Passive Mikrowellensensoren zur Fernerkundung

Wolfgang Keydel

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

Kontaktadresse

Mittelfeld 4, 82229 Hechendorf, Tel./Fax: 0 8152-980 523 / 5,

E-Mail's: wolfgang.keydel@gmx.de, wolfgang@keydel.com

Webseite: www.keydel.com

Übersicht Fernerkundungssensoren

	aktiv	passiv
sichtbares Licht ~ 450nm - 780nm	Kunstlicht-Kamera	Kamera Spektrometer
nahes/fernes Infrarot ~ 780nm - 1mm	Laser-Radar	IR-Kamera IR-Radiometer IR-Spektrometer
Mikrowelle 300MHz - 300GHz (1m - 1mm)	abbildendes Radar Scatterometer Altimeter	MW-Radiometer

Quellenangabe

Natürliche thermische elektromagnetische Strahlung unserer Umgebung

Ursache: atomare und molekulare Zustandsübergänge in Materie mit einer physikalischen Temperatur > 0K

Erscheinung: Rauschen
unpolarisierte regellose „breitbandige“ Strahlung

Abhängigkeit: chemisch-physikalische Zusammensetzung
Oberflächenbeschaffenheit
absolute physikalische Temperatur
Richtung
Frequenz
Polarisation

Quellenangabe

Schema der Strahlungsbeiträge

T_{Himmel}

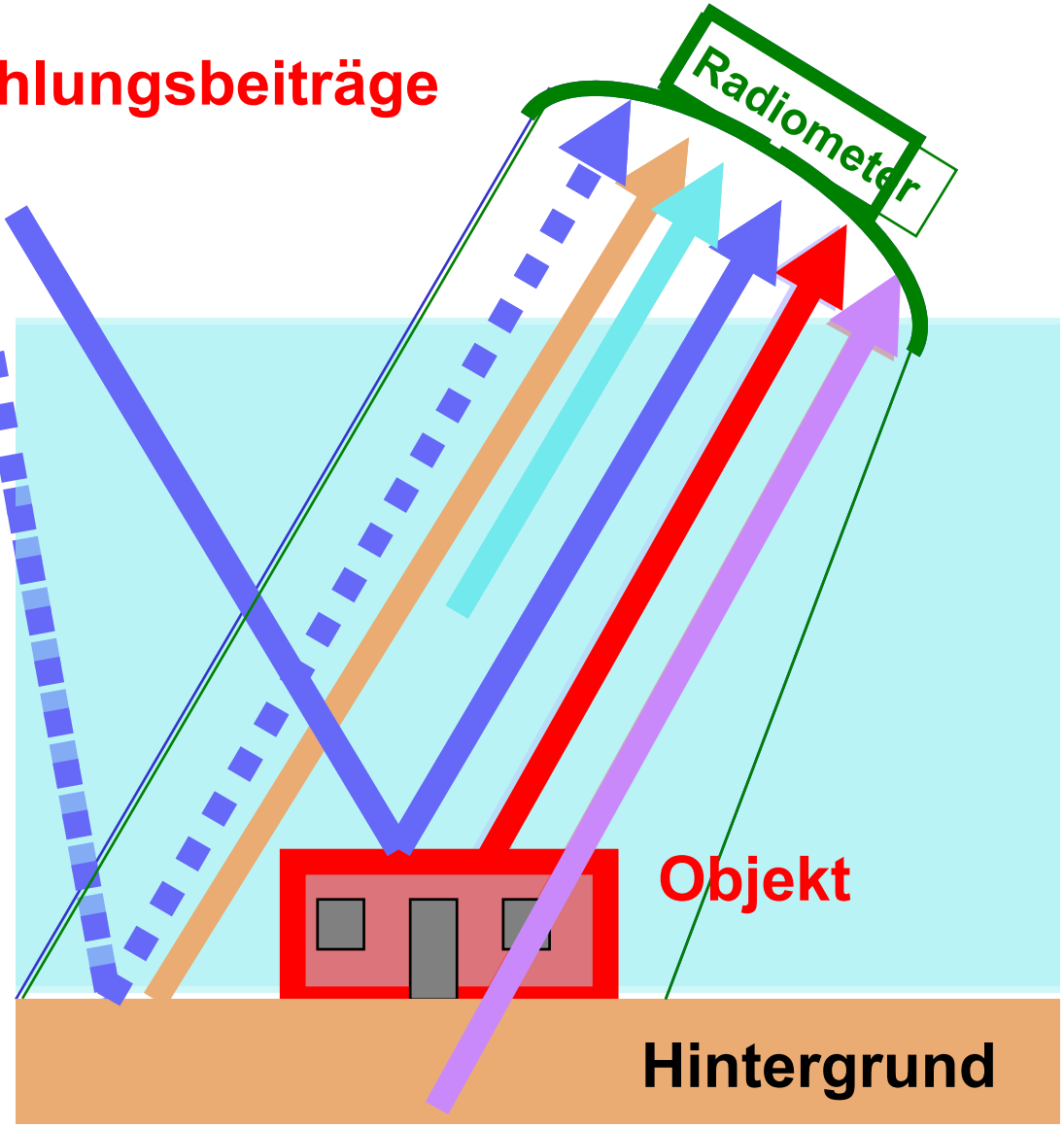
T_{Objekt}

$T_{Himmel\ reflektiert}$

$T_{Hintergrund}$

$T_{Hintergrund\ trans.}$

$T_{Atmosphäre}$



Quellenangabe

Scheinbare Temperatur T_s

$$T_s = \varepsilon\, T_w + \rho\, T_r + \tau\, T_{tr}$$

ε = Emissionsvermögen ≤ 1; α = Absorbtionsvermögen;
ρ= Reflexionsvermögen ≤ 1; τ = Transmissionsvermögen ≤ 1

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

Kirchhoff: $\varepsilon = \alpha$

Reale Antenne

T_H = Umgebungstemperatur; α = Streufaktor

$$\rho T_r = \iint \sigma\, T_H\, d\Omega$$

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

Quellenangabe

Helligkeit (Brightness)

$$S = \frac{\partial P}{\partial A \, \partial \Omega \, \partial f} \qquad \frac{W}{m^2 \, Sterad \, Hz}$$

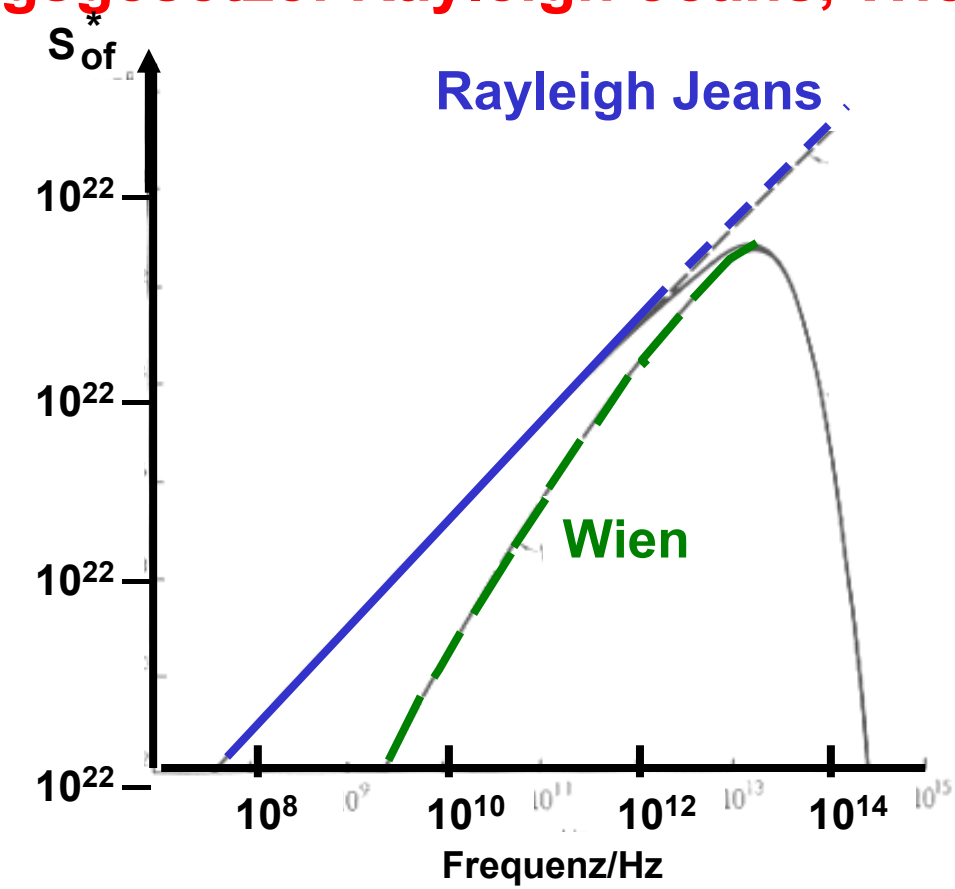
<u>Beschreibungsgröße der thermischen Strahlung</u>

∂ **P**	**Leistungsanteil**
∂ **A**	**Oberflächenelement**
$\partial \Omega$	**Raumwinkelelement**
∂ **f**	**Frequenzintervall**

Quellenangabe

Strahlungsgesetze: Rayleigh-Jeans, Wien & Plank,

Schwarzkörper 300K
f < 117 GHz
Bei f=300 GHz
Abweichung von Plank:
$\Delta \approx 3\%$



Rayleigh Jeans

$$S^*_{of} = \frac{2KT}{c^2} f^2$$

Wien

$$S^*_{of} = \frac{2h}{c^2} f^3 e^{\frac{-hf}{k \cdot T}}$$

$$S^*_{of} = \frac{2h}{c^2} f^3 \left(e^{\frac{h \cdot f}{k \cdot T}} - 1 \right)^{-1}$$ Plank

Quellenangabe

Plancksches Strahlungsgesetz

$$S^*_{of} = \frac{2h}{c^2} f^3 \left(e^{\frac{h \cdot f}{k \cdot T}} - 1 \right)^{-1}$$

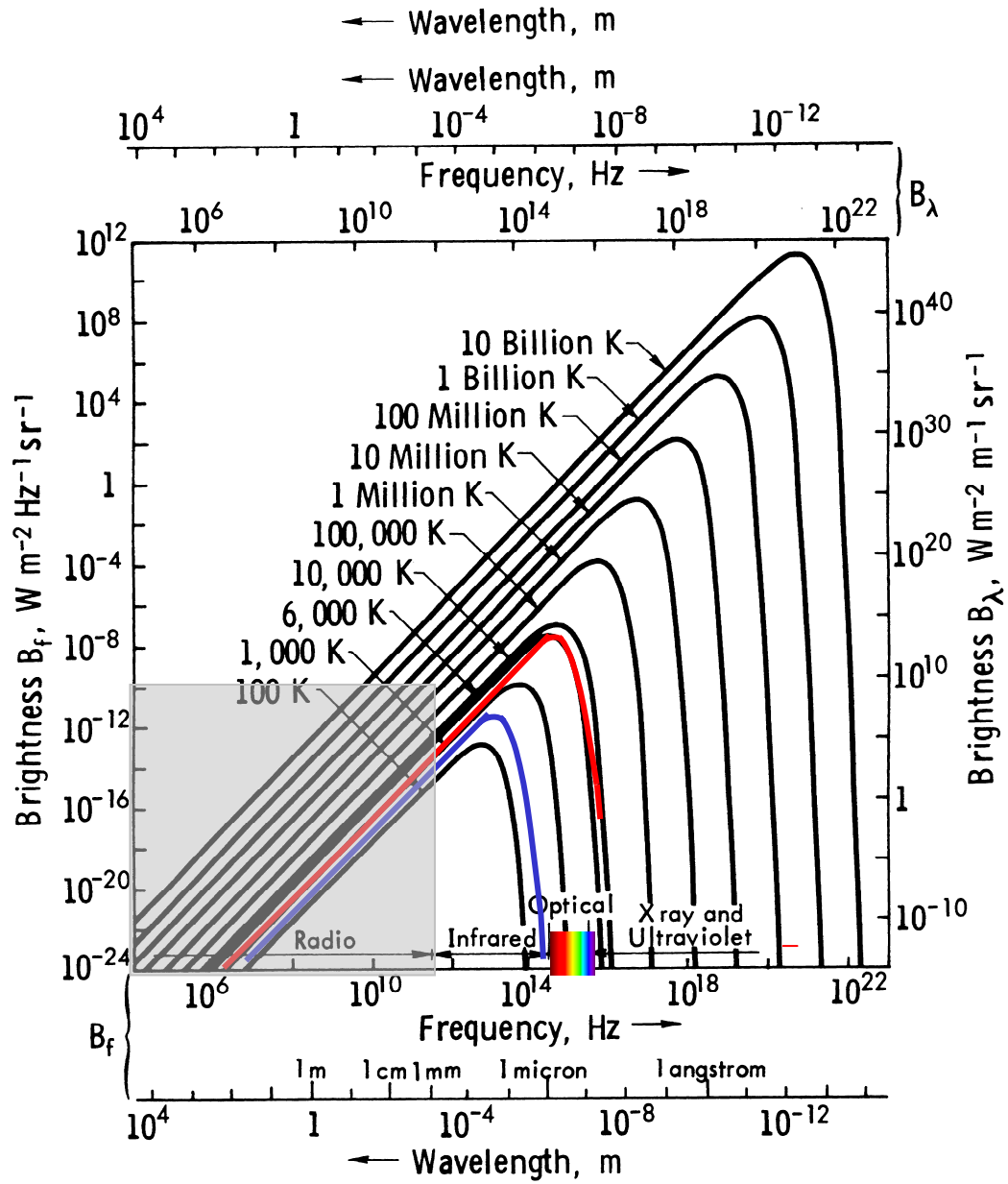
MW-Bereich: hf << kT

Näherung von Rayleigh-Jeans

$$S^*_{of} = \frac{2kT}{c^2} f^2$$

α = Absorptionsvermögen ≤ 1

$$\boxed{S_{0f} = \alpha \; S^*_{of}}$$



Quellenangabe

Emissionsvermögen verschiedener Materialien bei 94GHz

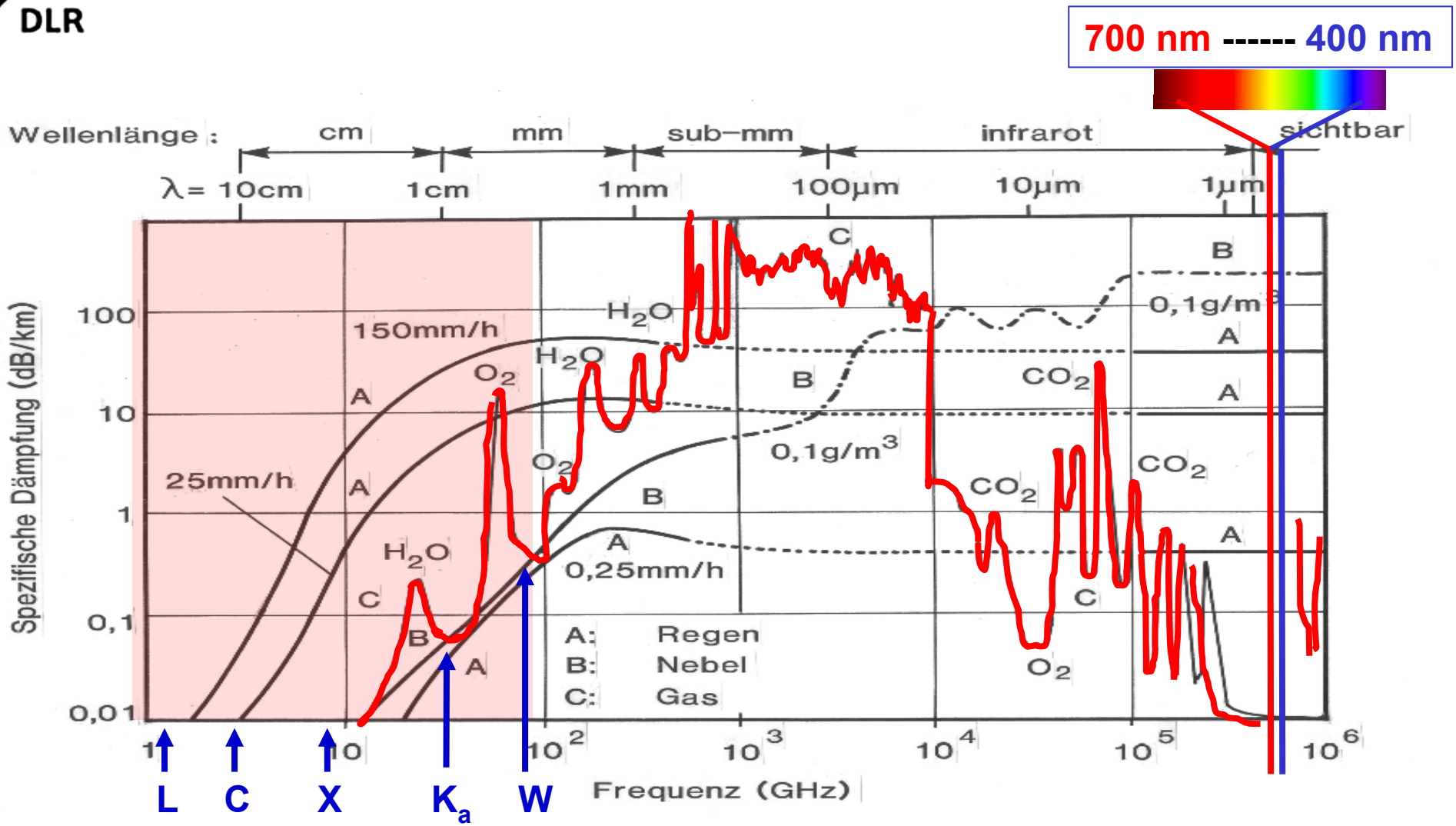
Material	Emissionsvermögen ε
dichte Vegetation	0.99 - 0.93
Polyäthylen	0.96
umgepflügter Boden	0.96 - 0.92
reines Eis (0°C)	0.92
trockenes Gras	0.95 - 0.91
Sand	0.91 - 0.89
trockener Schnee (28-75cm Dicke)	0.88 – 0.76
grober Kies	0.85 - 0.83
Asphalt	0.84 - 0.81
Beton	0.78 - 0.74
glattes Gestein	0.75
Wasser (20°C -10°C)	0.58 - 0.63
Metall	0.00

Quellenangabe

Ein Mikrowellenradiometer ist ein extrem empfindlicher Empfänger, der Mikrowellenstrahlung empfängt, auswertet und anzeigt, die aus der Umgebung des Radiometers einfällt.

