
Ringvorlesung „Hochfrequenztechnik“

für Studierende der
Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik,
Mechatronik, Computational Engineering, Informatik,
Technomathematik, Energietechnik
im 2. und 4. Semester

25.Mai 2009, 10:15 – 11:15, H6



Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauß
(in Vertretung von Prof. Dr.-Ing. Lorenz-Peter Schmidt)
Dr.-Ing. Rainer Engelbrecht
Dipl.-Ing. Marcus Schramm

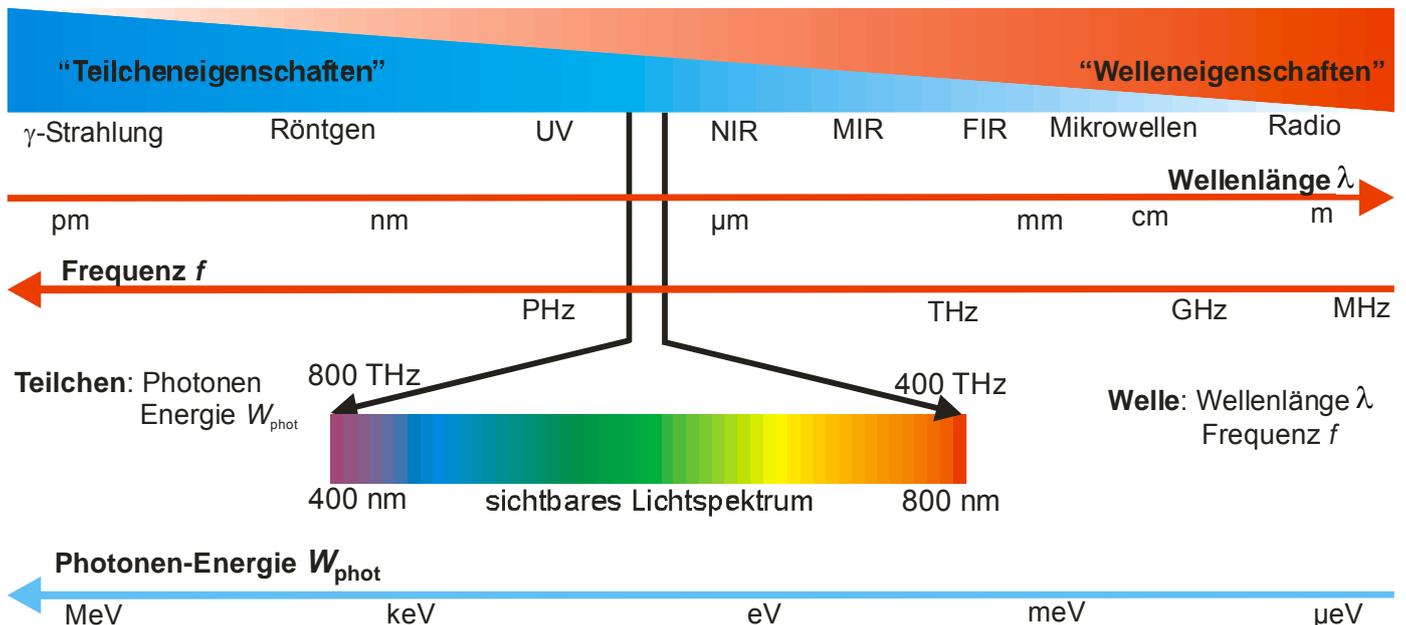
Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik (LHFT)



- Bedeutung und Einsatzbereiche der Hochfrequenztechnik
- Drahtlose Übertragung von Information
- Erzeugung und Nutzung von hohen Frequenzen mit hoher Leistung
 - Mikrowellenerwärmung, Laser
- Messen mit hohen Frequenzen
 - Radar, Fernerkundung, Umweltmesstechnik
- Hochfrequenztechnik im Studium
- Experimente
 - HF-Felder, Laser, Radar, ...

