

Passive Mikrowellensensoren zur Fernerkundung

Wolfgang Keydel

DLR-Oberpfaffenhofen. Institut für Hochfrequenztechnik & Radarsysteme
D-82230 Wessling

Mittelfeld 4, 82229 Hechendorf, Tel./Fax: 0 8152-980 523 / 5,
e-mail's: wolfgang.keydel@dlr.de, wolfgang@keydel.com

1. Ziel der Präsentation

Radiometrie bedeutet "Strahlungsmessung"; Mikrowellenradiometrie ist demnach die Messung der natürlichen Mikrowellenstrahlung der Materie, und ein Mikrowellenradiometer ist das dazu nötige Meßgerät. Die Mikrowellenradiometrie ist im Gegensatz zum aktiven Radar ein passives Mikrowellenverfahren.

Ein Mikrowellenradiometer ist ein extrem empfindliches Empfangssystem, das Mikrowellenstrahlung empfängt, auswertet und anzeigt, die aus der Umgebung des Radiometers einfällt.

Ziel der folgenden Ausführungen ist, in die Physik der Mikrowellenradiometrie einzuführen und grundlegende Geräte und Verfahren so zu beschreiben, daß man die Struktur der Ausgangssignale mit den bisher bekannten Auswerteverfahren für Fernerkundung und Aufklärung anwenden kann.

2. Physik der Mikrowellen-Radiometrie

2.1 Strahlungsmechanismen, die Meßgröße

Die natürliche Mikrowellenstrahlung ist inkohärente Wärmestrahlung. Ihre Intensität liegt entsprechend dem Planckschen Strahlungsgesetz für den schwarzen Körper mehrere Größenordnungen unter jener der natürlichen Infrarot-Strahlung (Abb. 1). Die vom Mikrowellenradiometer empfangene Strahlung resultiert in der Regel aus der vom Meßobjekt emittierten Strahlung (proportional zu seiner Eigentemperatur), der am Objekt reflektierten bzw. gestreuten Strahlung des Hintergrunds und der Umgebung sowie der vom Ausbreitungsmedium zwischen Objekt und Radiometer emittierten Strahlung (Abb. 2). Wie im Spektralbereich des infraroten und sichtbaren Lichts werden objektspezifische Größen wie Emissionsvermögen (ϵ), Absorptionsvermögen ($\alpha = \epsilon - 1$), Reflexionsvermögen ($\rho \leq 1$), wobei für rauhe Ober-

flächen dafür das Steuervermögen ($\sigma \leq 1$) steht, und τ das Transmissionsvermögen ($\tau \leq 1$) definiert.

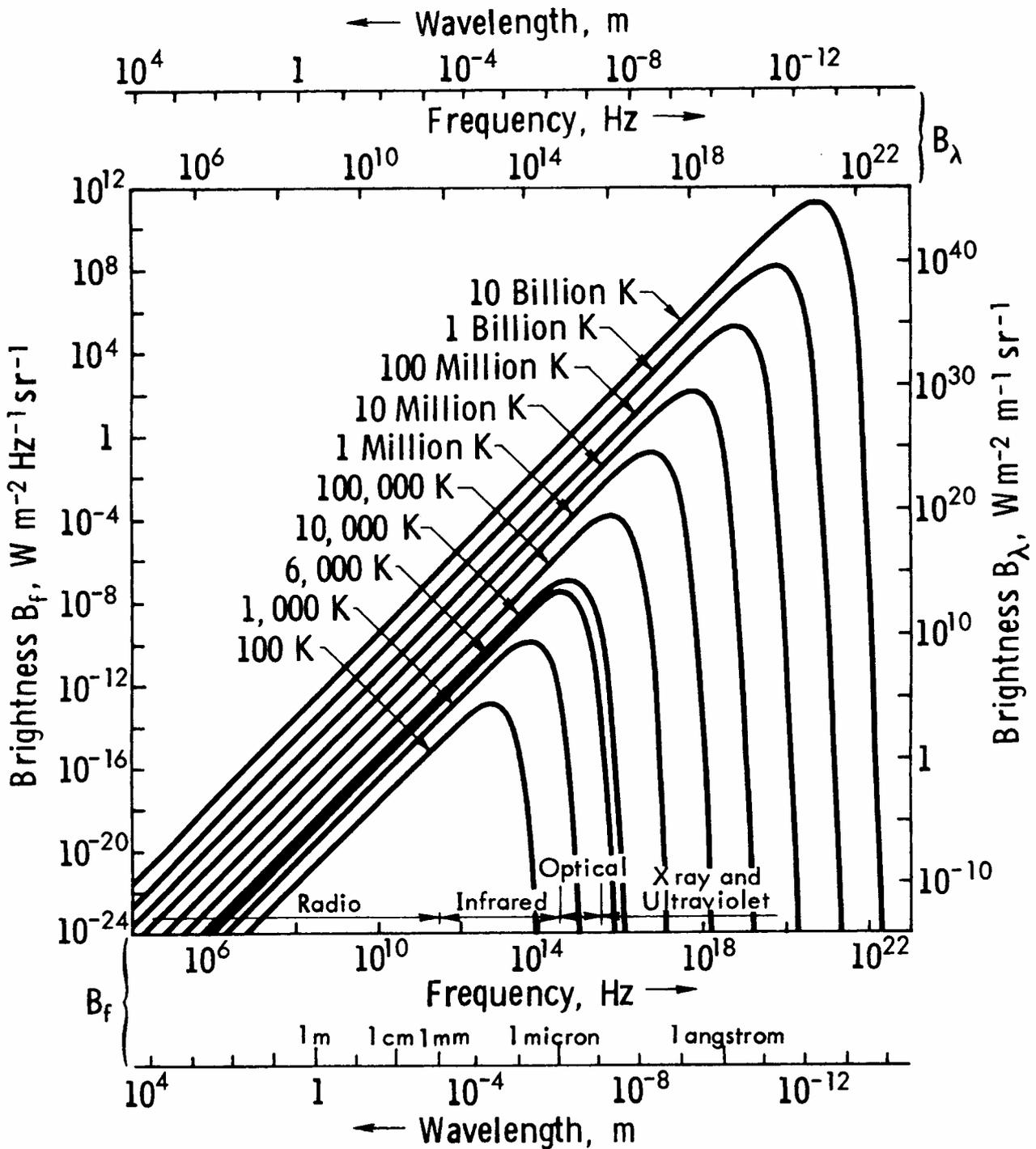


Abb.1 Darstellung des Planckschen Strahlungsgesetzes

Es ist auch im Mikrowellenbereich üblich, der empfangenen Strahlung und damit dem Meßobjekt gemäß dem Planckschen Strahlungsgesetz eine scheinbare Strah-

lungstemperatur (T_s) die äquivalente Schwarzkörpertemperatur zuzuordnen, und diese dann zur Meßgröße zu erklären. Da im Mikrowellenbereich das Plancksche Strahlungsgesetz mit abnehmender Frequenz zunehmend besser durch das Gesetz von Rayleigh-Jeans approximiert wird [1], gilt hier in sehr guter Näherung sogar eine direkte Proportionalität zwischen der empfangenen Strahlungsleistung und der definierten Strahlungstemperatur:

$$S = \frac{2 k T}{c^2} f^2 \quad (1)$$

Hier ist:

S = pro Flächeneinheit und 1 Hz Bandbreite in den Raumwinkel 1 emittierte Strahlungsleistung, k = Boltzmannkonstante, T = absolute Temperatur des schwarzen Körpers, c = Lichtgeschwindigkeit, f = Frequenz.

Dadurch ergeben sich auch relativ einfache Formeln für Strahlungstemperaturen "nicht schwarzer Körper", insbesondere für homogene Schichten mit glatter Oberfläche:

$$T_s = \varepsilon T_w + \rho T_u + \tau T_h \quad (2).$$

ε, ρ, τ und T_w, T_u, T_h sind skalare Größen, mit folgender Bedeutung für T_w, T_u, T_h :
 T_w = wahre Temperatur der homogenen Schicht, T_u = Strahlungstemperatur der Umgebung vor dem Objekt, T_h = Strahlungstemperatur der Umgebung hinter dem Objekt.

Die Emissions-, Transmissions-, Reflexions- bzw. Streueigenschaften eines Objekts hängen allgemein ab von seiner stofflichen Zusammensetzung, seiner relativen Oberflächenrauigkeit, seiner Geometrie sowie vom Ausfallswinkel der Strahlung. Rauigkeit ist dabei ein relativer, auf die Wellenlänge bezogener Begriff. (Rauigkeitskriterium von Rayleigh). Tatsächlich sind viele Oberflächen, die im üblichen Sinn als rau gelten, im Mikrowellenbereich spiegelnd glatt. In Tabelle 1 sind Werte für das Emissionsvermögen verschiedener Materialien zusammengestellt.

Im allgemeinen Fall eines inhomogenen Körpers mit unterschiedlicher Temperaturverteilung, unregelmäßiger Oberfläche, usw. treten an die Stelle der Einzelprodukte in Gl. (2) Integralausdrücke, wobei sich für die Strahlungstemperatur eine Vektorschreibweise anbietet, damit man das Polarisationsverhalten geschlossen erfassen kann (vgl. (19) in Kap. 9. Anhang). Das Emissionsvermögen, Reflexionsvermögen bzw. allgemein das Streuvermögen sowie das Transmissionsvermögen kann man durch Tensoren 2. Ordnung beschreiben.

Die objektspezifischen Größen ε , ρ und τ sind unmittelbar miteinander verknüpft, da sich in einem abgeschlossenen System immer ein Temperaturgleichgewicht einstellt. Im Fall von Gl. (2) gilt:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1. \quad (3)$$

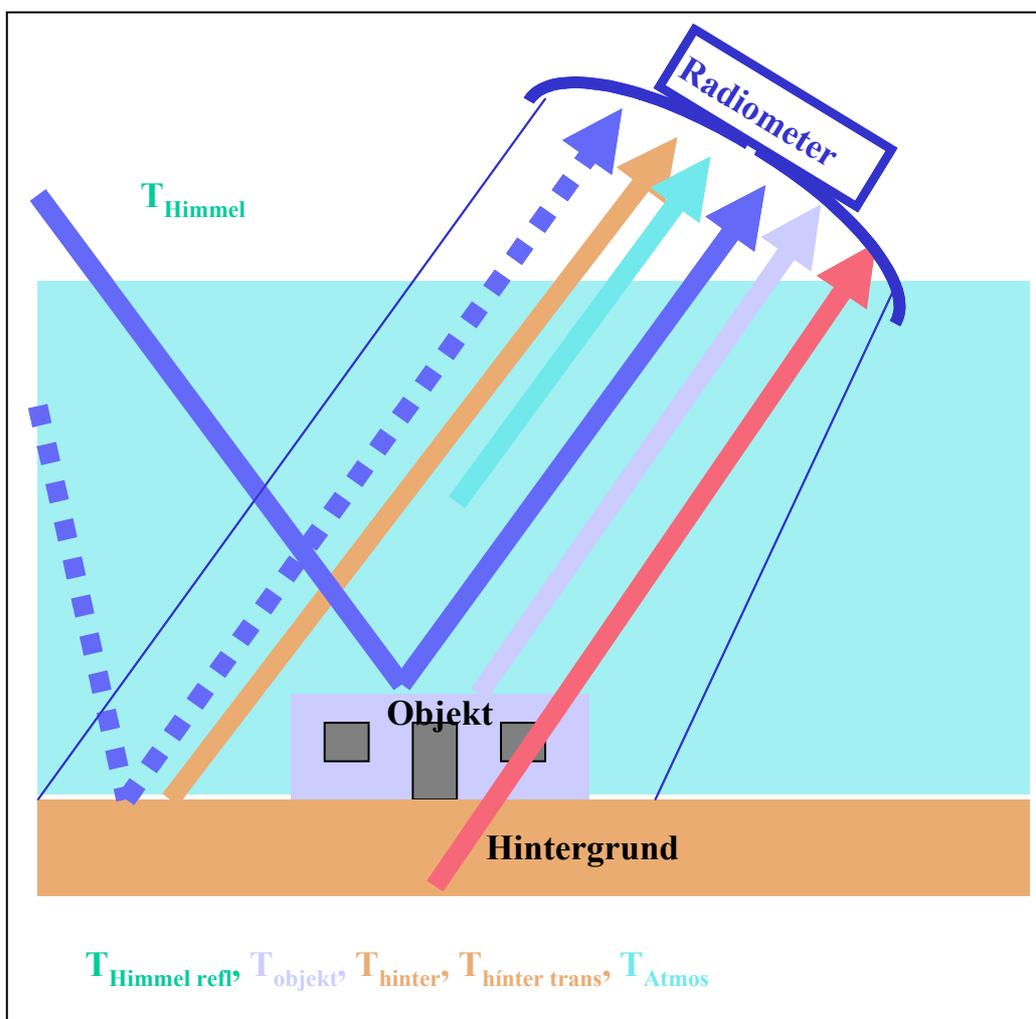


Abb. 2 Schema der Beiträge zur radiometrischen Strahlung

2.2 Der Einfluß der Atmosphäre

Für ein Meßobjekt in einer realen Umwelt, das für Mikrowellen undurchsichtig ist, erhält man in seiner unmittelbaren Nähe aus den Gleichungen (2) und (3) mit $\tau = 0$:

$$T_S = \varepsilon T_W + (1 - \varepsilon) T_U \quad (4)$$

bzw.