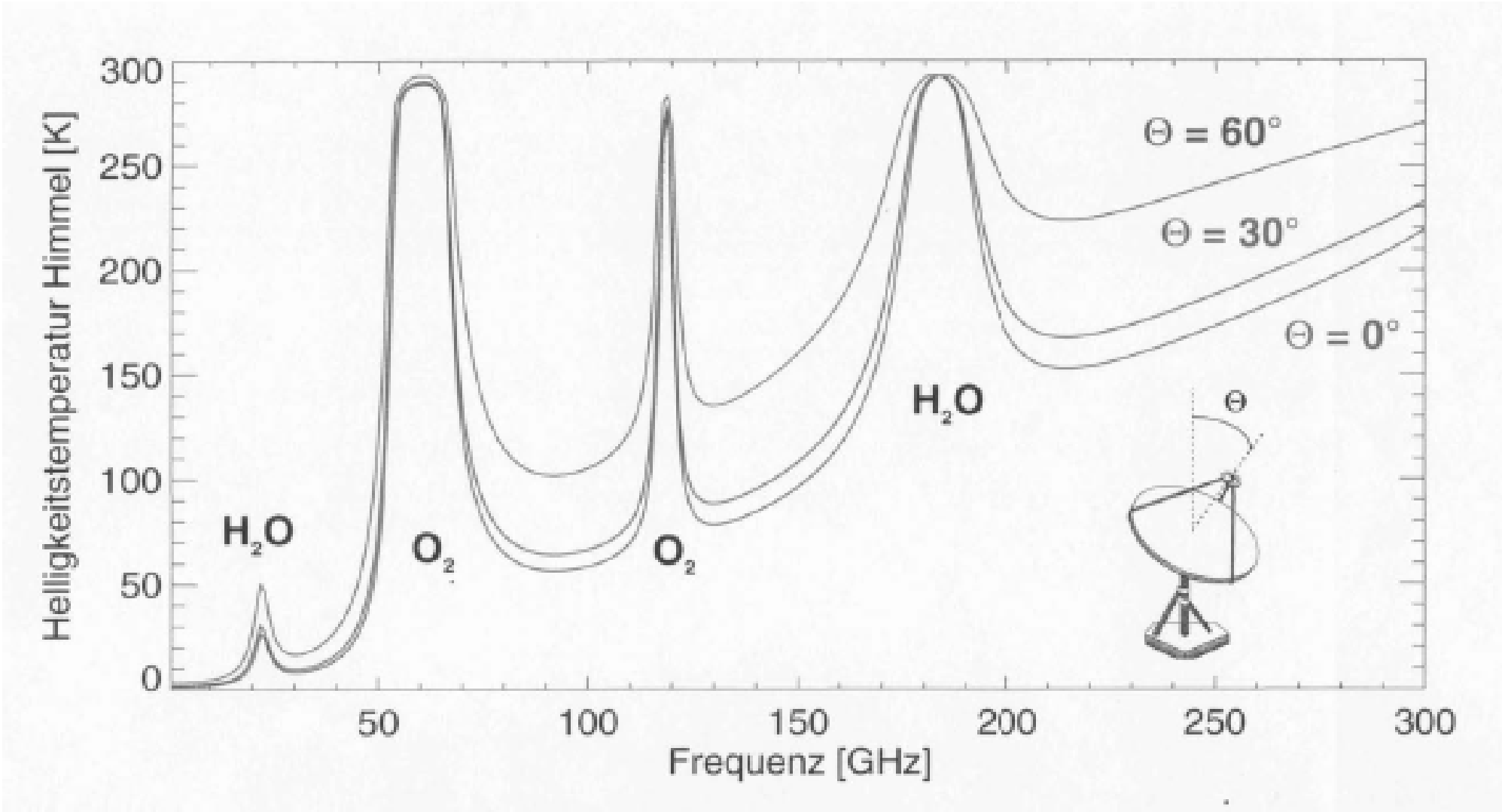
Quellenangabe

Atmosphärische Dämpfung nach CCIR



Quellenangabe

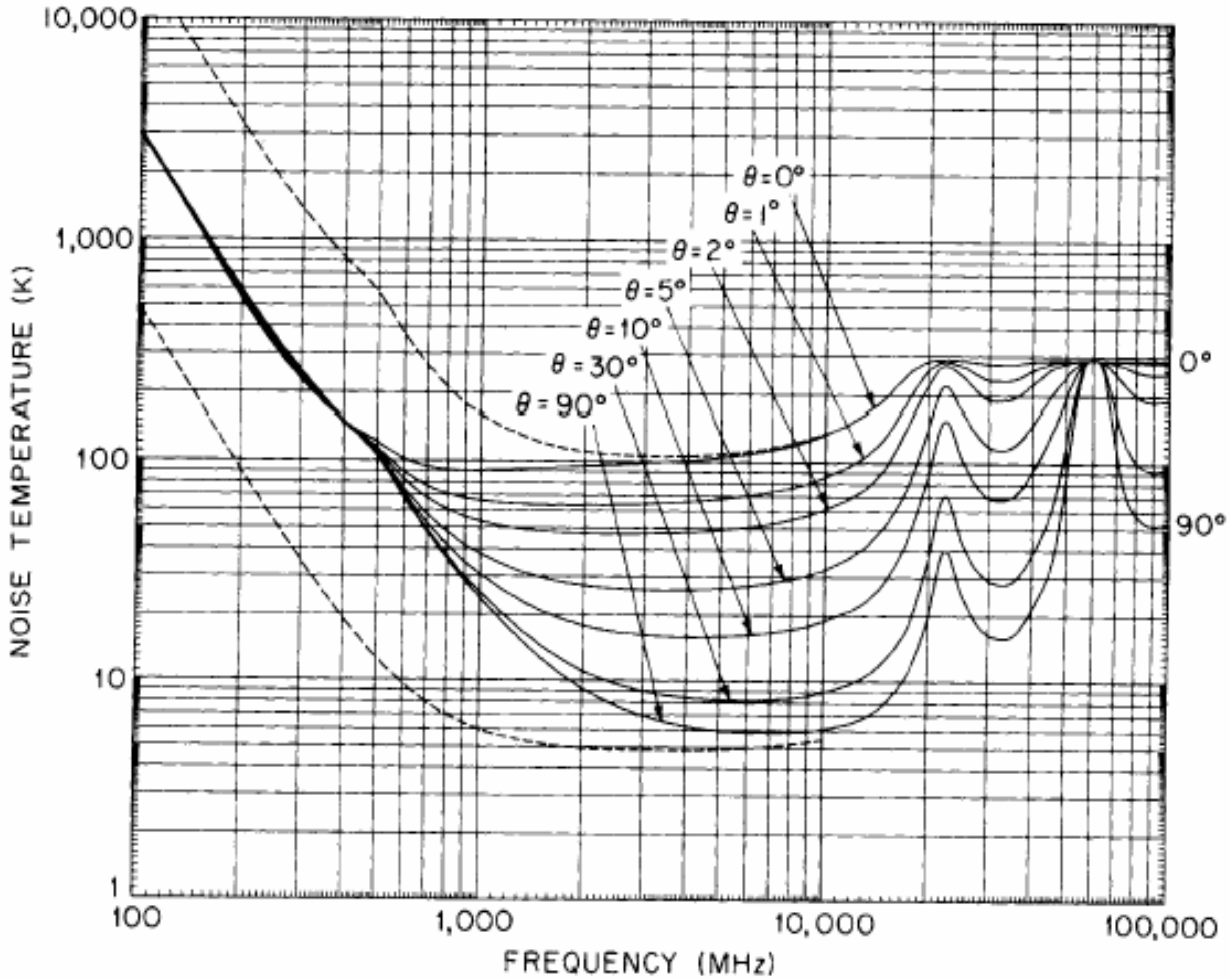
Himmelstemperaturen
Beobachtungshöhe: 500m, Temperatur 20° C

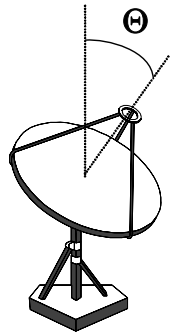


Quell

Rauschtemperaturen einer idealen Antenne ohne Nebenzipfel

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





Quellenangabe

Temperaturkontrast

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

$$T_1 = T_{Phys1} + r_1 T_{Sky} - r_1 T_{Phys1}$$

$$T_2 = T_{Phys2} + r_2 T_{sky} - r_2 T_{Phys2}$$

$$\Delta T = T_{Phys1} - T_{Phys2} + (r_1 - r_2) T_{sky} - r_1 T_{Phys1} + r_2 T_{Phys2}$$

$$r = \left(\frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \right)^2$$

$$T_{Phys1} = T_{Phys2}$$

$$\Delta T = (r_1 - r_2)(T_{Sky} - T_{Phys})$$

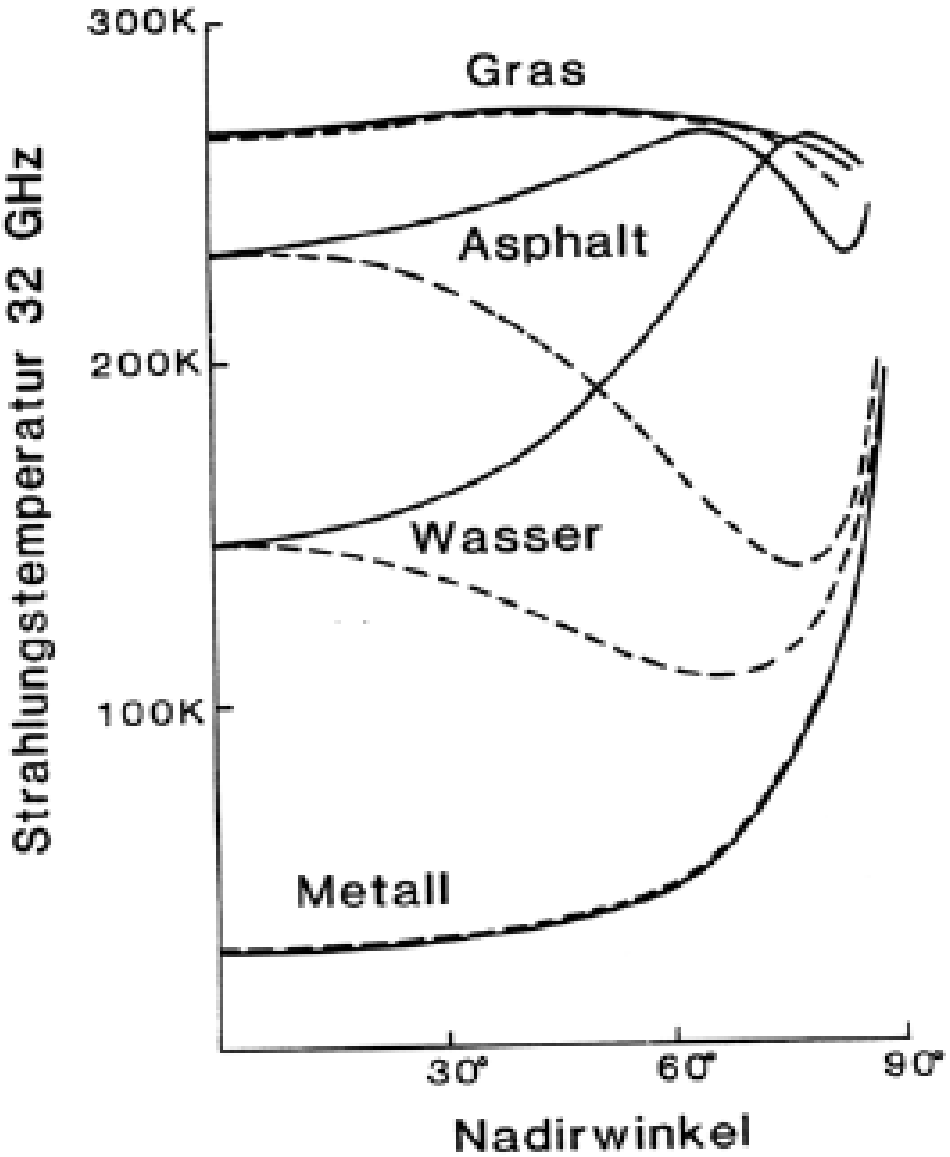
Quellenangabe

Strahlungstemperaturen verschiedener Medien bei 32 GHz

Polarisation

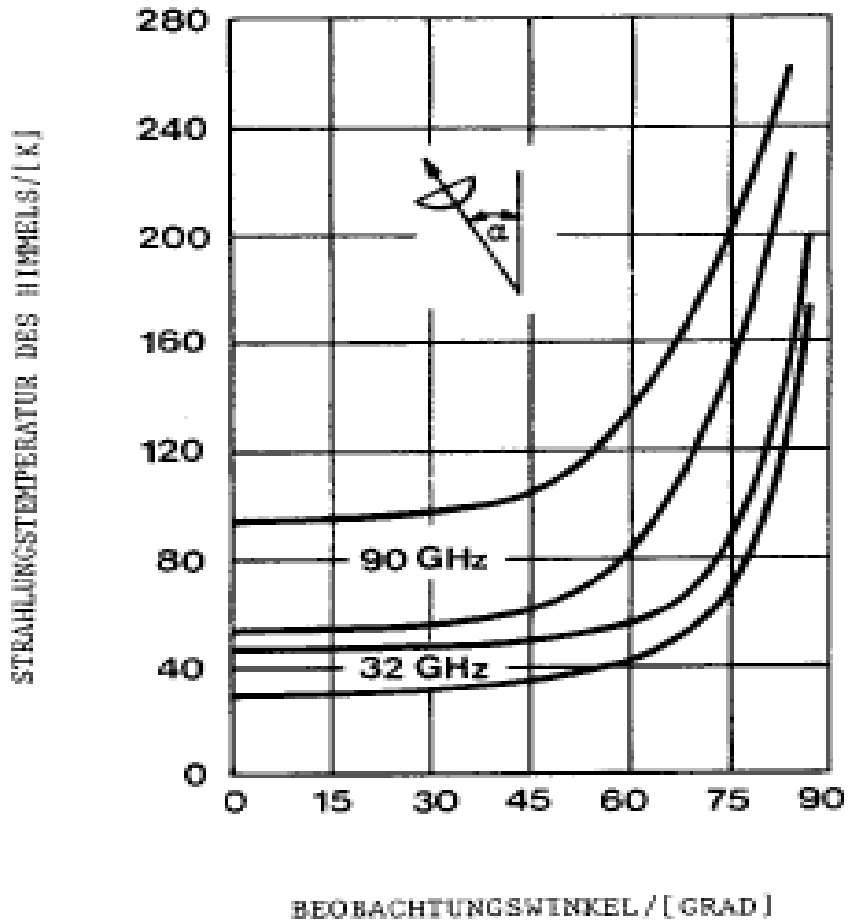
horizontal ▬▬▬▬

vertikal - - - - -



Quellenangabe

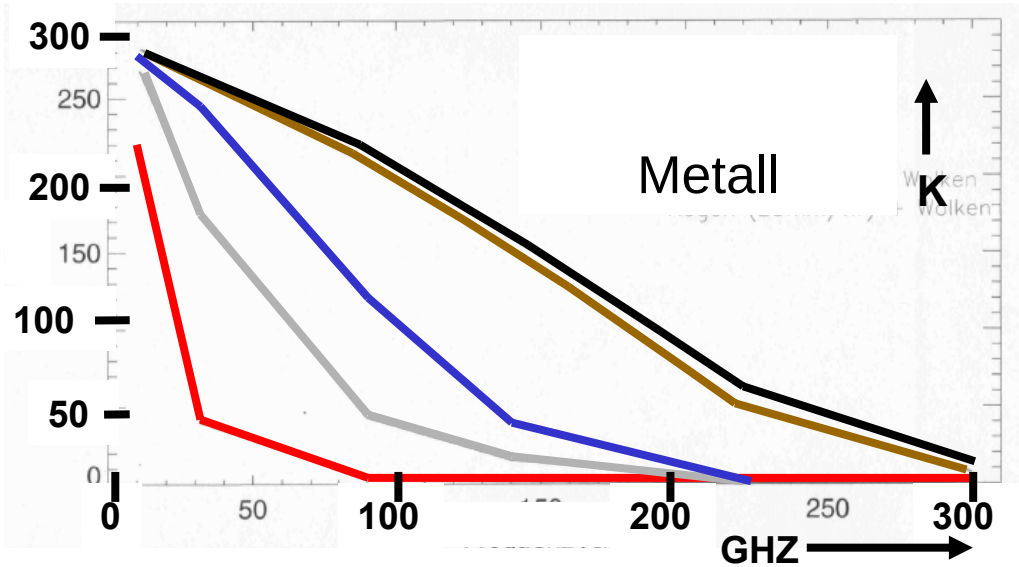
Streubreiten von Strahlungstemperaturen des Himmels

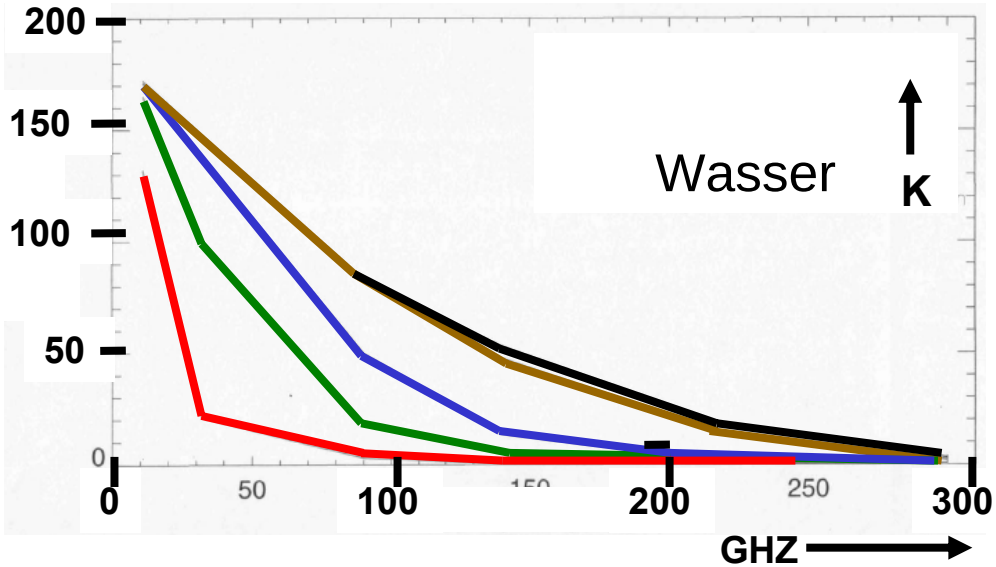


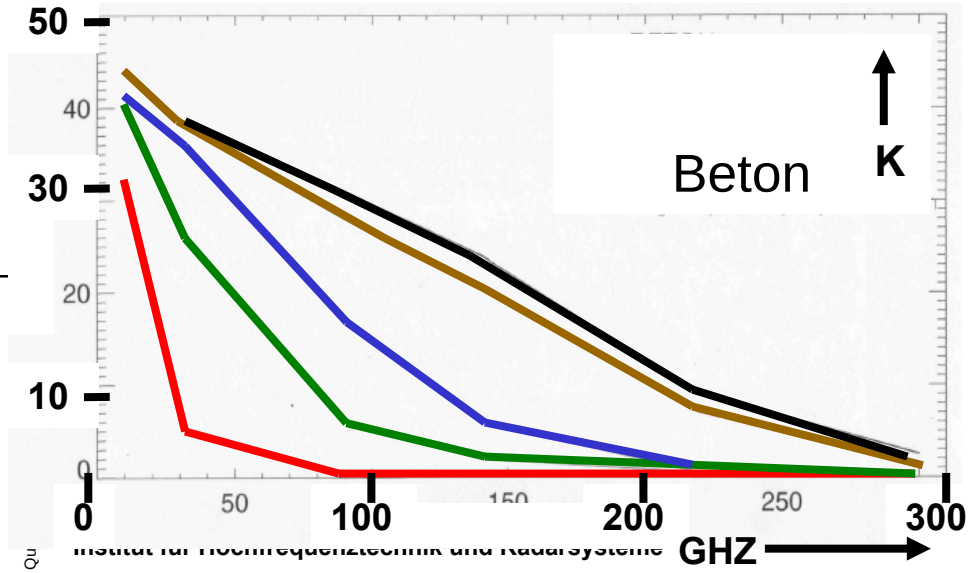
Quellenangabe

Strahlungstemperaturen (K) über der Frequenz (GHz)

Beobachtung: 180° gegen Nadir aus 500 m Höhe, Schichtdicken: 1 km







----- klare Atmosphäre

----- Nebel (Sicht.600m)

----- Nebel (Sicht.600m)

----- Regen (5 mm/hr + Wolken)

----- Regen (25 mm/hr + Wolken)

Beispiel: Eis - Wasser

Eis (1) : $\varepsilon_1 = 3$ **Wasser (2) :** $\varepsilon_2 = 81$

$r_1 = 0{,}07$ $r_2 = 0{,}64$

$$\Delta r = 0{,}57$$

$T_{sky} = 50\ K$ $T_{phys} = 273\ K$

$$\Delta T = 0{,}57 \cdot 223\ K$$

$$\Delta T = 127\ K$$

$T1 = 273\ K - 0{,}07 \cdot 223\ K = 257\ K$ (Eis)

$T2 = 273\ K - 0{,}64 \cdot 223\ K = 130\ K$ (Wasser)

Genauigkeit 1

$$r = \left(\frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1}\right)^2$$

$$\frac{dr}{d\varepsilon} = 2\left(\frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1}\right)\frac{\frac{1}{2\sqrt{\varepsilon}}\left(\sqrt{\varepsilon} + 1\right) - \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon}}\left(\sqrt{\varepsilon} - 1\right)}{\left(\sqrt{\varepsilon} + 1\right)^2}$$

$$\frac{dr}{d\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{\varepsilon}}\frac{\left(\sqrt{\varepsilon} - 1\right)}{\left(\sqrt{\varepsilon} + 1\right)^3} \cdot \frac{\left(\sqrt{\varepsilon} - 1\right)}{\left(\sqrt{\varepsilon} - 1\right)}$$

$$\frac{dr}{d\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{\varepsilon}}\frac{\left(\sqrt{\varepsilon} - 1\right)^2}{\left(\sqrt{\varepsilon} + 1\right)^2} \cdot \frac{1}{(\varepsilon - 1)}$$

Quellenangabe

Genauigkeit 2

$$\Delta r = r \frac{2\Delta\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon}\,(\varepsilon - 1)} \qquad \frac{\Delta r}{r} = \frac{2\Delta\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon}\,(\varepsilon - 1)}$$

