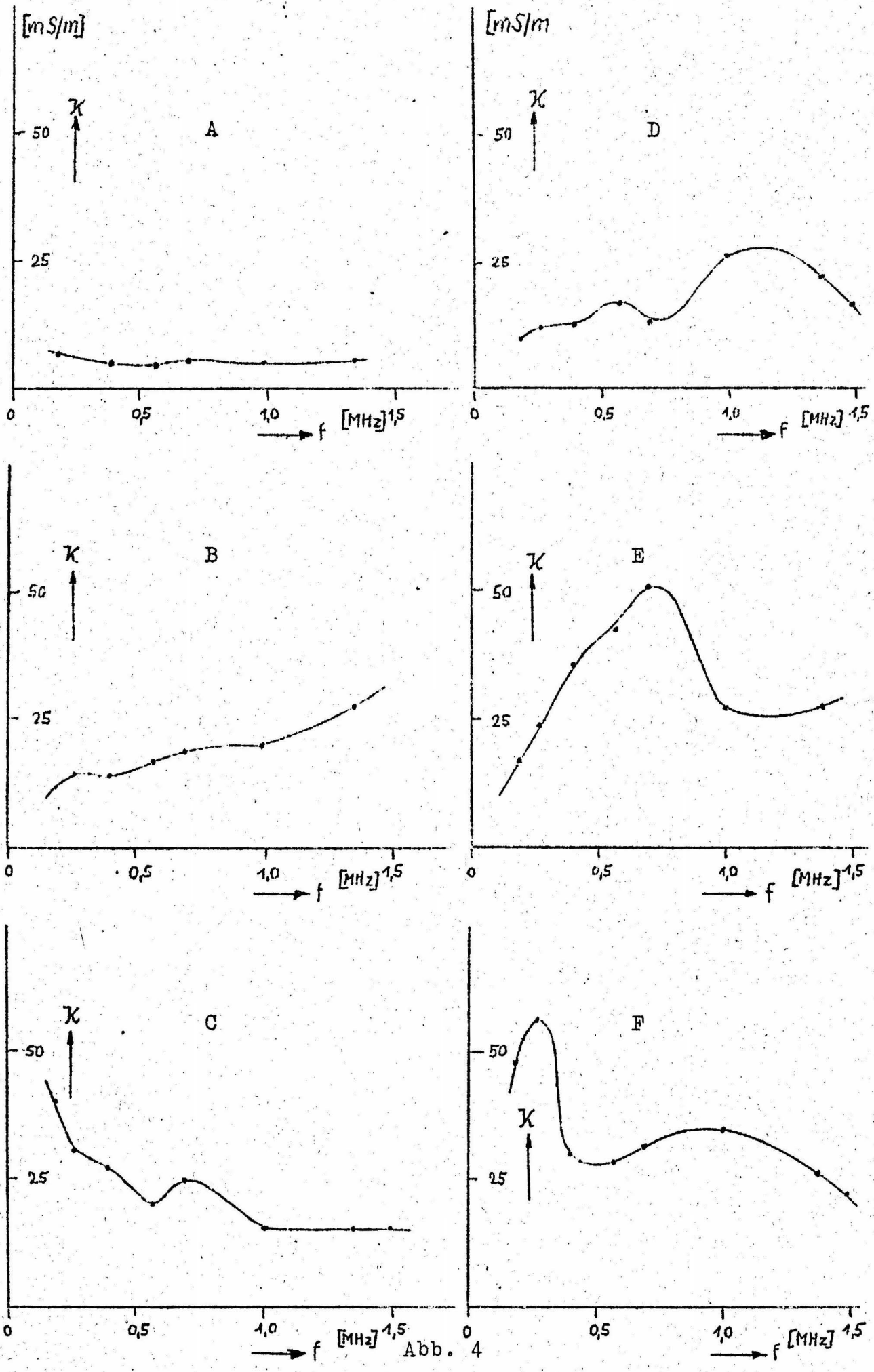

[mS/m]
κ
50
25
A
0
0,5
1,0
1,5
f [MHz]
[mS/m
κ
50
25
D
0
0,5
1,0
1,5
f [MHz]
κ
B
50
25
0
0,5
1,0
1,5
f [MHz]
κ
E
50
25
0
0,5
1,0
1,5
f [MHz]
κ
C
50
25
0
0,5
1,0
1,5
f [MHz]
F
50
κ
25
0
0,5
1,0
1,5
f [MHz]