Elektromagnetisches Spektrum

- Je nach Bedarf Beschreibung durch „Welle“ oder „Teilchen“ anschaulicher
- "Welle": Frequenz $f = \text{Lichtgeschwindigkeit } c / \text{Wellenlänge } \lambda$
- "Teilchen": Photonenenergie $W_{\text{phot}} = \text{Frequenz } f \cdot \text{PLANCK-Konstante } h$



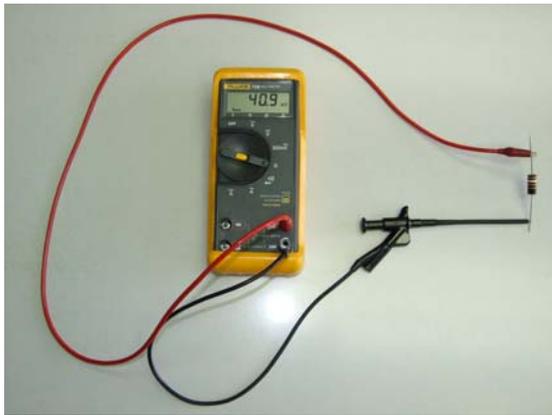
- Elektrisches und magnetisches Feld sind nicht mehr unabhängig voneinander, sondern miteinander verknüpft (→ Maxwell 1865)
- Elektromagnetische Wellen treten an die Stelle von Strom und Spannung
- Elektromagnetische Wellen können
 - Von Leitungen geführt werden (Koax, Hohlleiter, Mikrostreifenleitung, Glasfaser)
 - Sich von Leitungen ablösen (Antennen)
 - Sich im freien Raum oder in Stoffen ausbreiten
 - Leistung und Signale transportieren
 - In verschiedenen Stoffen unterschiedlich beeinflusst werden (Dämpfung, Wechselwirkung mit der Materie, Reflexion an Grenzschichten etc.)

Was ist „Hochfrequenztechnik“ ?

- Hochfrequenztechnik ist die Elektrotechnik der schnellen Vorgänge
 - In hochfrequenten Bauelementen, Schaltungen und Systemen spielen
 - Wellenausbreitungseffekte
 - Skineffekt
 - Laufzeiteffekte
 - Quanteneffekte
- eine wesentliche Rolle

Wellenausbreitung auf HF-Leitungen

DC:

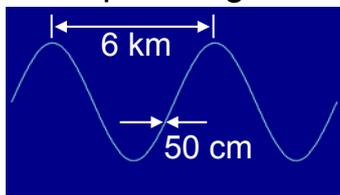


Widerstandsmessung ist unabhängig von der Leitungslänge

NF:

$$U_{\text{Leitungsanfang}} = U_{\text{Leitungsende}}$$

Bsp: 50 kHz-Spannung $\rightarrow \lambda = 6 \text{ km}$



HF:

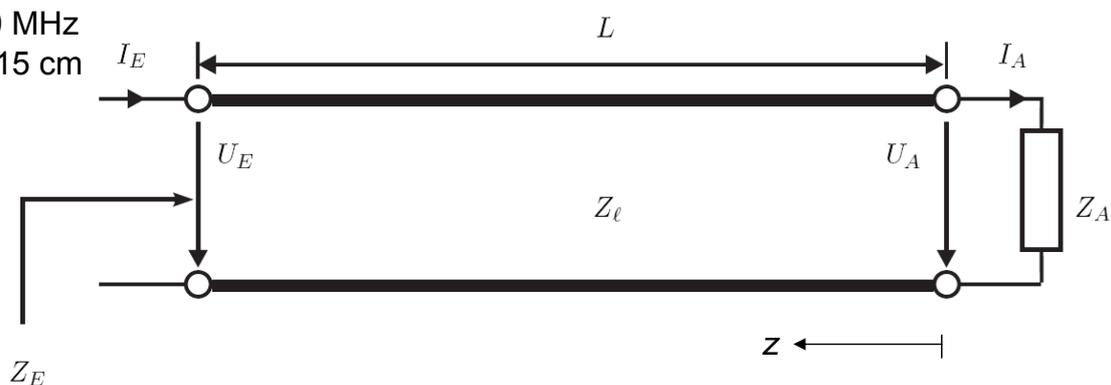


Bsp: GSM-Mobilfunk: $f = 900 \text{ MHz}$
 $\rightarrow \lambda = 33 \text{ cm}$
 \rightarrow Bauteilgrößen rücken in den Bereich einer Wellenlänge!

! Leitung zeigt impedanztransformierende Eigenschaften!