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{(\varepsilon - 1)}$$

Für ε=3 und $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = 0{,}2$ **(20 %)**

$$\frac{\Delta r}{r} = 0{,}35$$

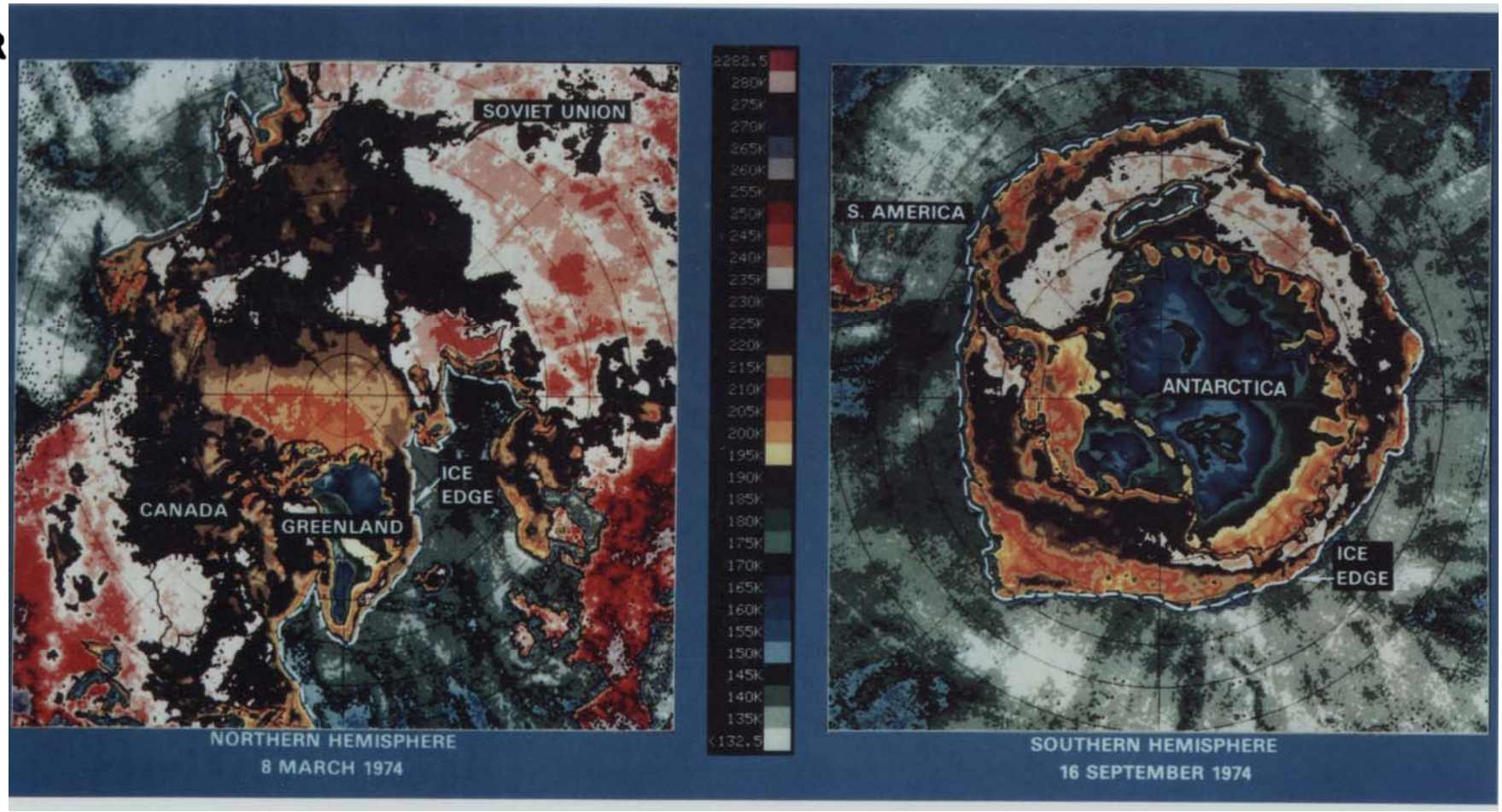
Für r = 0,07 → Δr = 0,024

$$\Delta T = \Delta r\,(T_{phys} - T_{sky})$$

$$\Delta T = 5.4\ K$$

Quellenangabe

Vereisung Arktis & Antarktis bei λ = 1,55 cm

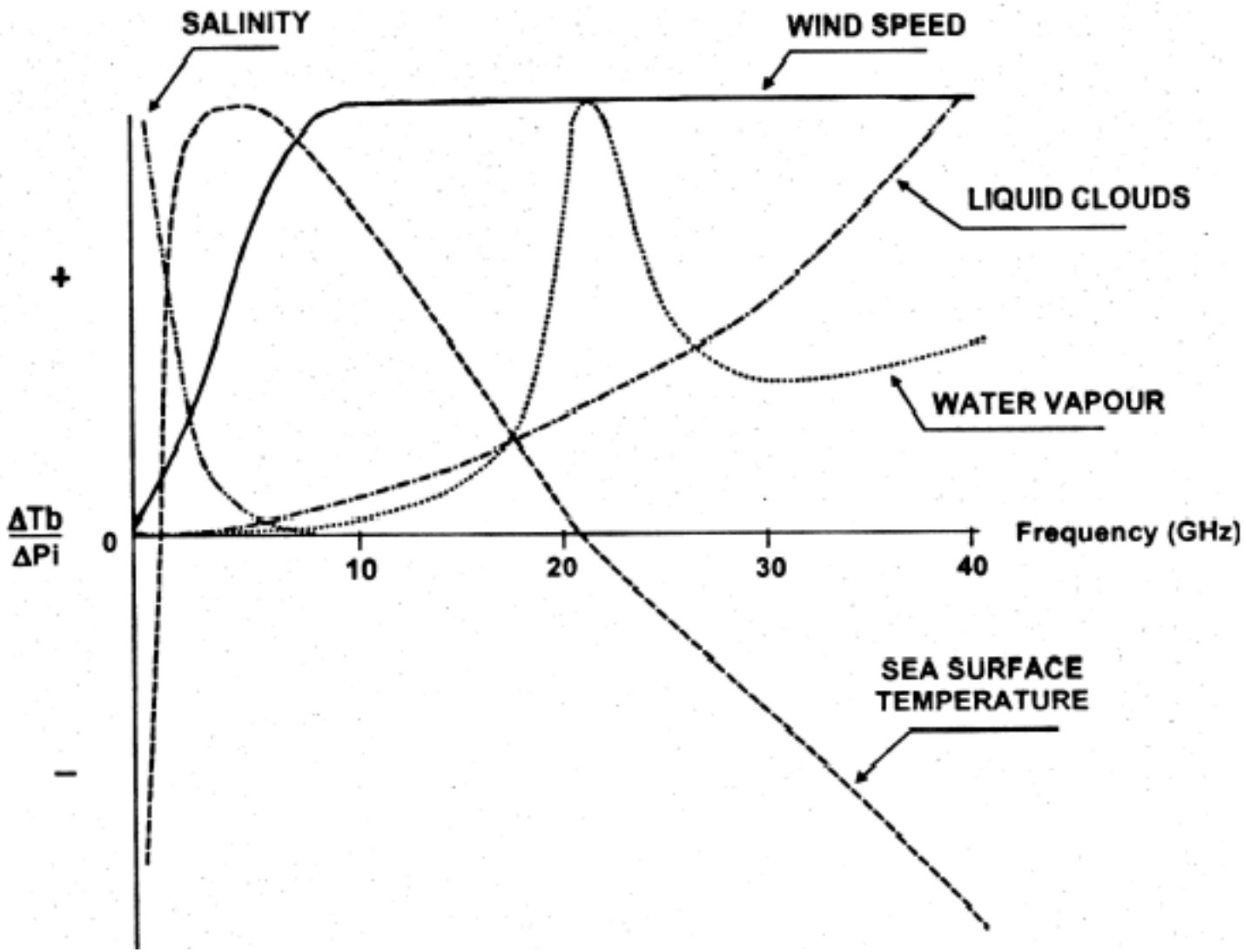


Winter:	**15 Mio km²**	**20 Mio km²**
Summer:	**8 Mio km²**	**2,5 Mio km²**

Wasser: 135 K….160 K; See-Eis: 190 K…250 K

Quellenangabe

Sensitivity of brightness temperature to geophysical ocean-surface parameters



Radiometer-Empfindlichkeit (Temperaturauflösung)

$$\Delta T_{min} = \alpha \frac{T_{Ant} + T_{Empf}}{\sqrt{B \cdot t_{int}}}$$

$$\text{Datenrate } n = \frac{1}{t_{int}}$$

$$n = \left[\frac{\Delta T_{min}}{\alpha \left(T_{Ant} + T_{Empf} \right)} \right]^2 \cdot B$$

Radiometerkonstante α : $0.1 < \alpha < 1$

abhängig von

Verfahren, Modulationsform, Filter

Quellenangabe

Signal-Rausch-Verhältnis

$$\frac{S}{N} = \frac{\Delta T}{\Delta T_{min}}$$

Δ T = effektiver Temperaturkontrast zwischen Ziel und Umgebung bzw. 2 Zielen

$$\Delta T = \Omega \cdot \Delta T_W \cdot \Gamma$$

Γ= Dämpfungsfaktor des Ausbreitungsmediums

Signal-Rauschverhältnis: S/N

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{min}} = \underbrace{\frac{F_{Ziel} \cdot F_{Antenne} \cdot \cos\vartheta}{R^2 \cdot \lambda^2}}_{\Omega} \Delta T_w \cdot \Gamma \cdot \frac{\sqrt{B\, t_{int}}}{\alpha \left(T_{Ant} + T_{Empf} \right)}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{min}} = \frac{S}{N}$$

$$\frac{S}{N} = \Delta T_w \frac{F_{Ziel} \cdot F_{Antenne} \sqrt{B \cdot t_{int}} \cdot \cos\vartheta \cdot \Gamma}{R^2 \cdot \lambda^2 \alpha \left(T_{Antenne} + T_{Empf} \right)}$$

Quellenangabe

Radiometer-Reichweitengleichung

$$\frac{S}{N} = \left(\frac{F_{Ziel} \cdot F_{Antenne}}{R^2 \cdot c^2 \cdot \alpha} \right) \cdot \left(\sqrt{B \cdot T_{int}} \, \frac{f^2 \cdot \Delta T_w \Gamma}{T_{Antenne} + T_{Empf}} \right)$$

$$R^2 = \frac{\Delta T_w \cdot F_{Ziel} \cdot F_{Antenne} \sqrt{B \cdot t_{int}} \cos\vartheta \cdot \Gamma}{(S/N) \lambda^2 \alpha \left(T_{Antenne} + T_{Empf} \right)}$$

Quellenangabe

Vereinfachte Formel für die Helligkeits-Temperatur T_B bewachsener Böden

$$T_B = \left(1 - e^{\frac{-\tau_{veg}}{\cos\theta}}\right) T_{Vegetation} + \varepsilon T_{Boden}\, e^{\frac{-\tau_{veg}}{\cos\theta}}$$

$$\tau_{veg} = \frac{\text{Dämpfungskonstante}}{\text{Schichtdicke}}$$

T_{veg} = Temperatur des Bewuchses

T_{Boden} = Temperatur des Bodens

θ = Beobachtungswinkel (off Nadir)

Quellenangabe

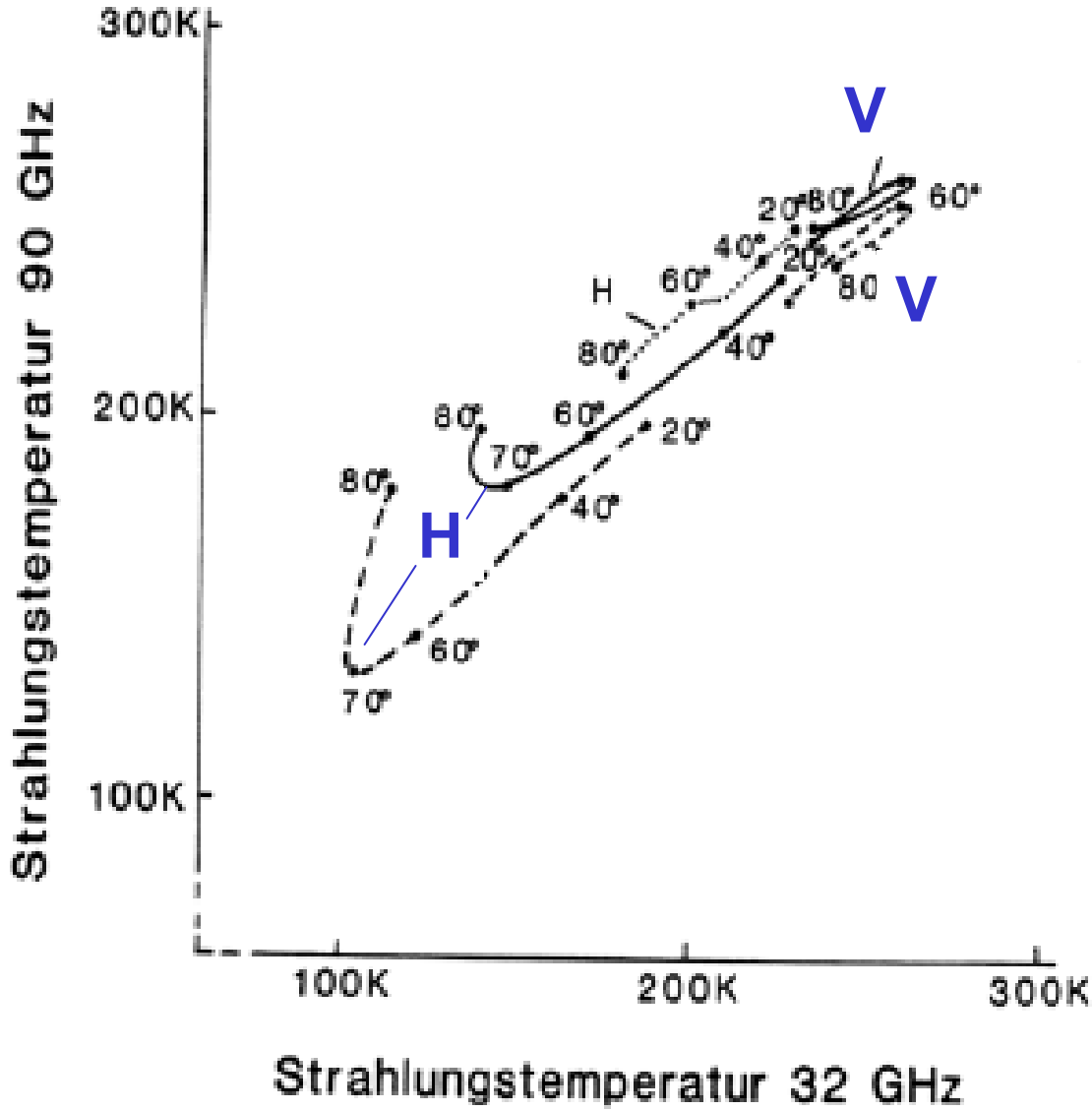
Asphalt-Signaturen

Polarisation:
horizontal & vertikal

Parameter:
Nadirwinkel

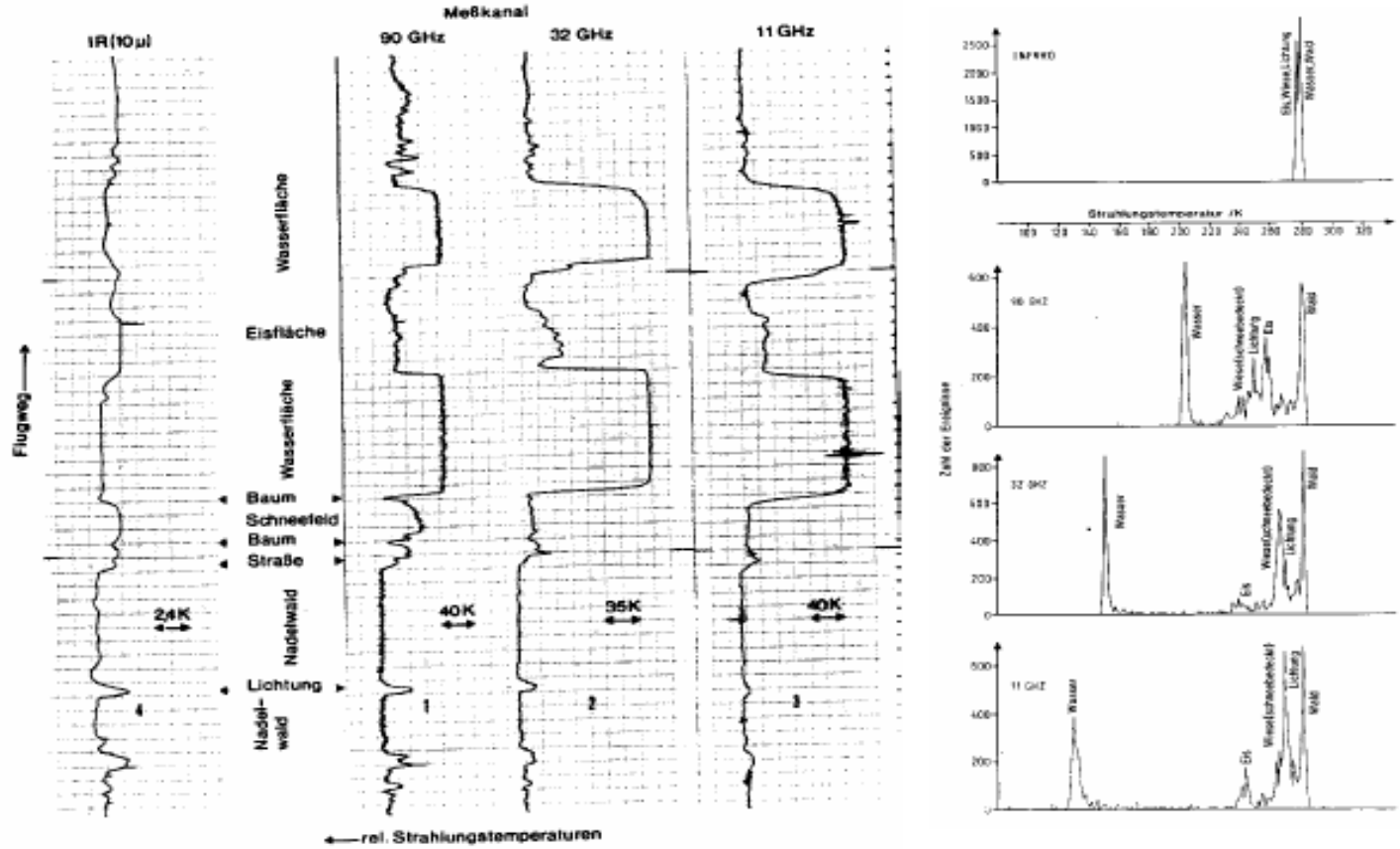
32GHz & 90GHz

trocken (—), naß(----),
3,5cm Schnee (.....)