Abb. 4

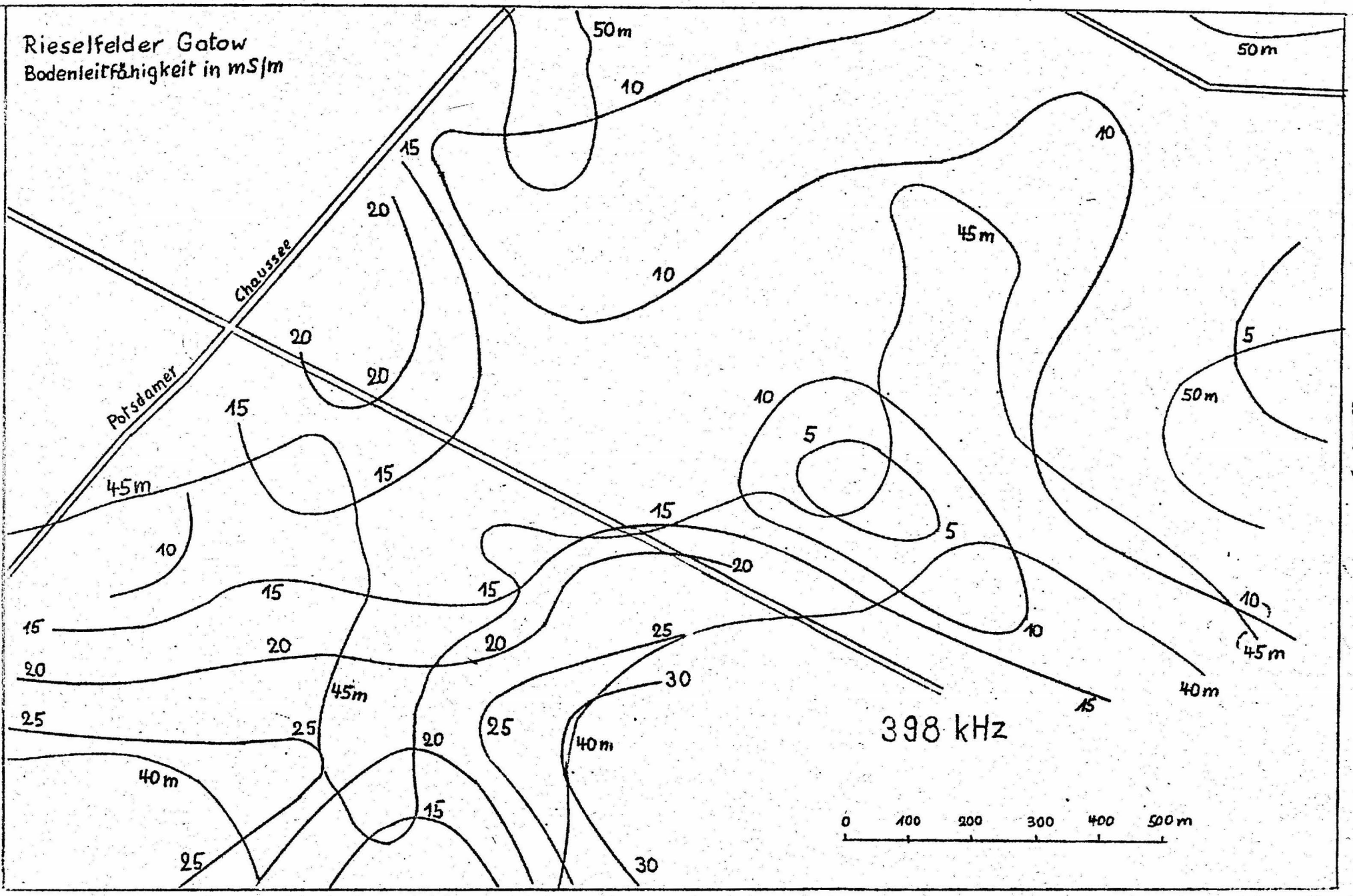

Rieselfelder Gatow
Bodenleitfähigkeit in mS/m
Chaussee
Potsdamer
50m
10
15
20
45m
5
25
30
40m
398 kHz
0 100 200 300 400 500 m