Wellenausbreitung auf HF-Leitungen

z.B. $f = 100 \text{ MHz}$
 $\lambda/4 = 15 \text{ cm}$

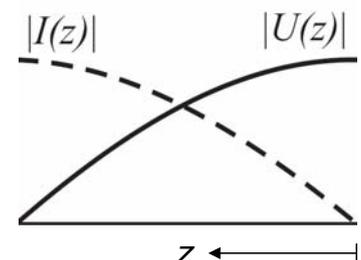


Transformation einer Impedanz über eine Leitung der Länge $L = \lambda / 4$ in die Impedanz $Z_E = Z_{\ell}^2 / Z_A$

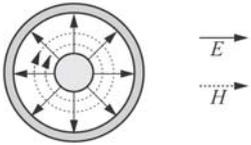
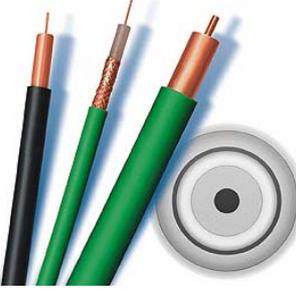
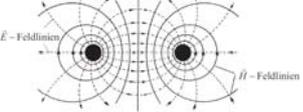
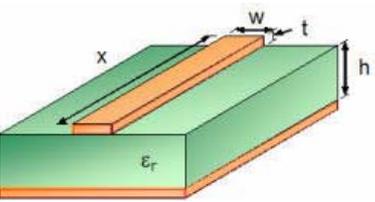
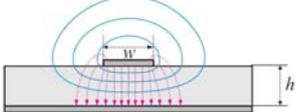
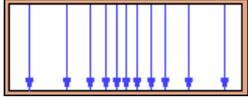
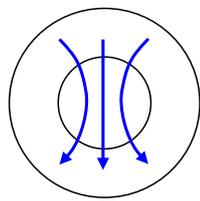
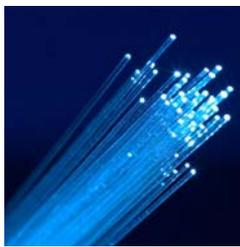
Beispiele:

- Z_A induktiv $\rightarrow Z_E$ kapazitiv
- Z_A kapazitiv $\rightarrow Z_E$ induktiv
- Z_A Kurzschluss $\rightarrow Z_E$ Leerlauf
- $Z_A = 0,1 \text{ M}\Omega$ $\rightarrow Z_E = 0,1 \Omega$ (bei $Z_1 = 100 \Omega$)

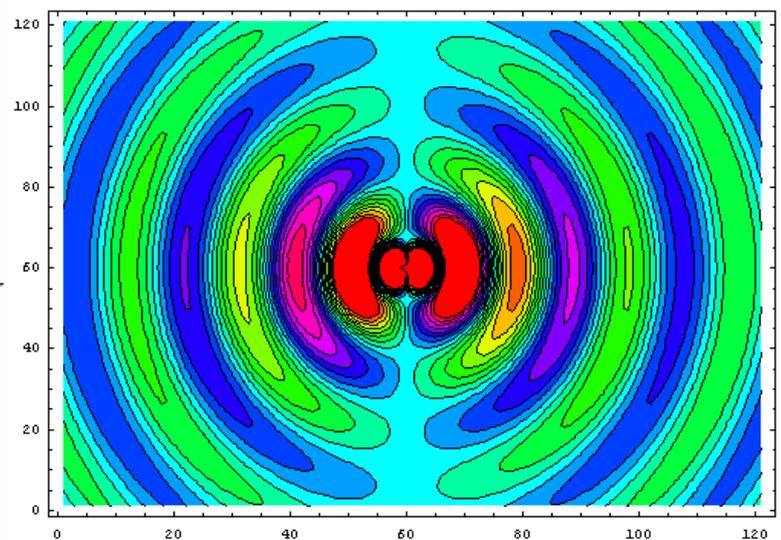
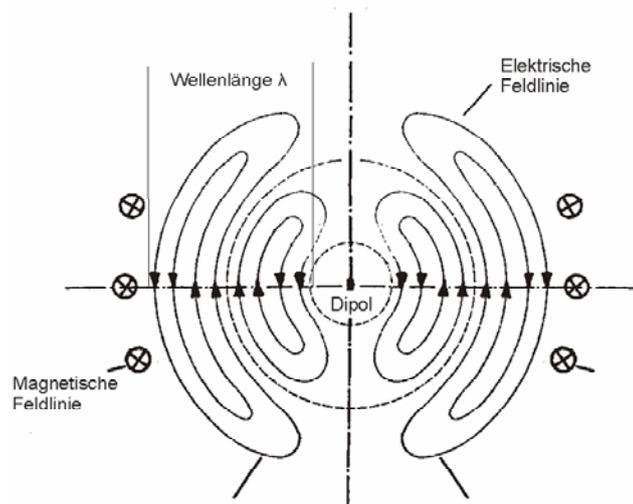
Ortsabhängigkeit von Spannungs- bzw. Stromamplitude für $Z_A = \infty$:



Elektromagnetische Wellenleiter

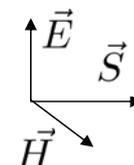
| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  | <p>Mikrostreifenleitung →</p> <p>2-Draht-Leitung:</p>  <p>← Koaxialleitung</p> |   |
|  |  |  <p>Rechteck- und Rundhohlleiter</p> | |
|  |  <p>← Glasfaser</p> | <p>Dielektrische Leitung →</p> |  |

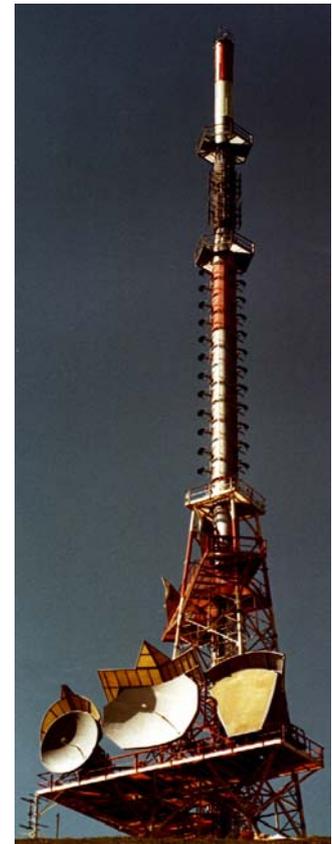
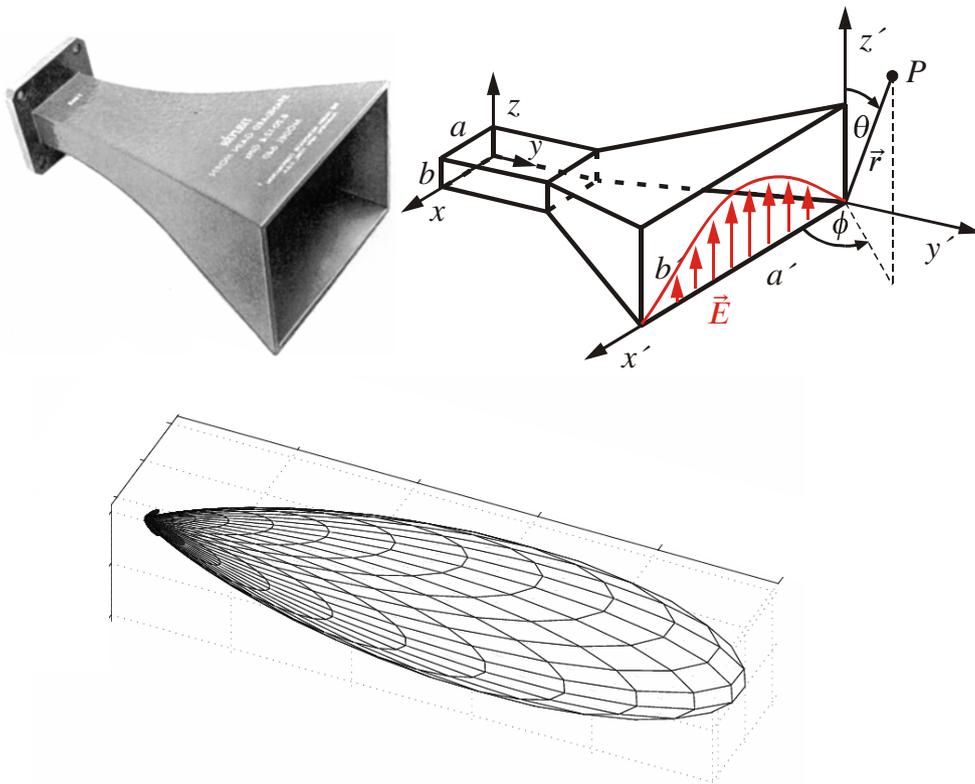
Feldlinien eines elektrischen Elementardipols



