

# Inhalt der Nachrichtentechnik

## Teil 1: Grundlagen Signalübertragung

## 2 Pegel und Übertragungsmedien

### 2.1 Pegel und Pegeldiagramm

### 2.2 Einführung in die Übertragungsmedien

### 2.3 Funksysteme: Kugelwelle und Antennenabstrahlung

#### 2.2.1 Charakteristische Parameter von Antennen

#### 2.2.2 Richtfaktor, Gewinn und Wirkfläche einer Antenne

### 2.4 Power Link Budget drahtloser Systeme anhand von TV-Satellitenempfang bei 12 GHz

### 2.5 Entwicklung von neuen Satellitensystemen

- Frequenzebenen einer **KOM-Hardwareplattform (Transceiver)**
- Funkwellenausbreitung
- Antennenparameter (Fernfeld)
- Einfluss auf KOM & Radar-Systeme

## Motivation:

Antennen sind Schlüsselkomponenten aller drahtlosen Systeme

⇒ koppeln Wellen ein und strahlen Wellen ab

Antennenparameter gehen entscheidend in **Link Budget eines Funksystems** ein

➔ **grundlegendes, physikalisches Verständnis erforderlich!**

(keine elektromagnetische Berechnung)

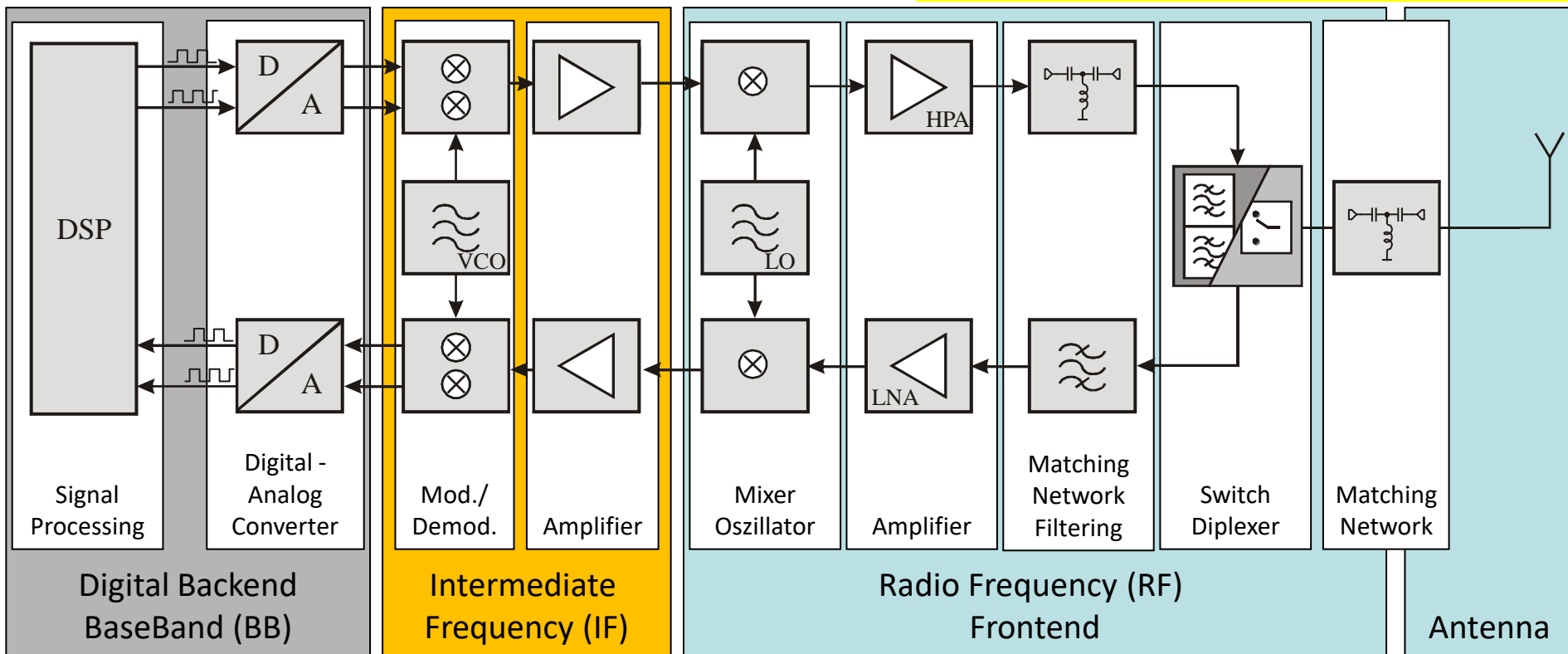
➤ Antennenvorlesung

# Frequenzebenen einer **Kommunikations-Hardwareplattform (Transceiver)**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Prinzip drahtloser/kabelgebundener Systeme von MHz über THz bis Optik



Verschiebung eines informationstragenden, digitalen Basisbandsignals in einen hochfrequenten Bereich durch **(1.) gezielte Veränderung (Modulation) eines analogen Trägersignals (meist im Zwischen-Frequenzbereich)** und **(2.) einer weiteren Aufwärtsmischung in den Hochfrequenzbereich** → Funkwellen, Licht

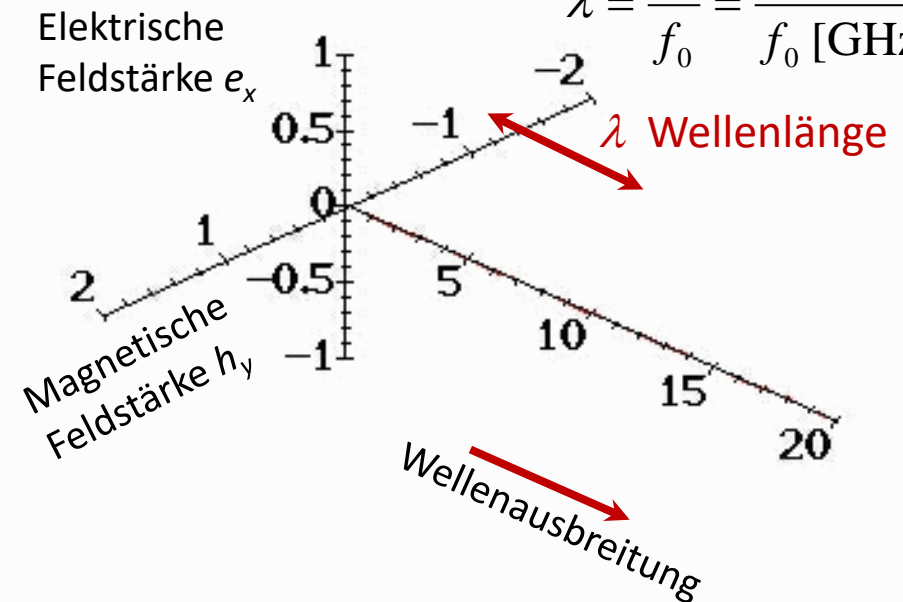
# Funkwellenausbreitung:

## Was ist eine elektromagnetische Welle?

$f_0$ in [GHz]	0.1	1	10	30	100
$\lambda$ in [cm]	300	30	3	1	0.3

Im elektromagnetischen Feld breiten sich elektrische und magnetische Wechselfelder gemeinsam wellenförmig mit Lichtgeschwindigkeit aus & transportieren dabei Energie.

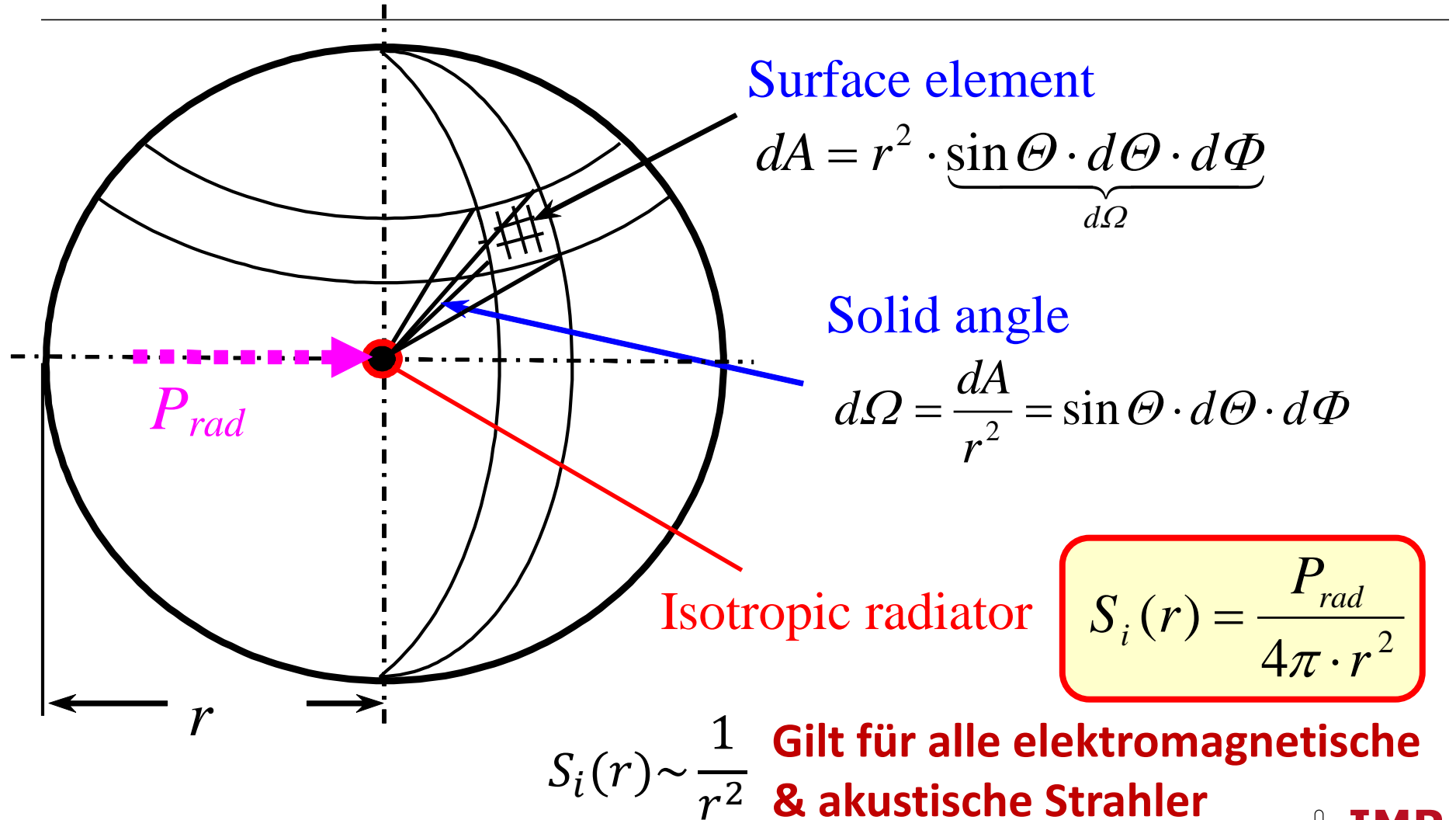
$$\lambda = \frac{c_0}{f_0} = \frac{30 \text{ cm/s}}{f_0 [\text{GHz}]}$$



Die Feldstärke ist ein Maß für die Stärke elektromagnetischer Felder. Sie wird in **Volt pro Meter** (V/m, elektrisches Feld) oder **Ampere pro Meter** (A/m, magnetisches Feld) gemessen.

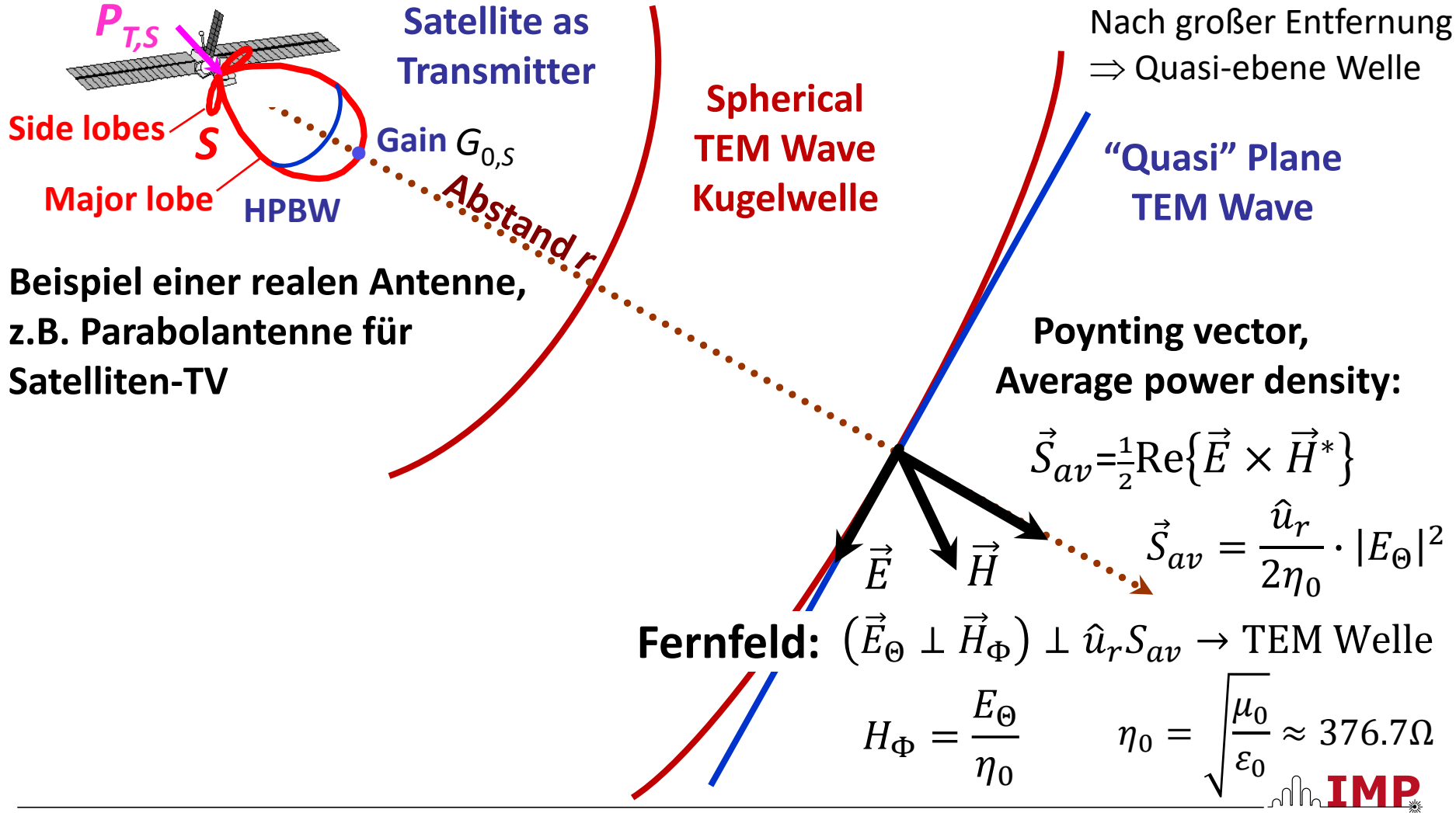
# Spherical Wave and Isotropic Radiator

► Antennenvorlesung



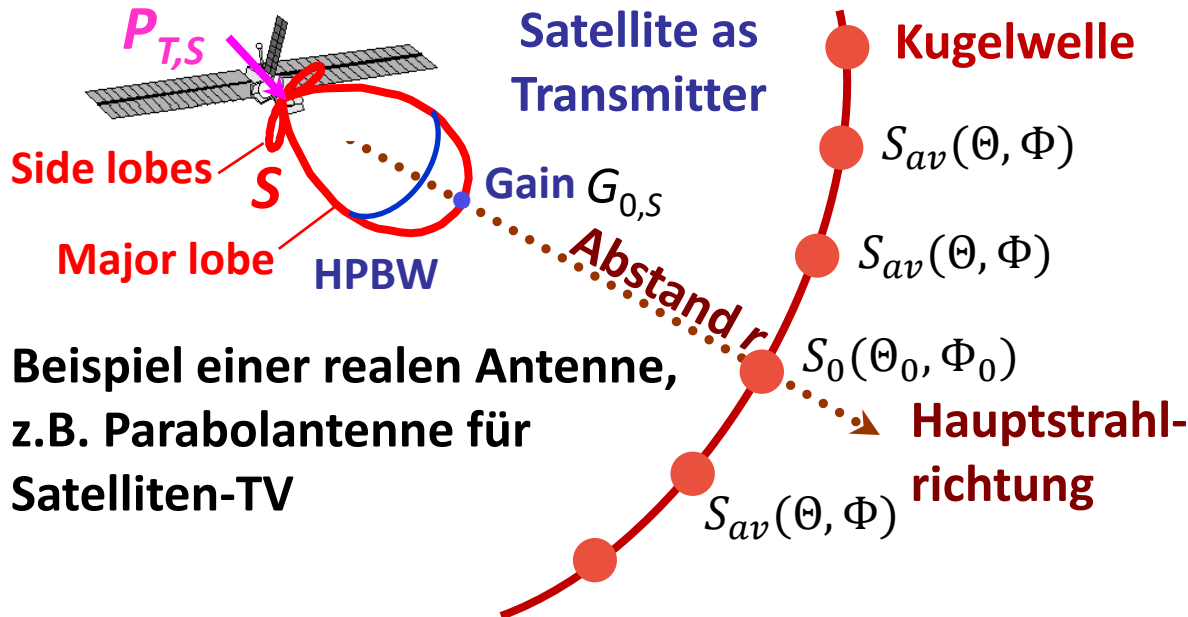
# Spherical Wave Propagation (from a Satellite)