$$T_S = (1 - \rho) T_W + \rho T_U \quad (5)$$

Spiegelt sich im Meßobjekt der Himmel so ist für T_U die Strahlungstemperatur der Atmosphäre einzusetzen. Betrachtet man das Objekt aus größerer Entfernung, so verfälschen Dämpfung und Eigenstrahlung des Ausbreitungsweges (Transmissionsvermögen τ) die Strahlungstemperatur des Objekts T_s . Für ein gasförmiges Medium läßt sich die gemessene Strahlungstemperatur ebenfalls mit Hilfe der Gleichungen (2) und (3) angeben, wobei jetzt $\rho = 0$ ist:

$$T_M = \tau T_S + (1 - \tau) T_A. \quad (6)$$

Hier ist T_A die wahre Temperatur des Mediums, also der Atmosphäre, wenn keine Wassertröpfchen oder Eiskristalle (Hydrometeore) auftreten, genauer ein gewichteter Mittelwert der Atmosphärentemperatur. Die Atmosphäre beeinflusst also die gemessene Strahlungstemperatur eines Objekts in realer Umgebung in mehrfacher Weise. Ihre Strahlung nimmt in dem Maße zu wie ihre spezifische Dämpfung. Die spezifische Dämpfung der klaren Atmosphäre nimmt im Mittel mit der Frequenz zu; bedingt durch Molekülresonanzen des Wasserdampfs und des Sauerstoffs ergeben sich jedoch relative Dämpfungsmaxima bei ca. 22 GHz und 180 GHz bzw. 60 GHz und 120 GHz. In den Frequenzbereichen unter 20 GHz, um 32 GHz, bei 90 GHz und 140 GHz befinden sich relative Dämpfungsminima, sie werden deshalb oft Fensterbereiche genannt und bevorzugt zur Fernerkundung des Erdbodens gewählt. Für die Gesamtdämpfung der klaren Atmosphäre bei senkrechter Betrach-

tung des Erdbodens ergeben sich z. B. bei 32 GHz und 90 GHz Werte von etwa 0,2 dB bzw. 1 dB (Abb. 3).

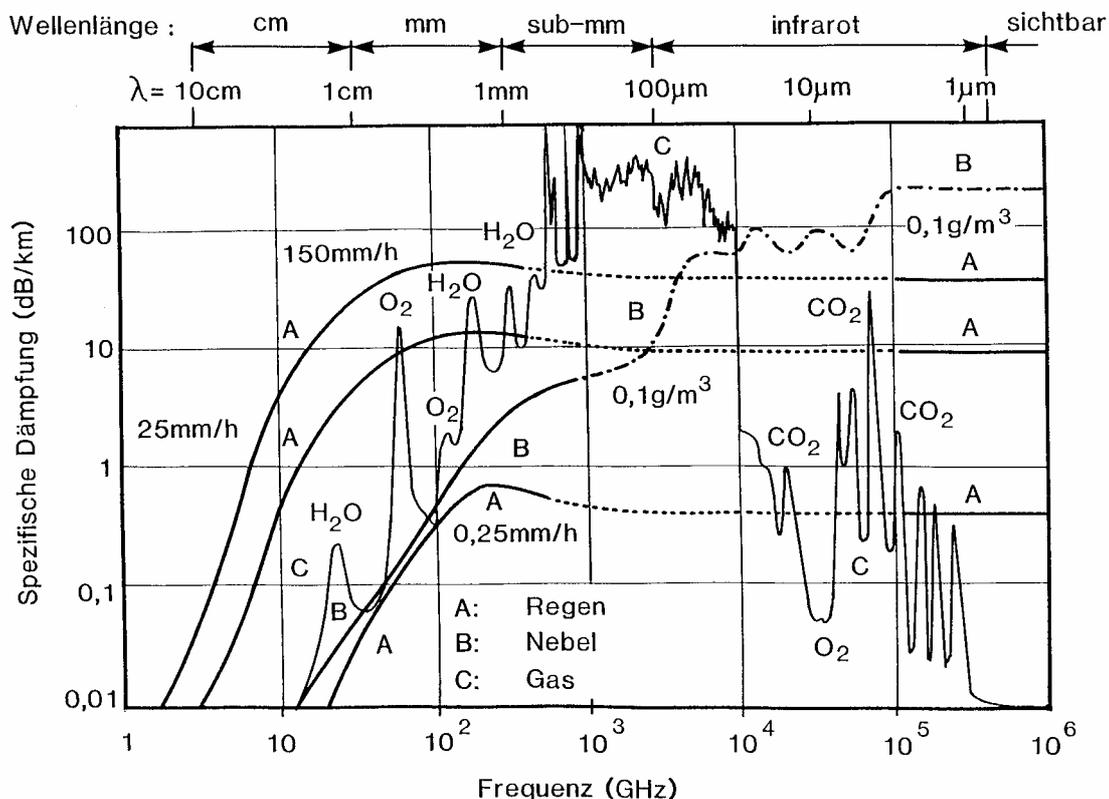


Abb.3 Atmosphärische Dämpfung in Abhängigkeit von der Frequenz, Normalatmosphäre, Höhe 0 über NN, nach CCIR [2]

Eine stetige Zunahme der Dämpfung bzw. Eigenstrahlung der Atmosphäre mit der Frequenz ist bei Regen, Nebel oder Wolken zu beobachten. Aber auch hier ist die Dämpfung gering, solange die Wassertröpfchen, die dabei auftreten, klein sind gegen die Wellenlänge. Das trifft bei Regen bis zu Frequenzen über 32 GHz, bei Nebel und Wolken bis zu Frequenzen über 90 GHz zu. Quantitative Angaben auf der Grundlage von Näherungsrechnungen sind in [3] zu finden.

Die vom Erdboden aus zu beobachtende Strahlungstemperaturen der Atmosphäre sind also frequenz- und witterungsabhängig. Die tiefsten Werte erhält man in der Regel für den Zenitbereich. Zum Horizont hin ergibt sich ein Anstieg zum wahren

Temperaturwert der unteren Luftschichten bzw. des Erdbodens. In Bild 4 sind entsprechende Meßkurven zu sehen, die im Zeitraum von mehreren Wochen aufgenommen wurden [4]. Es sind für 32 GHz und 90 GHz jeweils die Grenzkurven angegeben, innerhalb derer die Strahlungstemperaturen je nach Bewölkung streuten. Regen trat in dieser Zeit nicht auf.

3. Die scheinbaren Temperaturverteilungen der Umwelt und verschiedener Körper

Verschiedene Objekte können mit Radiometern nur dann voneinander getrennt und

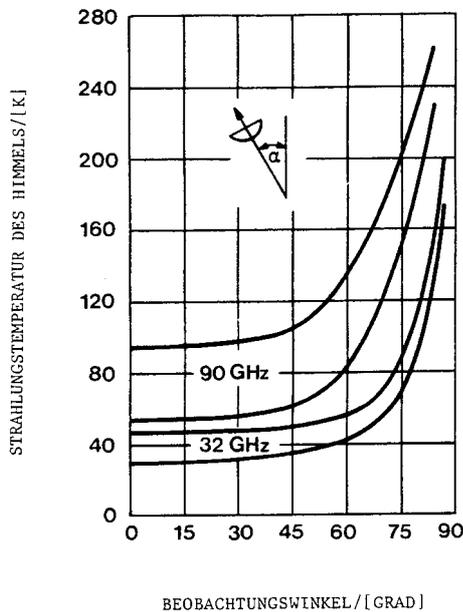


Abb.4 Streubreiten von Strahlungstemperaturen des Himmels bei 32GHz und 90GHz in Abhängigkeit vom Zenitwinkel

als verschieden erkannt werden, wenn ihre scheinbaren Temperaturen unterschiedlich sind; d.h. mit Radiometern versucht man sowohl im Mikrowellen- als auch im IR-Bereich, Temperaturkontraste zu messen. Wenn man mit einem Radiometer gemäß Bild 2 von oben ein Objekt auf der Erdoberfläche betrachtet, dann registriert man im

allgemeinen gleichzeitig die scheinbare Temperatur des Objektes und die scheinbare Temperatur der Erdoberfläche. Dabei setzt sich die scheinbare Temperatur des Objektes zusammen aus einem Anteil, der von der wahren Temperatur und aus einem Anteil, der von der Spiegelung des Himmels am Objekt herrührt, und das gleiche gilt natürlich von der scheinbaren Temperatur der Erdoberfläche; außerdem leistet auch die Atmosphäre einen Beitrag.

Die gemessenen Strahlungstemperaturen sind einerseits von der Beschaffenheit, Gestalt und Größe der betrachteten Objekte, d.h. von Objektparametern, und andererseits von den Daten des zur Messung benutzten Radiometers, den Radiometerparametern, abhängig. Objektparameter sind z. B. unter anderem die Rauigkeit, der Objektoberfläche, Materialkonstanten, Feuchtigkeitsgehalt usw.; Radiometerparameter sind z. B. unter anderem Antennendaten wie Polarisation und Gewinn, Bandbreite des Empfängers, Integrationszeiten usw. In Bild 5 und 6 sind typische

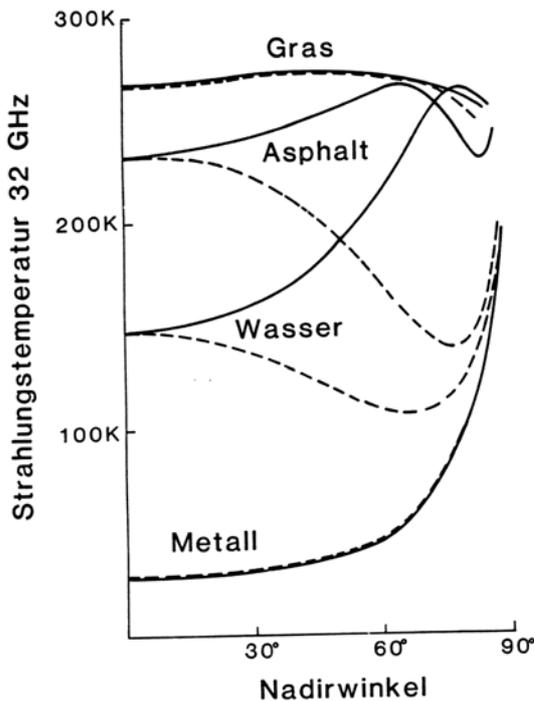


Abb 5 Strahlungstemperaturen verschiedener Medien bei 32 GHz in Abhängigkeit vom Nadirwinkel bei horizontaler (----) und vertikaler(—) Polarisation

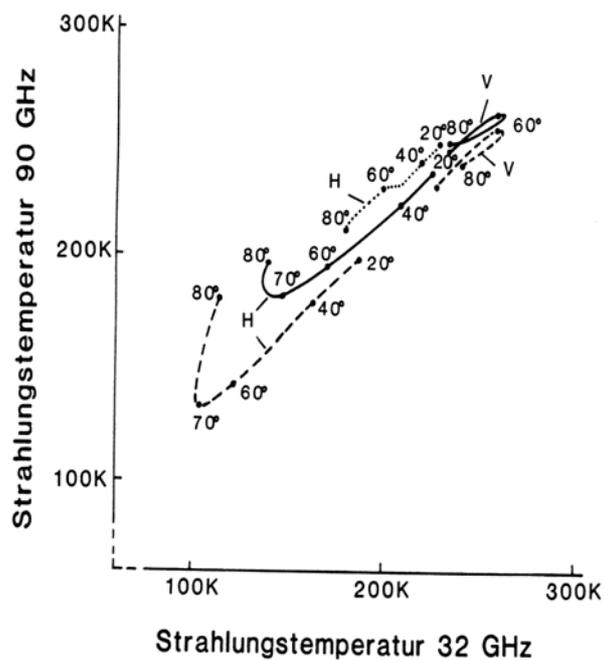


Abb 6 Asphalt-Signaturen bei horizontaler und vertikaler Polarisation, Parameter: Nadirwinkel, 32GHz und 90GHz, trocken (—), naß(----), 3,5cm Schnee (.....)