Abb. 5

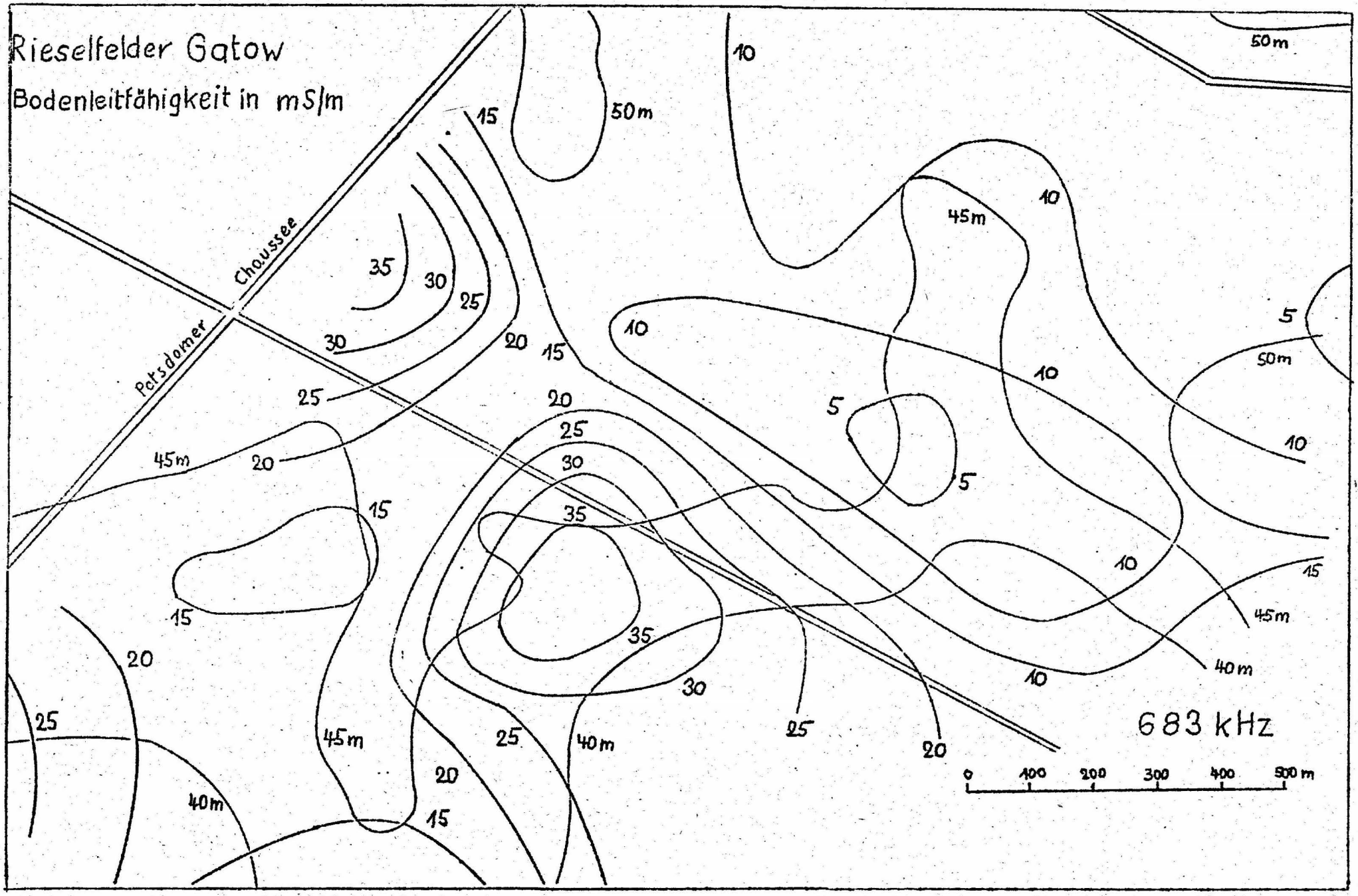