## Average Power Density (Leistungsdichte)



# Spherical Wave Propagation (from a Satellite)

## Average Radiated Power (Abgestrahlte Leistung)



Beispiel einer realen Antenne,  
z.B. Parabolantenne für  
Satelliten-TV

Abgestrahlte Leistung der  
ANT aus Integral der  
Leistungsdichte über eine  
geschlossene Fläche (Kugel)

$$P_{rad} = \oiint_S \vec{S}_{av} \cdot \hat{n} \cdot dS$$

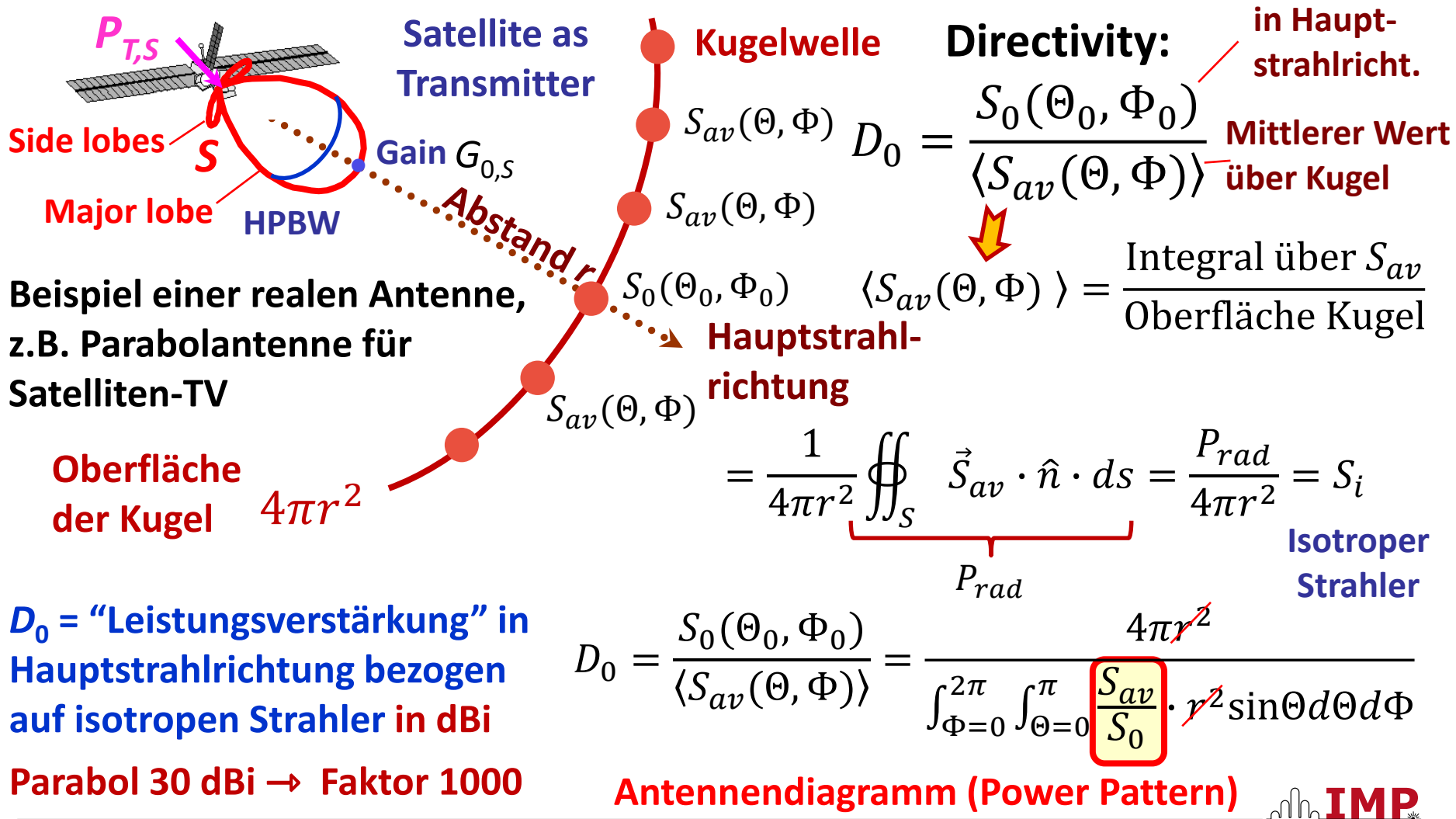
$$= \int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=0}^{\pi} S_{av} \cdot r^2 \sin\Theta d\Theta d\Phi$$

# Spherical Wave Propagation (from a Satellite)

## Directivity (Direktivität) & Power Pattern (Diagramm)



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



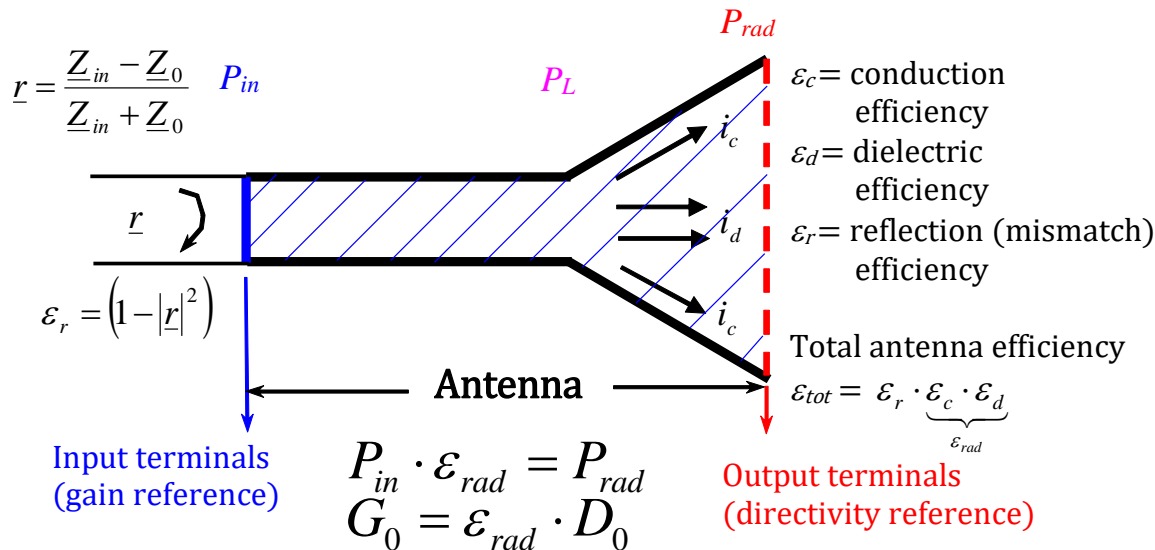
# Radiation Characteristics of Antennas:

## Directivity, Gain and ANT Radiation Efficiency

Antenna Types	Directivity in dBi
Dipole, Loop & Slot Antennas ...	1.7 – 3
Patch, Dielectric Rod ...	2.5 – 9
Yagi, Helix, Small Arrays ...	5 – 17
Horn, Medium Arrays ...	10 – 22
Reflector, Lens, Large Arrays ...	22 – 70

### Antenna Radiation Efficiency:

$$\varepsilon_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_L}$$



### Directivity and Gain:

$$G_0 = \varepsilon_{rad} \cdot D_0$$



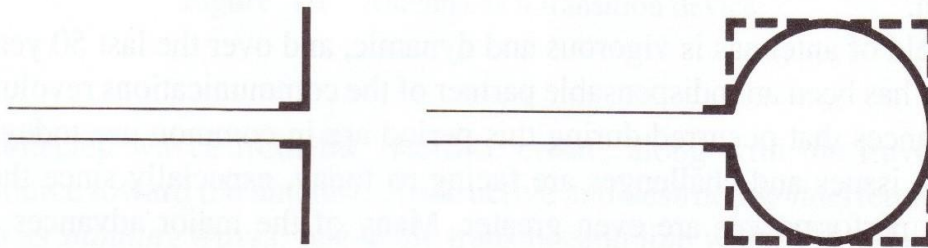
# Antennenklassen (Classes of Antennas)

## ► Antennenvorlesung



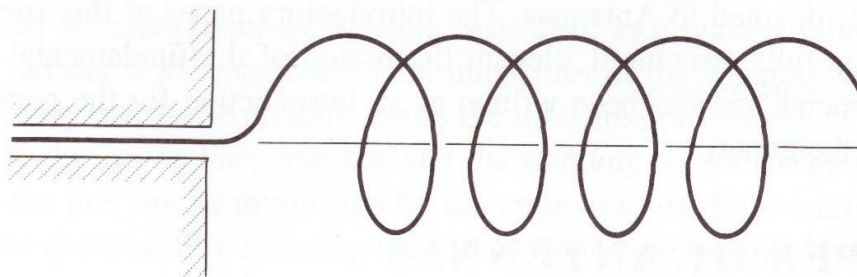
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Wire antennas



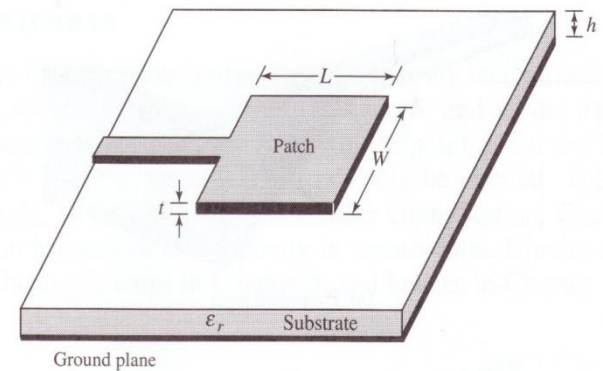
(a) Dipole

(b) Circular (square) loop

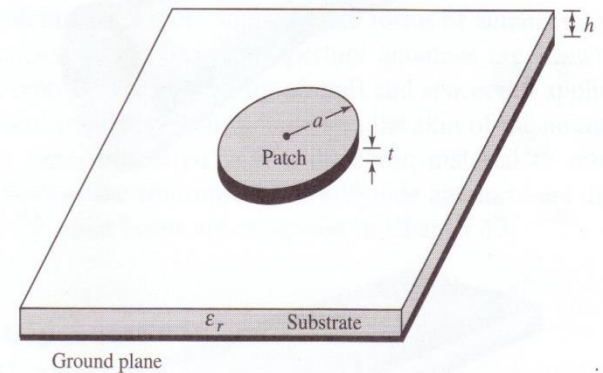


(c) Helix

## Patch antennas



(a) Rectangular

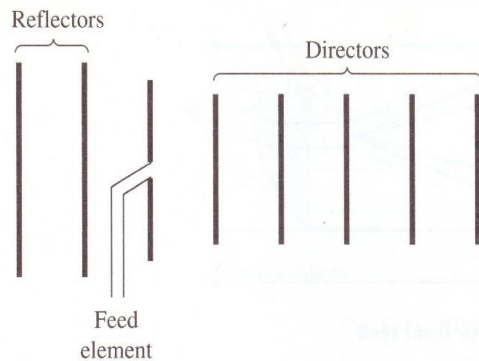


(b) Circular

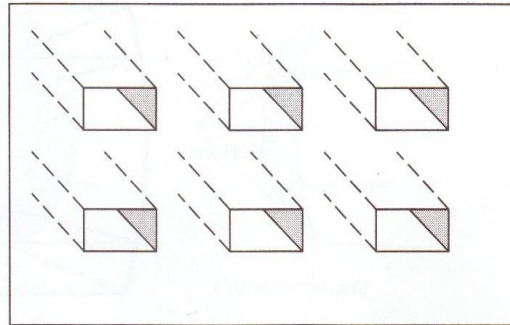
# Antennenklassen (Classes of Antennas)

## ➤ Antennenvorlesung

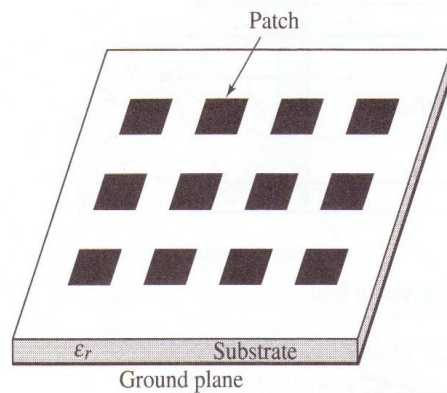
## Antenna Arrays



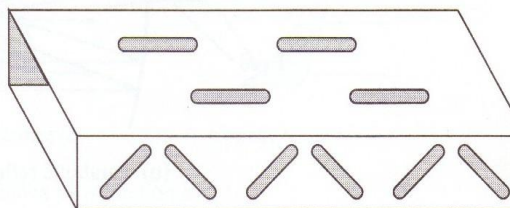
(a) Yagi-Uda array



(b) Aperture array



(c) Microstrip patch array



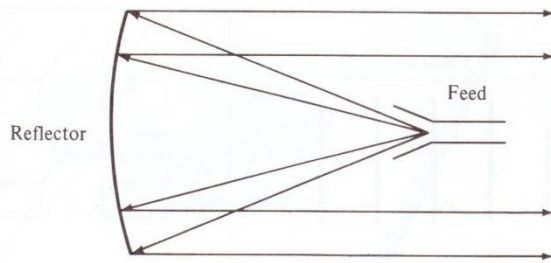
(d) Slotted-waveguide array

# Antennenklassen (Classes of Antennas)

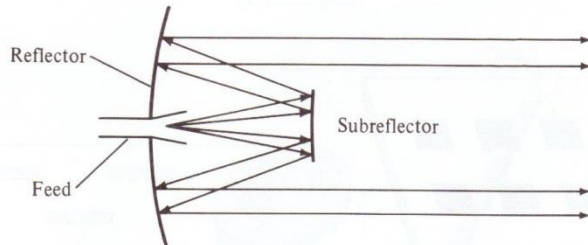
## ➤ Antennenvorlesung



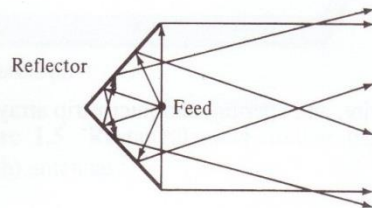
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



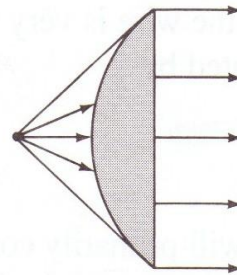
(a) Parabolic reflector with front feed



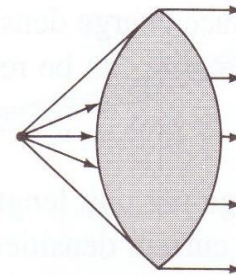
(b) Parabolic reflector with Cassegrain feed



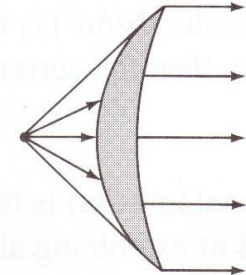
(c) Corner reflector



Convex-plane

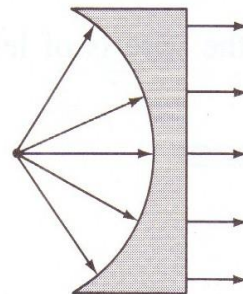


Convex-convex

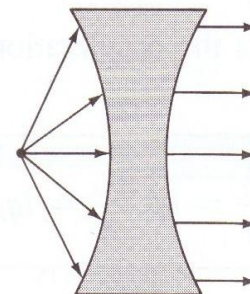


Convex-concave

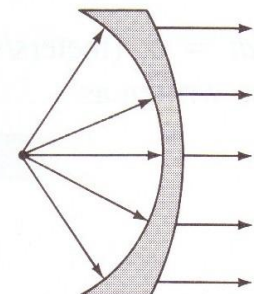
(a) Lens antennas with index of refraction  $n > 1$