Ergebnisse von experimentellen und theoretischen Untersuchungen über die Strahlungstemperaturen der Erdoberfläche für verschiedene Frequenzbereiche und für unterschiedliche Erdoberflächen zusammengestellt.

Bild 5 zeigt die scheinbaren Temperaturen von verschiedenen Oberflächen bei einer Frequenz von 32 GHz in Abhängigkeit von Einfallswinkel und für eine Umgebungstemperatur von 290°K. Besonders deutlich wird hier, daß für Gras, d.h. für bewachsenen Erdboden, der Temperaturverlauf bis ca. 60° Einfallswinkel nahezu konstant bei 270° K verläuft, d.h. in diesem Bereich ist eine Erdoberfläche der angegebenen Gestalt in guter Näherung ein schwarzer Körper; dementsprechend hat

man auch keine Polarisationsabhängigkeit. Der Grund liegt darin, daß für raue Oberflächen der Reflexionsfaktor bei großen Streifwinkeln (kleinen Einfallswinkeln) nahezu ausschließlich eine "diffuse" Komponente hat und daß dort kaum "optische", d.h. kohärente Reflexionen stattfinden. Für glatte Oberflächen dagegen, wie Beton oder Wasser, überwiegt die sogenannte "optische" Reflexion, die diffuse Streuung geht zurück, der Reflexionsfaktor wird polarisationsabhängig, und diese Oberflächen erscheinen kälter als z. B. mit Gras bewachsener Erdboden. Hier zeigt sich der Einfluß der Dielektrizitätskonstanten auf die scheinbare Temperatur. Für eine Metallplatte findet man einen scheinbaren Temperaturverlauf, der mit zunehmendem Einfallswinkel merkbar wächst. Man hat keine Polarisationsabhängigkeit. In der Metall-Platte spiegelt sich der Himmel und seine unpolarisierte Strahlung, und für kleine Einfallswinkel ϑ hat die Metallplatte die Temperatur des Himmels, d.h. sie ist sehr kalt. Das stimmt damit überein, daß eine Metallplatte keine Strahlung absorbiert.

In Bild 6 sind die Ortskurven eines zweidimensionalen Temperaturvektors zusammengesetzt aus simultan gemessenen Strahlungstemperaturen bei 90 GHz und 32 GHz mit Einfallswinkeln als Parameter für horizontale und vertikale Polarisation aufgetragen. Deutlich erkennbar ist hier der Witterungseinfluß. Bemerkenswert ist, daß sich die Qualität und Gestalt der Einzelsignaturen für Asphalt bei Befeuchtung nur quantitativ ändert; eine Bedeckung der Fläche mit einer 3,5 cm dicken Schneeschicht dagegen führt zu einer grundsätzlichen Veränderung der Signatur.

Für praktische Anwendungen sind im allgemeinen die Strahlungstemperaturkontraste von Interesse. Bild 7 zeigt links Temperaturprofile des Erdbodens, die in verschiedenen Frequenzbereichen (bei 11 GHz, 32 GHz, 90 GHz und im Infraroten bei 10μ Wellenlänge) simultan von einem Flugzeug aus mit senkrechter Sicht nach unten, in Nadir-Richtung gemessen worden sind. Unterschiede in den verschiedenen Frequenzbereichen sind deutlich erkennbar. Wasserflächen sind im Mikrowellenbereich deutlich kälter als ihre Umgebung, auch im Hinblick auf Schnee und Eis. Ein Baum ist besonders bei 90 GHz gut zu sehen, eine Straße bei 32 GHz. Bemerkenswert ist außerdem, daß von niederen zu höheren Frequenzen der gesamte Kontrastbereich deutlich abnimmt. Dies geht auch aus den Darstellungen in Bild 7 rechts hervor. Dort sind die Strahlungstemperaturverteilungen für die gezeigten

Meßprofile angegeben. Den Histogrammen kann man entnehmen, daß der gesamte Kontrastbereich, hier bedingt durch das Auftreten der Objektklassen Wasser und Wald, ca. 150 K bei 11 GHz, ca. 130 K bei 32 GHz und ca. 115 K bei 90 GHz beträgt, im Infraroten schrumpft der gesamte Kontrastbereich auf ca. 10 K zusammen. Bezeichnend ist, daß der Wald überall konstant eine Strahlungstemperatur von ca. 280 K hat; d. h. Wald ist in guter Näherung ein schwarzer Körper. Die Strahlungstemperaturverteilungen der verschiedenen Kanäle sind nicht streng korrelierbar. Das deutet auf unabhängige Informationsinhalte in den verschiedenen Kanälen hin.

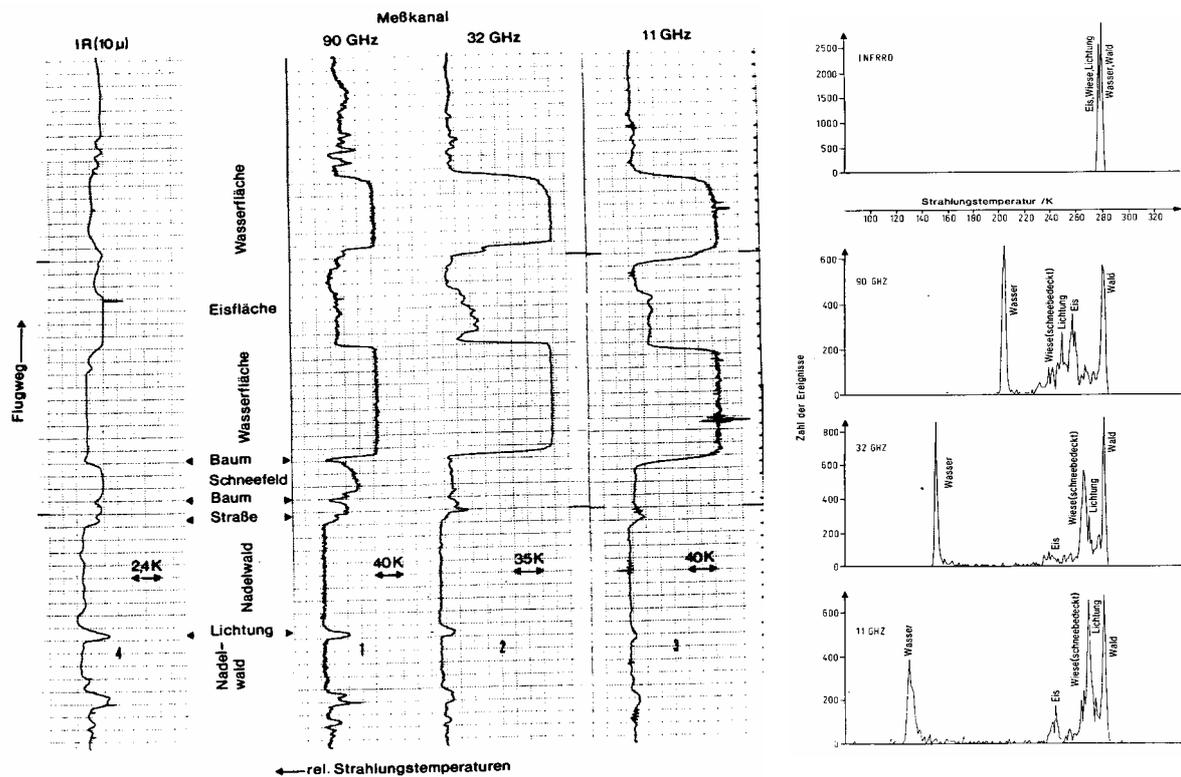


Abb.7 Temperaturprofile einer Erdoberfläche, Ergebnis simultaner Messungen im IR, $f_1=90\text{GHz}$, $f_2=32\text{GHz}$, $f_3=11\text{GHz}$, Flughöhe ca.400m, Bodenauflösungen bei f_1 und f_2 ca 16m bei f_3 ca 20m

Von besonderer Bedeutung ist die scheinbare Temperatur einer Metallplatte. In einer Metallplatte spiegelt sich im allgemeinen der Himmel, und so hat von oben gesehen eine Metallplatte die scheinbare Temperatur des Himmels; diese scheinbare Temperatur ist wesentlich abhängig von der beobachteten Frequenz und außerdem vom Aspektwinkel. In Bild 8 ist nach [5] die Rauschtemperatur einer Antenne in Abhängigkeit von der Frequenz mit dem Elevationswinkel als Parameter aufgetragen. Die Kurven gelten für eine verlustlose Antenne ohne zur Erde hin gerichtete Neben-

keulen für 2.7°K kosmische Schwarzkörperstrahlung, ohne Grundrauschen und für mittleres galaktisches Rauschen. Diese Antennentemperaturen entsprechen den scheinbaren Temperaturen, die ein Radiometer bei einer Meßanordnung gemäß Bild 2 für eine Metallplatte registriert (vgl. (20) in Kap. 9. Anhang).

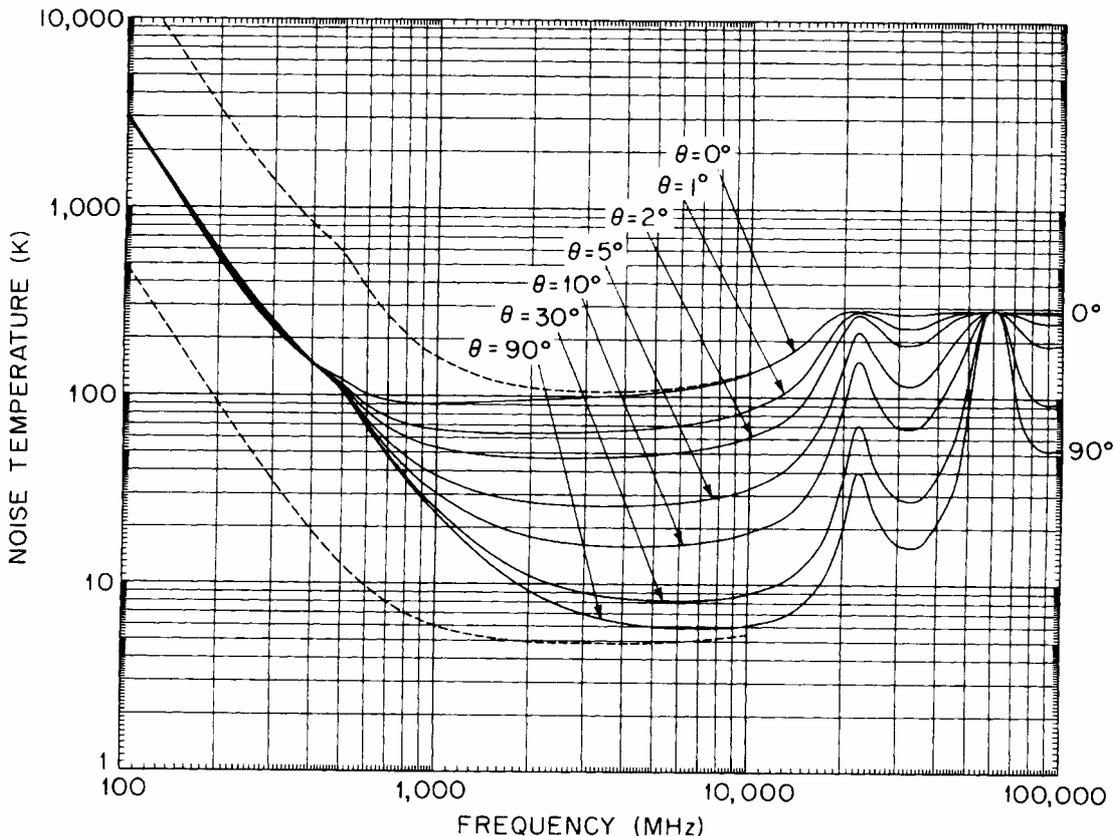
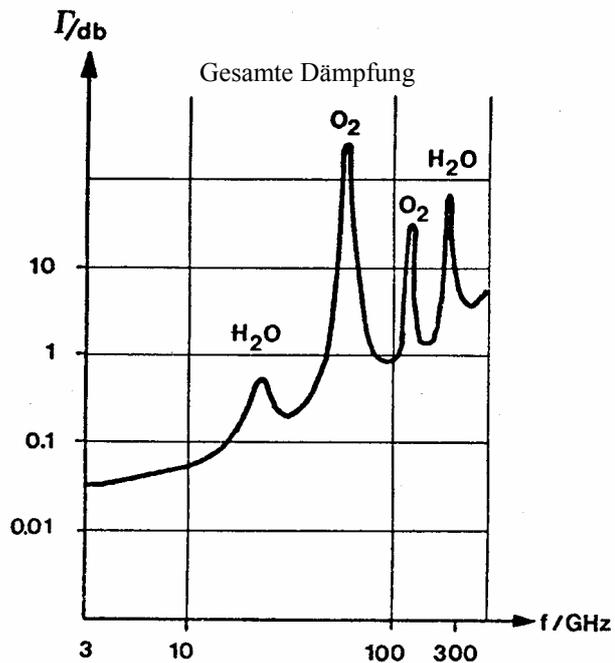
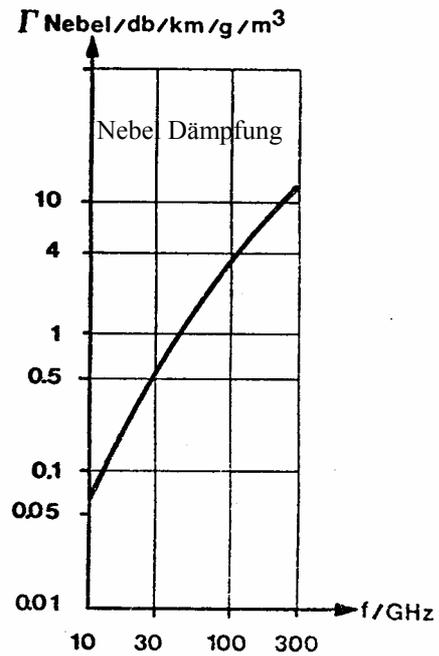