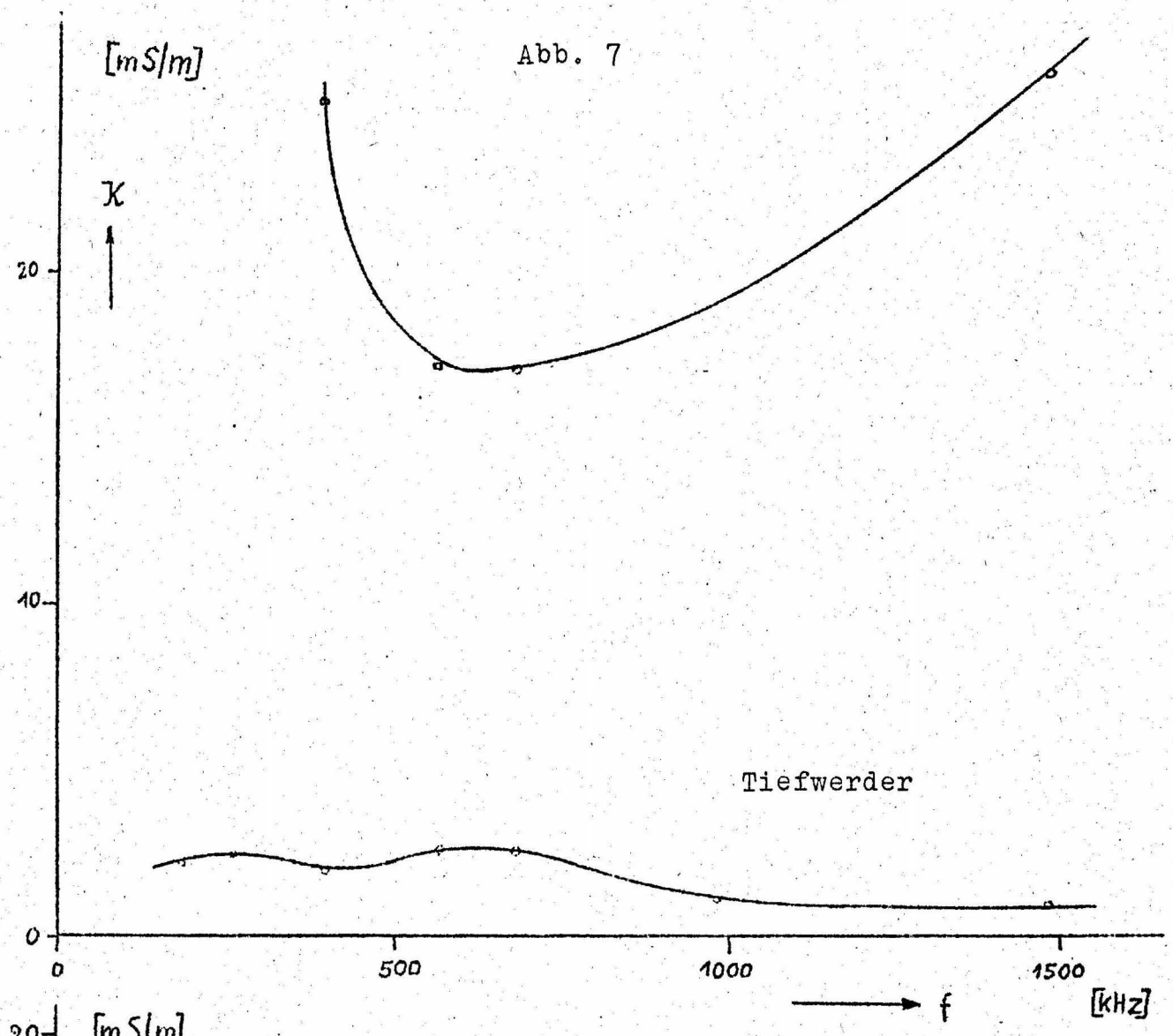