Quellenangabe

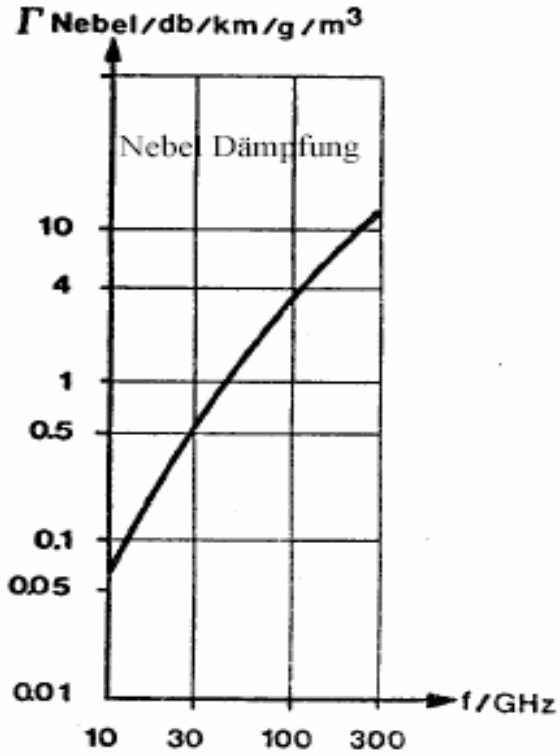
Temperaturprofile der Erdoberfläche

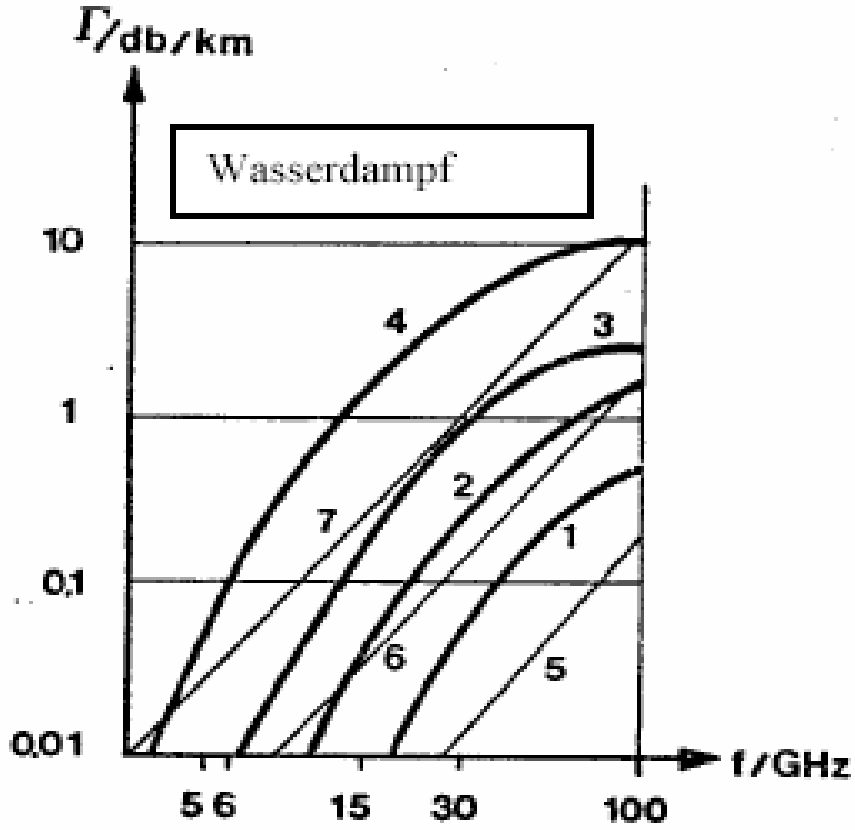


Simultane Messungen bei IR, f_1= 90GHz, f_2= 32GHz, f_3= 11GHZ, Flughöhe ca.400m, Bodenauflösungen bei f_1 und f_2 16m bei f_3 20m

Quellenangabe

Frequenzabhängigkeit von Regen- & Nebeldämpfungen





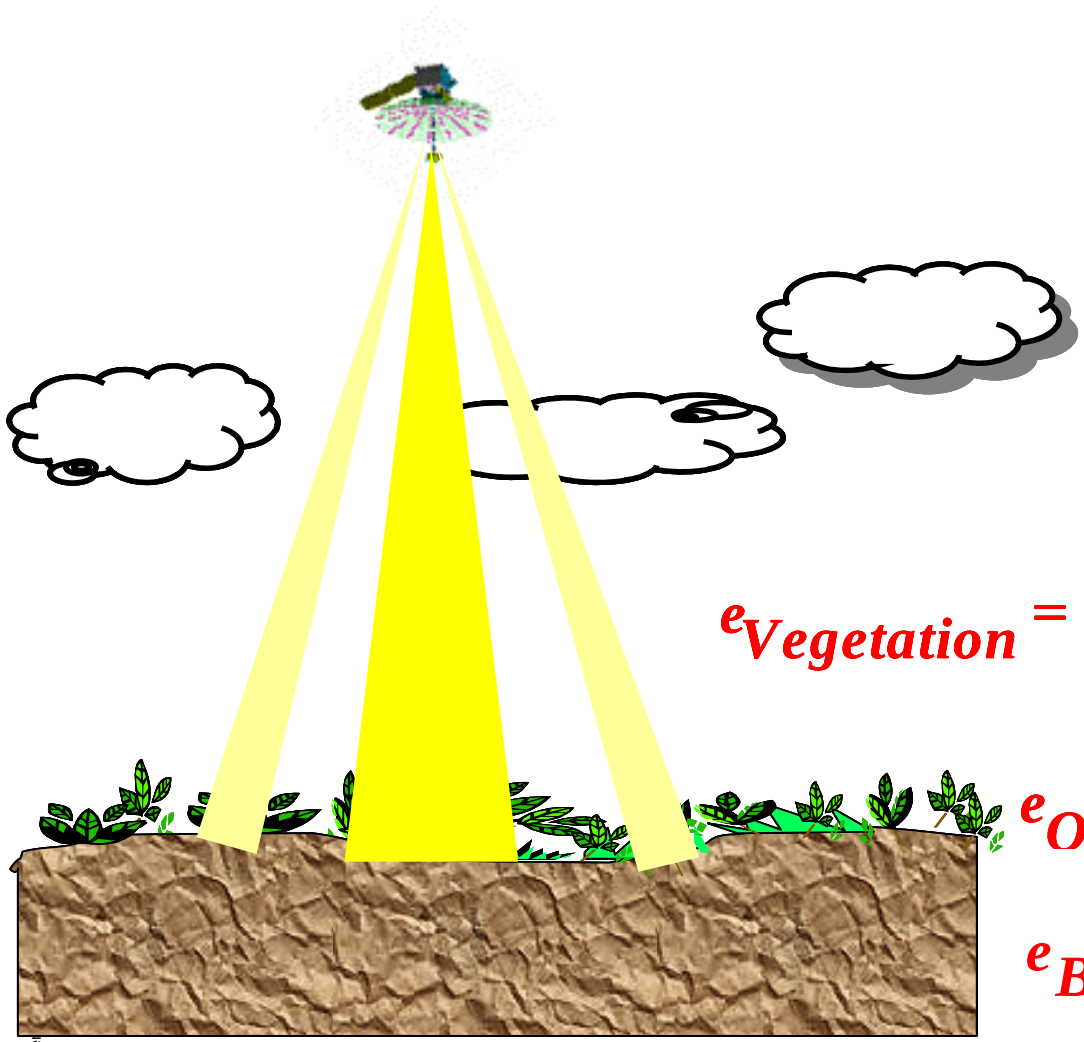
Regen: **1** 0,25 mm/h ; **2** 1 mm/h ; **3** 4 mm/h ; **4** 16 mm/h ;

Wassergehalt: **5** 0,032 g m^{-3}; **5** 0,3 g m^{-3}; **6** 2,32 g m^{-3};

Quellenangabe

Radiometrisches Strahlungsmodell

$$T_B = \tau\,[(1 - e_{Vegetation})\,T_{Himmel} + e_{Vegetation}\,T_{Boden}] + T_{Atmosphäre}$$



b: Dämpfung Vegetation
e: Emissionsvermögen
h: Rauhigkeit Oberfläche
r: Reflexionsvermögen
T: Strahlungstemperatur
W: Wassergehalt Vegetation
ε: DK Boden
τ: Transmission Atmosphäre

$$e_{Vegetation} = 1 + (e_{Oberfläche} - 1)\exp(bW)$$

$$e_{Oberfläche} = 1 + (e_{Boden} - 1)\exp(h)$$

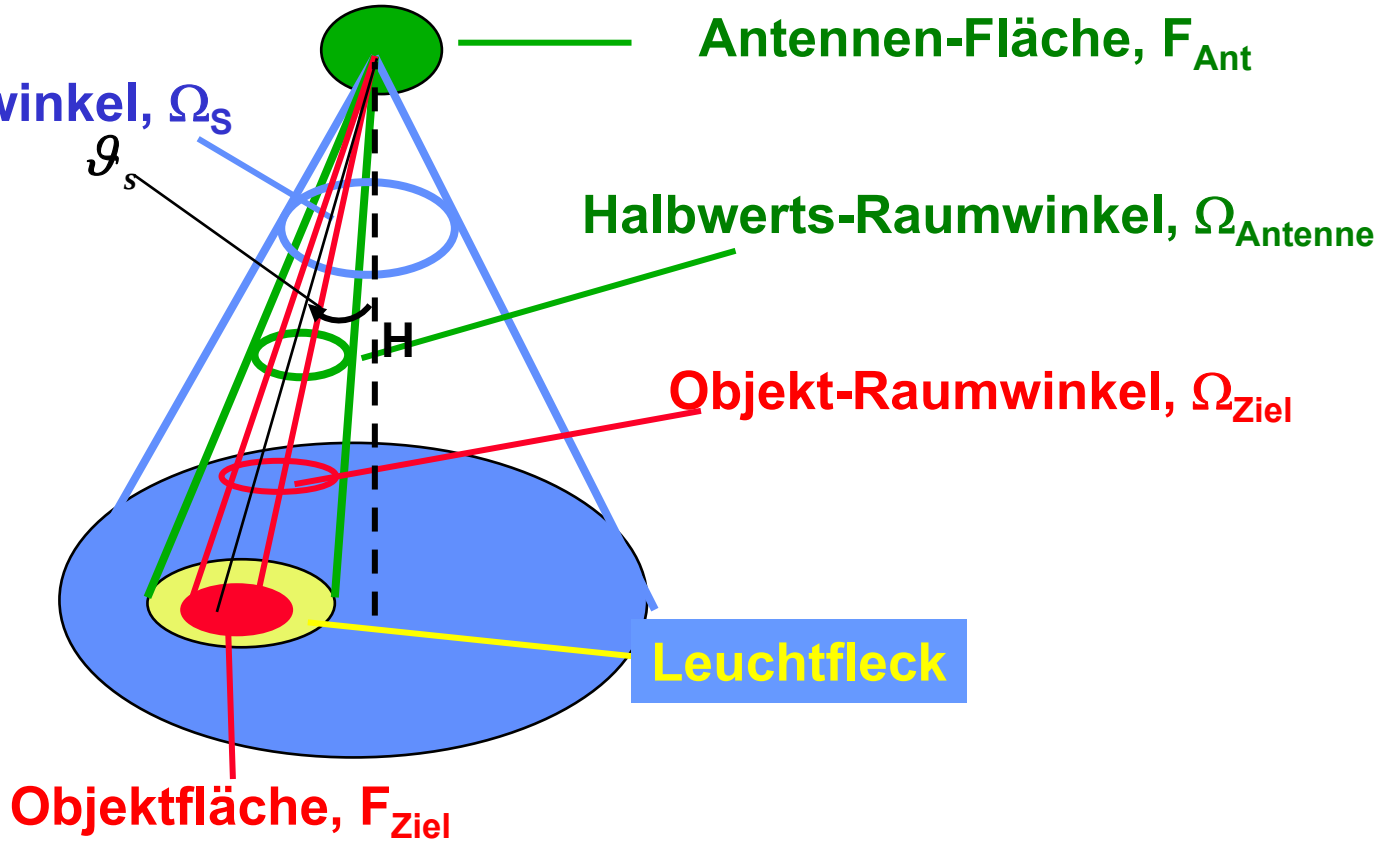
$$e_{Boden} = 1 - r_{Boden} = 1 - \left|\frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1}\right|^2$$

Füllfaktor

$$\Omega = \frac{\Omega_{Ziel}}{\Omega_{Antenne}}$$

$$\Omega_{Antenne} \sim \frac{\lambda^2}{F_{Ant}}$$

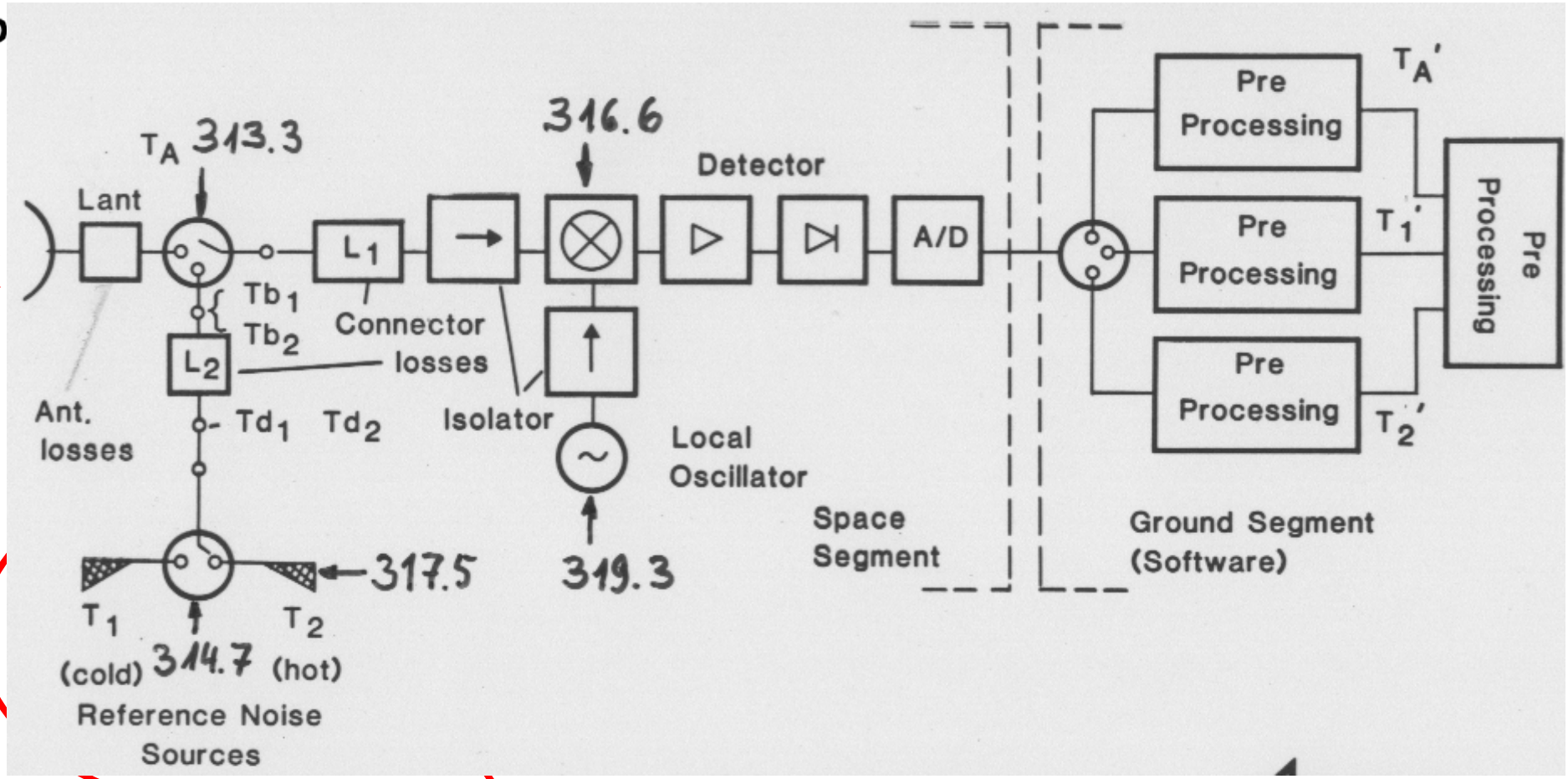
$$\Omega_{Ziel} \sim \frac{F_{Ziel}}{R^2}$$



$$\boxed{\Omega = \frac{F_{Ziel} \cdot F_{Antenne} \cdot \cos\vartheta}{R^2 \cdot \lambda^2}}$$

Hach-Radiometerschema mit Temperaturverlauf im Einsatz

228 K



Hach, J.P. A very sensitive airborne microwave radiometer using two reference temperatures, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques Vol. 16*, No. 9 (1968)

Quellenangabe

Kalibrierung mit 2 bekannten Eichnormalen (heiß & kalt)

Radiometer-Ausgangsspannung:

$$U_A = \alpha \cdot (T_A + T_E)$$

warme Quelle:

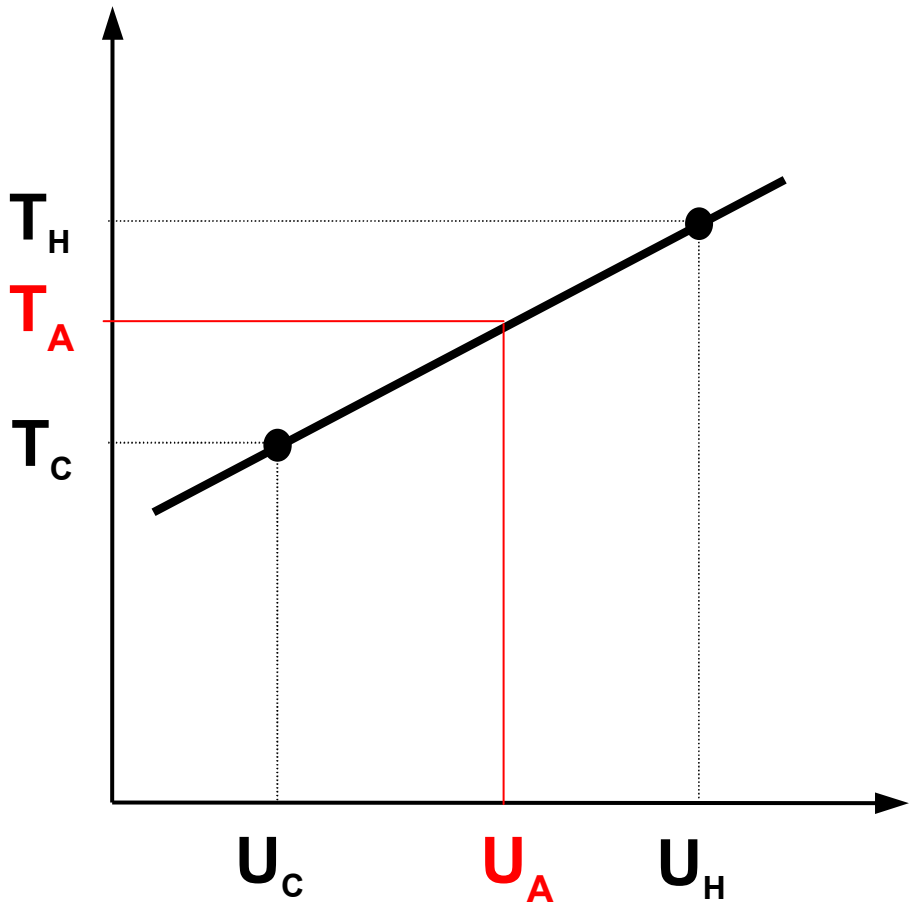
$$U_H = \alpha \cdot (T_H + T_E)$$

kalte Quelle:

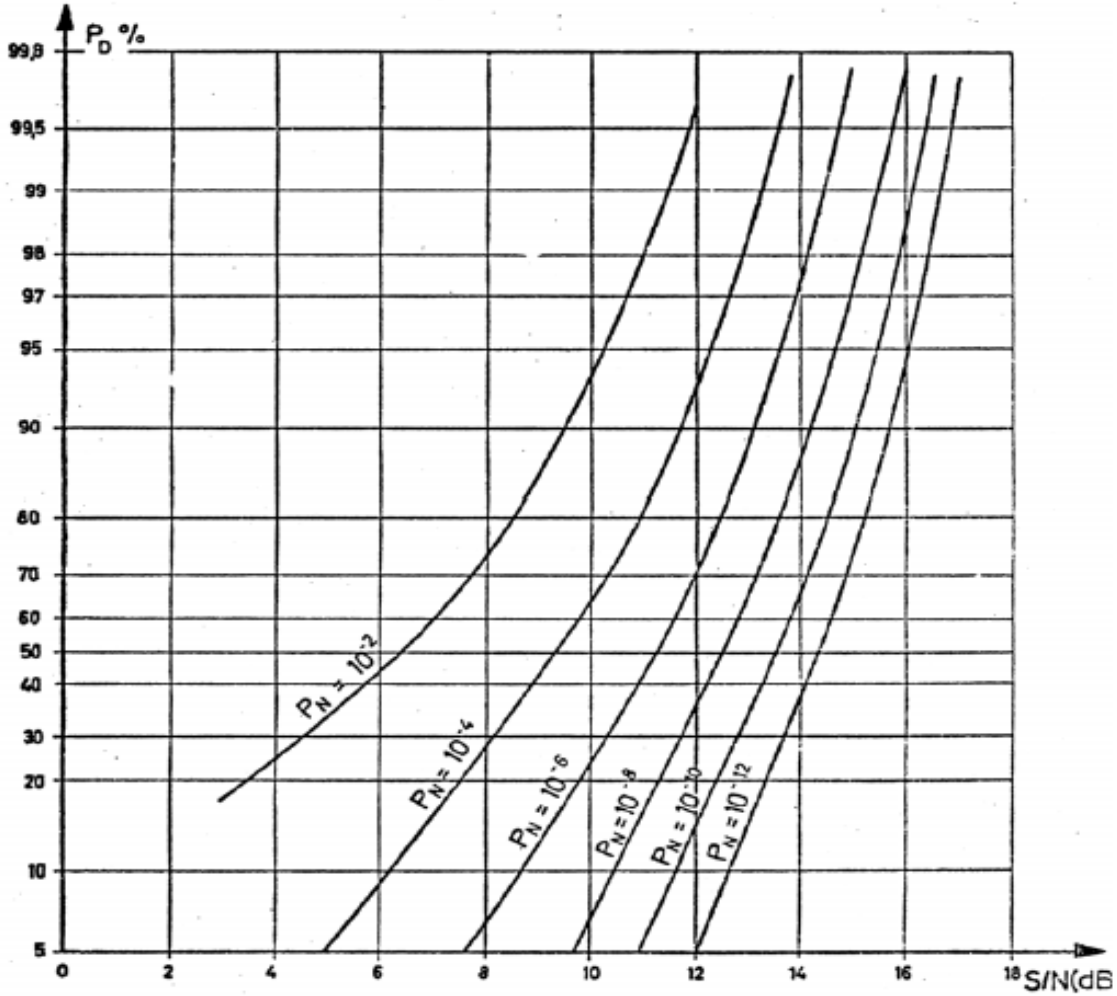
$$U_C = \alpha \cdot (T_C + T_E)$$

Eichkurve: $T_A = \frac{1}{\alpha} \cdot U_A - T_E$

$$\alpha = (U_H - U_C)(T_H - T_C)^{-1}$$



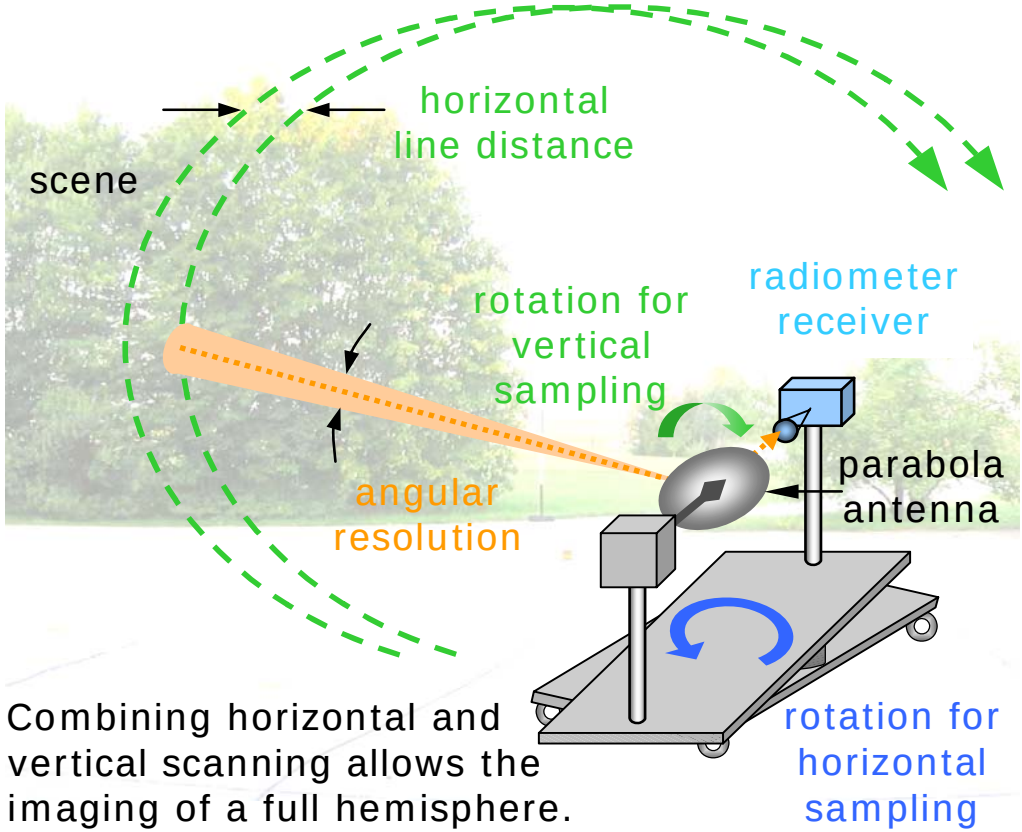
Anzeigewahrscheinlichkeit P_D



PN = Falschalarmwahrscheinlichkeit, S/N = Signal/Rauschverhältnis

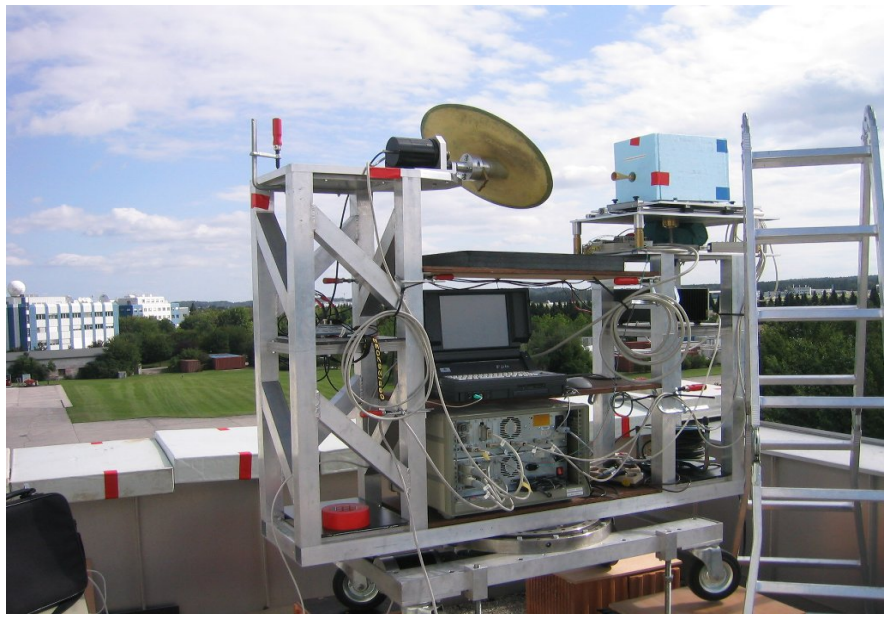
Quellenangabe

ABOSCA (Abbildender BOdenSCAnner)



Combining horizontal and vertical scanning allows the imaging of a full hemisphere.

- W-,Ka-, X-Band
- Winkelauflösung: 0,6°, 1,5°,5,8°,
- Hermisphärenabtastung < % Min
- Empfindlichkeit: 0,1 K



Quellenangabe

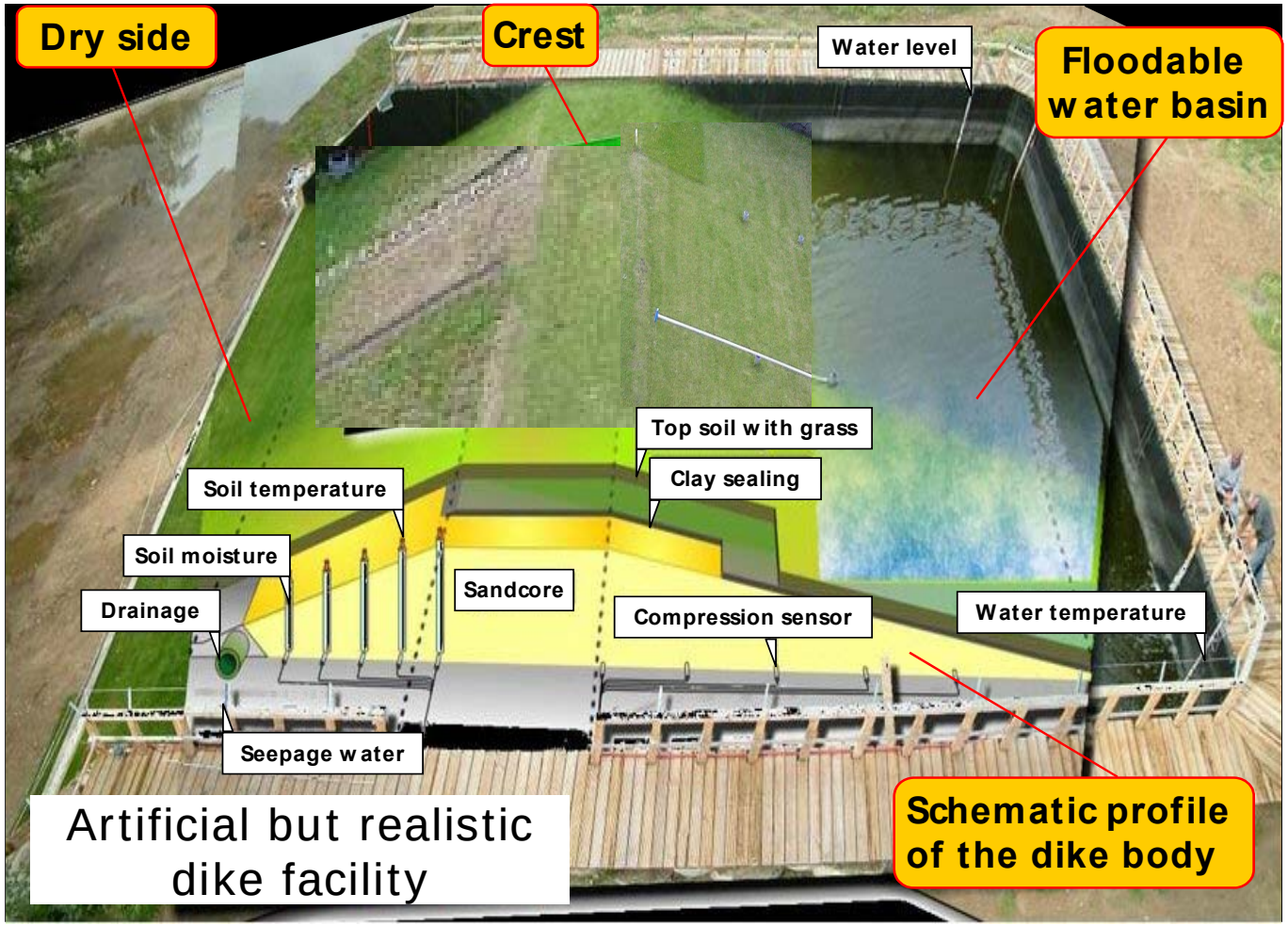
Imaging of complex scenes

- W-band radiometric image using ABOSCA.
- Much details can be observed.
- Angular resolution about 0.6°.

- Photograph of the complex scene.

Quellenangabe

Application „Monitoring of dike seepage“

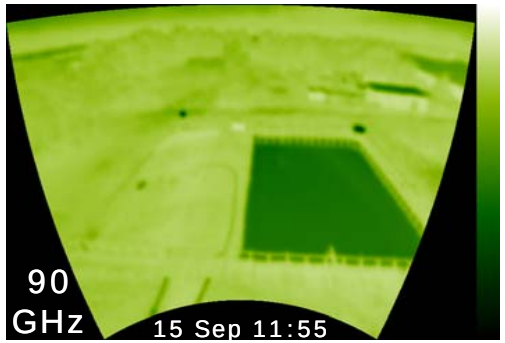


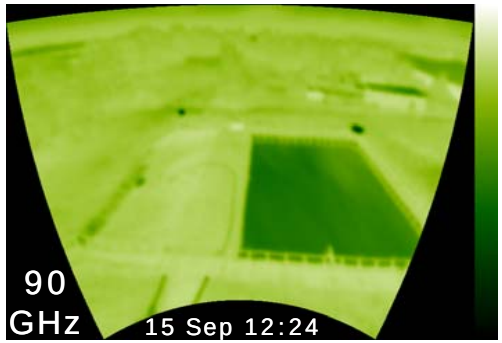
The general problem:

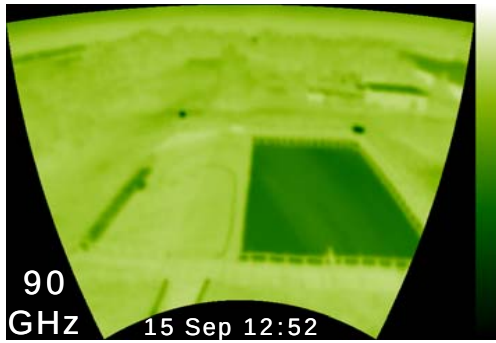
- Old constructions, not state of the art.
- Damages on the dike body have occurred over time.
- Seepage when flooded longer on the water side.
- After a few days the dike will burst.
- Flooded back-country and related „hard damages“.

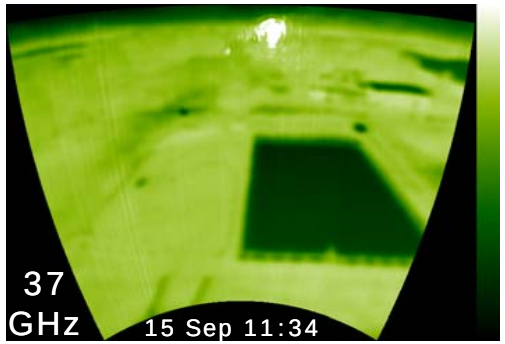
Solution: Early detection of seepage using an airborne sensor.

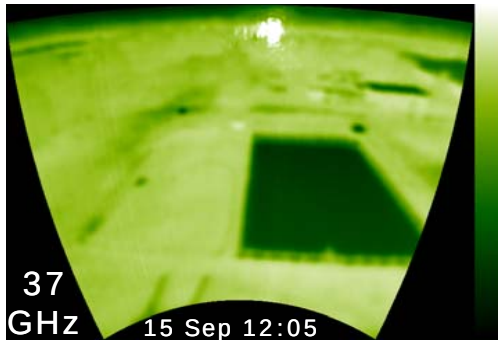
Deichkontrolle: Sickerwasser nach 35 Stunden

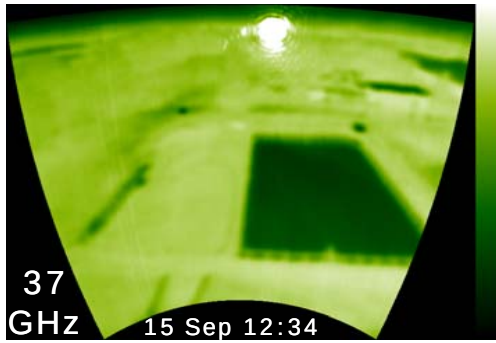


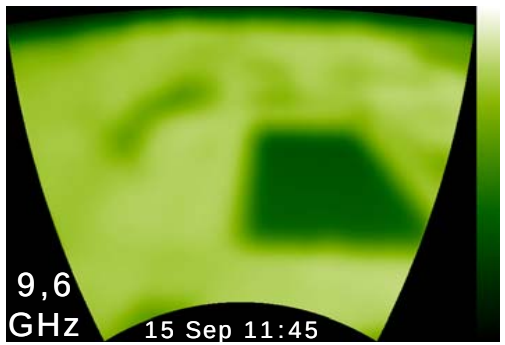


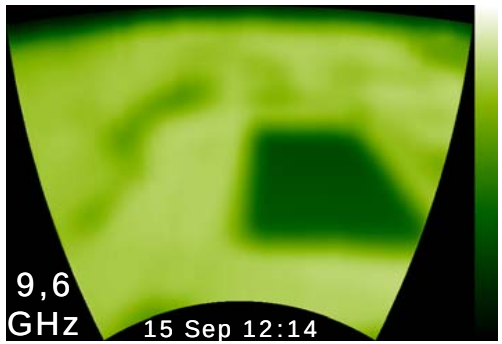


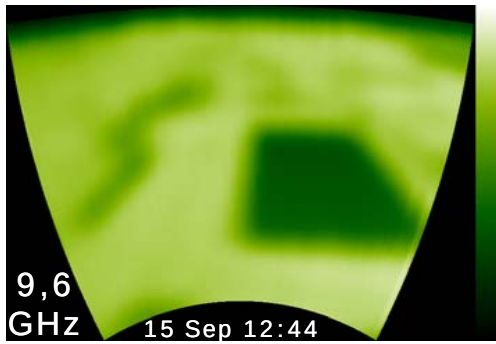








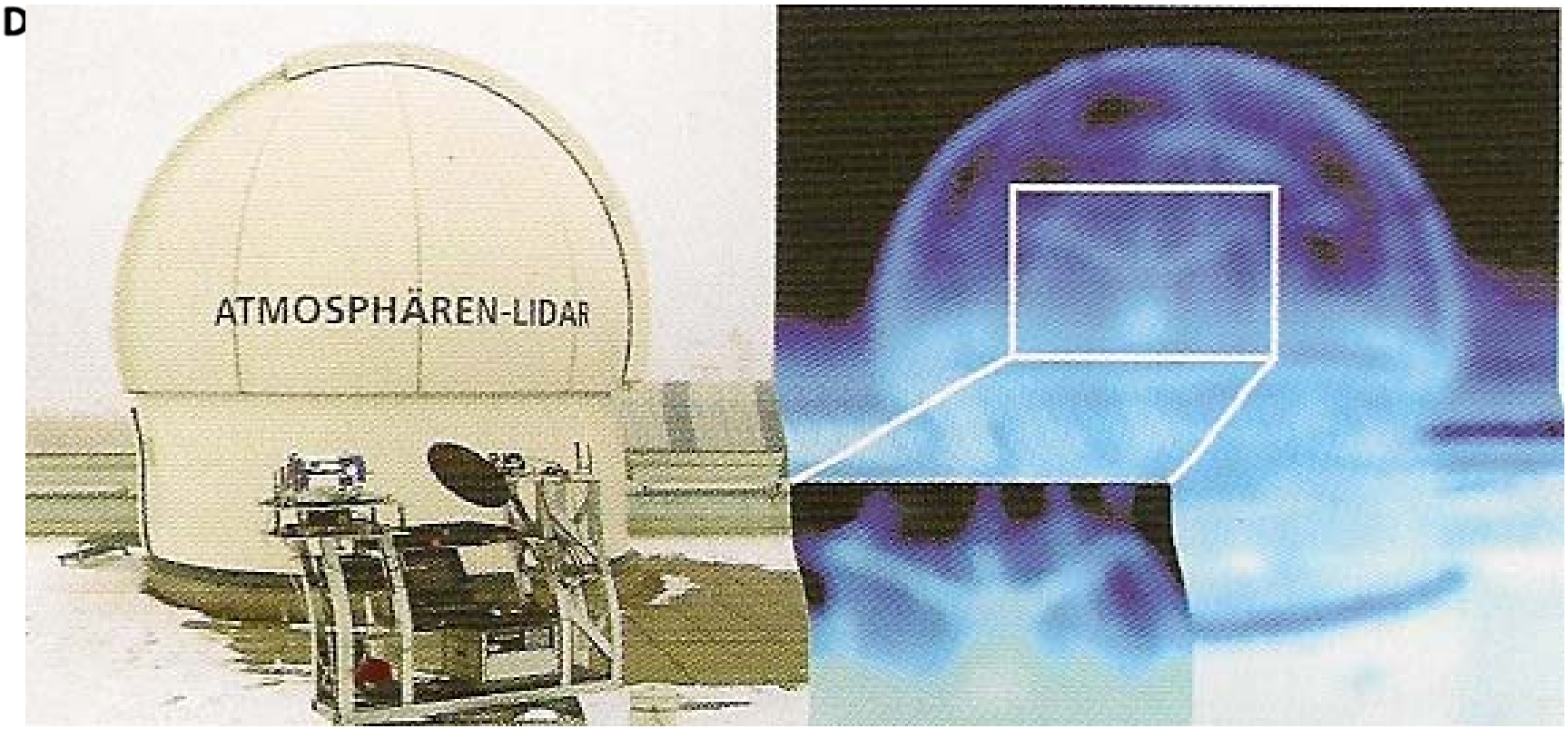




Peichl, Markus; Dill, Stephan (2005):Radiometrische MESSUNGEN IM Millimeterwellenbereich an einer künstlichen Deichanlage ohne & nach 35-stüdigeer Wasserexposition DLR Project Report 2005

Quellenangabe

Beispiel: Eindringtiefe, 37 GHz

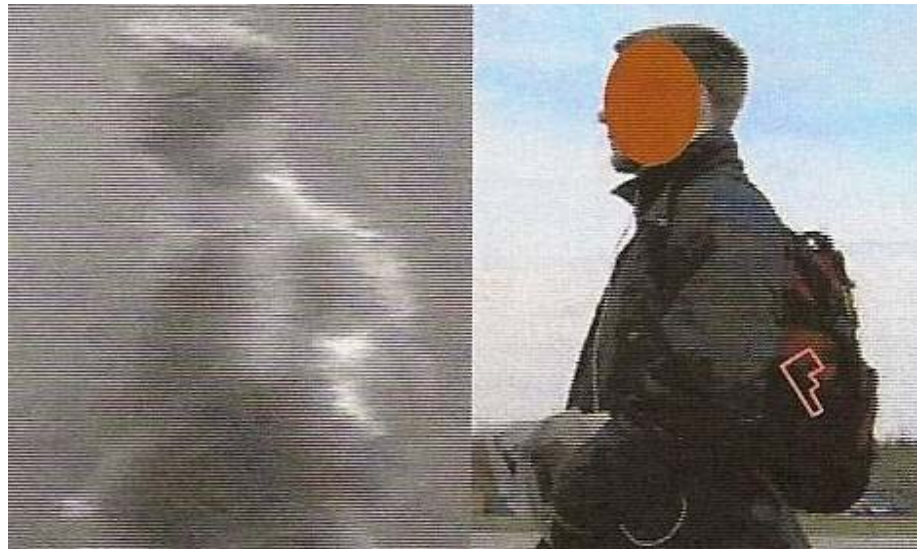


Person mit ausgestreckten Armen innerhalb eines Fiberglasradomes, Entfernung 6m

Peichl, M., Dill, S. Erprobung bildgebender radiometrischer Verfahren „Radom Durchblick, Dlr Projektreport, 2004“