Abb.8 Rauschtemperatur eine idealen Antenne (ohne Nebenzipfel) in Abhängigkeit von der Frequenz mit dem Elevationswinkel als Parameter [5]

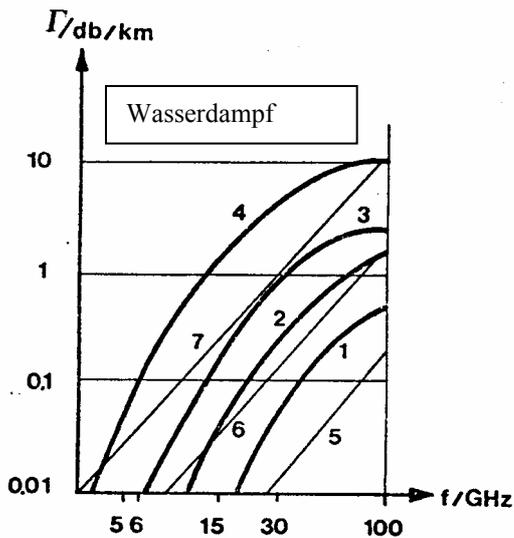
Wie bereits dargelegt, hat die Transparenz der Atmosphäre wesentlichen Einfluß auf die von Radiometern gemessenen Strahlungstemperaturen. Die Transparenz der Atmosphäre wird üblicherweise durch den Dämpfungsfaktor Γ charakterisiert; dieser Dämpfungsfaktor Γ ist u.a. abhängig von der Frequenz und den Wetterbedingungen in der Atmosphäre und von der Geometrie, d.h. der Höhe über dem Meeresspiegel. In Bild 9 ist die Dämpfung der Atmosphäre für verschiedene Wetterbedingungen dargestellt. Der Verlauf von Γ in Abhängigkeit von der Frequenz gilt für einen "Blickwinkel" senkrecht nach oben und für einen Weg durch die gesamte Troposphäre.



7a



7b



7c

- | | | |
|----|-----------------------------------|---------------------|
| 1. | $0,25 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ | } Regen |
| 2. | $1 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ | |
| 3. | $4 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ | |
| 4. | $16 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ | |
| 5. | $0,032 \text{ gm}^{-3}$ | } Wasser-
gehalt |
| 6. | $0,3 \text{ gm}^{-3}$ | |
| 7. | 2.32 gm^{-2} | |

Abb.9 Quantitative Werte für Atmosphärendämpfung durch Regen und Nebel. 7a: Gesamte Dämpfung, 7b: Beitrag von Nebel, 7c: Beitrag von Wasserdampf

Im allgemeinen geht die Rauigkeit einer Fläche und ähnliche Faktoren, wie z.B.

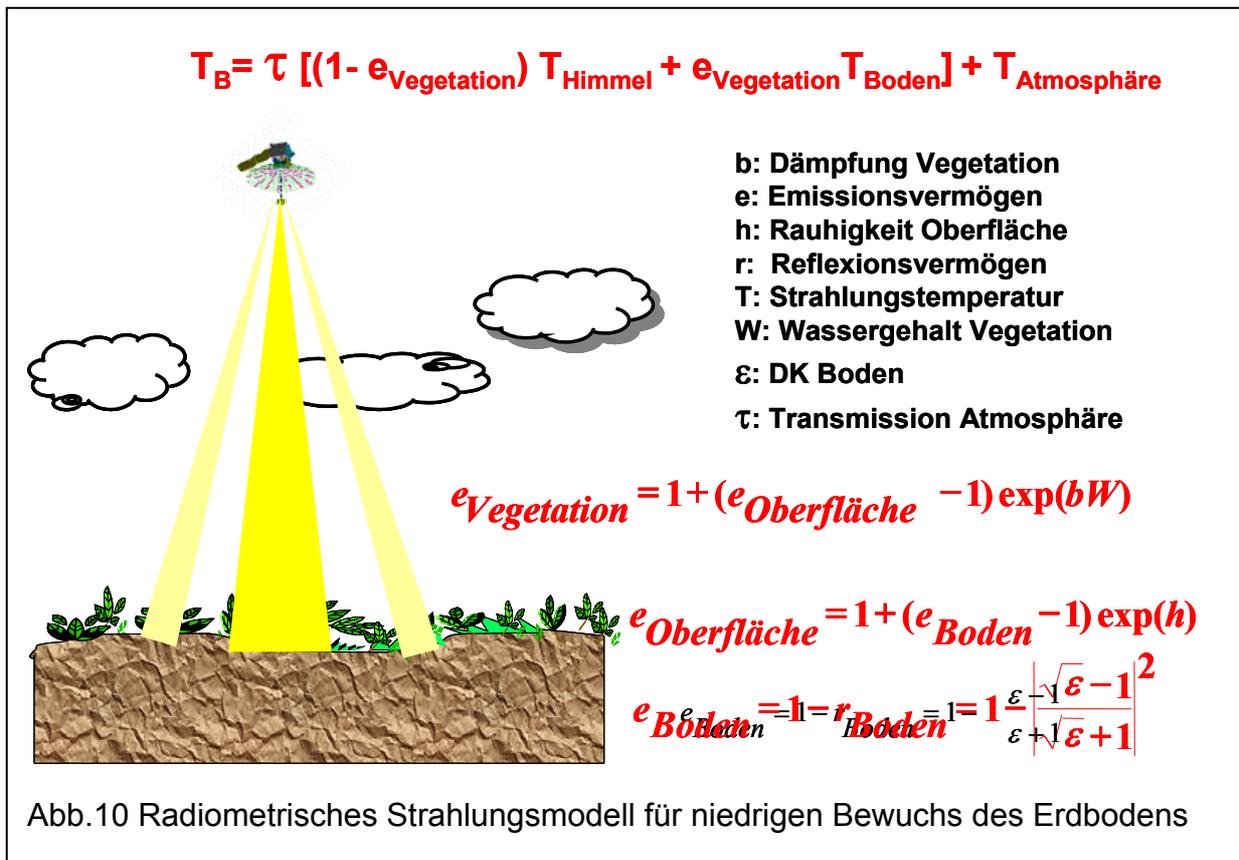
die Vegetation und ihr Wassergehalt in die mathematische Formulierung mit exponentieller Abhängigkeit ein. Damit kann man ein Modell für die Strahlungstemperatur einer mit Vegetation bedeckten Erdoberfläche aufstellen. [6]

4. Prinzip des Radiometers

Grundsätzlich besteht ein Radiometer aus einer Antenne mit möglichst hohem Gewinn bzw. hoher Winkelauflösung, einem hochempfindlichen Empfänger mit möglichst niedrigem Eigenrauschen und großer Bandbreite und einer Auswerteschaltung. Dieses Radiometer stellt den Strahlungstemperaturkontrast ΔT des angemessenen und gesuchten Objekts gegenüber der Objektumgebung fest.

Dieser Temperaturkontrast ΔT zwischen einem Objekt und seiner Umgebung bzw. zwischen 2 Objekten ist im wesentlichen von 3 Faktoren abhängig:

- dem scheinbaren Temperaturkontrast zwischen Ziel und Umgebung, $\Delta T'$,
- dem sogenannten Füllfaktor, $\Omega_{T/A}$,
- dem atmosphärischen Dämpfungsfaktor, Γ ,



Es gilt :

$$\Delta T = \Omega_{T/A} \cdot \Gamma \cdot \Delta T' \quad (7)$$

$\Delta T'$ kann man z. B. aus den Darstellungen in Bild 5 für eine Frequenz von 32 GHz für ein Blech, das auf einer Grasfläche liegt, ablesen; man erhält für einen Blickwinkel von oben senkrecht nach unten den Wert $\Delta T' = 275^\circ\text{K}$; das Blech ist sehr kalt!

Die Einführung des Füllfaktors $\Omega_{T/A}$ trägt dem Umstand Rechnung, daß man im allgemeinen mit der Hauptkeule der Antenne eine Umgebung bzw. eine Fläche ausleuchtet, die eine andere Größe hat als der Raumwinkel Ω_T unter dem man vom Standpunkt der Antenne aus das Objekt sieht.

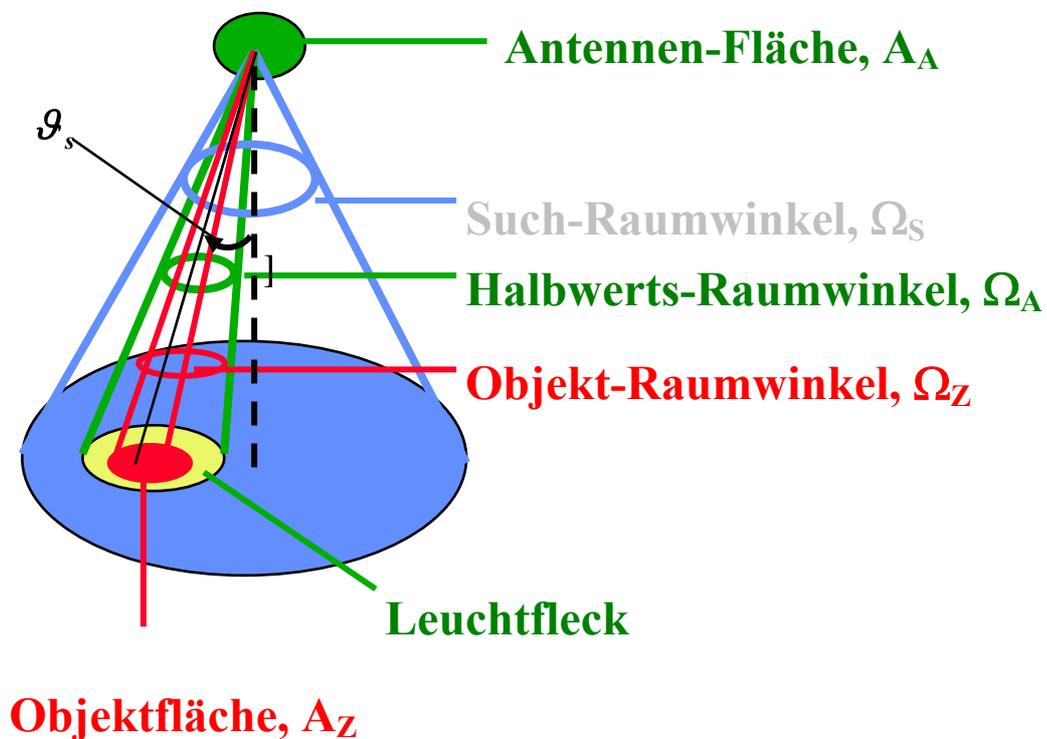


Abb.11 Schematische Erklärung des Füllfaktors

In Bild 11 ist ein Schema dieser Verhältnisse dargestellt. Der Füllfaktor $\Omega_{T/A}$ ist dabei definiert als Quotient aus Ω_T und Ω_A :

$$\Omega_{T/A} = \frac{\Omega_T}{\Omega_A} \quad (8)$$

dabei ist

$$\Omega_A = \frac{\lambda^2}{A} \quad (9)$$

$$\Omega_T = \frac{A_T}{R^2} \cos \vartheta_s \quad (10)$$

λ ist die Wellenlänge, A die Antennenfläche, A_T die Zielfläche, R die Entfernung Ziel – Antenne, ϑ_s der Winkel gegen die Vertikale, unter dem die Antenne das Ziel sieht. Die von Ω_A "gesehene" bzw. ausgeleuchtete Fläche, den Leuchtfleck, bezeichnet man im Englischen mit "Footprint"