Concave-plane



Concave-concave



Concave-convex

(b) Lens antennas with index of refraction  $n < 1$

# Effektive Wirkfläche & Gewinn einer Antenne

Herleitung in Antennenvorlesung (hier zu zeitaufwendig)



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_0$$

**für alle Antennen**

mit  $A_e = \varepsilon_{ap} \cdot A_{phy}$

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_{rad} \cdot \varepsilon_t$$

$\varepsilon_{ap} = 50\%$  für Pyramidenhörnern

$\varepsilon_{ap} = 60\%$  für Parabolantennen und

$\varepsilon_{ap} = 80\%$  für Cassegrain-Antennen

## 1.) Bestimmung des Gewinns aus physikalischer Apertur

$$G_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \varepsilon_{ap} \cdot A_{phy} \Rightarrow G_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \varepsilon_{ap} \cdot (A \cdot B)$$

für **rechteckige Apertur**

$$\Rightarrow G_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \varepsilon_{ap} \cdot (\pi \cdot a^2) = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \varepsilon_{ap} \cdot \left( \pi \cdot \left[ \frac{D}{2} \right]^2 \right) = \varepsilon_{ap} \cdot \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

für **runde Apertur**

## 2.) Gewinn und HPBW

$$G_0 = \varepsilon_{ap} \cdot \pi \cdot \frac{2A}{\lambda} \cdot \frac{2B}{\lambda} = \varepsilon_{ap} \cdot \pi \cdot \underbrace{\frac{2k_x}{k_x \cdot \frac{\lambda}{A}}}_{HPBW_x} \cdot \underbrace{\frac{2k_y}{k_y \cdot \frac{\lambda}{B}}}_{HPBW_y} = \varepsilon_{ap} \cdot 4\pi \cdot \frac{k_x}{HPBW_x} \cdot \frac{k_y}{HPBW_y}$$

Erweiterung um  $\frac{k_{x,y}}{k_{x,y}}$

Vergleich  $\rightarrow$  HPBW

**rechteckige Apertur**

mit  $k = k_x = k_y$  und  $HPBW = HPBW_x = HPBW_y$   
 $k$  = Faktor für unterschiedliche Aperturbelegung

$$G_0 = \varepsilon_{ap} \cdot 4\pi \cdot \frac{k^2}{HPBW^2}$$

**runde Apertur**

# Half-Power BeamWidth (HPBW)

## 3.) Half-Power BeamWidth (HPBW) für runde Apertur

$$G_0 = \epsilon_{ap} \cdot \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \longleftrightarrow G_0 = \epsilon_{ap} \cdot 4\pi \cdot \frac{k^2}{HPBW^2}$$

$$\Rightarrow HPBW = \sqrt{4\pi} \cdot \frac{k}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} = \underbrace{\sqrt{\frac{4}{\pi}}}_{\approx 1.128} \cdot k \cdot \frac{\lambda}{D}$$

$k=0.886$  für konstante Belegung

$k=1.19$  für cos-Verteilung

$k=1.55$  für  $\cos^2$ -Verlauf

Parabolantenne mit  $D/\lambda = 50$ : HPBW =  $1.15^\circ$ ,  $1.54^\circ$  und  $2^\circ$  für obige Belegungen.

**Gewinn  $G_0$  & HPBW einer Antenne sind korreliert:**

**Große ANT (großer Durchmesser  $D$ )  $\Rightarrow$  hoher  $G_0$  & schmale HPBW**

**ANT-Belegung  $\Leftrightarrow$  Fourier-Transformation  $\Leftrightarrow$  Fernfeld**

**gilt für alle elektromagnetische Strahler (Antennen, Linsen) & akustische Strahler (Mikrofon, Lautsprecher)**



# Gewinn (Gain $G_0$ ) & Keulenbreite (Half-Power BeamWidth, HPBW) einer **runden Apertur-ANT**

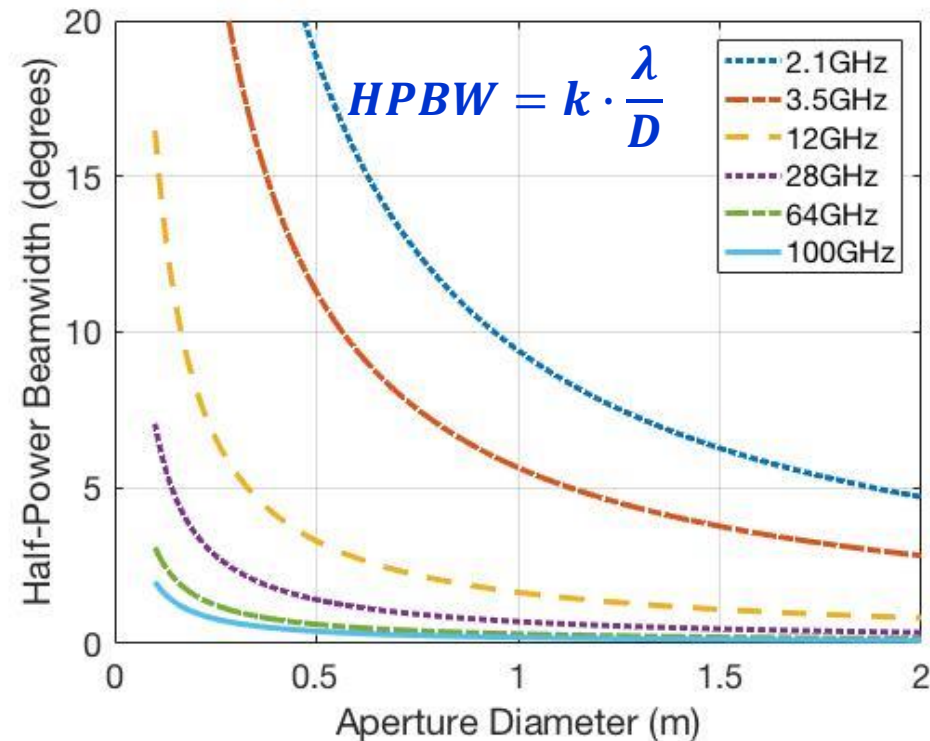
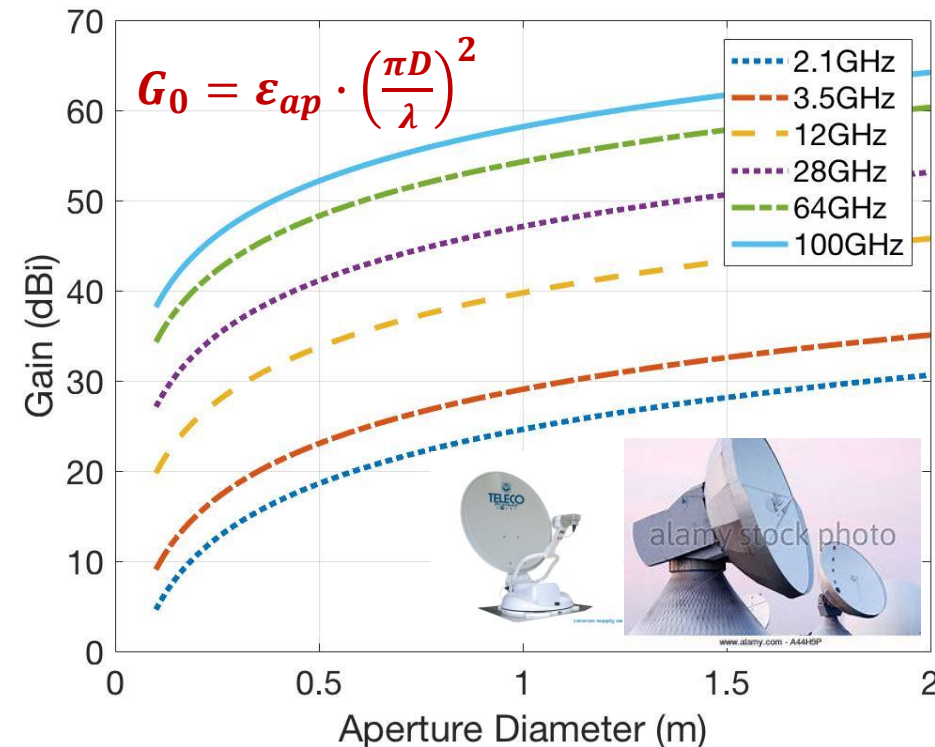


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## 4.) Gewinn $G_0$ & HPBW für runde Apertur

Parabolantenne für  $\epsilon_{ap} = 0.6$  & -10dB Taper  $k=1.15$   
über den Durchmesser für verschiedene Frequenzen

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_0$$



# Gewinn (Gain $G_0$ ) & Keulenbreite (Half-Power BeamWidth, HPBW) einer **quadr. Apertur-ANT**



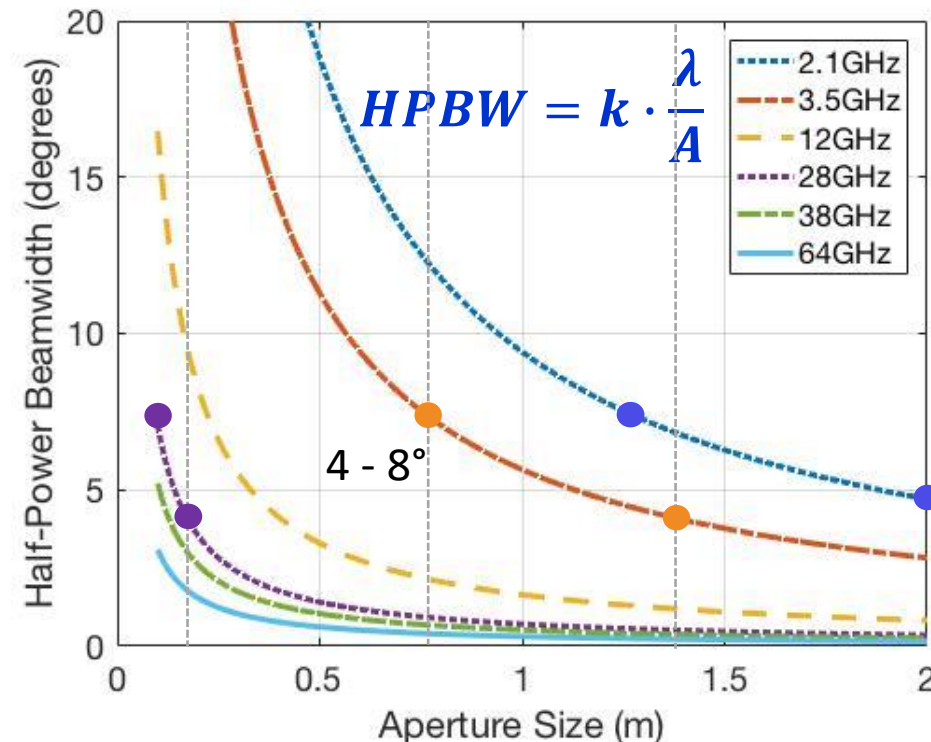
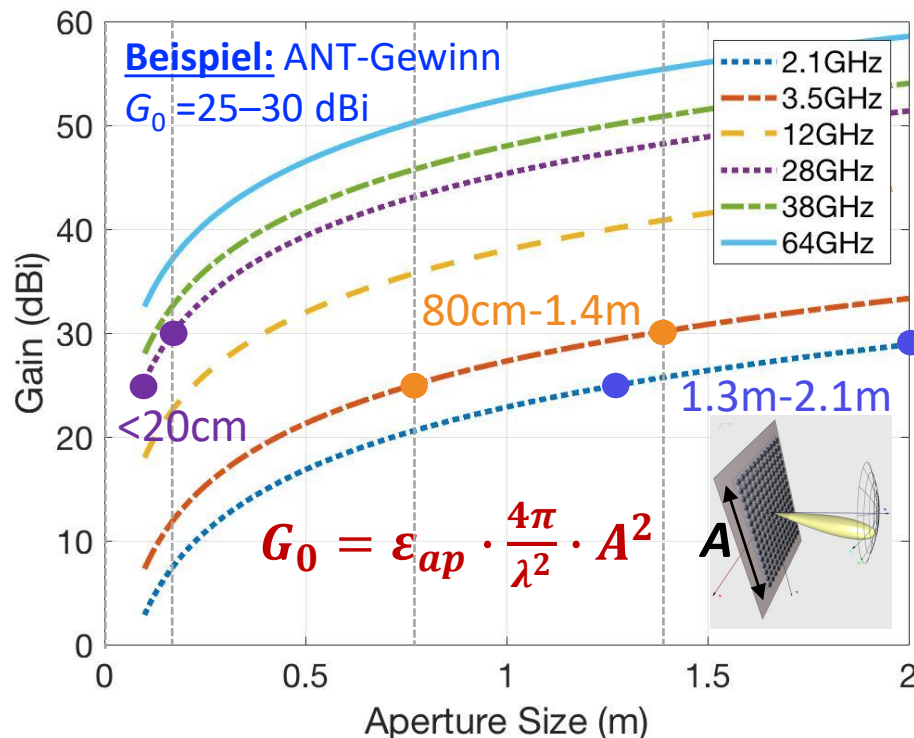
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## 4.) Gewinn $G_0$ & HPBW für quadratische Apertur

Array  $A=B$  für  $\epsilon_{ap} = 0.4$  und -10dB-Taper  $k=1.15$

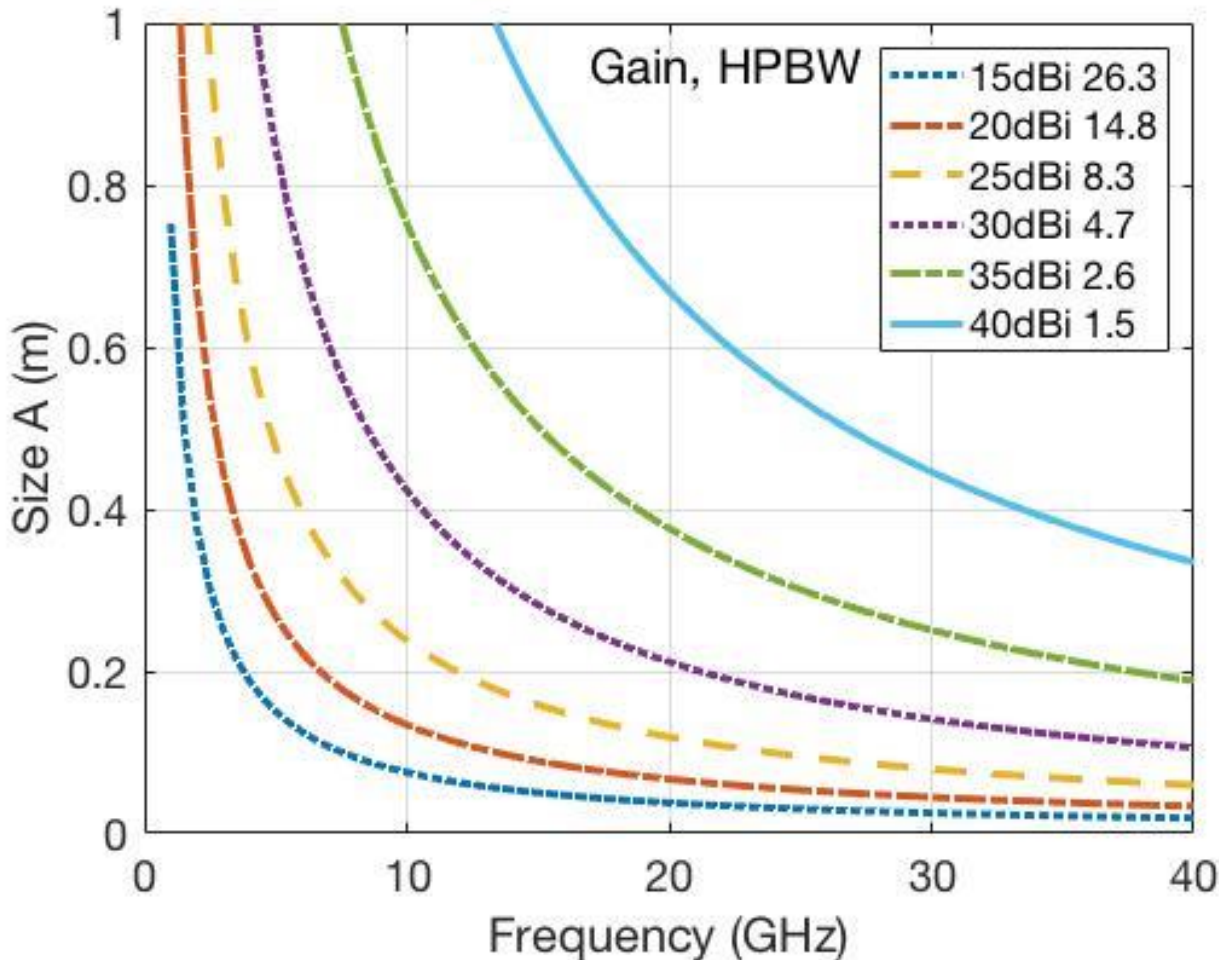
über quadratischen Querschnitt für verschiedene Frequenzen