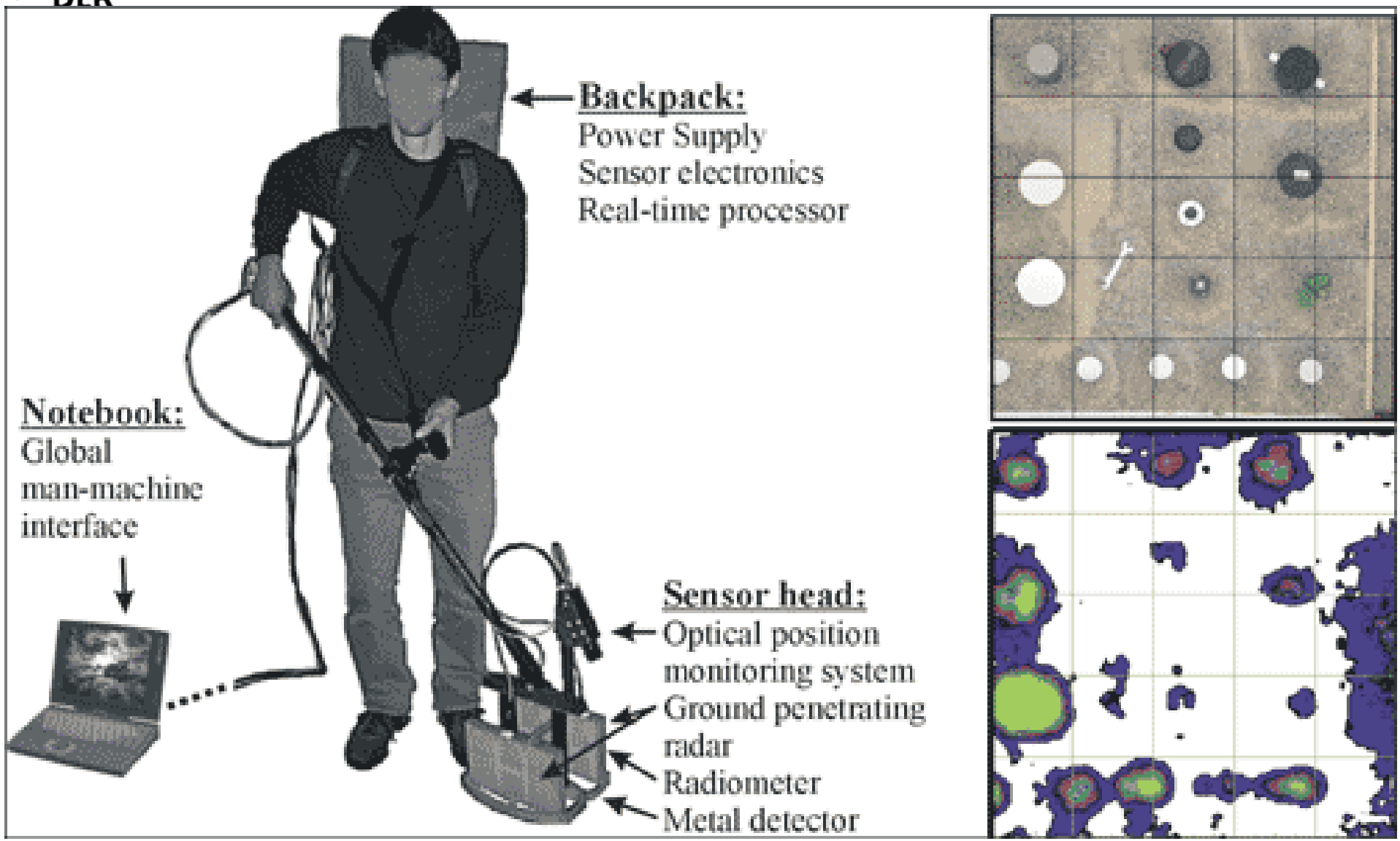
Quellenangabe

Anwendung im Sicherheitsbereich: Aufspüren verborgener Waffen



Quellenangabe

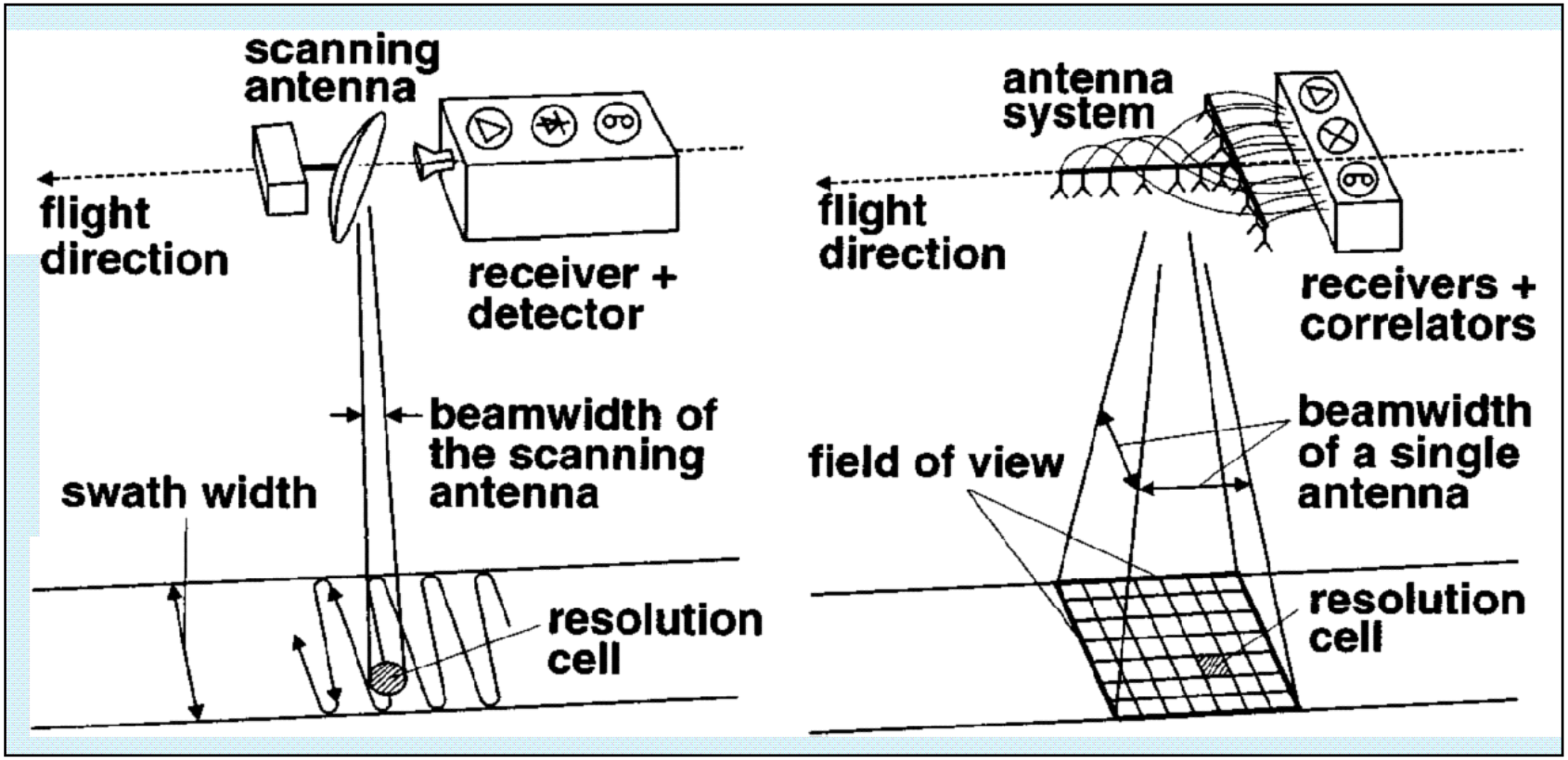
Suche nach verborgenen Landminen



Quellenangabe

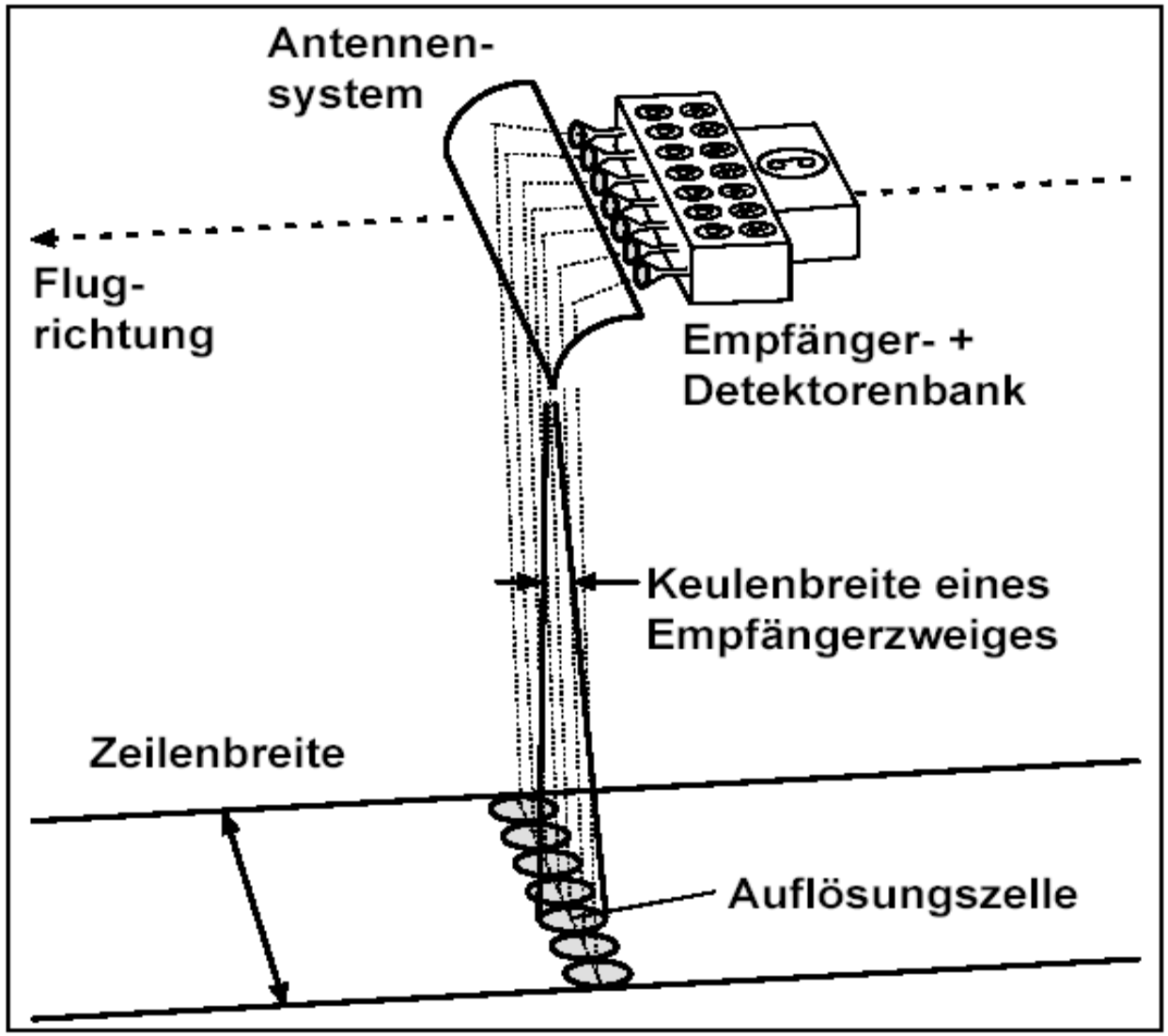
M.Peichl:http://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabid 2434/3770_read-5677/

Linescanner- & Apertursynthese-Prinzip



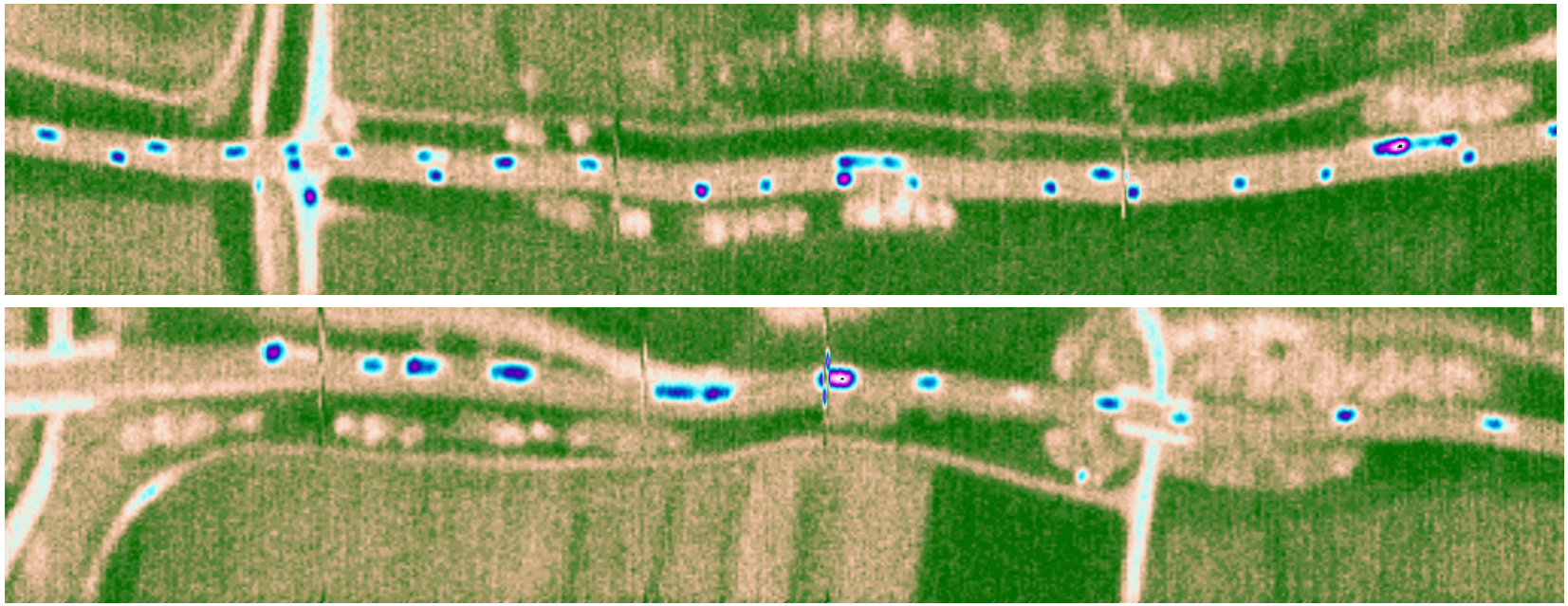
Quellenangabe

Pushbroom- Radiometerprinzip



Quellenangabe

Linescanner:Autobahnabschnitt



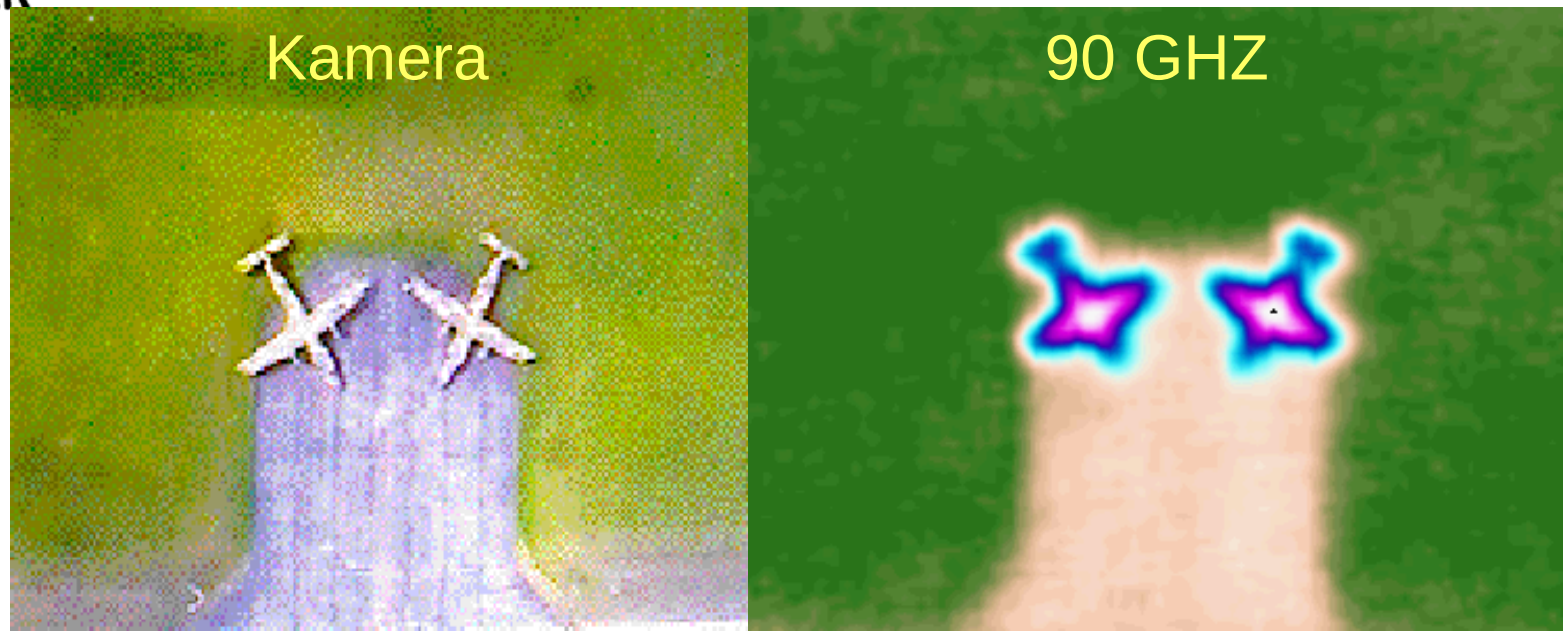
Flughöhe 200m

Bodenauflösung 3.5m, Temperaturauflösung 1.9K)