Rieselfelder Gatow
Bodenleitfähigkeit in mS/m
Chaussee
Potsdamer
683 kHz
0 100 200 300 400 500 m

Abb. 6

Abb. 7


[mS/m]
K
20
10
0
Tiefwerder
0
500
1000
1500
f
[kHz]

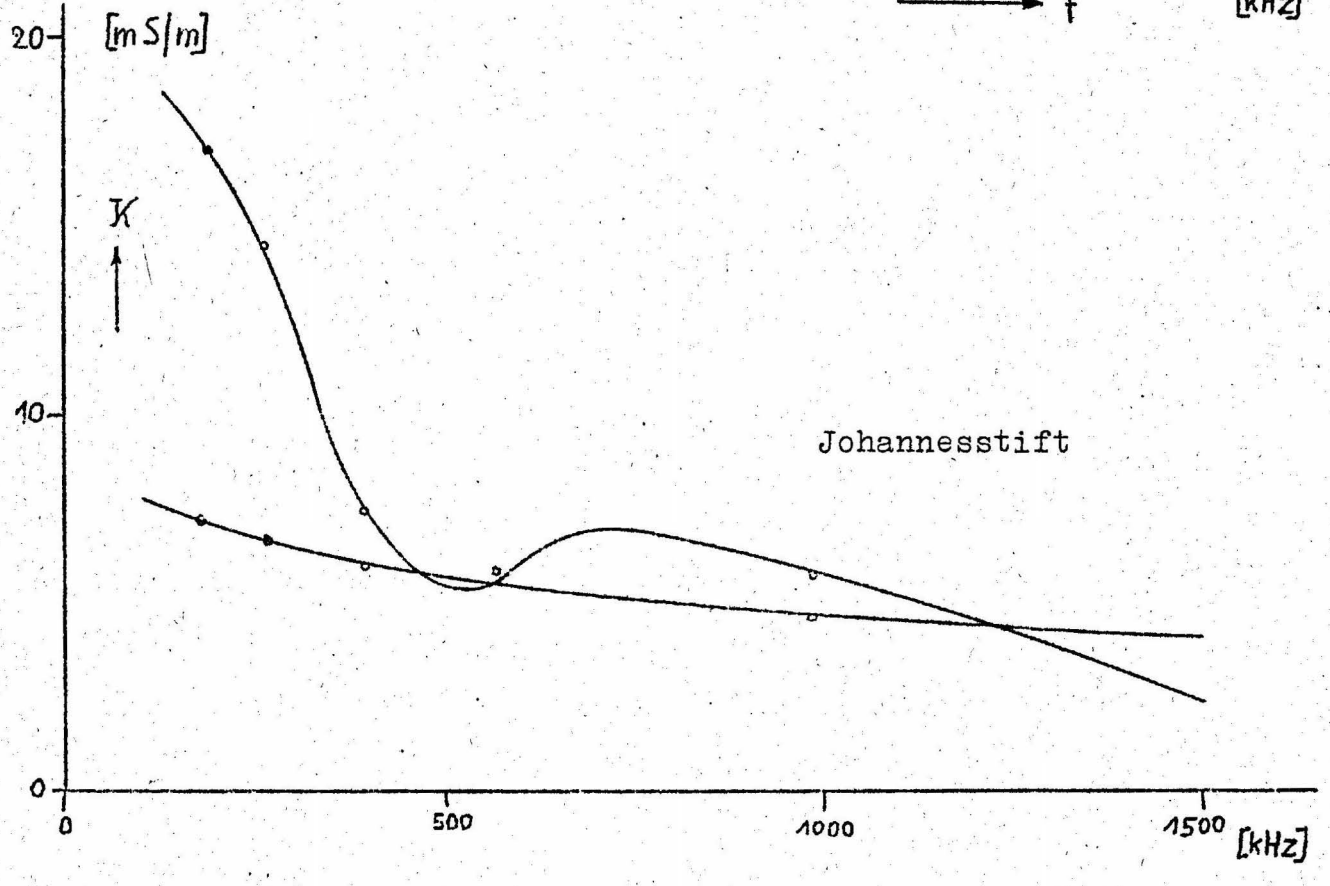
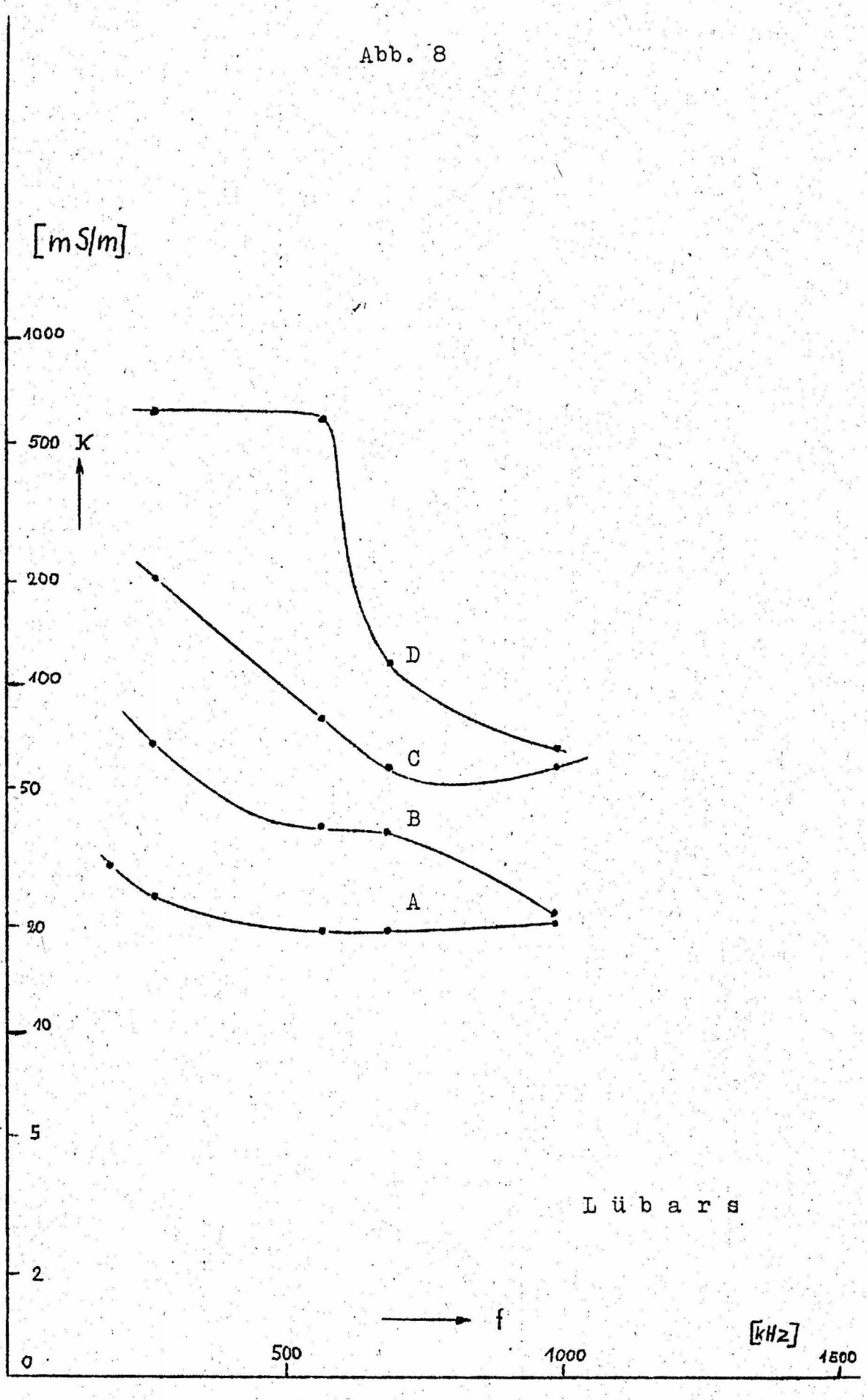