**5G-Frequenzen:  
2.1, 3.5 & 28 GHz**



# Size $A$ of a quadratic Aperture vs. Frequency

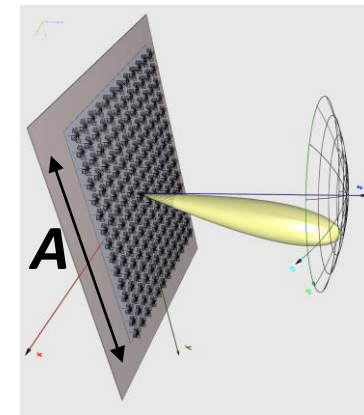
## Parameter Gain (related HPBW)



Dimension  $A = B$  einer  
quadratischen Apertur  
Parameter  $G_0$  & HPBW  
für  $\epsilon_{ap} = 0.4$  &  $k=1.15$

$$G_0 = \epsilon_{ap} \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A^2$$

$$HPBW = k \cdot \frac{\lambda}{A}$$

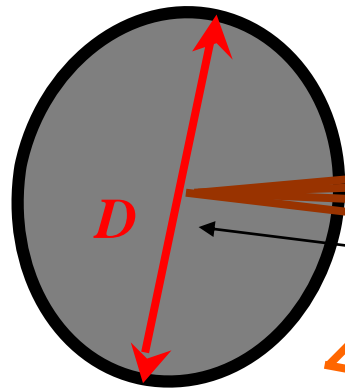




# Ausleuchtgebiet einer Satellitenantenne

## Footprint Diameter, Service Area, 3-dB Contour

Satellite



Parabolic  
reflector



Feed horn

$HPBW_1 = HPBW_2$  Earth  
 $HPBW$

Distance  $d$

$HPBW$

3-dB Contour on Earth with  
diameter  $a/2 \approx d \cdot \tan(HPBW/2)$

$$a \approx d \cdot HPBW \approx \frac{d \cdot k}{A/\lambda} \quad \text{für kleine } HPBW \quad \text{(große ANT)}$$

Ausleuchtzone mit Durchmesser  $a$  auf der Erde abhängig von Größe & Belegung der Antenne sowie der Frequenz

Näherungsweise runde Ausleuchtzone mit Durchmesser  $a$  auf der Erde für runde Antennenapertur (Parabolspiegel) (Erdkrümmung wird nicht betrachtet)

## 2 Pegel und Übertragungsmedien

### 2.1 Pegel und Pegeldiagramm

### 2.2 Einführung in die Übertragungsmedien

### 2.3 Funksysteme: Kugelwelle und Antennenabstrahlung

#### 2.2.1 Charakteristische Parameter von Antennen

#### 2.2.2 Richtfaktor, Gewinn und Wirkfläche einer Antenne

### 2.4 Power Link Budget drahtloser Systeme anhand von TV-Satellitenempfang bei 12 GHz

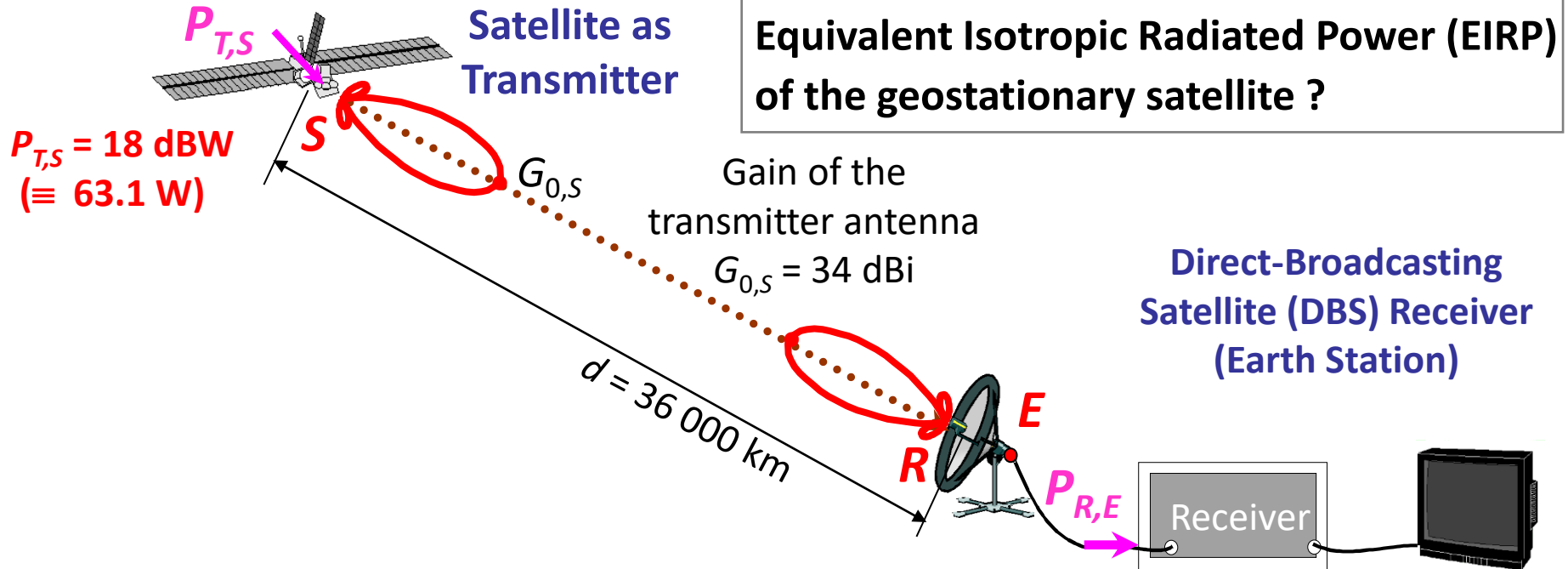
### 2.5 Entwicklung von neuen Satellitensystemen

#### Übung:

1-5 Satelliten-Übertragungsstrecke

1-3 Freiraumdämpfung

# EXAMPLE 1: Direct-Broadcasting Satellite (DBS) at $f = 12$ GHz with a GEO Satellite



$$EIRP_S = P_{T,S} + G_{0,S} = 52 \text{ dBW}$$

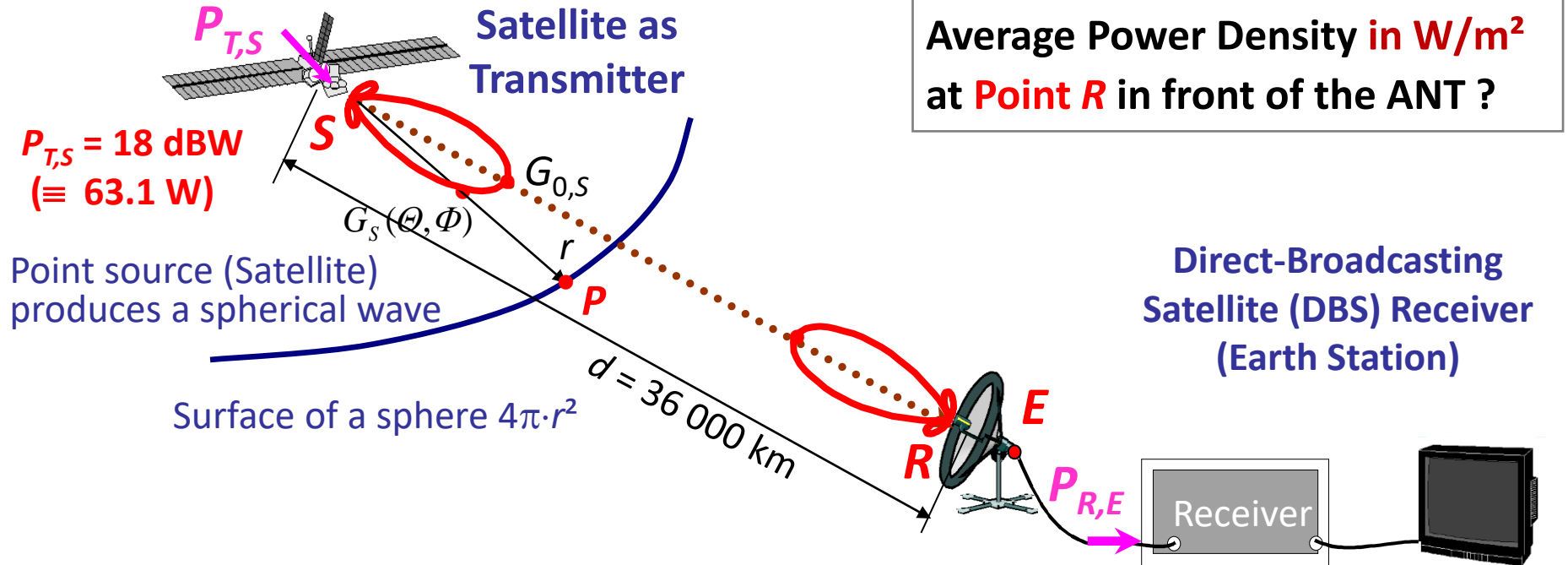
$\Rightarrow 158\,490$  W in the direction of the antenna maximum  
with respect to an isotropic radiator with  $P_{T,S} = 18$  dBW



# EXAMPLE 1: Direct-Broadcasting Satellite (DBS) at $f = 12$ GHz with a GEO Satellite



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



**From satellite radiated power density in  $\text{W/m}^2$**

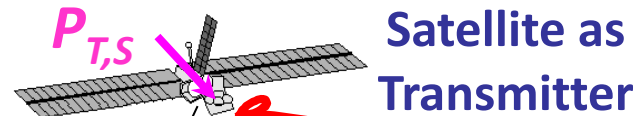
**in point  $R$**   
**(in front of ANT)**

$$S_R = S_R(d, \Theta_0, \Phi_0) = \frac{P_{T,S} \cdot G_{0,S}}{4\pi d^2}$$


# EXAMPLE 1: Direct-Broadcasting Satellite (DBS) at $f = 12$ GHz with a GEO Satellite



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



$$P_{T,S} = 18 \text{ dBW} \\ (\equiv 63.1 \text{ W})$$

Point source (Satellite)  
produces a spherical wave

Surface of a sphere  $4\pi \cdot r^2$

Received Power  $P_{R,E}$  in W at Point E ?

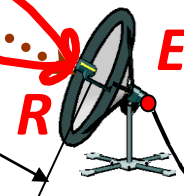
$$P_{R,E} = S_R \cdot A_{e,E} = \frac{P_{T,S} \cdot G_{0,S}}{4\pi \cdot d^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{0,E}$$

Effective aperture

$$A_{e,E} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_{0,E}$$

Direct-Broadcasting  
Satellite (DBS) Receiver  
(Earth Station)

$d = 36\,000 \text{ km}$



From satellite radiated power density in  $\text{W/m}^2$

in point R

(in front of ANT)

$$S_R = S_R(d, \Theta_0, \Phi_0) = \frac{P_{T,S} \cdot G_{0,S}}{4\pi d^2}$$



# EXAMPLE 1: Direct-Broadcasting Satellite (DBS) at $f = 12$ GHz with a GEO Satellite



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



$$P_{T,S} = 18 \text{ dBW} \\ (\equiv 63.1 \text{ W})$$

Point source (Satellite)  
produces a spherical wave

Surface of a sphere  $4\pi \cdot r^2$

$$G_s(\theta, \phi)$$

$$G_{0,S}$$

$$d = 36\,000 \text{ km}$$

Effective aperture

$$A_{e,E} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_{0,E}$$

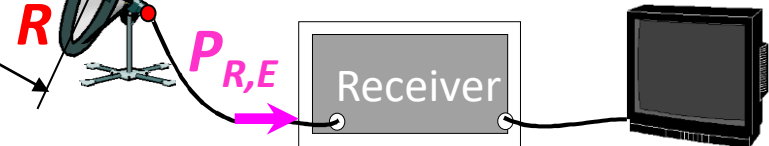
Received Power  $P_{R,E}$  in dBW &  $a_{fs}$  ?

$$P_{R,E} = S_R \cdot A_{e,E} = \frac{P_{T,S} \cdot G_{0,S}}{4\pi \cdot d^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{0,E}$$

Direct-Broadcasting

Efficiency  $\sim 10^{-15}$

$$P_{R,E} = -118 \text{ dBW} \equiv 1.6 \text{ pW}$$



$$P_{R,E} = P_{T,S} + G_{0,S} + G_{0,E} - 20 \lg \left( 4\pi \frac{d}{\lambda} \right) \text{ in dBW}$$

Free-space propagation losses for  $d = 36\,000 \text{ km}$  &  $f = 12 \text{ GHz}$

$$a_{fs} = 20 \lg \left( 4\pi \frac{d}{\lambda} \right) \approx 205 \text{ dB}$$

see next slide

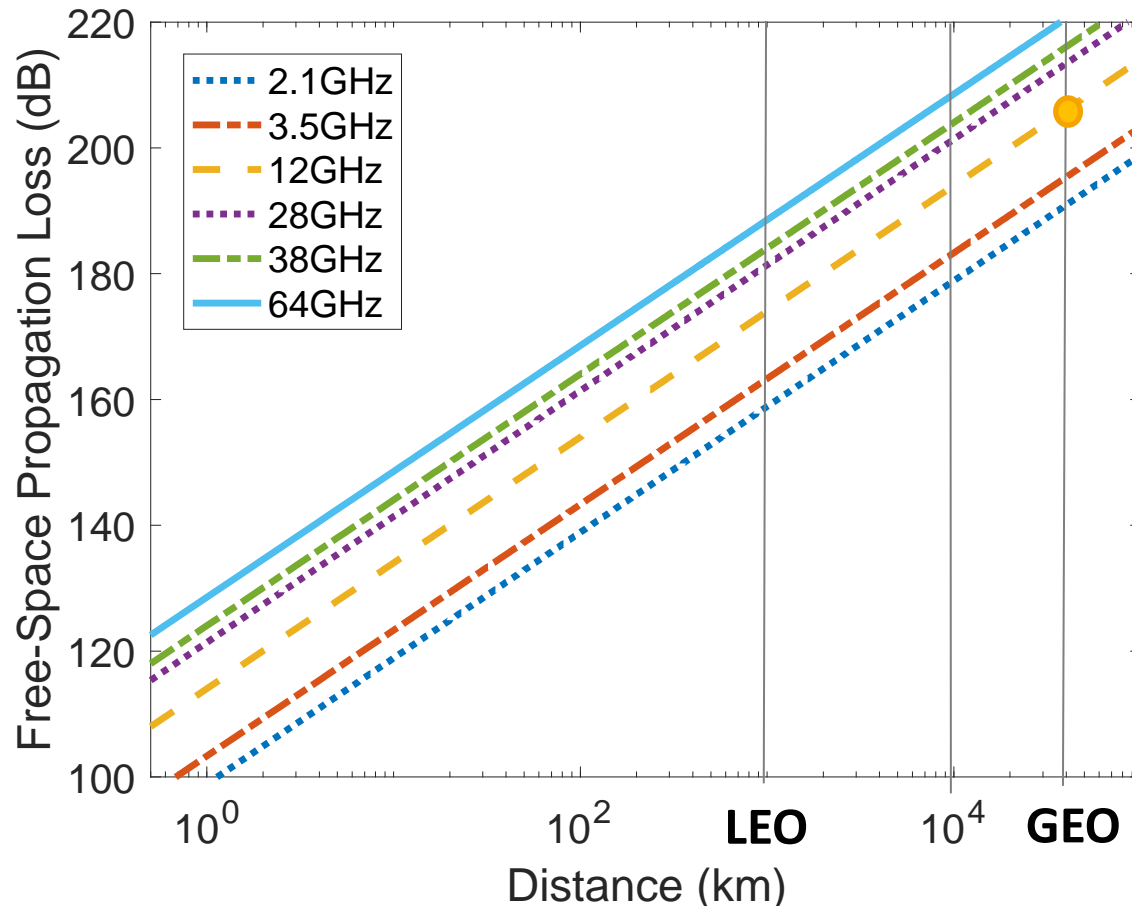


# Free-Space Propagation Loss

Übung:

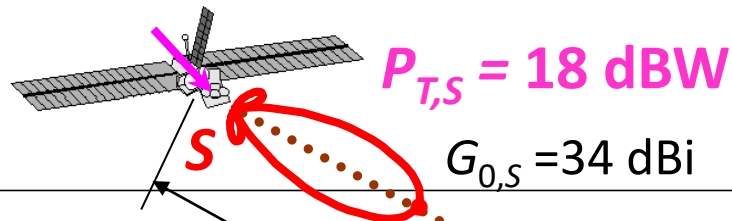
1-3 Freiraumdämpfung

Doppellogarithmisch



$$a_{fs} = 20 \lg \left( 4\pi \frac{d}{\lambda} \right) \approx 205 \text{ dB}$$

Freiraumdämpfung steigt  
um **20 dB pro Dekade** im  
Abstand (100 → 1000 km)  
Frequenz (1 → 10 GHz)



$$P_{n,E} = k \cdot B_{n,E} \cdot T_{s,E} = k \cdot B_{n,E} \cdot (T_{A,E} + T_{R,E})$$