Temperaturen Gras - Asphalt - Autos ca. 290K - 270K-190K

Quellenangabe

Linescanner: Flughafen



Flughöhe 100m

Radiometrie: Bodenauflösung 1.75m, Temperaturauflösung 1.9K

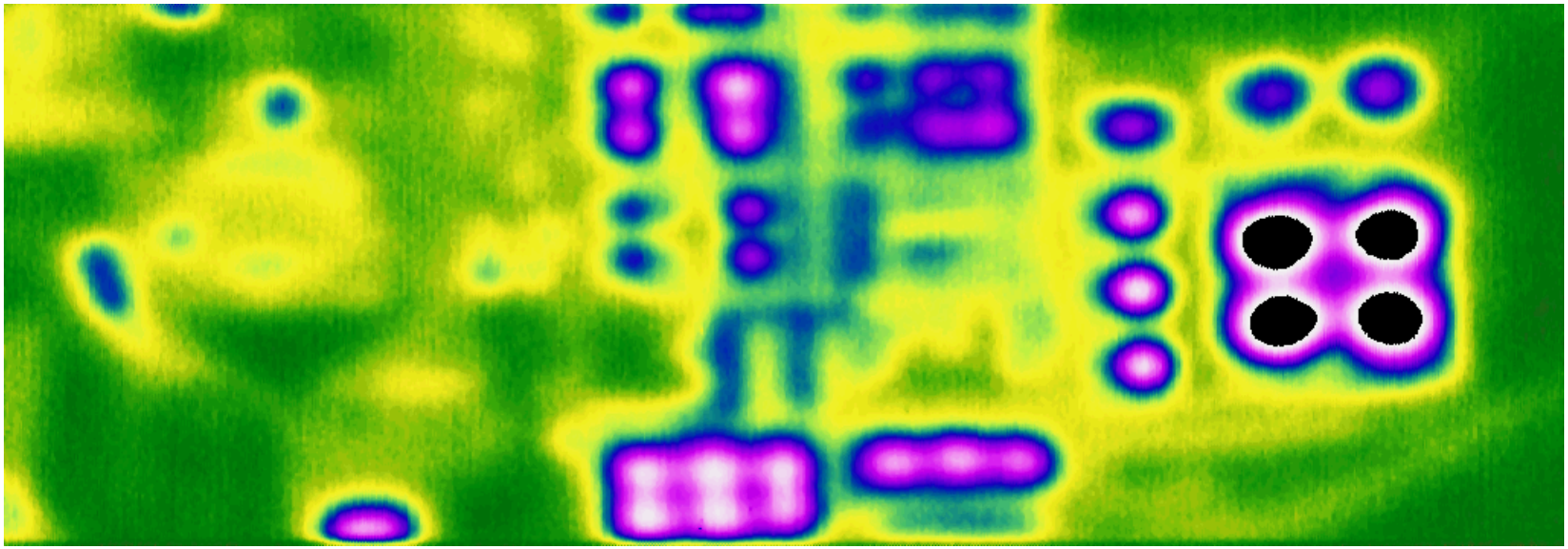
Grasbereich (grün): ~ 290K,

Asphalt (hellbraun): ~ 270K

Flugzeuge: (rot-weiß): ~ 190K

Quellenangabe

Linescanner:Ölraffinerie

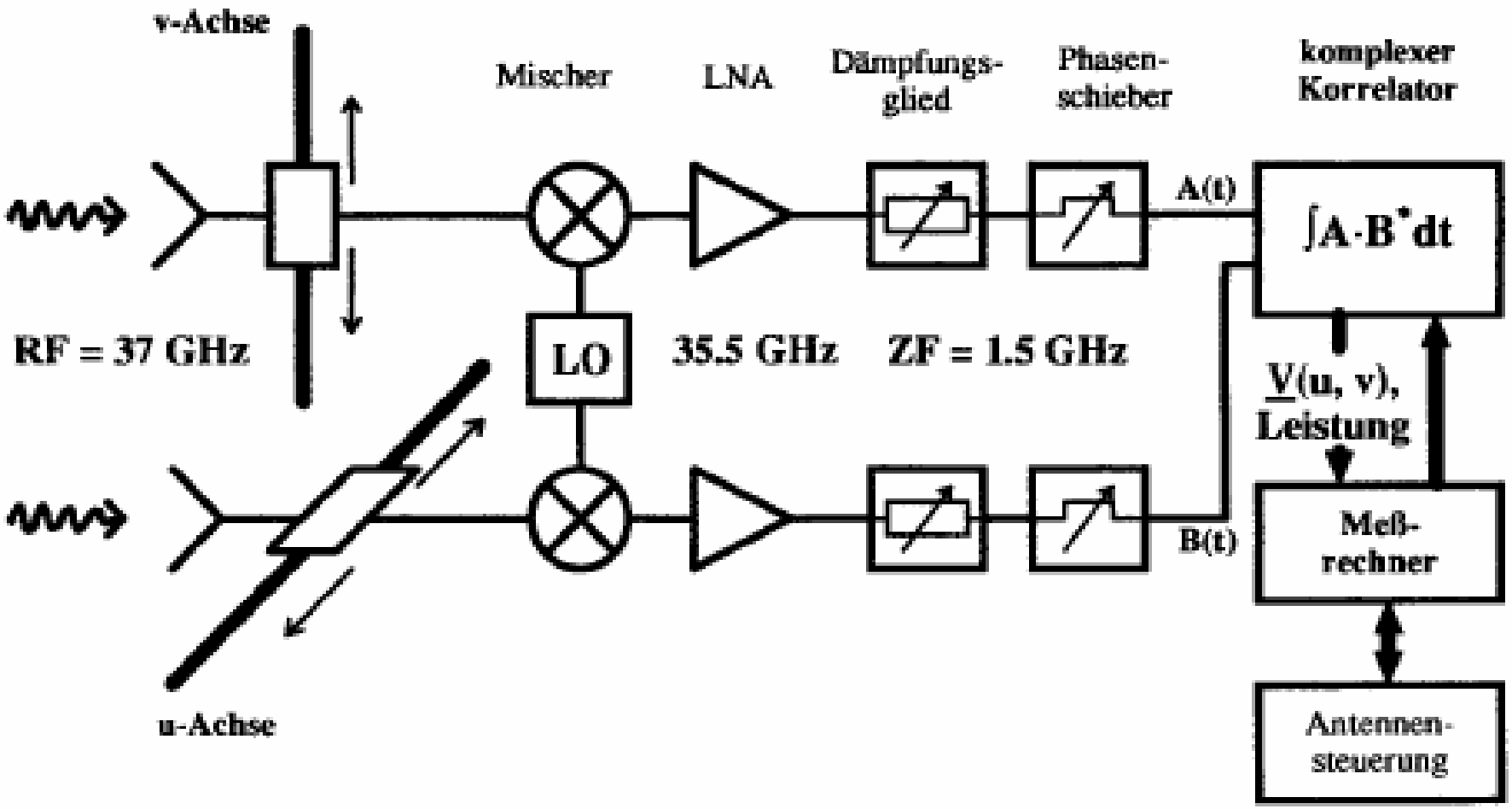


Flughöhe 1000m,
90 GHz, Bodenauflösung 17.5m, Temperaturauflösung 1.9K

Kontrast: Grasbereich (dunkelgrün) - Öltanks (schwarz): ~ 100K

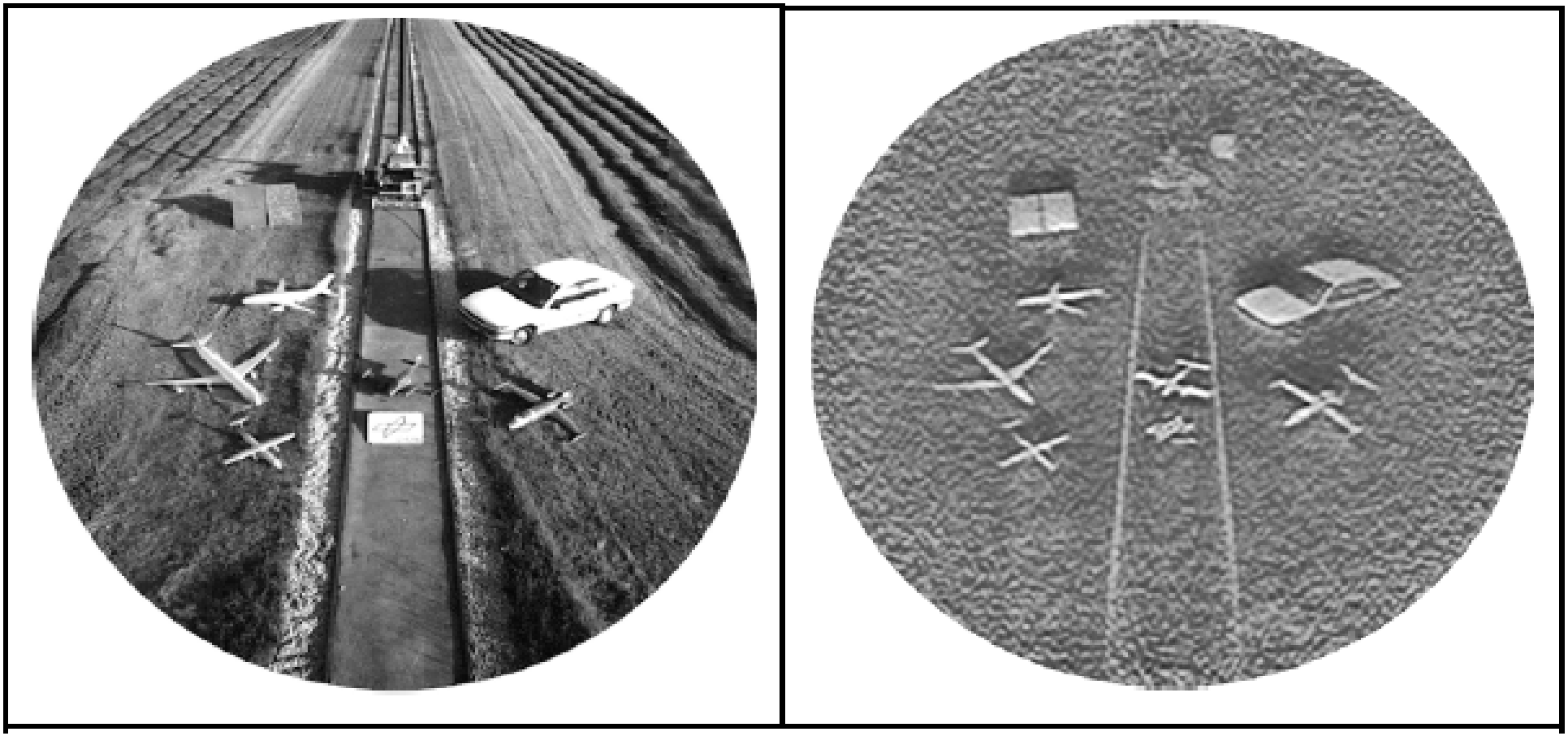
Quellenangabe

Blockschaltbild Apertur-Synthese-Radiometer-Prinzip



Quellenangabe

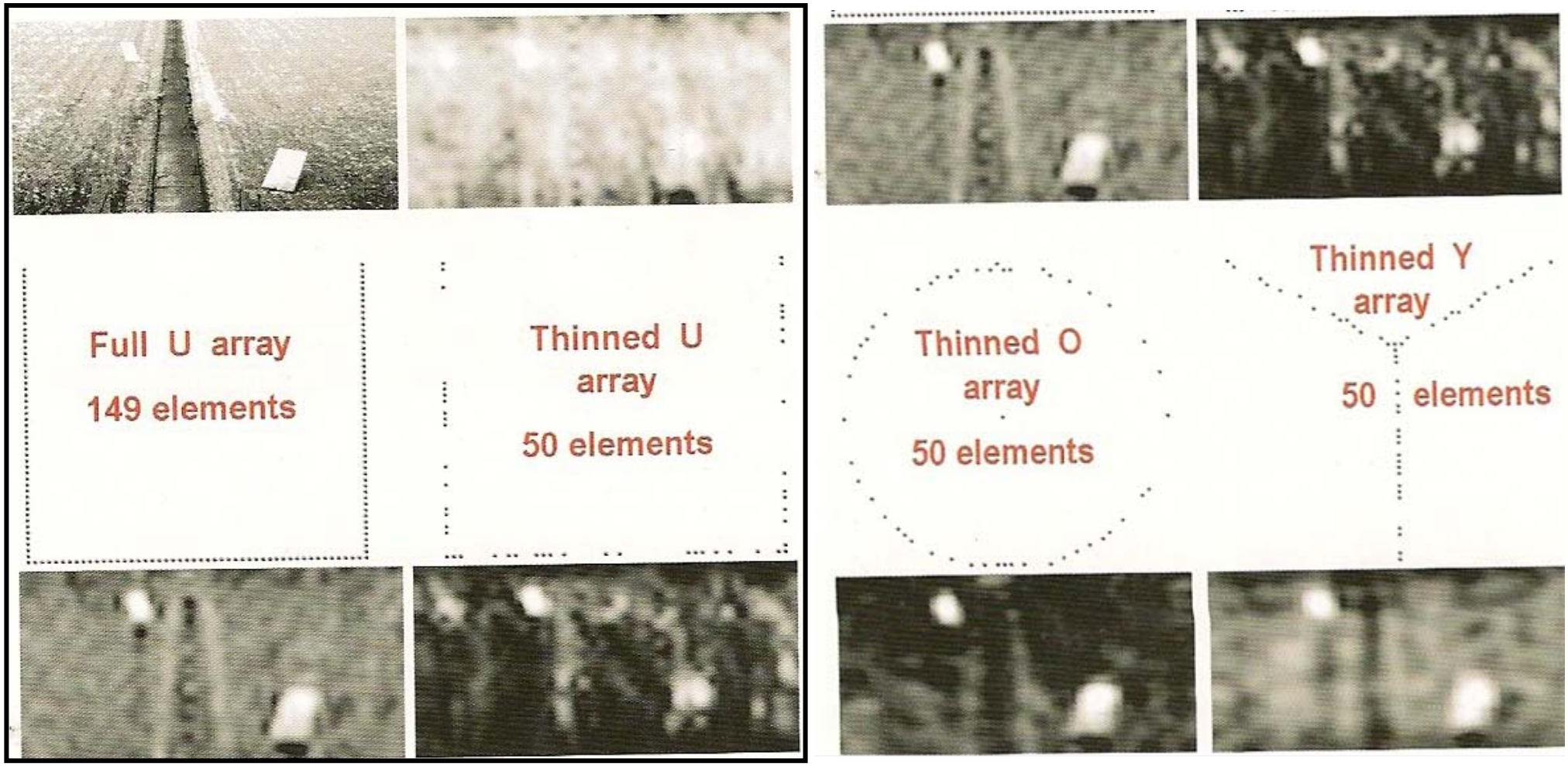
Vergleich Kamera- Apertursynthese



34 GHz, Rechteckanordnung 75 cm x /5 cm, 2 Hornantennen
Successive Verschiebungen

Quellenangabe

Aperture synthesis imaging, 37GHz
different sampling & reconstruction algorithms



Peichl, M., Greiner, M., Süß, H., DLR activities on aperture synthesis radiometry, IGARSS 2000

Quellenangabe

SMOS - MIRAS

Soil Moisture & Ocean Salinity Mission

Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis

www.cesbio.upstlse.fr/.../smos_final_new.jpg

L-band (21 cm-1.4 GHz)
69 Empfänger

Geometrische Auflösung
35 km

Radiometrische Auflösung
0,8 K – 2,2 K

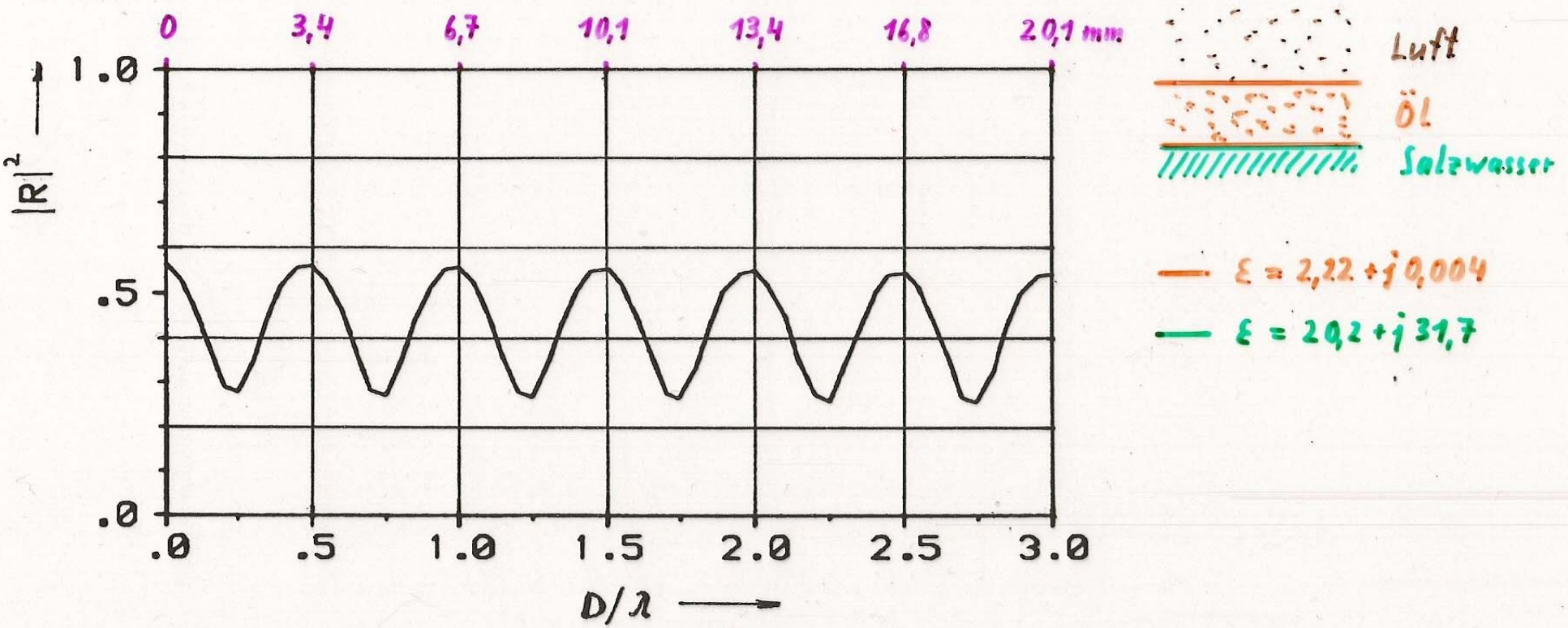
Wiederholzeit 3 Tage

683 kg Startmasse
317 kg Plattform,
366 kg Nutzlat

Quellenangabe

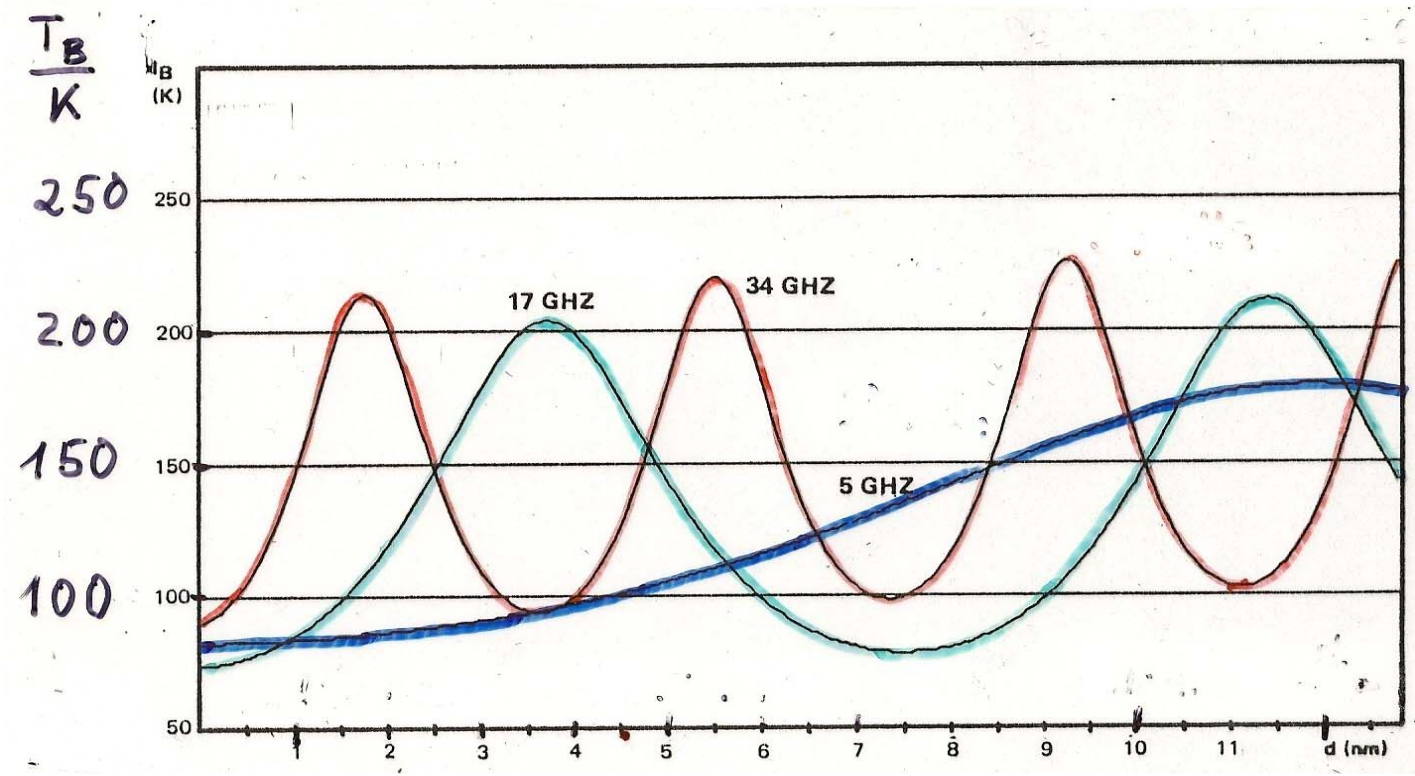
MEhrfrequenz Radiometer zur Erkundung der Seeoberfläche
MERES

Quellenangabe

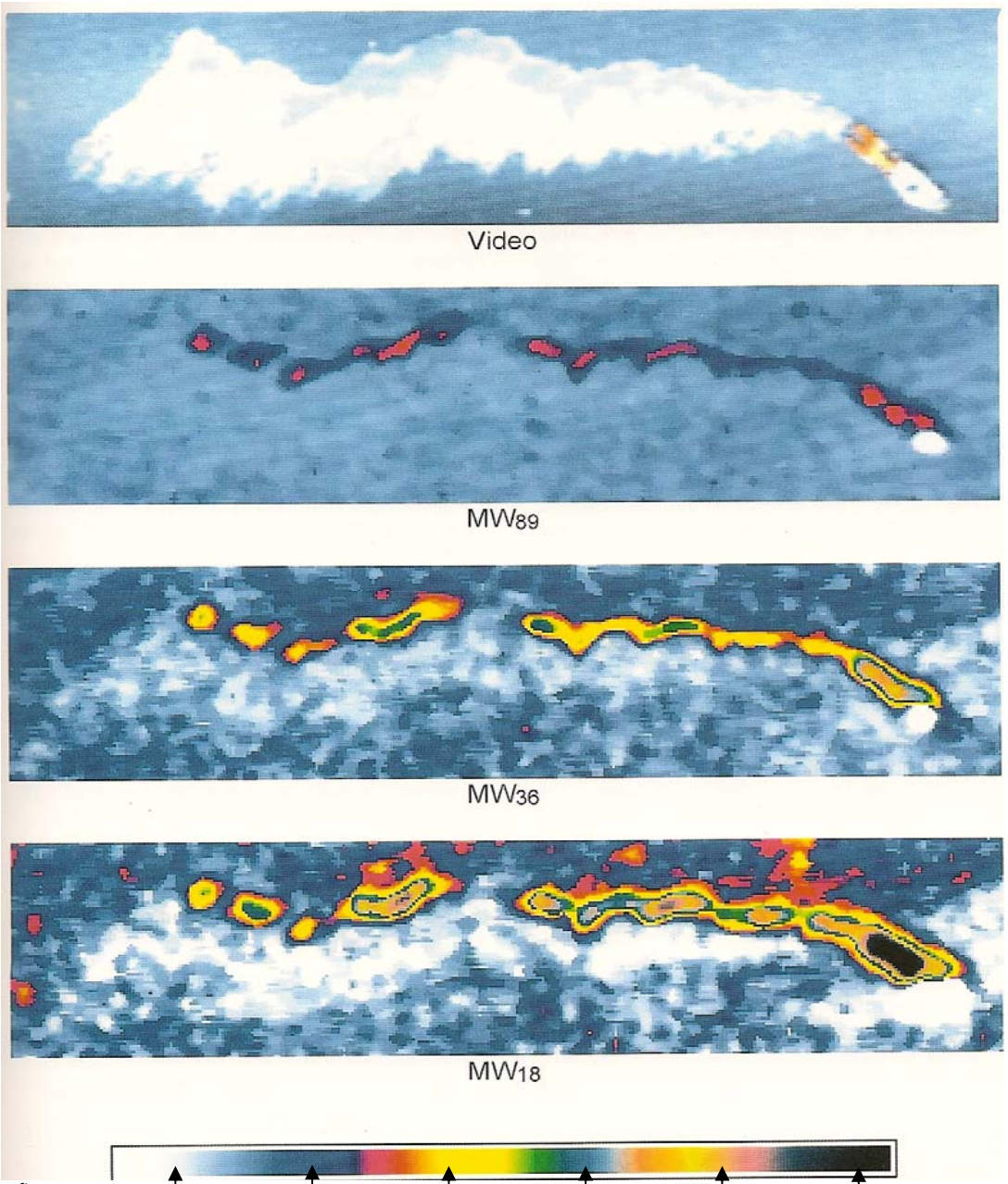


Leistungsreflexionsfaktor für senkrechten Einfall der Welle als Funktion der Schichtdicke für die Anordnung Luft – Öl – Salzwasser; f = 30 GHz.