Mit (8) und (9) erhält man aus (10) folgenden Ausdruck für den Füllfaktor:

$$\Omega_{T/A} = \frac{A_T \cdot A \cos \vartheta_s}{R^2 \cdot \lambda^2} \quad (11)$$

Die minimale meßbare Temperaturdifferenz $\Delta T = \Delta T_{\min}$ ist ein Maß für die Empfindlichkeit eines Radiometers. Sie ist von verschiedenen Systemparametern abhängig und wird durch die bereits von Dicke [7] im Jahre 1946 angegebene sogenannte "Radiometergleichung" beschrieben:

$$\Delta T_{\min} = \alpha \frac{T_A + T_R}{\sqrt{B \cdot \tau}} \quad (12)$$

In (12) ist: ΔT_{\min} die Varianz der kleinsten vom Radiometer registrierbaren Temperaturdifferenzen, α eine spezifische Radiometerkonstante, T_A die Antennentemperatur, T_R die Empfänger-Rausch-Temperatur, B die Eingangsbandbreite des Empfängers, τ die Integrationszeit.

Die Gleichung (12) zeigt, daß man die Empfindlichkeit bzw. die Temporauflösung eines Mikrowellenradiometers steigern kann, indem man die Bandbreite und die Integrationszeit bzw. das Produkt aus beiden Größen möglichst groß macht; eine Verringerung des Empfänger-Rauschens bringt aber nur bis zu einer Grenze Verbesserung, die durch die Antennenrauschtemperatur T_A bestimmt wird; aus diesem Grunde wird man $\Delta T_{\min} \rightarrow 0$ durch Maßnahmen im Empfänger nicht erreichen können.

Die Radiometerkonstante $\alpha \geq 1$ ist stark vom Typ des Mikrowellenradiometers und von den im Gerät vorgenommenen Modulationen und Demodulationen abhängig. Für ein sogenanntes "Total-Power-Radiometer" ohne Modulation gilt $\alpha = 1$ und für ein sogenanntes "Dickeradiometer", bei dem am Empfängereingang zwischen Antenne und einer Referenzrauschquelle umgeschaltet wird, $\alpha \geq 2$.

Ein modernes "Total-Power-Radiometer" registriert noch Unterschiede in der Strahlungsleistung von kleiner 10^{-15} Watt.

Das mit einem Radiometer erzielbare Signal zu Rauschverhältnis S/N; bei einem Temperaturkontrast ΔT kann man schreiben als

$$\frac{S}{N} = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\min}} \quad (13)$$

In Verbindung mit der Radiometergleichung (12) erhält man aus (21) und (15) für das erzielbare S/N folgenden Ausdruck:

$$\frac{S}{N} = \frac{A_T \cdot \Delta T' \cdot A \cos \vartheta_s \cdot \Gamma \sqrt{B \cdot \tau}}{R^2 \cdot \lambda^2 \cdot \alpha (T_A + T_R)} \quad (14)$$

Daraus resultiert für ein gefordertes S/N die entsprechende Reichweitengleichung:

$$R^2 = \frac{A_T \cdot \Delta T' \cdot A \cos \vartheta_s \cdot \Gamma \sqrt{B \cdot \tau}}{(S/N) \cdot \lambda^2 \cdot \alpha (T_A + T_R)} \quad (15)$$

Diese Gleichungen (22) bzw. (23) gestatten Abschätzungen der Reichweiten bzw. der

S/N, die mit Radiometern grundsätzlich zu erreichen sind. Dies gilt um so mehr dann wenn man die bisher noch nicht berücksichtigten Verluste durch einen Faktor $L \leq 1$ multiplikativ in (22) bzw. (23) einführt.

Signal-zu-Rauschverhältnisse

Das in (15) eingeführte Signal-zu-Rauschverhältnis S/N ist eine statistische Größe, und ebenso wie in der Technik von monostatischen und bistatischen Radaren ist auch bei der Radiometrie das geforderte S/N abhängig von der zulässigen Falschalarmrate P_N und der geforderten Entdeckungswahrscheinlichkeit P_D . Die Abhängigkeit der Entdeckungswahrscheinlichkeit P_D von S/N mit P_N als Parameter zeigt Bild.12, [8], für ein Gerät mit Schwellwertdetektor.

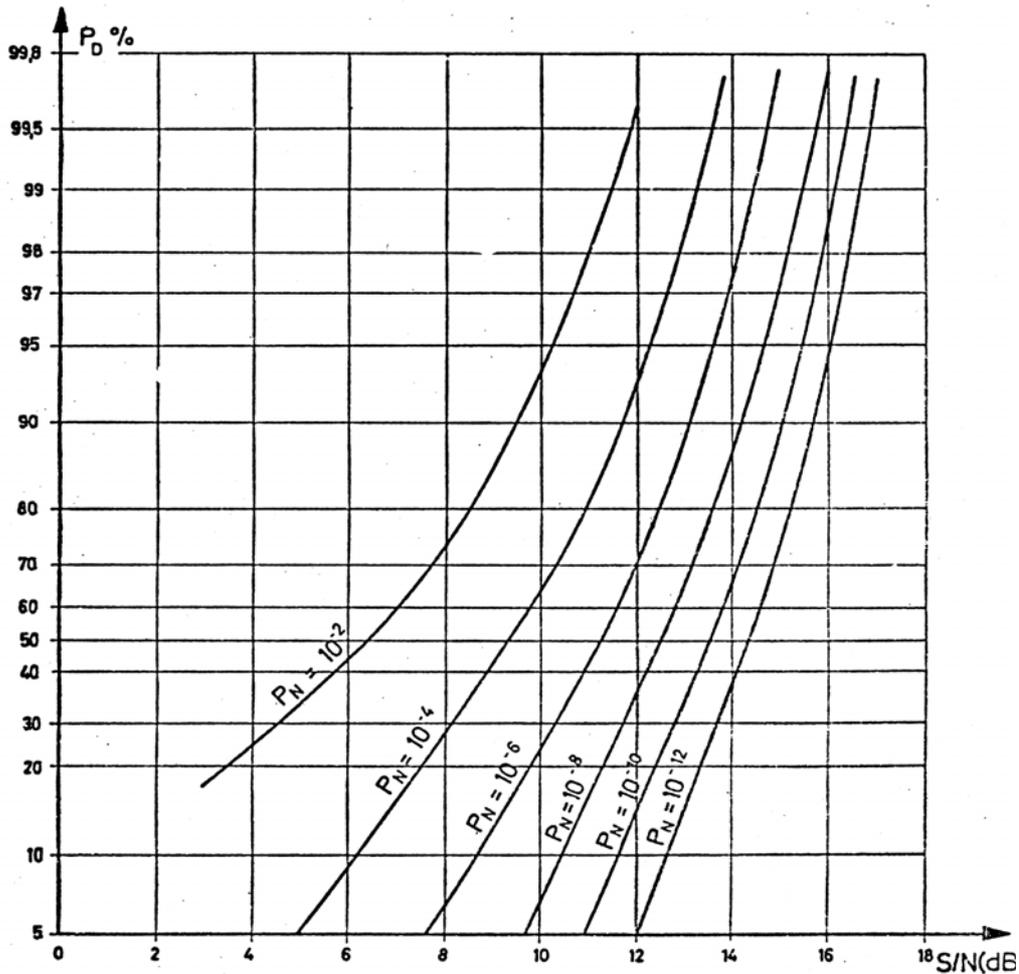


Abb.12 Abhängigkeit der Entdeckungswahrscheinlichkeit P_D vom Signal-zu Rauschabstand mit Falschalarmwahrscheinlichkeit P_N als Parameter

Ein

Ergebnis dieser Darstellung ist z.B.: Für eine zulässige Falschalarmrate $P_N = 1\%$ und eine geforderte Entdeckungswahrscheinlichkeit $P_D = 93\%$ muß man sicherstellen, daß für das Signal-zu-Rauschverhältnis gilt

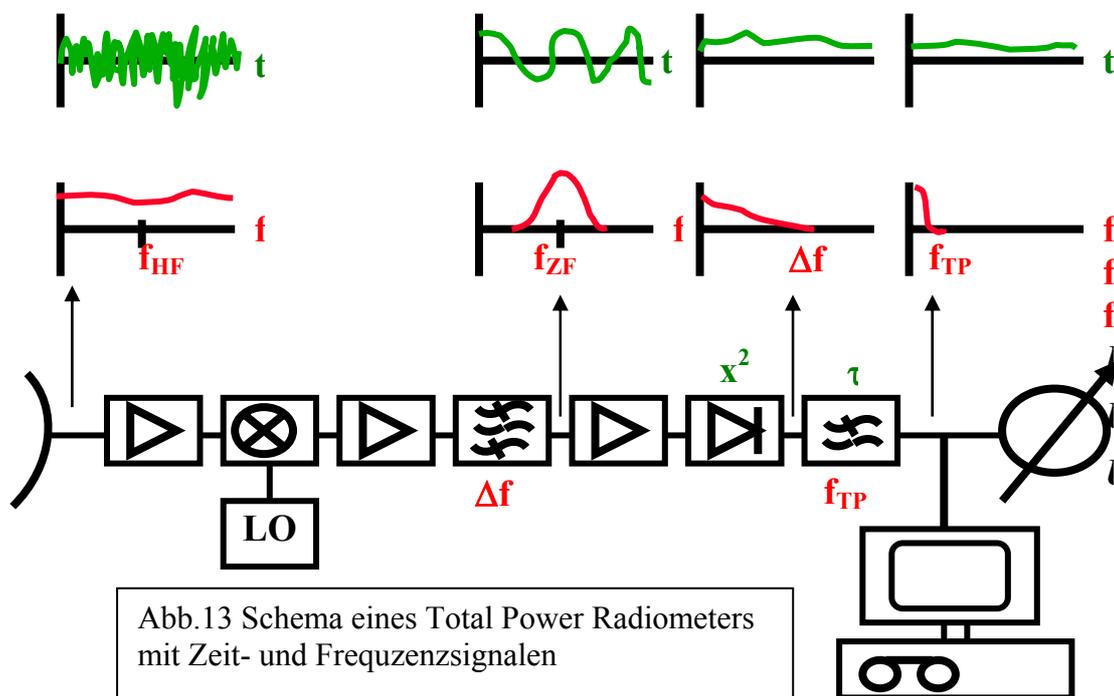
$$S/N = 10 \text{ dB.}$$

Zu beachten bleibt, daß für Radiometer die Temperaturen der Ziele niedriger sein können als die Temperaturen der Umgebung, so daß man für diese Fälle (z. B. Blech auf Grasboden) Einbrüche in der Rauschspannung registrieren und verarbeiten muß, während man im allgemeinen in der Radartechnik Signale registriert, die positiv größer sind als das Rauschen.

5. Radiometersysteme

5.1 Total Power Radiometer

In Abb. 13 ist ein einfaches, sogenanntes Total-Power-Radiometer zusammen mit den nach jedem Block erscheinenden Signalen schematisch dargestellt. Zur Kalibrierung kann man Mikrowellenabsorber vor die Antennenparameter bringen, und dabei die Spannung am Ausgang messen. Zur Kalibrierung kann man aber auch eine oder mehrere Rauschquellen definierter Rauschparameter wechselweise mit der gemessenen Strahlungstemperatur an den Eingang des Radiometers direkt hinter die Antennen schalten und damit Gewinnschwankungen des Empfängers kompensieren.