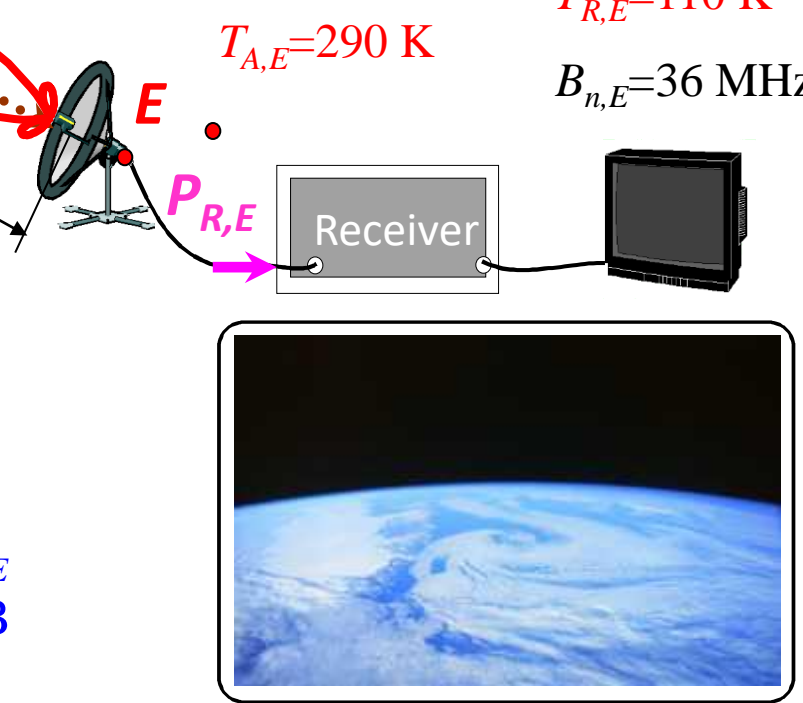
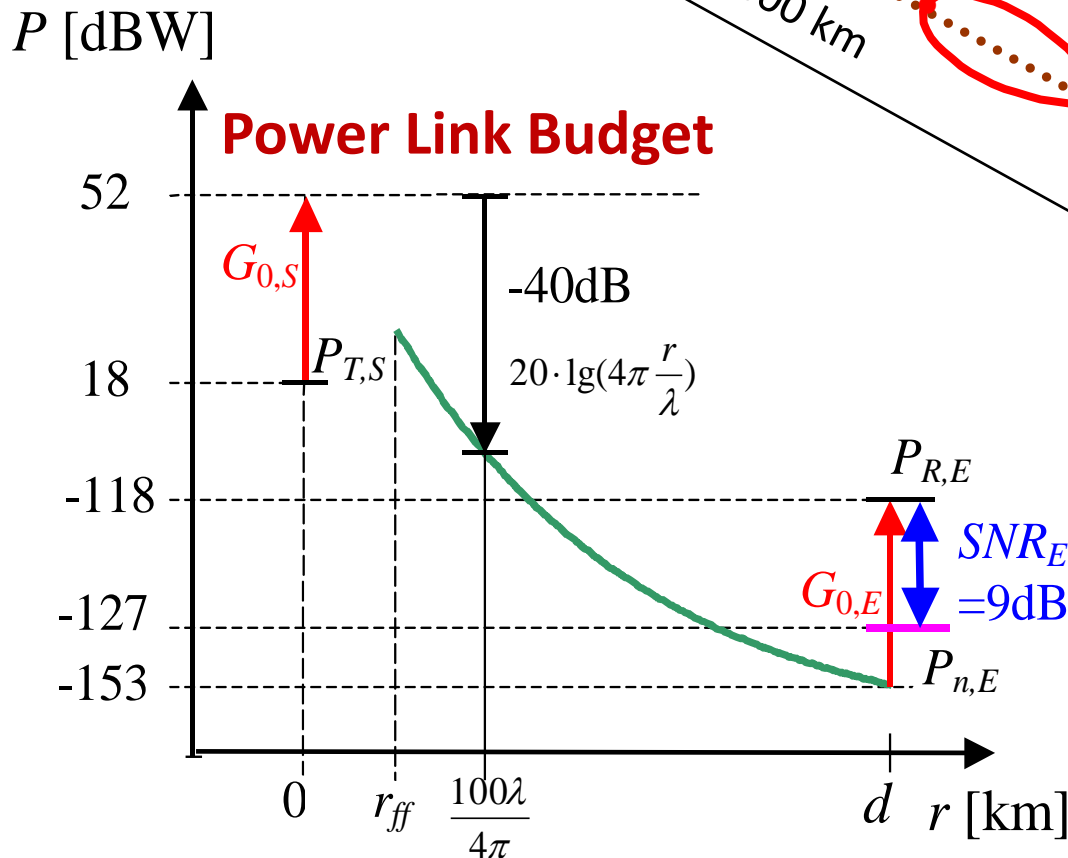
$$\approx 0.2 \text{ pW} \equiv -127 \text{ dBW} \text{ (Kap. 3)}$$

Boltzmann constant  $k = 1.379 \cdot 10^{-23} \frac{\text{W}}{\text{Hz} \cdot \text{K}}$

$T_{R,E} = 110 \text{ K}$

$T_{A,E} = 290 \text{ K}$

$B_{n,E} = 36 \text{ MHz}$





# Atmosphärische Dämpfung

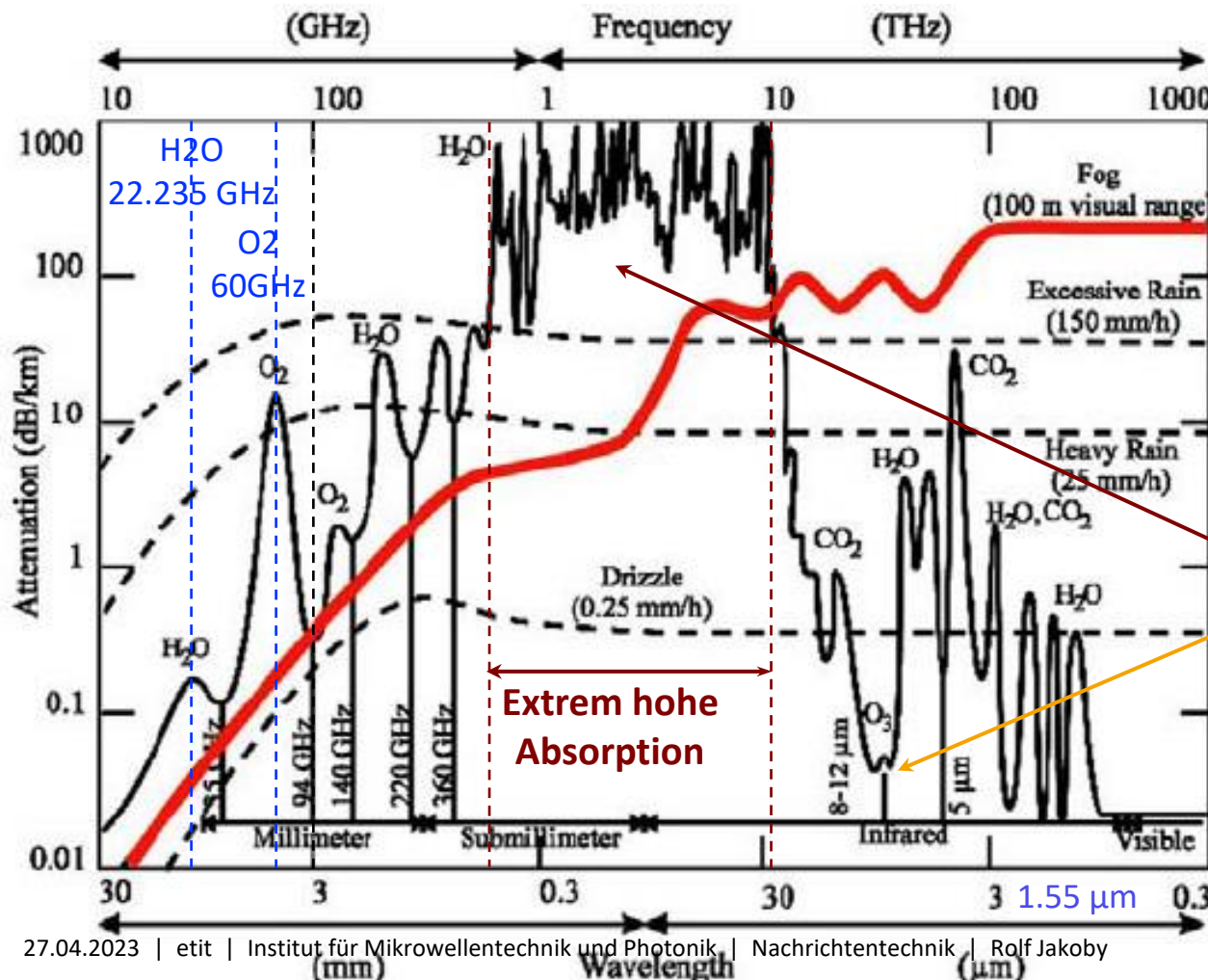
Absorptionslinien von Sauerstoff und Wasser: 22,235 GHz (H<sub>2</sub>O), 60 GHz (O<sub>2</sub>), 118,75 GHz (O<sub>2</sub>), 183,31 GHz (H<sub>2</sub>O), 325,153 GHz (H<sub>2</sub>O)



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

$$P_R|_{\text{dBW}} = P_{T,S}|_{\text{dBW}} + G_{0,S}|_{\text{dBi}} + G_{0,E}|_{\text{dBi}} - 20\lg\left(4\pi\frac{d}{\lambda}\right)|_{\text{dB}} - 10\lg(a_{\text{path}})|_{\text{dB}}$$

**Zusätz. Dämpfung:**  
Atmosphärische Gase,  
Nebel, Niederschläge, ...



**Fog**  
100 m  
visual range

**Path Loss  $a_{\text{path}}$  due to**

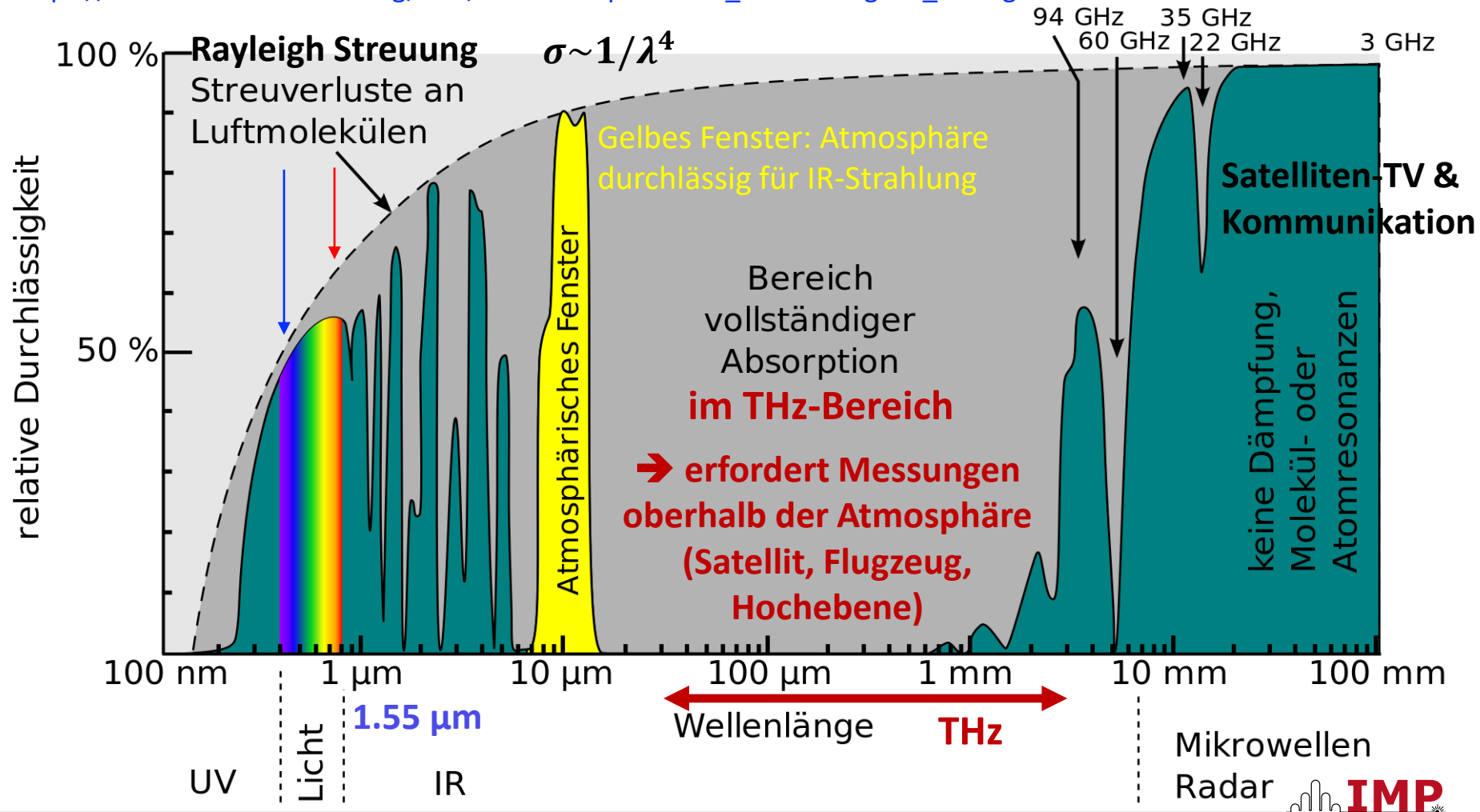
- **Atmospheric Gas**
  - 0.3–10 THz high absorption
  - Atmosph. transparent for IR
- **Rain**
- **Water Vapor (Fog)**  
increases extremely  
towards IR & optics

# Durchlässigkeit der Atmosphäre für EM-Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmosphärische\\_Durchlässigkeit\\_DE.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmosphärische_Durchlässigkeit_DE.svg)



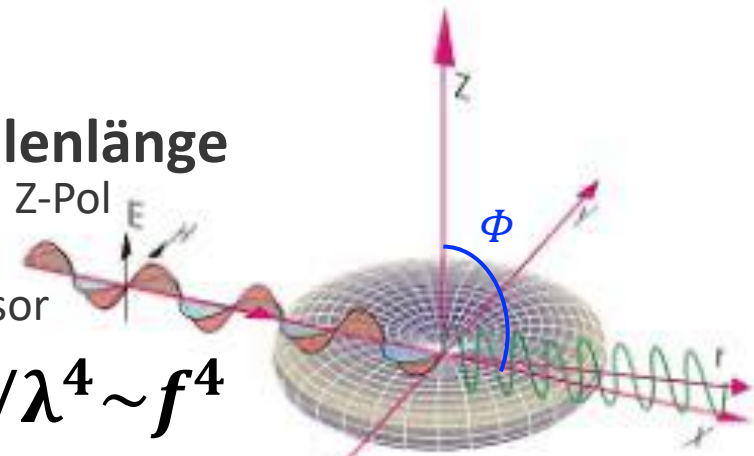
# Rayleigh Streuung $\sigma(f) \sim f^4$ (Streuung an Streupartikel (z.B. Gasmoleküle) $\ll$ Wellenlänge

Gestreuete/einfallende Intensität

$$\frac{I_s}{I_0} = \frac{E_r^2}{E_0^2} = \frac{\left( \frac{\alpha E_0 4 \pi^2}{r \lambda^2} \sin \Phi \right)^2}{E_0^2} \quad \alpha = \text{Polarisierbarkeitstensor}$$

$$= \frac{16 \pi^4 \alpha^2 \sin^2 \Phi}{r^2 \lambda^4} \sim 1/\lambda^4 \sim f^4$$