20
[mS/m]
K
10
0
Johannesstift
0
500
1000
1500
[kHz]

Abb. 8



L ü b a r s

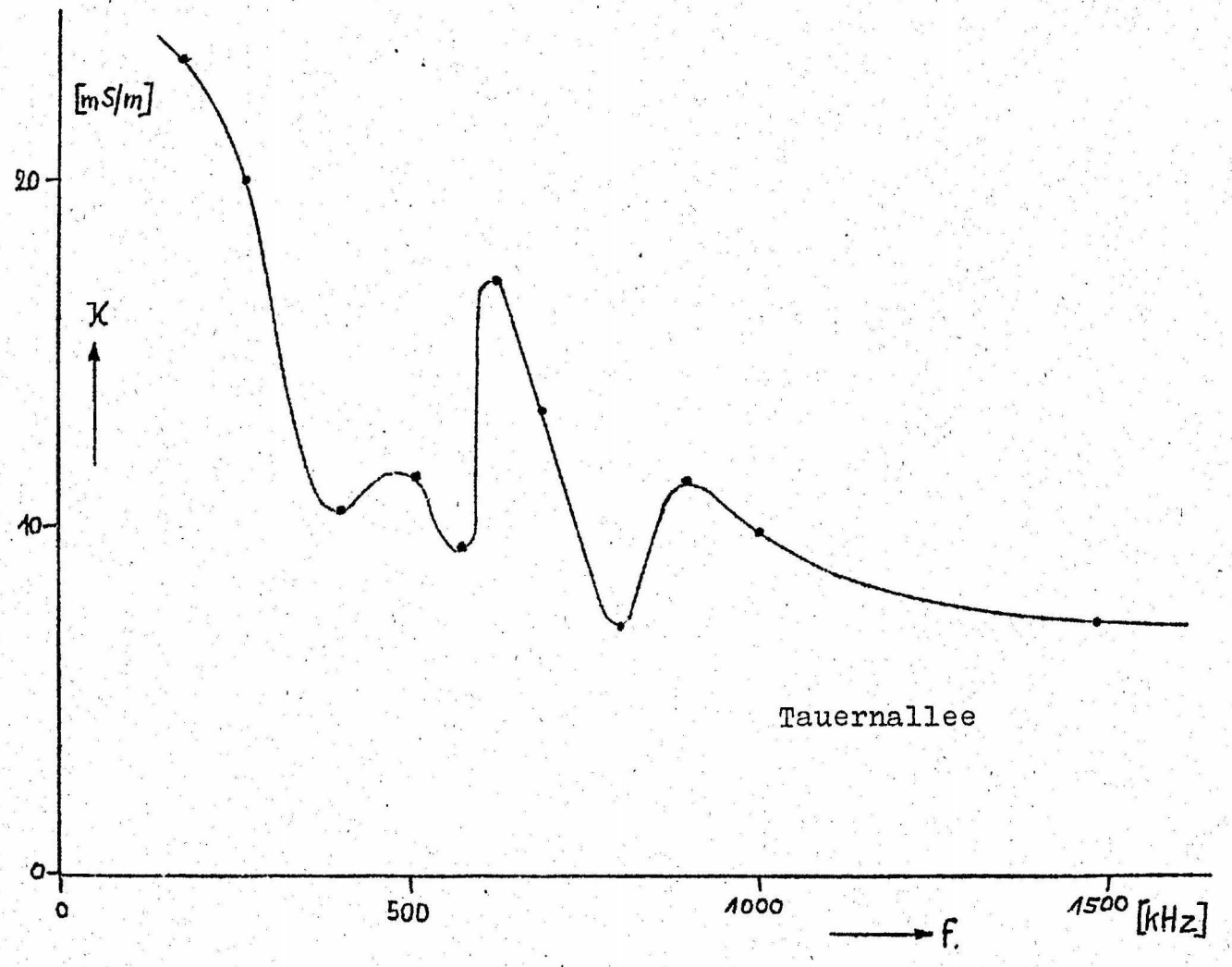



Abb. 9