Benutzt man nur eine Quelle, dann spricht man von einem Dicke-Radiometer, benutzt man 2 Quellen mit unterschiedlicher Temperatur, dann nennt man diese Konfiguration ein "Hach-Radiometer" und die Methode auch die "warm-kalt-Merthode" (hot-cold-method) (Damit kann man die Radiometerkonstante ermitteln, die für ein "Total-Power-Radiometer" grundsätzlich den Wert 1 hat.

U_A sei die Ausgangsspannung eines Radiometers, die "warme" Quelle liefere die Spannung U_H , die kalte Quelle die Spannung U_C , T_R , T_A , T_H , T_{RC} seien die Temperaturen des Empfängers, der Antenne sowie der beiden Quellen. Es gelten folgende Beziehungen:

$$U_A = \alpha(T_A + T_R)$$

$$U_H = \alpha(T_H + T_R)$$

$$U_C = \alpha(T_C + T_R)$$

Daraus erhält man für den Faktor α die Beziehung:

$$\alpha = \frac{U_H - U_C}{T_H - T_C}$$

Damit ist die Konstante bestimmt und das Radiometer geeicht.

5.2 Abbildende Systeme zur Erdbeobachtung

Zur Abbildung einer Fläche bzw. eines ausgedehnten Objekts muß man die Fläche bzw. das Objekt mit dem Lichtfleck der Antenne abtasten. Bei nach unten blickenden Radiometer-Systemen, die sich in einer Richtung bewegen, z. B. auf Flugzeugen, genügt im allgemeinen eine zur Flugrichtung transversale Abtastung. Dazu kann man die Antenne transversal schwenken, man spricht dann von einem Line-Scanner. Dabei bestimmen Flughöhe und Fluggeschwindigkeit sowohl die Auflösung am Boden als auch die über die Integrationszeit die erzielbare Temperaturauflösung und damit den meßbaren Kontrast (Abb.14). In Abb. 15 bis Abb. 117 sind Meßergebnisse von Linescannern dargestellt [9]. In Tabelle 2 sind Spezifikationen der verwendeten DLR - Radiometer zusammengestellt.

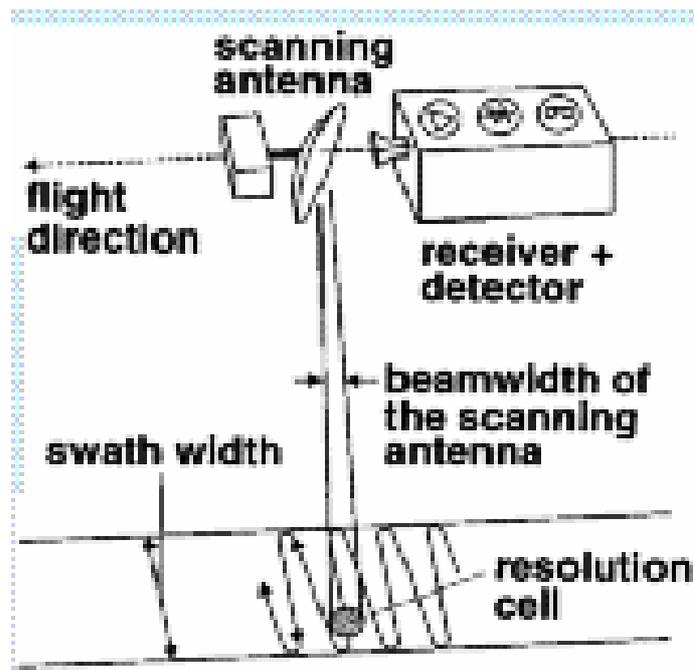


Abb.14 schematische Darstellung des Linescanner - Prinzips

Ein mechanisches Schwenken der Antenne kann man bei Verwendung sogenannter "Pushbroom-Radiometer" vermeiden. Das sind Systeme, bei denen eine Vielzahl von Einzelradiometern, d. h. ein Array, transversal zur Flugrichtung angeordnet ist (Abb. 18). Mit diesem Verfahren lassen sich Bildpunkte einer Zeile simultan erfassen, die Datenerfassung und Datenverarbeitung wird relativ einfach. Dagegen stehen nachteilig der aufwendige und im allgemeinen sehr teure Aufbau, das eingeschränkte Gesichtsfeld sowie die recht aufwendige Kalibrierung und Stabilisierung der vielen Einzelelemente, die ja alle möglichst identische Eigenschaften haben müssen.

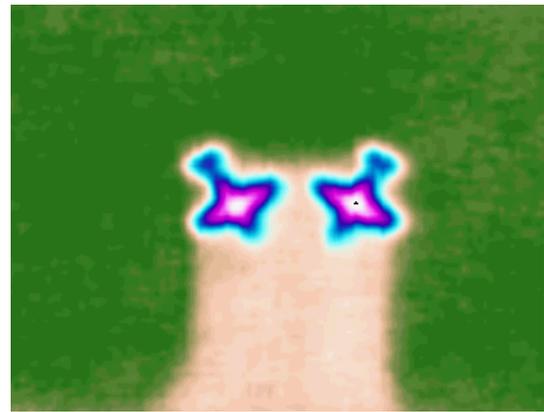


Abb15 90 GHz Linescanner-Aufnahme von Flugzeugen auf einer Asphaltfläche(rechts), links zum Vergleich ein optisches Bild. Flughöhe 100m, Bodenauflösung 1,75 m, Temperaturauflösung 1,9K, Grasbereich (grün) ca. 290K, Asphalt(hellbraun) ca.270 K, Flugzeuge ca.190 K

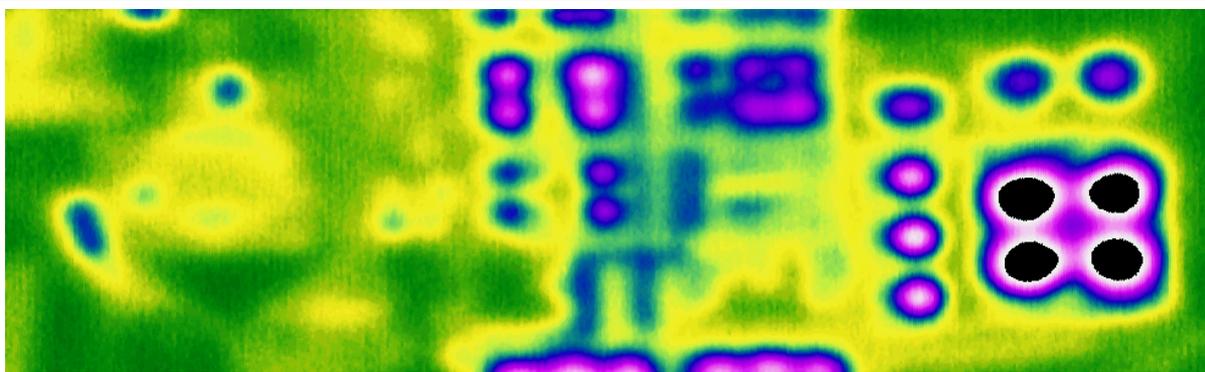


Abb16 90GHz Linescanneraufnahme einer Ö Raffinerie, Flughöhe 1000m, Bodenauflösung 17,5m, Temperaturauflösung 1,9K, Kontrast Gras Öltanks ca 100 K

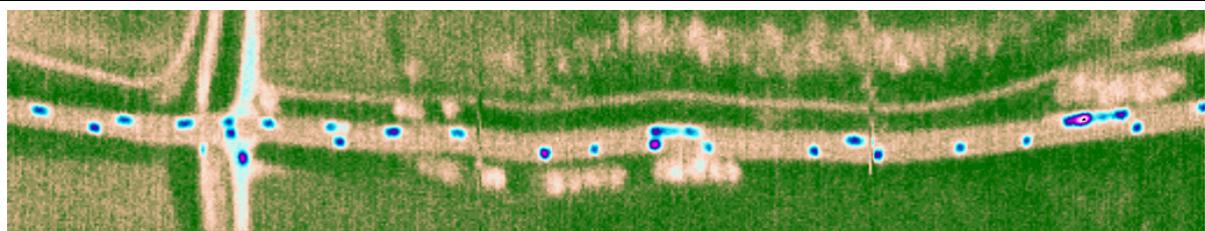


ABB.17 90GHZ Linescanneraufnahme eines Autobahnabschnitts, Flughöhe 200m, Bodenaufklärung 3,5m, Temperaturauflösung 1,9K, Kontraste: Gras - Asphalt - Autos ca. 290K - 270K- 190K

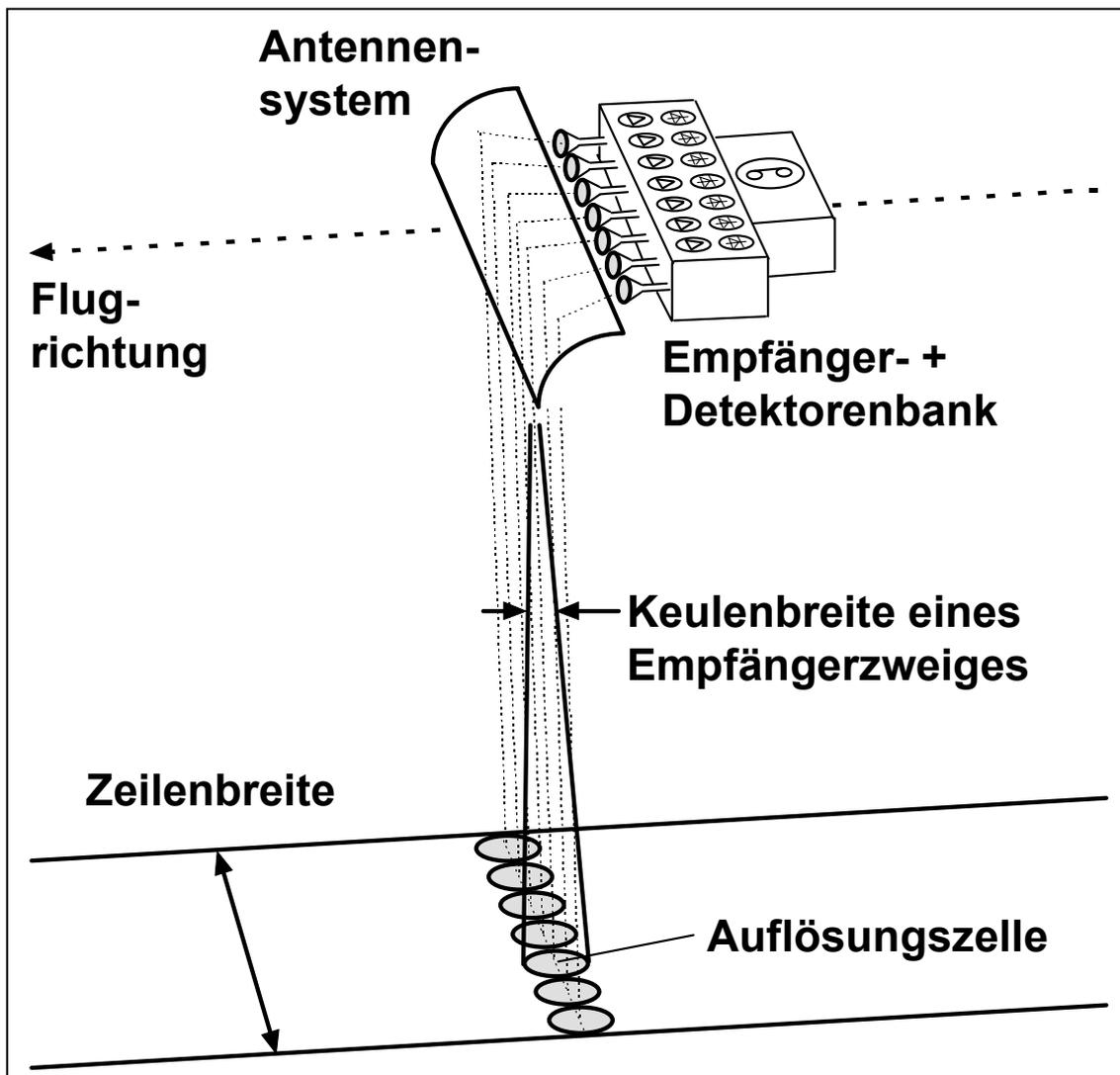


Abb 18 schematische.Darstellung des Pushbroom-Radiometrie-Prinzips

Die räumliche Auflösung eines Radiometers, d. h. das Maß für die Unterscheidbarkeit zweier Objekte ist von der Größe der Antennenapertur im Verhältnis zur Wellenlänge bestimmt; der Faktor λ^2/A in Gleichung (9) trägt dem Rechnung. Die Forderung nach hoher geometrischer Auflösung führt demnach zu sehr großen Aperturen, die man insbesondere zu sehr großen Aperturen, die man insbesondere auf Flugzeugen und Satelliten nur schwer realisieren kann. Man kann aber mit dem Verfahren der Apertur-Synthese, das schematisch in Abb. 19 dargestellt ist, die Antenne grundsätzlich vereinfachen. Man verwendet dabei zwei zueinander senkrechte Arrays aus kleinen Einzelstrahlern mit breiten Antennenkeulen (z. B. 60°-Hornantennen) und tastet damit (während der Vorwärtsbewegung) die beobachtete Fläche ab. Die von den Einzelstrahlern registrierten Signale der beiden Linien-Arrays werden dann miteinander korreliert, so daß jedes Element des einen mit je-

dem Element des anderen Arrays über einen Korrelator ausgewertet wird. Das führt dann im gesamten Gesichtsfeld zu einer guten Auflösung, die in etwa einer Abtastung des beobachteten Gebietes durch Schwenkung einer Antenne mit den geometrischen Abmessungen des Arrays um den Winkel der Halbwertsbreite der Einzelstrahler entspricht.