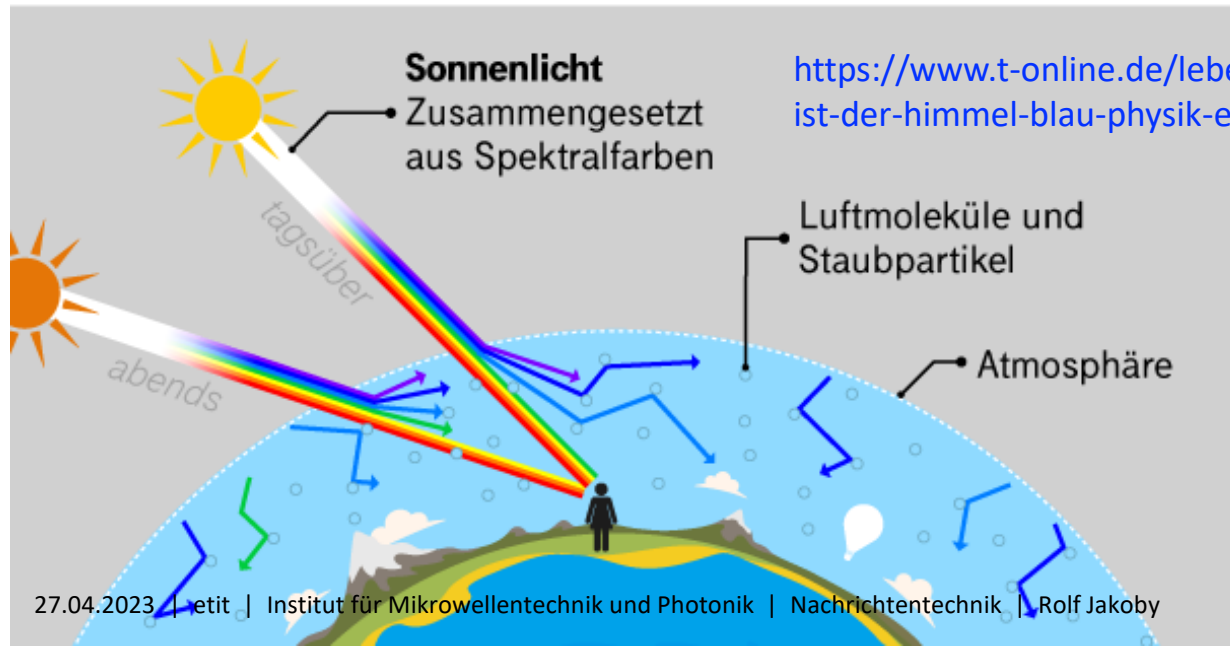
Z-Pol



<https://www.smart-piv.com/de/techniques/mie-rayleigh-raman/index.php>

## So entsteht das Himmelsblau

Der blaue Anteil des Sonnenlichts wird von Partikeln in der Luft am meisten gestreut – so wirkt der Himmel blau



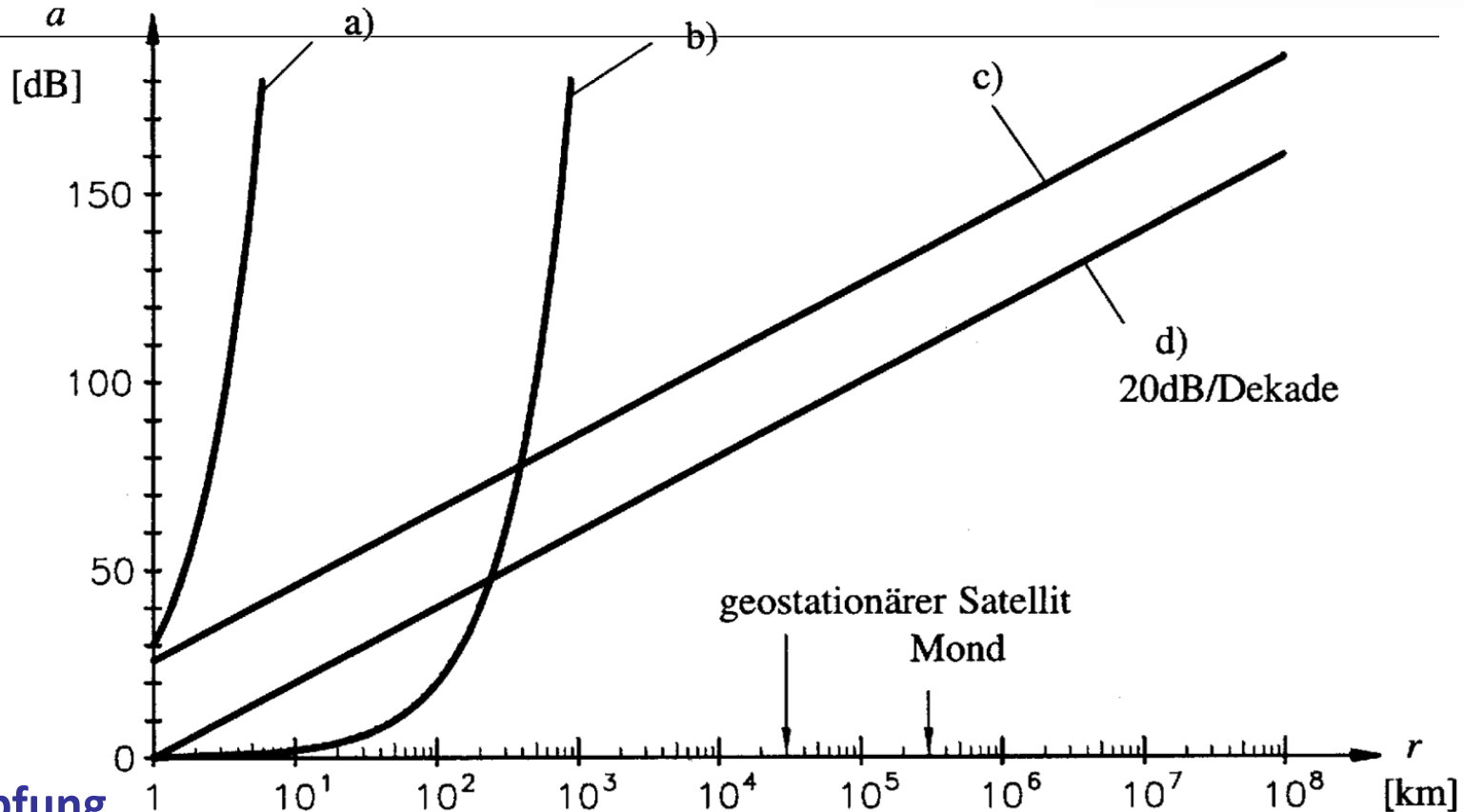
[https://www.t-online.de/leben/familie/id\\_77050008/warum-ist-der-himmel-blau-physik-einfach-erklart.html](https://www.t-online.de/leben/familie/id_77050008/warum-ist-der-himmel-blau-physik-einfach-erklart.html)

# Streckendämpfung: Kabel oder Funk?

**„Virtuelle“ Verbindung von der Erde zum  
Geostationären Satelliten und zum Mond**

**Was hat die geringere Streckendämpfung:  
Optische Glasfaserkabel mit nur 0.2 dB/km oder  
eine Funkverbindung bei 6 GHz mit hoher  
Freiraumdämpfung?**

# Streckendämpfung: Kabel oder Funk



## Streckendämpfung

- a) Koaxialkabel (Typ RGU221: Ø=3 cm, 30 dB/km bei 100 MHz),
- b) optische Glasfaser (0.2 dB/km),
- c) Funkstrecke (6 GHz, Sendeantenne Ø=2 m, Empfangsantenne Ø=2 m) und
- d) Funkstrecke (6 GHz, Sendeantenne Ø=30 m, Empfangsantenne Ø=2 m).

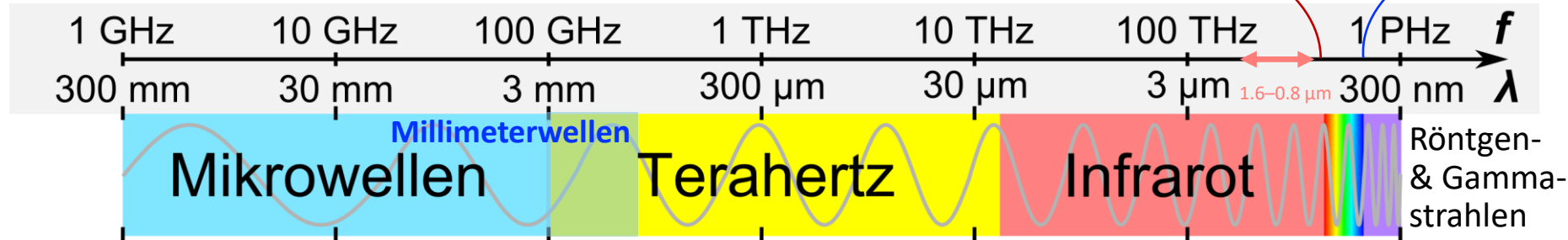
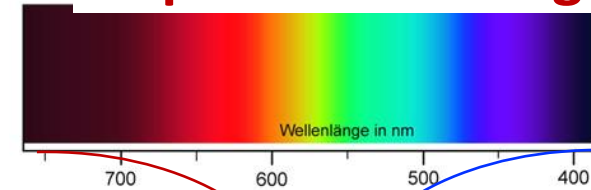
## Signallaufzeit

$$\tau = d / (c_0 / \sqrt{\epsilon_r})$$

$$\tau = d / c_0$$



## Warum immer höhere Frequenzen ?

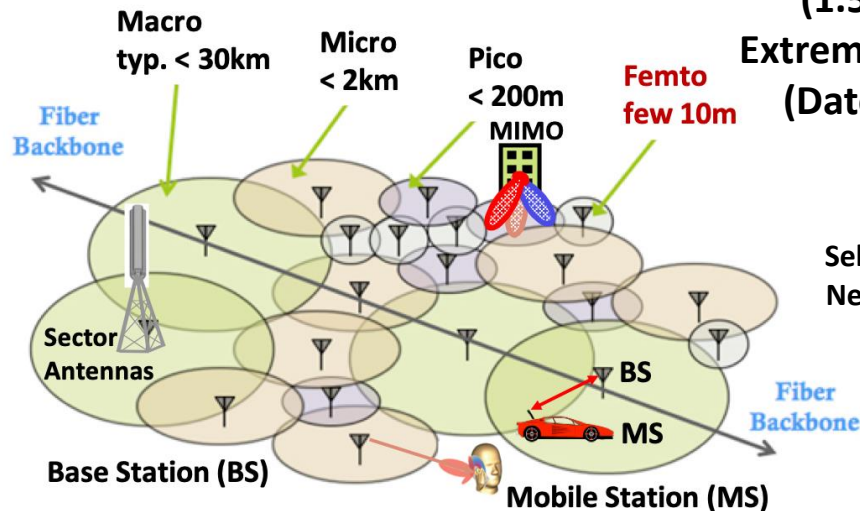


### Mobilfunksysteme (2.1, 3.5, 28 ... 240 GHz):

Verdichtung bestehender Netze

Je höher Frequenz, desto geringer

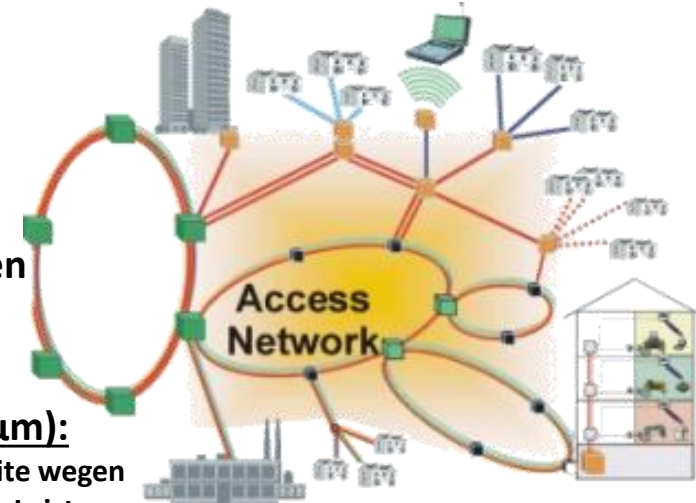
Reichweite, aber desto höher Datenrate



### Glasfaser-Netz

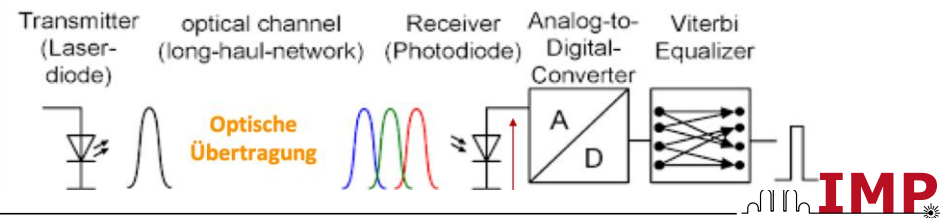
(1.5 $\mu$ m, 200 THz):

Extrem hohe Datenraten  
(Datenautobahnen)



### Laser Link (1.5 $\mu$ m):

Sehr begrenzte Reichweite wegen  
Nebel & eingeschränkter Leistung





# Warum immer höhere Frequenzen?

$\epsilon_s = 1$  2-wertige  $\epsilon_s > 1$  Höherwertige MOD

Digitale Modulation hochfrequenter Signale zur Übertragung von Daten

Hohe Datenraten  $R_b = \epsilon_s \cdot B_{RF}$  erfordern

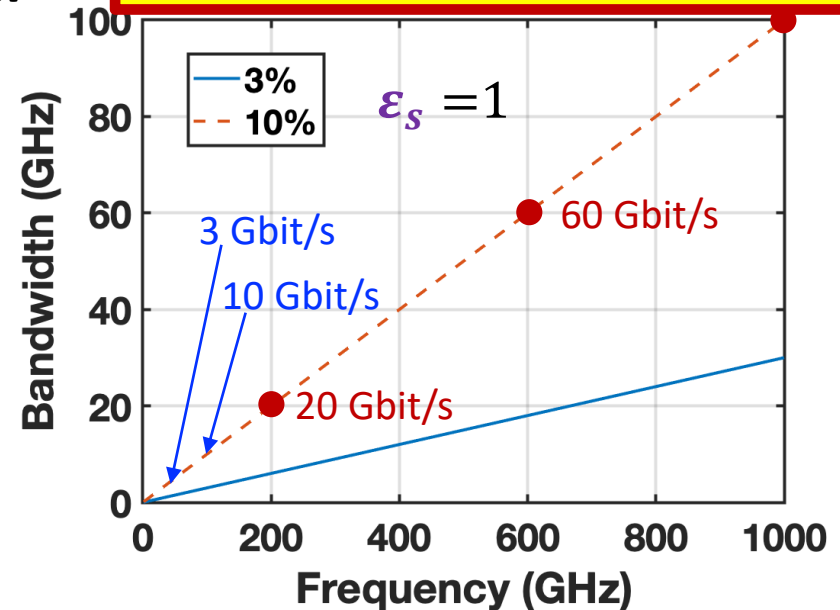
→ große absolute RF-Bandbreiten  $B_{RF}$

→ hohe Trägerfrequenzen  $f_c$

→ Höhere spektrale Effizienz  $\epsilon_s > 1$

→ Erhöhung der Datenraten  
bei gleicher Bandbreite

5G / 6G und in SATCOM



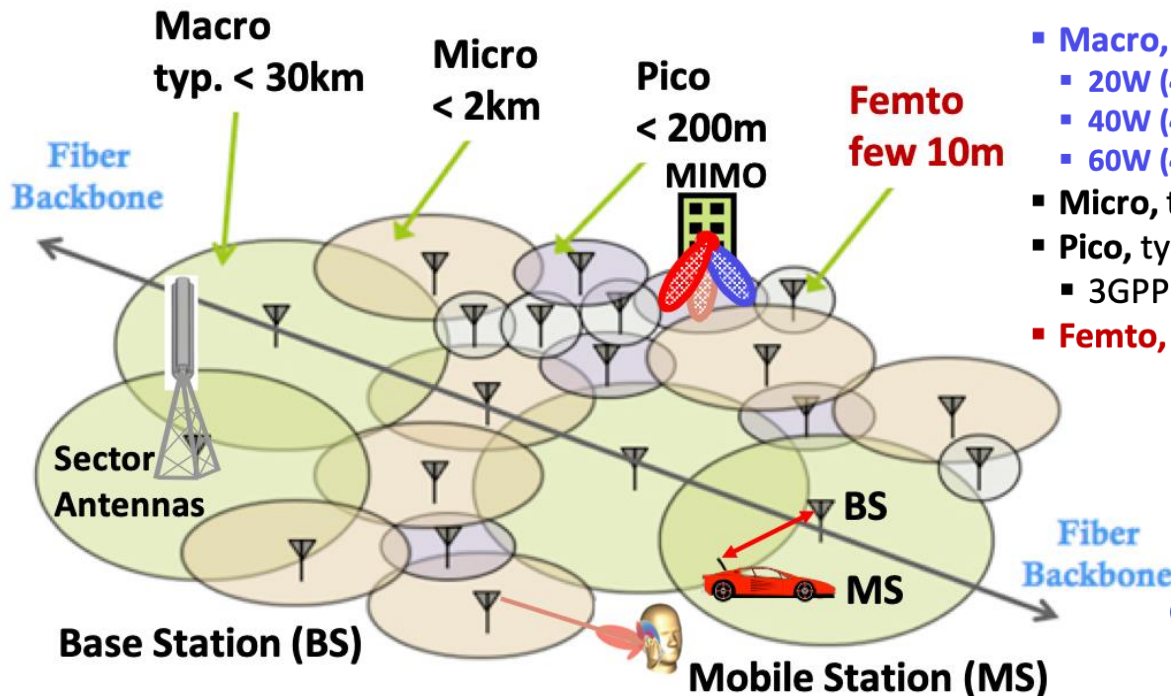
Datendurchsatz steigt gegenwärtig **exponentiell**; Wie hält man Schritt?