Quellenangabe



Quellenangabe



Video

89 GHz

36 GHz

18 GHz

5 m³ Rohöl

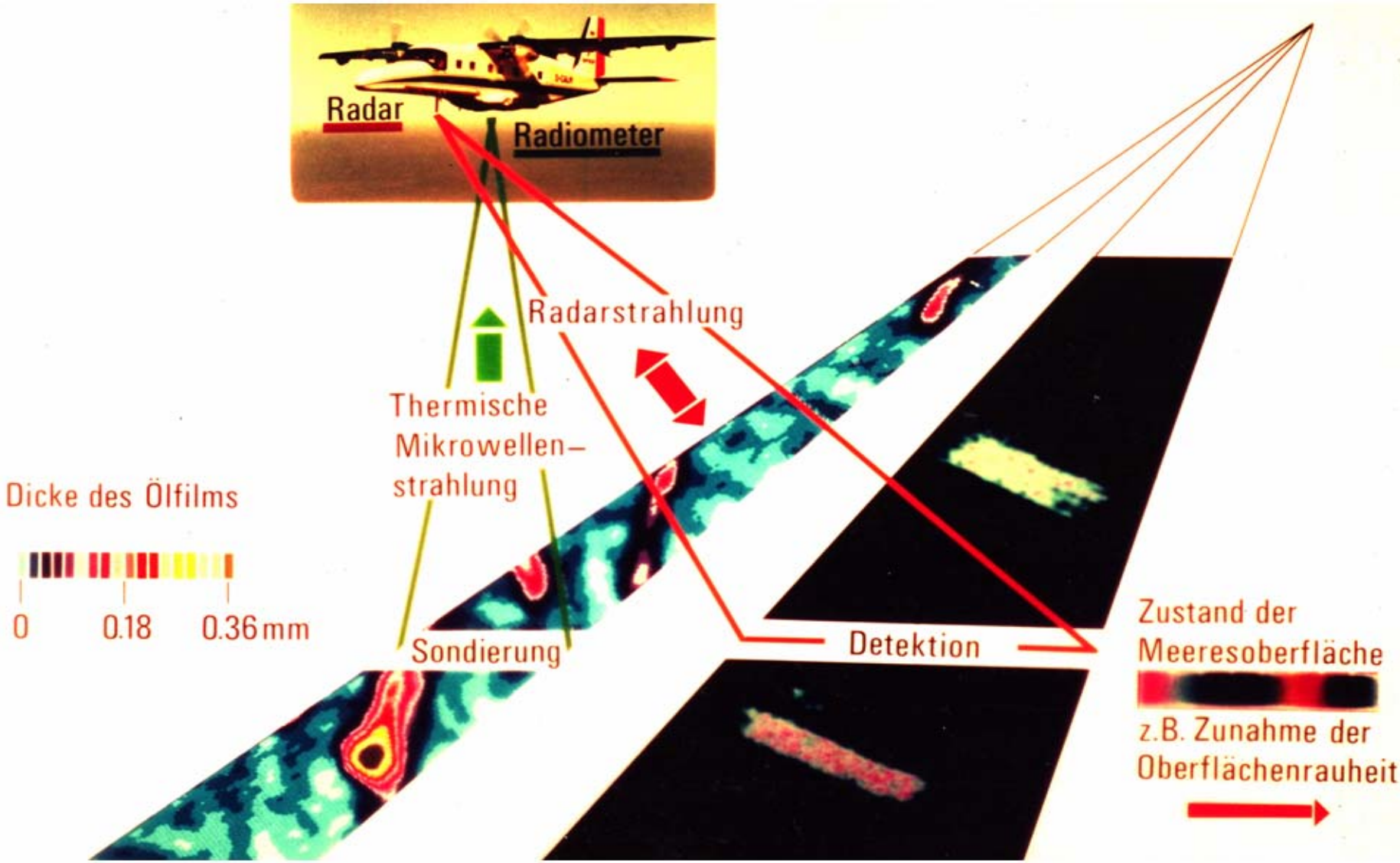
Dicke > 0,5 mm

> Eindeutigkeitsgrenze

Volumenschätzwert

4,9 m³

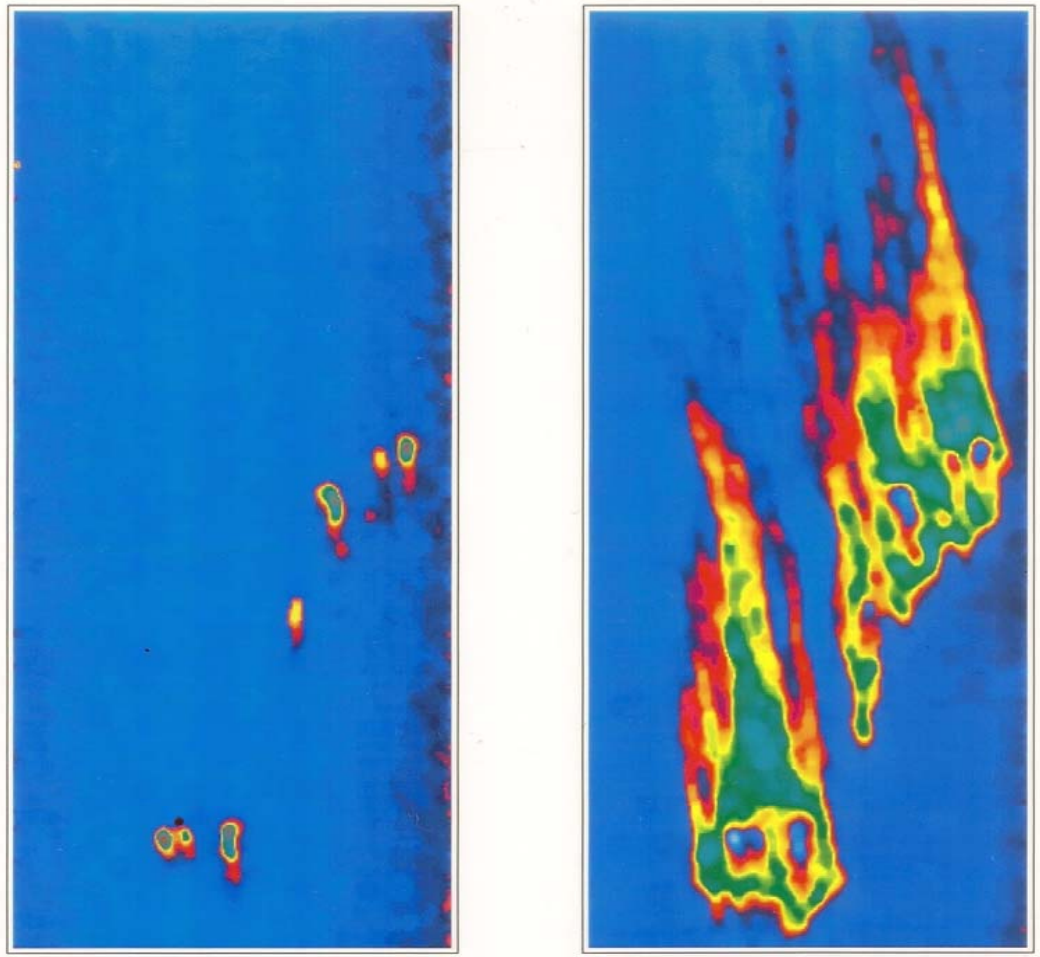
Quellenangabe

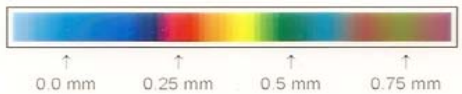


Quellenangabe

Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e. V.

Institut für Hochfrequenztechnik

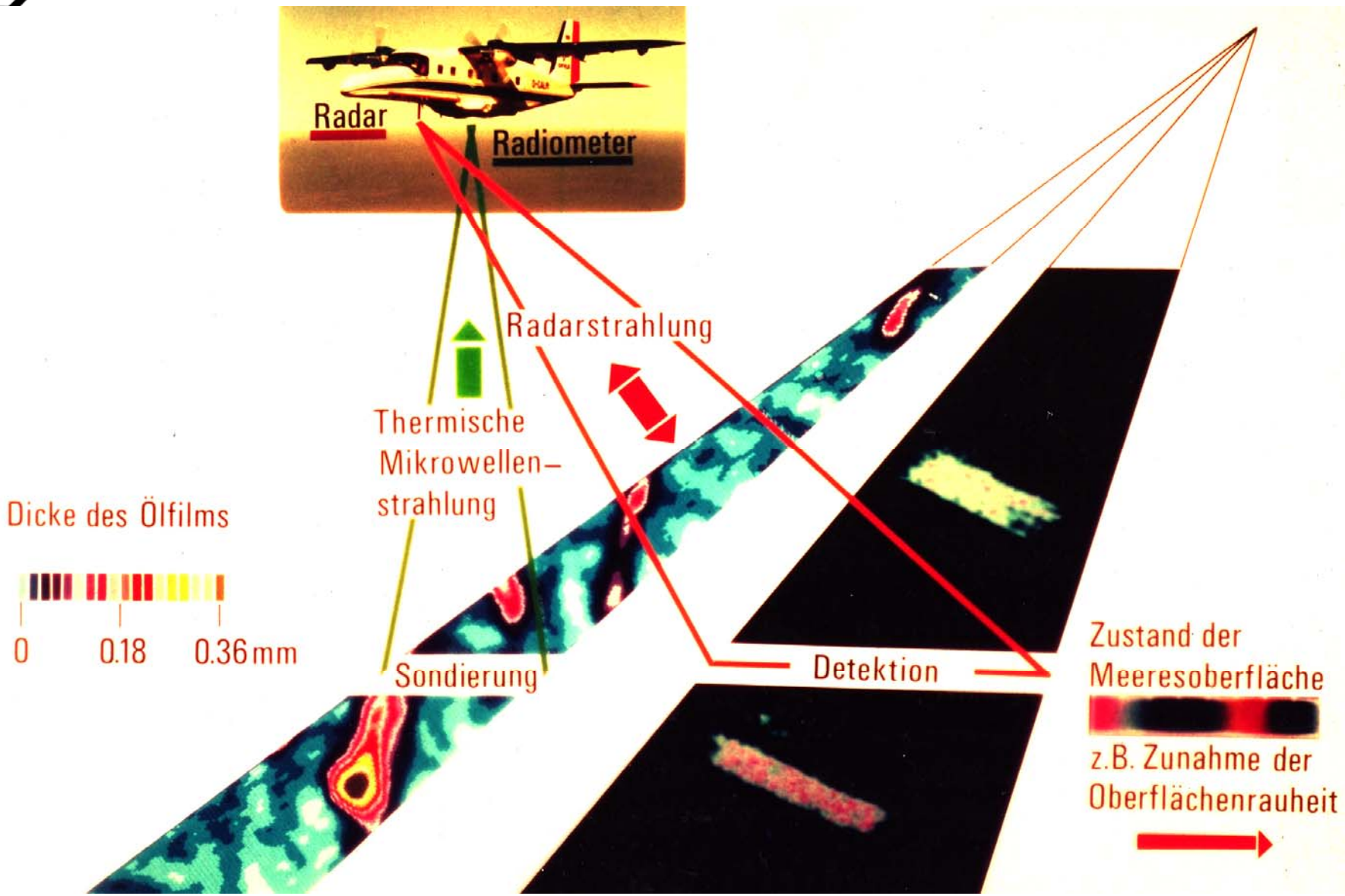




Dickenkodierte Mikrowellenabbildung eines Ölflecks aus 5m^3 Rohöl zusammen mit einer Referenzaufnahme im Infrarotbereich dargestellt

Messungen anläßlich der internationalen Vergleichsmessungen 1995 der Nordsee Anrainerstaaten (15. - 17. Mai); das MWR zeigt nur die Stellen größerer Dicken (> 50µm); die Volumenschätzung ergibt 4.1 m^3; Meßstreifenbreite 520m, Flughöhe 1093ft.

ÖLDETEKTION



Quellenangabe

Zivile Anwendungen der Mikrowellenradiometrie

Parameter		Frequenz/GHz										
		1.4	2.6	6	10	18	21	37	50-60	90	160	183
Atmos-phäre	Wasserdampfgehalt					N	N	W				
	Wasserdampfverteilg						W	H	W	H	W	N
	Flüssigwassergehalt						W	N		W		
	Temperaturprofil						H	H	N	H		
Ozeane	Oberflächentemperat				N			N				
	Windgeschwindigkeit				N	W	H	H				
	Niederschlag				W	N	H	W				
	Salzgehalt		N									
	Ölverschmutzung					N		N		N		
Kryo-sphäre	Meereisbedeckung					N		N		H		
	Eistyp						N	N				
	Eisalter					N		N				
Land	Niederschlag					W		N		N		W
	Bodenfeuchte	N		H								
	Vegetation	H		W	N							
	Schneebedeckung	H		H	H	N		N		N		

N=Notwendig; W=Wichtig; H=Hilfreich

Quellenangabe

Militärische Anwendungen der Mikrowellenradiometrie

Aufklärung: 30GHz; 90GHz; 140GHz
(Zustandserfassung)

Navigation: 30GHz; 90GHz; 140GHz
(Führung und Lenkung)

Intelligente Munition: 90GHz; 140G
(Sucher, Zielerfassung)

Vorteile

passives Verfahren ⇒ schwere Detektierbarkeit des Sensors

hohe Kontraste zwischen Metall und Umgebung

Schwierige Objekt-Tarnung

Quellenangabe

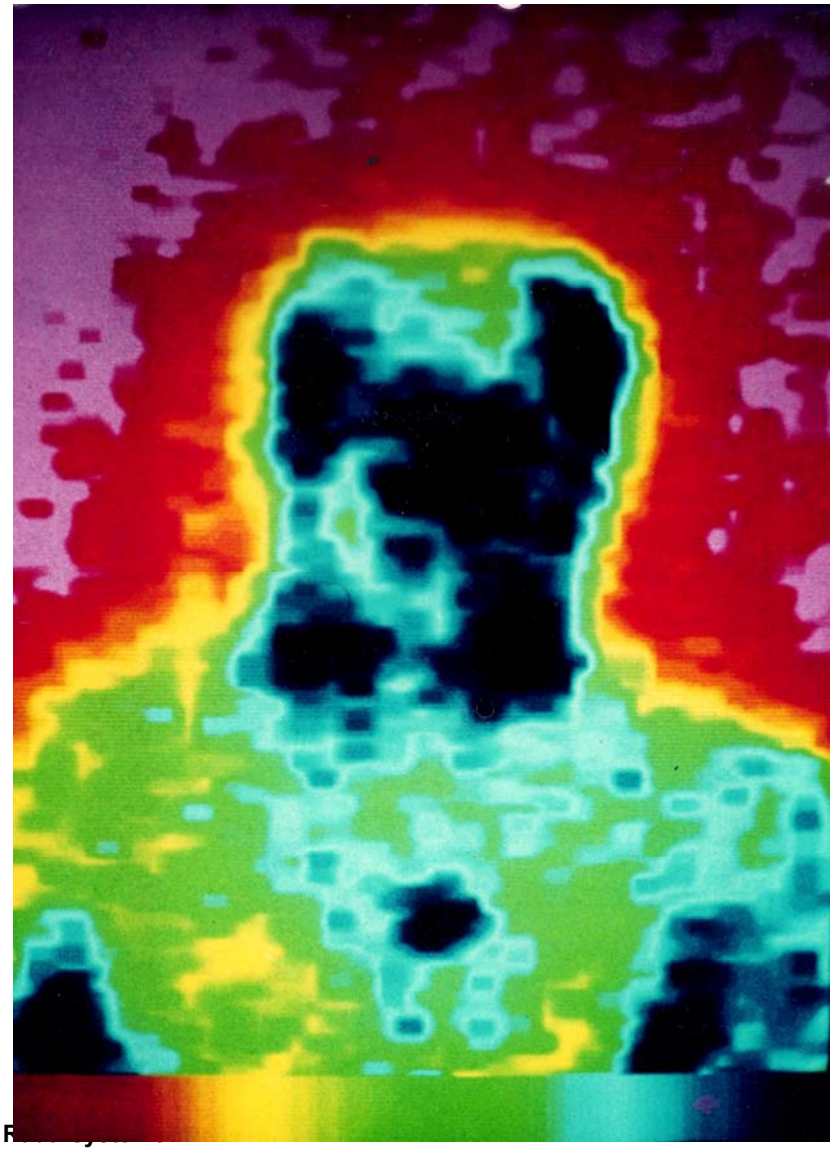
Technische Daten der eingesetzten Radiometer:

	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-Bandbreite	50 MHz – 350 MHz	2.9 GHz – 4.1 GHz
Empfänger Rausch – Temperatur T_E	485 K (DSB	256 K (DSB, Prototyp 1)
ΔT/ ms bei 300 K	3 K	< 0,6 K
Antennentyp	Offset-Paraboloid mit Schwenkgetriebe	
Schwenkfrequenz	0 – 5 Hz	0 – 35 Hz
Winkelauflösung (3-dB)	40 mrad	18 mrad

Vergleich Mikrowellen- Optik - Verfahren

	Active MW.	Passive MW	Passive Opt.	Aktive Optics
Angular Resol.	SAR: sehr gut RAR: schlecht	schlecht	sehr gut	sehr gut
Rad. – Velocity	sehr gut	nicht möglich	nicht möglich	sehr gut
Tang.- Velocity	möglich	schlecht	schlecht	sehr gut
Distance	sehr gut	nicht möglich	nicht möglich	sehr gut
Bandwidth	klein	klein	gross	klein
Integrat. Time	ausreichend	ausreichend	niedrig	ausreichend
Rad. Constrast	Speckle	gross	klein	Speckle
Temperatur	nicht möglich	sehr gut	sehr gut	möglich
Allwetterfähig	sehr gut	sehr gut	nicht möglich	nicht möglich
Penetrat.: Land Wasser	möglich schlecht	möglich schlecht	nicht möglich möglich	nicht möglich möglich
Environment	Störstrahlung	keine	keine	keine
Power Consum.	hoch	niedrig	niedrig	hoch
Mass, Structure	groß, schwer	groß	klein, leicht	klein, leicht

Wolfgang Keydel bei 35 GHz



Quellenangabe