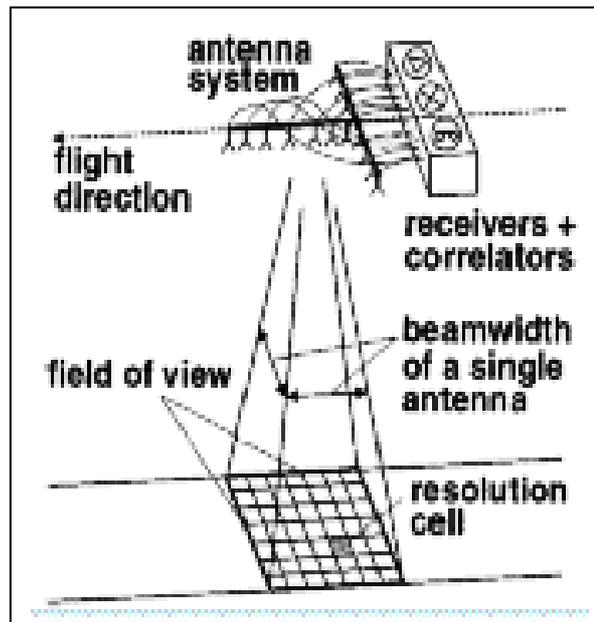


Abb 19 Prinzip des Apertursynthese Radiometers

Bezeichnet man mit x, y die beiden senkrecht aufeinander stehenden Arrays mit der Länge $D_{x,y}$, resultiert für die räumliche Auflösung in X- bzw. Y-Richtung:

$$\delta_{x,y} = K \frac{\lambda}{D_{x,y}} [\text{Grad}] \quad (15)$$

Dabei ist K ein Faktor der abhängig von der Aperturbelegung zwischen 50° und 70° liegen kann. Grundsätzlich bilden jeweils 2 Antennen ein Interferometer. Das ganze ist also ein Konglomerat von $n_x \cdot n_y$ Interferometern. n_x und n_y sind die Anzahl der Einzelstrahler.

Für die radiometrische Auflösung resultiert

$$\Delta T_{\min} = \frac{T_A + T_E}{\sqrt{2 \Delta \phi \tau}} \cdot \frac{1}{n_x n_y} \cdot \frac{A_{syn}}{A_e} \quad (16)$$

A_{syn} ist die von den beiden Arrays aufgespannte Fläche und A_e ist die effektive Antennenfläche eines Einzelstrahlers. T_A ist die mittlere Helligkeitstemperatur der gesamten beobachteten Fläche und T_E die mittlere Rauschtemperatur aller Empfänger und $\Delta\varphi$ deren mittlere Bandbreite. τ ist die Integrationszeit für alle Korrelationen.

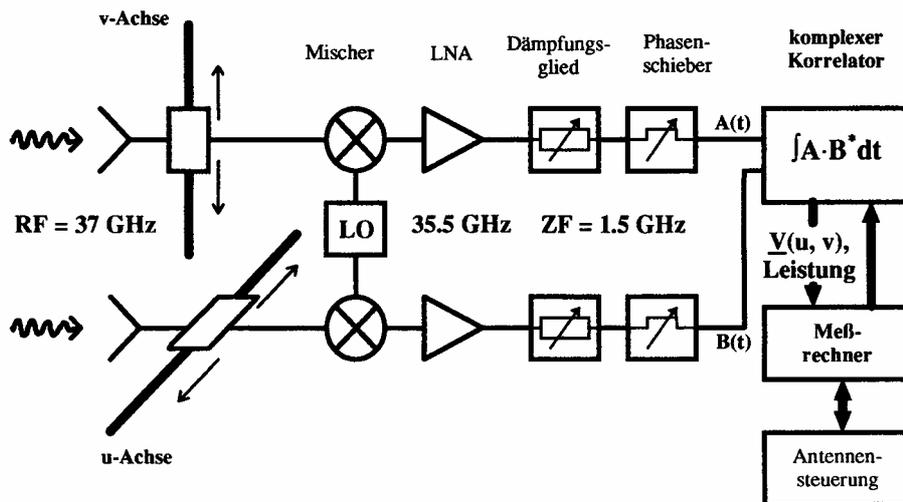


Abb.20 Blockschaltbild des Apertur-Synthese-Radiometer-Prinzips

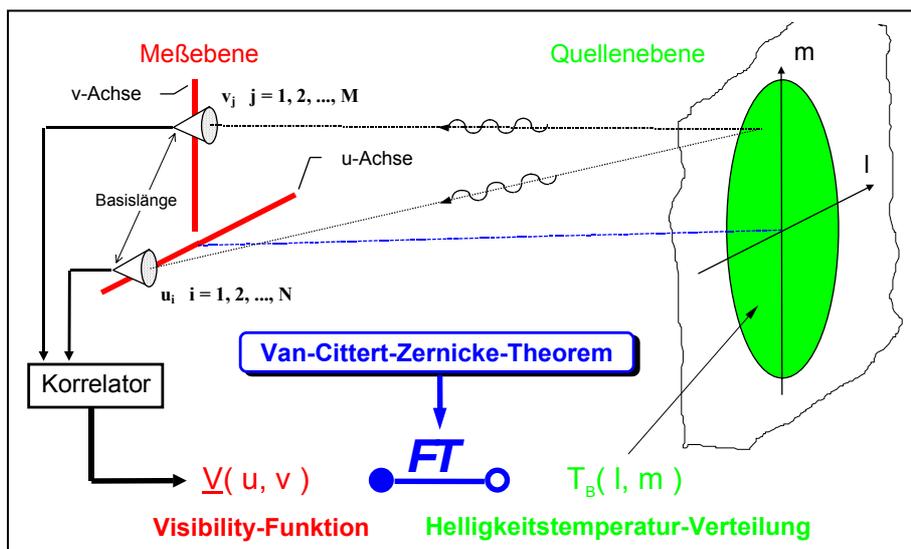


Abb.21 Physikalisches Prinzip der Apertur-Synthese-Radiometrie

Dieses Verfahren findet schon geraume Zeit in der "Very Long Baseline Interferometry" zur Beobachtung inkohärenter Strahlung von Radiosternen Anwendung. Man benutzte hier anfangs terrestrische über kontinentale Entfernung auseinanderliegende Antennen, derzeit werden extrem lange Basen unter Verwendung von Satelliten aufgebaut.

Abb. 22 zeigt eine radiometrische Abbildung verschiedener Objekte, die mit einem Sytese Aprtur radiometer gewonnen wurde im Vergleich zu einem optischen Bild.

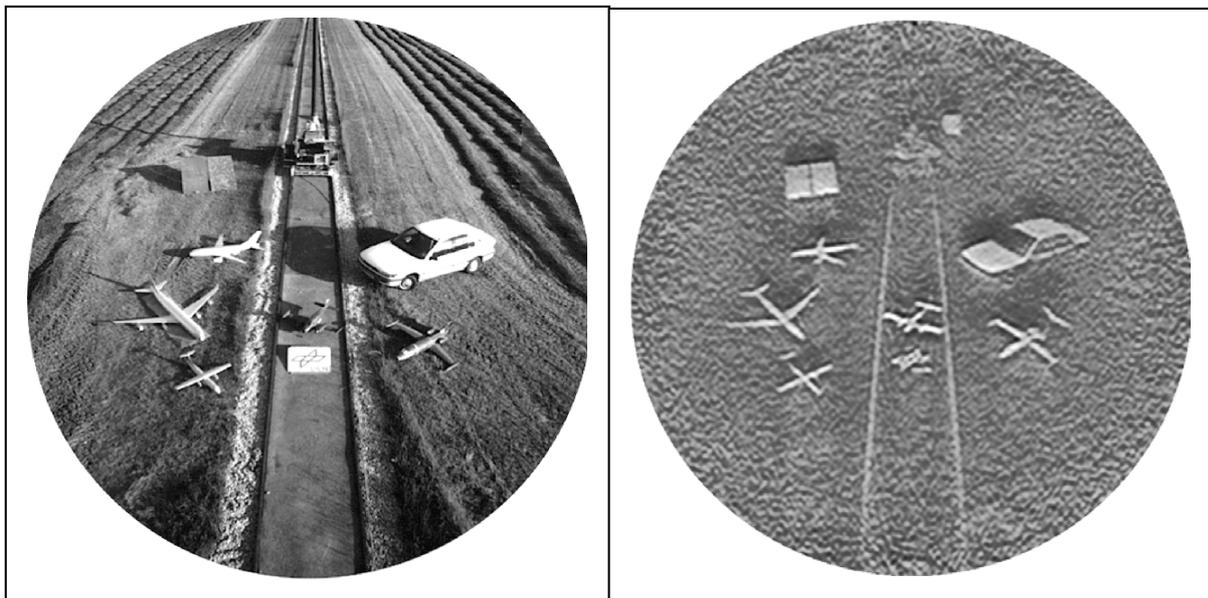


Abb 22 Vergleich einer mit 34 GHz aufgenommenen Szene(rechts) mit einer Photographie (links), die synthtische Aprtur war75cm x75cm groß. .Benutzt wurden dabei 2 Hornantennen, die sukzessive gegeneinander verschoben wurden

6. Möglichkeiten zur Anwendung der Mikrowellenradiometrie

Die Mikrowellenradiometrie ist ein mögliches Fernerkundungsverfahren neben Radarverfahren, wo man mit gleichen Wellenlängen arbeitet und neben anderen aktiven und passiven Verfahren, die im Bereich des Infraroten bzw. des sichtbaren Lichts, d. h. im sogenannten optischen Bereich, Anwendung finden. Gegenüber den im "optischen" Bereich arbeitenden Erkundungsverfahren hat die Mikrowellenradiometrie (ebenso wie Radarverfahren) den frequenzbedingten Vorteil der weitgehenden Allwetterfähigkeit und der möglichen Eindringtiefe unter die sichtbare Oberfläche. Vorteilhaft ist außerdem der größere Temperaturkontrast im Mikrowellenbereich. Von Nachteil ist hier – wegen der großen Wellenlängen – das grundsätzlich schlechtere Winkelauflösungsvermögen von Mikrowellensystemen, das vom Verhältnis aus Wellenlänge zu Aperturdurchmesser bestimmt wird. Nachteilig gegenüber passiven optischen Systemen wirken sich außerdem in der Mikrowellenradiometrie die relativ kleinen Bandbreiten und großen Integrationszeiten aus.

Gegenüber Radarverfahren hat die passive Mikrowellenradiometrie den Vorteil geringen Leistungsaufwandes und der fehlenden Umweltbelastung. Andererseits haben Radarverfahren den Vorteil, daß man einfach Entfernungen und Geschwindigkeiten messen kann. Außerdem kann man mit kohärenten Radarverfahren synthetische Aperturen aufbauen und so das Winkelauflösungsvermögen beträchtlich verbessern. Dies ist wegen der Inkohärenz der von einem Radiometer detektierten Strahlung in der Mikrowellenradiometrie nicht möglich.

Zu bemerken bleibt noch, daß man auf Radiometrie-Bildern im Gegensatz zu Abbildungen, die man mit aktiven Verfahren erhält, keinen Speckle erhält. Speckle und Glint sind Interferenzphänomene, und diese treten in der Mikrowellenradiometrie nicht auf.