1. Existente Kommunikationskanäle: Übertragungsraten  $R_b$  / Datenkapazität  $C$  erhöhen durch **spektrale Effizienz**  $\epsilon_s$  der Modulationsverfahren

2. **Neue Frequenzbänder** bei höheren Trägerfrequenzen  $f_c$  mit höherer absoluter Bandbreite  $B_{RF}$  erschließen → **Millimeterwellen- & THz-Bereich**  $f_c > 26$  GHz

# Verdichtung/Erweiterung der bestehenden Netze mittels kleinerer Zellen & Kleinstzellen

- **Große Zellen (Macro)** zur Flächendeckung (geringe Kapazität, typ. GSM, UMTS, LTE), Verwendung hoch-angebrachter Sektorantennen
- **Kleinere Zellen (Micro, Pico)** für zusätzliche Kapazität & Netzabdeckung (große Kapazität, LTE, 5G Phase I (3.5 – 7 GHz) → niedrige Antennen, Mehrantennentechnik
- **Kleinstzellen (Femto: Outdoor & Indoor)** für extrem hohe Übertragungsraten  
→ 5G Phase II (24 – 80 GHz) & 6G (100 – 240 GHz)



- **Macro**, typical value is **20W-60W (43dBm-48dBm)**
  - 20W (43dBm) on 5MHz band (as in WCDMA/HSPA)
  - 40W (46dBm) on 10MHz band (usual test case for LTE)
  - 60W (48dBm) on 20MHz band
- **Micro**, typical value is **5-10W (37dBm-40dBm)**
- **Pico**, typical value is **100mW-2W (20dBm-33dBm)**
  - 3GPP limit is **250mW (24dBm)**
- **Femto**, TX power is limited to **100mW (20dBm)**

Jede Basisstation kann nur ein begrenztes Volumen an Daten übertragen. Deshalb versorgt sie nur ein eng begrenztes Gebiet (Funkzelle)



# Warum immer höhere Frequenzen (> 10 GHz)?

## Nachteile / Herausforderungen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- Kleinere Zellen (Micro, Pico) für zusätzliche Kapazität & Netzabdeckung → 5G Phase I (3.5 – 7 GHz) → niedrige Antennen, Mehrantennentechnik
- Kleinstzellen (Femto: Outdoor & Indoor) für extrem hohe Übertragungsraten → 5G Phase II (24 – 80 GHz) & 6G (100 – 240 GHz)

- **höhere Penetrationsverluste** (z.B. durch Mauerwerk)  
→ Welle dringt nicht durch die Mauer
- **geringerer Beugungsbereich  $\sim \lambda$**  → starke Abschattung  
→ Sichtverbindung (Line-of-Sight, LOS) erforderlich!
- ± **höhere Ausbreitungsdämpfung** → Wellenausbreitung begrenzt!  
→ nur sehr kleine Funkzellen (Kleinst-/Femtozellen) möglich!
- **Mehr Standorte / höhere Infrastrukturkosten**

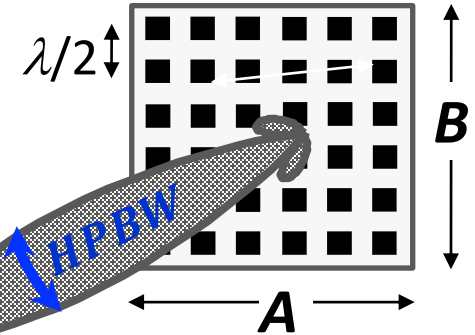
# Warum immer höhere Frequenzen? Was bedeutet das für die Antennen?

+ **kompaktere Antennen** (z.B. für  $\lambda/2$ -Dipol / Patch)

Beispiel:  $6 \times 6$  Patch-Array ( $A = B \approx 6 \cdot \lambda/2$ ) quadratische Apertur

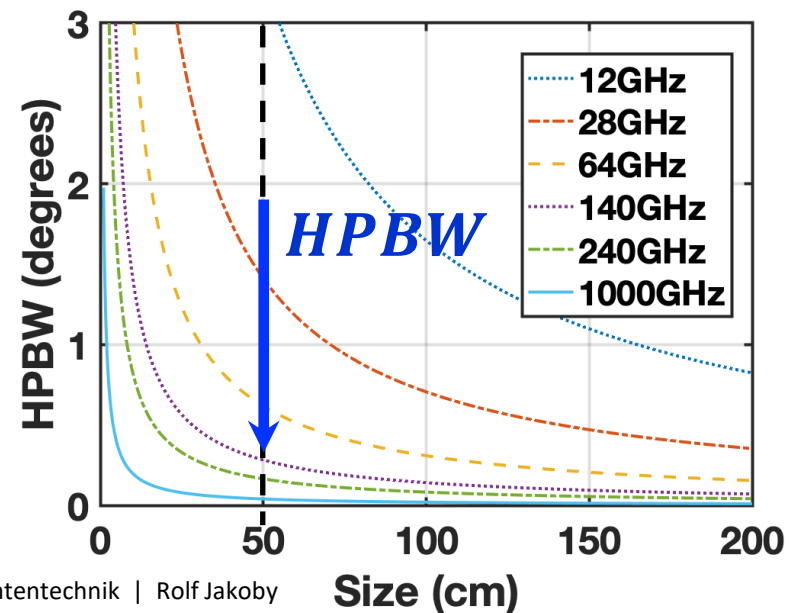
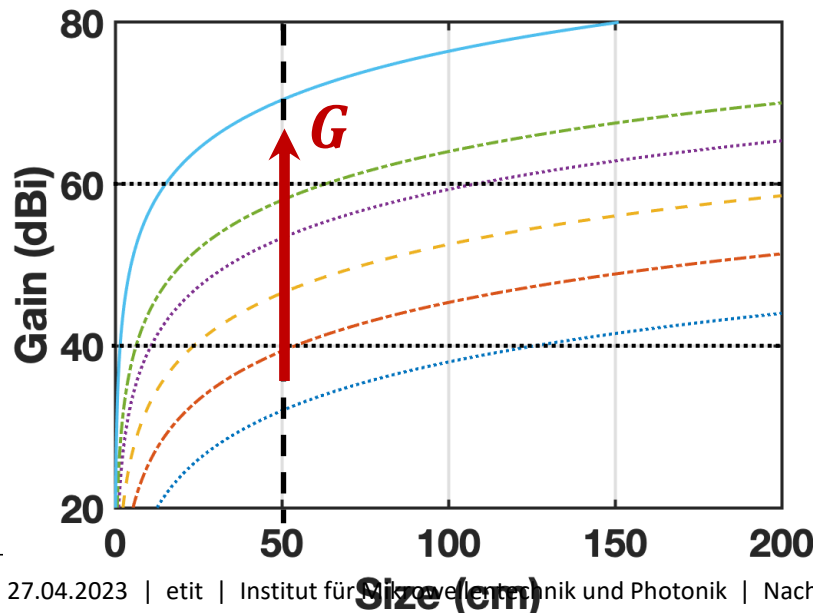
$$f_0 = 3 \text{ GHz}, \lambda = 10 \text{ cm} \rightarrow A = 30 \text{ cm}$$

$$f_0 = 300 \text{ GHz}, \lambda = 1 \text{ mm} \rightarrow A = 3 \text{ mm}$$



Antennengewinn (Gain, G) in dBi  $G = \epsilon_{ap} \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A^2$

3dB-Keulenbreite (Half-Power Beamwidth)  $HPBW = k \cdot \frac{\lambda}{A}$  Array  $A=B$ :  $\epsilon_{ap} = 0.4$ ; -10dB-Taper  $k=1.15$



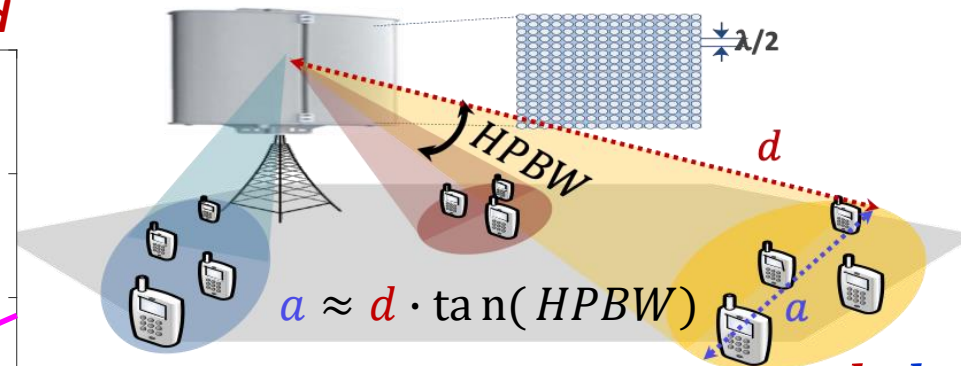
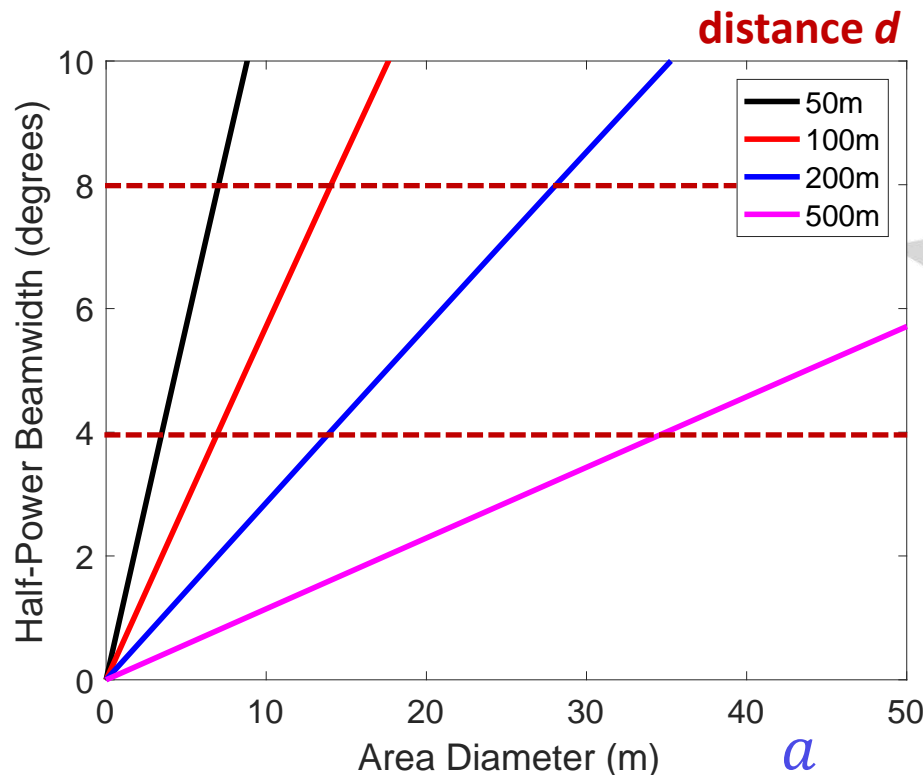
# Warum immer höhere Frequenzen?

## Was bedeutet das für die Antennen?

➔ kompaktere Antennen mit hohem Gewinn & schmalen Keulen realisierbar

Antennengewinn (Gain, G) in dBi  $G = \epsilon_{ap} \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A^2$

3dB-Keulenbreite (Half-Power Beamwidth)  $HPBW = k \cdot \frac{\lambda}{A}$



$$a \approx d \cdot HPBW \approx \frac{d \cdot k}{A/\lambda}$$

3-dB Kontur (Footprint)

Ausleuchtzone mit Durchmesser  $a$

~ Entfernung  $d$

~  $\lambda/A$  1/ANTabm., 1/Frequenz

## Warum immer höhere Frequenzen? Was bedeutet das für die Antennen?

→ kompaktere Antennen mit hohem Gewinn & schmalen Keulen realisierbar

Antennengewinn (Gain, G) in dBi  $G = \epsilon_{ap} \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A^2$

3dB-Keulenbreite (Half-Power Beamwidth)  $HPBW = k \cdot \frac{\lambda}{A}$

→ elektronische Strahlschwenkung zur  
genauen Ausrichtung erforderlich!

→ Gilt insbesondere für portable/  
mobile Teilnehmer-Terminals

Analog/Digital  
Beamsteering

Multibeam-Subarrays & Multiple Input Multiple Output (MIMO):

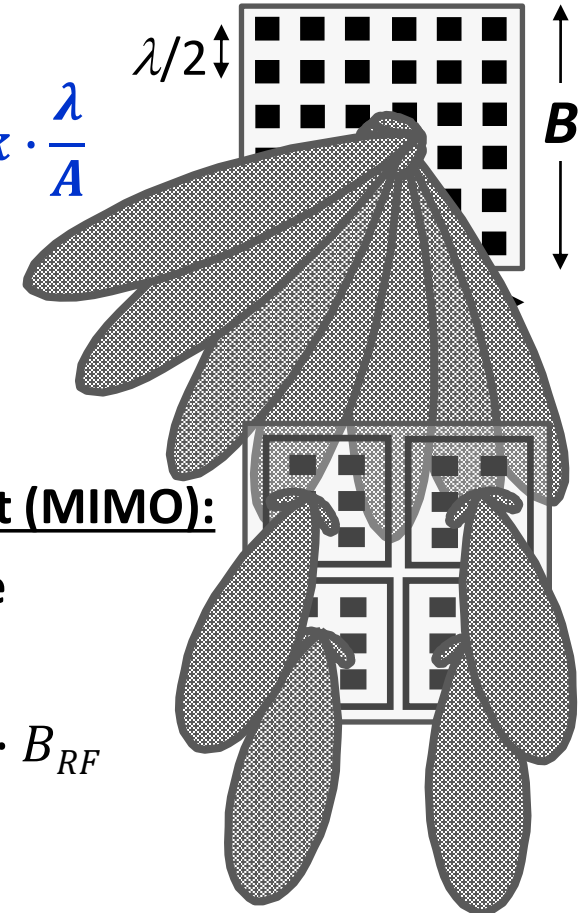
Flexible Adressierung unterschiedlicher Raumsegmente  
(Raummultiplex) → Erhöhung der Kapazität

$N_b$  = Anzahl der Antennenkeulen  
pro Basisstation (BS)

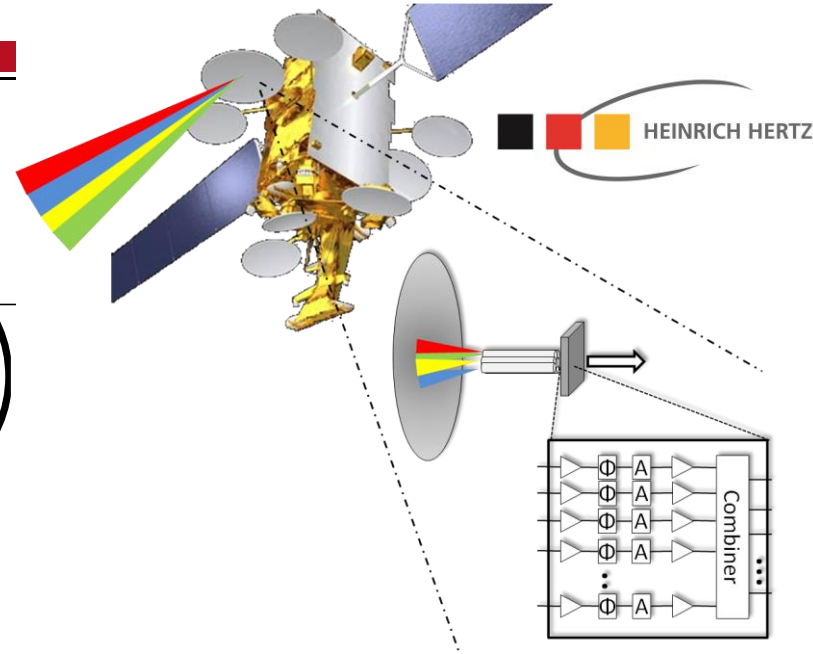
$N_c = 3$  Clustergröße bei 120°-Sektorantennen

$$C = \epsilon_s \cdot B_{tot} = \epsilon_s \cdot \frac{N_b}{N_c} \cdot B_{RF}$$

- deutlich höherer Hardwareaufwand / Kosten
- Leistungsverbrauch kritisch!