In Tabelle 3 sind die grundsätzlichen Vor- und Nachteile von aktiven und passiven Fernerkundungsverfahren, die im Mikrowellenbereich und in den optischen Bereichen möglich sind, zusammengestellt.

Die wesentlichen Vorteile der Mikrowellenradiometrie sind demnach weitgehende Allwetterfähigkeit, mögliche Eindringtiefe unter die sichtbare Oberfläche, großer

Kontrastbereich und Möglichkeit von Temperaturmessungen. Diese Vorteile öffnen einen weiteren Bereich von Anwendungsmöglichkeiten.

In Land- und Forstwirtschaft kann man z. B. Bewuchsqualität und –quantität bestimmen, Strukturen ermitteln und grundsätzliche Aussagen über Bodenfeuchte und ihre Änderungen treffen. Für wasserwirtschaftliche Fragestellungen kann man Wasserqualität und Temperatur bestimmen, Wasserstandsmessungen auch im Hinblick auf Überflutungen vornehmen und Schneemessungen durchführen und sogar Süßwasser-Suche betreiben [12]. Man hat die Möglichkeit, mit radiometrischen Messungen Karten zu aktualisieren, thematische Kartographie zu betreiben, geologische Strukturen und Formationen zu ermitteln. In der Meteorologie benutzt man derzeit Mikrowellenradiometrie zur Wettervorhersage und zur Verbesserung von Satellitenfunkstrecken, indem man die Strecke radiometrisch sondiert und z. B. Einflüsse des Ausbreitungswegs auf die Polarisation der Funkwelle ermittelt. In der Ozeanographie kann man Seezustände und Oberflächentemperaturen messen und so optimale Schiffsrouten ermitteln. Wracks, insbesondere solche aus Metall, sind sowohl auf See als auch an Land leicht zu detektieren. Es sind grundsätzlich Navigationsverfahren möglich, die Flugzeuge an Flüssen und Straßen entlang führen, weil im allgemeinen sowohl Flüsse und Straßen einen recht großen Temperaturkontrast zu ihrer Umgebung haben. Mit Mikrowellenradiometern können Straßenzustände stationär oder vom Flugzeug aus in Hinblick auf Eis, Schnee und auch auf Aufbrücke überwacht werden sowie Verkehrszählungen z. B. hinsichtlich der Verkehrsdichte, Parkplatzbelegung usw. vorgenommen werden. Schließlich ist eine Anwendung auch in der Medizin für diagnostische Zwecke denkbar; hier ist die mögliche Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen unter die Kleidung, ja sogar in das Gewebe hinein ein wesentlicher Faktor.

Besondere Bedeutung hat derzeit der Einsatz von Mikrowellenradiometern zur Detektion und Beseitigung von ausgelaufenem Öl auf Wasseroberflächen [10]; man kann dabei äußerst genau das Volumen des Öls bestimmen. Neuerdings stellt man auch Untersuchungen zum Einsatz von Mikrowellenradiometern für die Detektion von Landminen an.[11]

Operationell finden Mikrowellenradiometer Anwendung auf Satelliten zur Beobachtung der Eisausdehnung an den Polkappen und der entsprechenden Meere, zur Beobachtung und Überwachung der Atmosphäre der Meeresoberfläche zur Bestimmung von Wind- und Wellenfeldern sowie zur großflächigen, globalen Beobachtung von Landoberflächen[12].

Für unterschiedliche Anwendungen haben sich inzwischen jeweils optimale bzw. besonders günstige Frequenzbereiche herauskristallisiert. In Tab 4 sind einige Anwendungsfelder zusammen mit den entsprechenden Frequenzen im Hinblick darauf zusammengestellt ob die Frequenz notwendig, wichtig oder hilfreich für die entsprechende Analyse ist.

7.Literatur

- [1].Ulaby F.T., R.K. Moore, A.K. Fung, Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Vol 1: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry, Addison Wesley Publ. Company, 1981
- [2].N. N.: Recommendations and Reports of the CCIR, 197, XIV Plenary Assembly, Kyoto 1978 Vol V, Propagation in nonionized Media
- [3].Preißner, J.: Einfluß der Atmosphäre auf mikrowellenradiometrischen Messungen im Frequenzbereich von 10 GHz bis 400 GHz. DFVLR-Mitt. 80-16
- [4].Grüner, K.: Probleme und Möglichkeiten der Fernerkundung mit Mikrowellenradiometern. Bildmessung und Luftbildwesen BuL 5-1975, S. 182-188
- [5].Skolnik: Radar Handbook, 2nd Edition, 1995, p. 2.29
- [6].Kerr Y. H., J.P.Wigneron: Vegetation Models and Observations, a Review, in Passive Microwave Remote Sensing of Land-Atmosphere Interactions/ ed by

- B.J.Chouduri, Y.H.Kerr, E.G.Njoku, P.Pampaloni-Utrecht: VSP , ESA/NASA international Workshop held at Lary, France from Jan. 11-15, 1993, VSP BV 1995
- [7].Dicke, R. H.: The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies. Rev. Sci. Inst. Vol. 17, July 1946, pp. 268-275
- [8].Moore, R., Ulaby, F.: The Radar Radiometer, Proceedings of the IEEE, Vol. 57, No 4, april 1969, pp. 587-593
- [9].Süß, H., Peichl, M.: Airborne and Groundbased Passive Millimeterwave Imaging at 37 and 90 GHz. SPIE Proceedings on Passive Millimeterwave Imaging Technology, Orlando, April 21-22, 1997, Vol. 3064, pp. 71-78, 1997
- [10].Peichl, M.: Radiometrie, CCG-Kurs Systeme und Verfahren der Aufklärung, Oberpfaffenhofen, 29.09.1999, CCG, (1999).
- [11]. Peichl M., Schulteis S., Dill S., Süß H., Application of microwave radiometry for buried landmine detection, German Radar Symposium GRS 2002, Bonn, Germany, 3-5 September 2002.
- [12].Vohwinkel, B. Passive Mikrowellenradiometrie, Vieweg& Sohn, Braunschweig / Wiesbaden, 1988
- [13].Keydel W, Alpers: Detection of Oil Films by Active and Passive Microwave Sensors.Proc. COSPAR 26th Meeting, Workshop V, Toulouse/F., June 30-July 12, 1986, 7 pages, 12 figs., 11 refs
- [14].Süß H., Schröder R., Peichl M., Neff T., Possible Military Requirements and Applications of Active and Passive Imaging Sensors at Micro- and Millimeterwave Frequencies, Proc. of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2002, Toronto, Canada, 24-28 June 2001
- [15] Kempf T., Peichl M., Süß S., A Method for Advanced Automatic Recognition of Relocatable Targets, NATO/RTO SET Symposium on Complementarity of Ladar and Radar, Prague, Czech Republic, 22-23 April 2002.
- [16].Kempf T., Peichl M., Süß S., A Method for Advanced Automatic Recognition of Relocatable Targets, NATO/RTO SET Symposium on Complementarity of Ladar and Radar, Prague, Czech Republic, 22-23 April 2002.
- [17].Peichl M., Dill S., Süß H., Keydel W., Detection of Anti-personnel Landmines using Microwaves, Proc. of 3rd International Workshop on Commercial Radio Sensors and Communication Techniques CRSCT, Linz, Austria, 23 August 2001

8. Tabellen

Material	Emissionsvermögen ϵ
Dichte Vegetation	0.99 - 0.93
Polyäthylen	0.96
Umgepflügter Boden	0.96 - 0.92
Süßwasser-Eis (0°C)	0.92
Trockenes Gras	0.95 - 0.91
Sand	0.91 - 0.89
Trockener Schnee, Dicke: 28-75 cm	0.88 - 0.76
Grober Kis	0.85 - 0.83
Asphalt	0.84 - 0.81
Beton	0.78 - 0.74
glattes Gestein	0.75
Wasser (20° C -10°C)	0.58 – 0.6
Metall	0.00

Tab.1 Emissionsvermögen verschiedener Materialien bei 94GHz

	32 GHz	90 GHz
Radiometer-Typ	Dicke	Direkt (Total Power)
Empfänger-Prinzip	Superheterodyn Parametrischer Vorverstärker (DSB)	Superheterodyn Mischer und 1. ZF-Stufe 20 K Kühlung
ZF-Bereich (B)	50 MHz – 350 MHz	2.9 GHz – 4.1 GHz
T_E	485 K (DSB)	256 K (DSB, Prototyp 1)
$\Delta T / ms$	3 K	< 0,6 K
Antennentyp	Offset-Paraboloid mit Schwenkgetriebe	
Schwenkfrequenz	0 – 5 Hz	0 – 35 Hz
Winkelauflösung (3-dB)	40 mrad	18 mrad

Tabelle 2. Technische Daten der eingesetzten Radiometer:

T_E : Äquivalente Empfängerrauschtemperatur; $\Delta T / ms$: Temporauflösung bei 1 ms Integrationszeit und 300 K Antennentemperatur

	Aktive MW	Passive MW	Passive Optik	Aktive Optik
Winkelauflösung	SAR: sehr gut RAR: schlecht	schlecht	sehr gut	sehr gut
Geschwindigkeit Radial	sehr gut	nicht möglich	nicht möglich	sehr gut
Geschwindigkeit Tangential	möglich	schlecht	schlecht	sehr gut
Entfernung	sehr gut	nicht möglich	nicht möglich	sehr gut
Bandbreite	klein	klein	gross	klein
Integrationszeit	ausreichend	ausreichend	niedrig	ausreichend
Radiometrischer Konstrast	Speckle	gross	klein	Speckle
Temperatur	nicht möglich	sehr gut	sehr gut	möglich
Allwetterfähig	sehr gut	sehr gut	nicht möglich	nicht möglich
Eindringtiefe: Land Wasser	möglich schlecht	möglich schlecht	nicht möglich möglich	nicht möglich möglich
Umwelt- beeinflussung	Störstrahlung	keine	keine	keine
Leistungsauf- wand	hoch	niedrig	niedrig	hoch
Massen u. Strukturen	gross, schwer	gross	klein, leicht	klein, leicht

Tabelle 3 Vergleich von Mikrowellenverfahren mit optischen Fernerkundungsverfahren

Parameter	Frequenz/GHz										
	1.4	2.6	6	10	18	21	37	50 - 60	90	160	183
Atmosphäre: - Wasserdampfgehalt - Wasserdampfverteilung - Flüssigwassergehalt - Temperaturprofil					N	N	W		H	W	N
Ozeane: - Oberflächentemperatur - Windgeschwindigkeit - Niederschlag - Salzgehalt - Ölverschmutzung		N		N	W	H	N				
Kryosphäre: - Meereisbedeckung - Eistyp - Alter			H	W	N	N	N		H		
Land: - Niederschlag - Bodenfeuchte - Vegetation - Schneebedeckung	N		H		W		N		N		W
	H		W	N							
	H		H	H	N		N		W		

Tab.4 Anwendungsmöglichkeiten der Mikrowellenradiometrie zur Messung geophysikalischer Parameter und die dazu notwendigen, wichtigen und hilfreichen Frequenzen. Legende: N = Notwendig, W = Wichtig; H = Hilfreich

9. Anhang

9.1. Integraldarstellungen für Strahlungs- und Antennentemperatur

Gleichung (2) stellt einen recht vereinfachten Zusammenhang zwischen T_S, T_W, T_U und T_H her unter Einbeziehung der objektspezifische Größen $\varepsilon, \alpha=\varepsilon-1, \rho<1$ und τ . Realiter sind die Zusammenhänge aber komplexer; alle diese Größen sind im Raum richtungsabhängig, und deswegen müsste man Gl. (2) entsprechend als Summe von Integralen über den gesamten Raumwinkel (Ω, Ω') wie folgt darstellen:

$$T_S(\Omega) = \varepsilon(\Omega)T_W + \iint \rho(\Omega, \Omega')T_U(\Omega')d\Omega' + \iint \tau(\Omega, \Omega')T_H(\Omega')d\Omega' \quad (19)$$

Die gemessene Antennentemperatur T_A ist grundsätzlich ebenfalls als Integral über den gesamten, von der Antenne abgedeckten Raumwinkel (Ω_a) zu formulieren:

$$T_A = \frac{1}{\Omega_A} \iint F(\vartheta, \varphi)T_S(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi \quad (20)$$

Diese Funktion ist in Abb.8 dargestellt. Zusammen mit der Rauschtemperatur des Empfängers T_E erhält man für die gesamte System-Rauschtemperatur T_{sys} des Radiometers:

$$T_{sys} = T_A + T_E$$