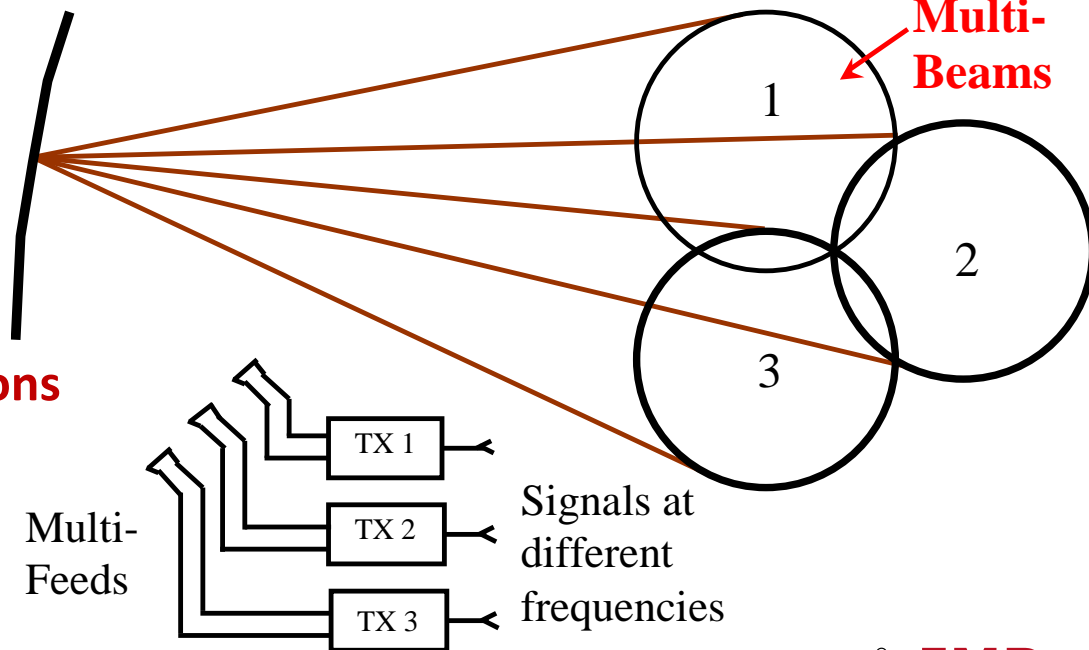
\_\_\_\_\_



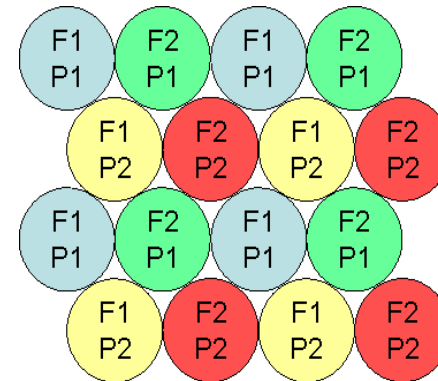
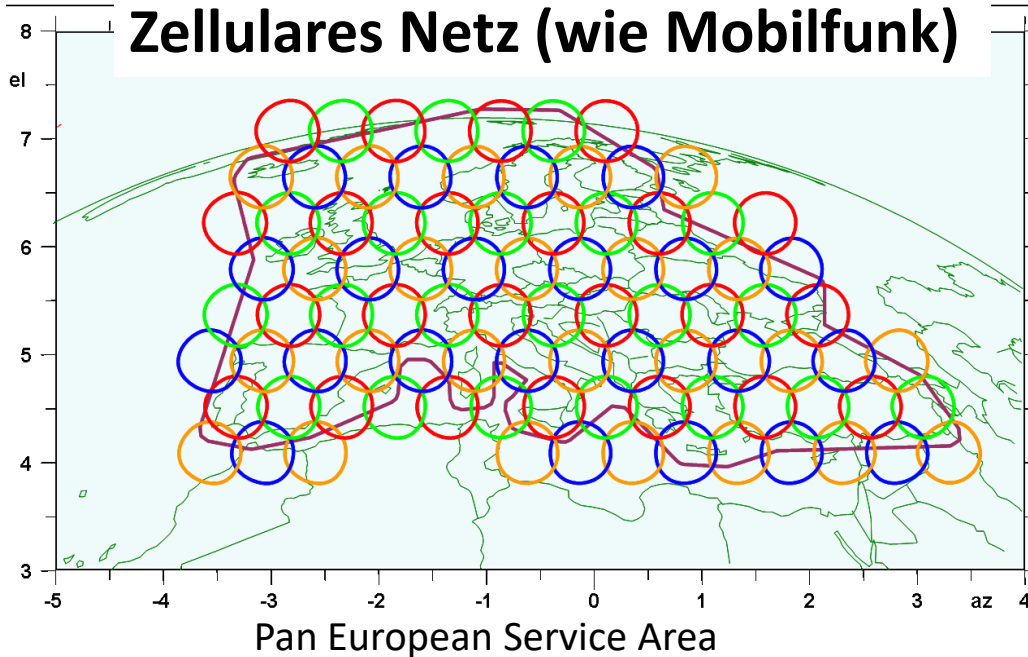
**1. same frequency/polarization**  
**➔ defined service area contour**

- spot beams with different frequencies/polarizations

➔ higher satellite capacity



# Multibeam-Multimode Antenna Concept High-Throughput Satellites (HTS)



$N_c = 4$  cluster size

Four Colour Topology



$$B_{tot} = \frac{P \cdot N_b}{N_c} \cdot B_w \text{ and } C_{sat} = \eta_s \cdot B_{tot}, \text{ where}$$

$P=1$  if polarization diversity is not employed and  $P=2$  for dual-pol. frequency reuse

$N_b$  is the number of beams of the satellite;  $N_c$  is the cluster size

$F_r = P \cdot N_b / N_c$  is the frequency reuse factor

$B_w$  is the bandwidth allocate to the satellite in Hz

$\eta_s$  is the spectral efficiency in bit/s/Hz of the modulation and coding scheme

**Tens of Gbit/s to several Tbit/s  
total throughput capacity of HTS**

# Warum immer höhere Frequenzen ?

## Auflösung(svermögen)

Sicherheitstechnik (Körperscanner, Radar), Bildgebung (Imaging), Radioastronomie..

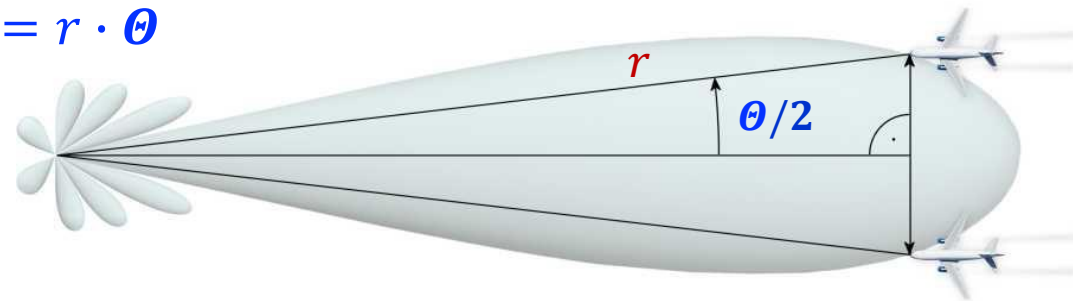
### Winkelauflösungsvermögen (spatial or angular resolution)

$$\Delta\theta \geq 2 \cdot r \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \approx 2 \cdot r \cdot \left(\frac{\theta}{2}\right) = r \cdot \theta$$

$$\Delta\theta \geq r \cdot k \cdot \frac{\lambda}{A}$$

Half-Power BeamWidth of an antenna

$$HPBW = \theta = k \cdot \frac{\lambda}{A}$$



Antenne mit  $A=30$  mm

$f$	10 GHz	100 GHz	1 THz	193 THz	600 THz
$\lambda$	30 mm	3 mm	0.3 mm	1.55 $\mu\text{m}$	0.5 $\mu\text{m}$
$\Delta\theta \sim \lambda/A$	1	0.1	0.01	$51.6 \cdot 10^{-6}$	$16.6 \cdot 10^{-6}$

Je größer die Antenne/Linse bezogen auf die Wellenlänge  $A/\lambda$  (für gleiche Entfernung  $r$  und Antennenbelegung  $k$ ), desto besser das Winkelauflösungsvermögen  $\Delta\theta$

im **optischen Bereich (600 THz)** a priori **6000 × besser** (schmäler) als **bei 100 GHz**



# Warum immer höhere Frequenzen ?

## Auflösung(svermögen)

Sicherheitstechnik (Körper-scanner, Radar), Bildgebung (Imaging), Radioastronomie..

### Entfernungsaufhebungsvermögen (range resolution)

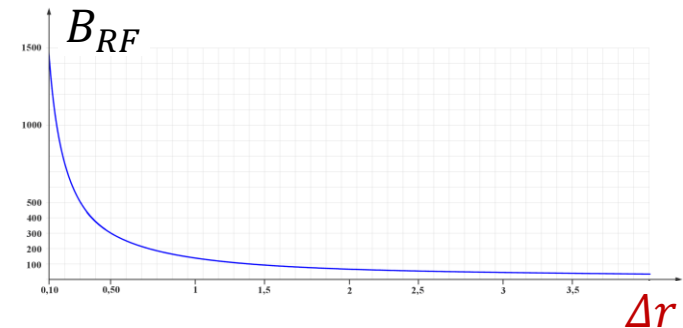
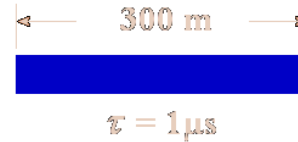
$$\Delta r \geq \frac{c_0}{2 \cdot B_{RF}} = \frac{\lambda_0}{2} \cdot \frac{f_0}{B_{RF}}$$

$$B_{RF} / f_0 = 1 \dots \frac{1}{4} \implies \Delta r = \lambda_0 / 2 \dots 2 \cdot \lambda_0$$

$f$	10 GHz	100 GHz	1 THz	193 THz	600 THz
$\lambda$	30 mm	3 mm	0.3 mm	1.55 $\mu\text{m}$	0.5 $\mu\text{m}$

Auflösung  $\Delta r$  im optischen Bereich a priori **6000 x besser** als bei 100 GHz

Räumliche Auflösung ist im Bereich der Wellenlänge: mmW zeigen deutlich schlechtere Auflösung als Optik, durchdringen aber Nebel und Schmutz!



Je höher die Frequenz (bei gleicher relativer Bandbreite  $B_{RF} / f_0$ ), desto besser das Entfernungsaufhebungsvermögen (Tiefenschärfe)

**Autonome Fahrzeuge: Sicherheitstechnik**

**Lidar:** Light detection and ranging

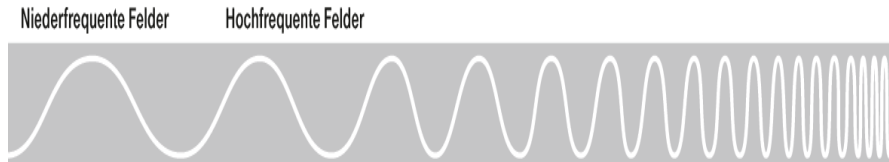
**Radar:** Radio detection and ranging



# Warum immer höhere Frequenzen?

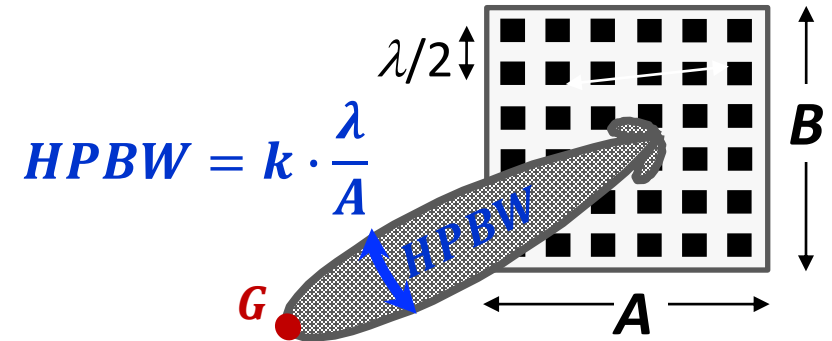
## Zusammenfassung

Kommunikation:  
5G/6G und Satelliten



höhere Trägerfrequenzen  $f_0$  oder  $f_c$   
 + große absolute RF-Bandbreiten  $B_{RF}$   
 + hohe Datenraten  $R_b = \varepsilon_s \cdot B_{RF}$

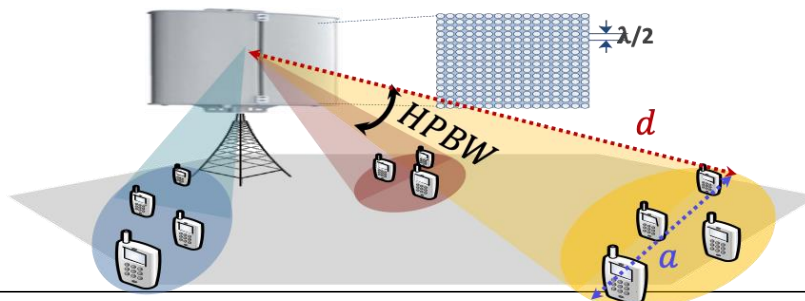
- hohe Freiraumausbreitungsdämpfung
- hohe Dämpfung (Atmosphäre, Regen, ...)
- höhere Infrastruktur(kosten)



$$HPBW = k \cdot \frac{\lambda}{A}$$

$$G = \varepsilon_{ap} \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A^2$$

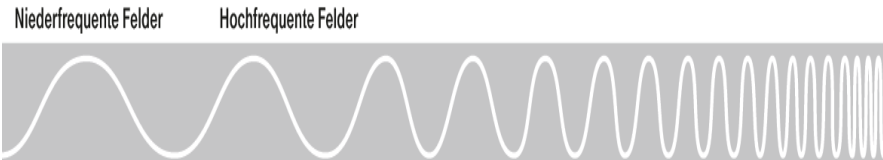
- + kompaktere Antennen (z.B. für Patch)
- + hoher Antennengewinn (Gain, G)
- + schmale 3dB-Keulenbreite (HPBW)
- + Ausleuchtzone mit Durchmesser  $a$   
 $\sim$  Entfernung  $d$  und  $\sim \lambda/A$



# Warum immer höhere Frequenzen?

## Zusammenfassung

### Bildgebung & Radar Radioastronomie

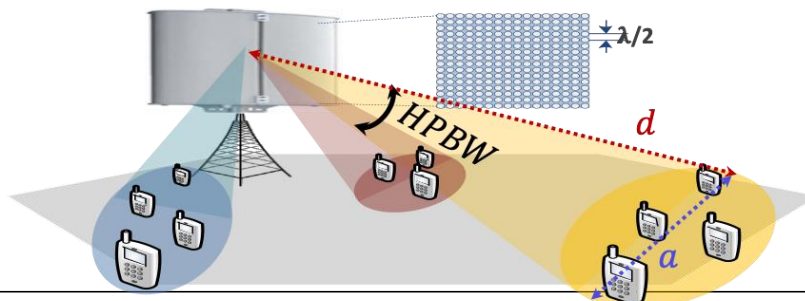


- höhere Trägerfrequenzen  $f_0$  oder  $f_c$
- + große absolute RF-Bandbreiten  $B_{RF}$
- + hohe Datenraten  $R_b = \varepsilon_s \cdot B_{RF}$

- hohe Freiraumausbreitungsdämpfung
- hohe Dämpfung (Atmosphäre, Regen, ...)
- höhere Infrastruktur(kosten)

- + hohe Entfernungsauflösung (range resolution)

$$\Delta r \geq \frac{c_0}{2 \cdot B_{RF}} = \frac{\lambda_0}{2} \cdot \frac{f_0}{B_{RF}}$$



$$HPBW = k \cdot \frac{\lambda}{A}$$

$$G = \varepsilon_{ap} \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A^2$$

- + kompaktere Antennen (z.B. für Patch)
- + hoher Antennengewinn (Gain, G)
- + schmale 3dB-Keulenbreite (HPBW)
- + Ausleuchtzone mit Durchmesser  $a$   
~ Entfernung  $d$  und ~  $\lambda/A$
- + hohe Winkelauflösungsvermögen (spatial or angular resolution)

$$\Delta \Theta \geq r \cdot \Theta = r \cdot k \cdot \frac{\lambda}{A}$$

# Danke für die Aufmerksamkeit

**Technische Universität Darmstadt (TUD)**

**Mikrowellentechnik (MWT)**

**Institut für Mikrowellentechnik und Photonik (IMP)**

Merckstrasse 25, 64283 Darmstadt, Tel.: +49 6151-16-28460, E-Mail: [rolf.jakoby@tu-darmstadt.de](mailto:rolf.jakoby@tu-darmstadt.de)



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