Maß für die transportierte Leistung:
Poynting-Vektor

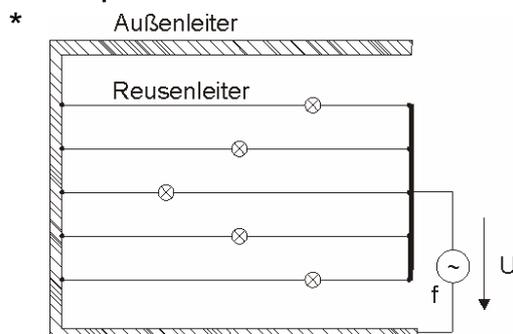
$$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^*$$



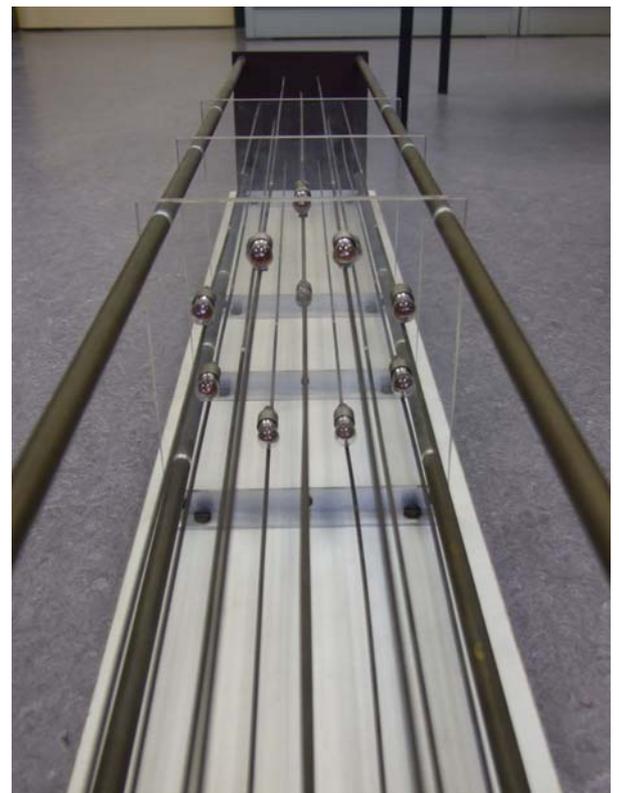


HF-Phänomene: Skin-Effekt

- Verdrängung der Stromdichte an den Rand eines Leiters mit wachsender Frequenz
- Demonstration: Draht-Modell, bestehend aus
 - * Reusenleiter mit 13 Drähten
 - * 4 Messingstäbe zur Rückleitung
 - * Frequenzabstimmbarer Generator



- Glühlämpchen zeigen Stromfluss in den Reusen-Drähtchen an
- **Wie viele Lämpchen leuchten bei höheren Frequenzen?**



HF-Phänomene: Proximity-Effekt

- Nicht-rotationssymmetrische Geometrie der Leiteranordnung
- Auswirkung des Skin-Effekts bei benachbarten Leitern:
 - Konzentration der Stromdichte an der Stelle mit dem kleinsten Leiterabstand bei antiparallelen Stromflüssen
 - Kleinste Stromdichte an der Stelle mit dem kleinsten Leiterabstand bei parallelen Stromflüssen

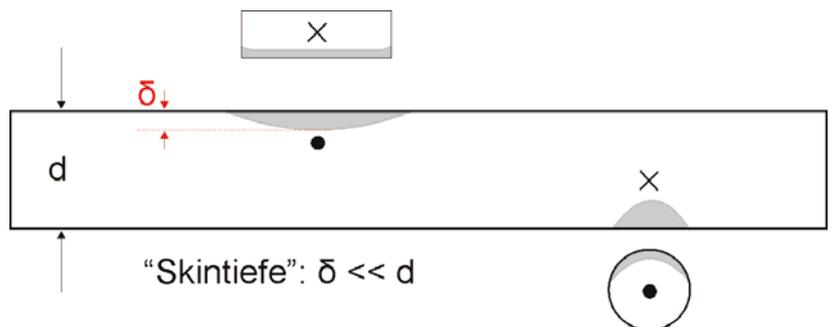
→ Beispiel 1: Antiparallel



→ Beispiel 2: Parallel

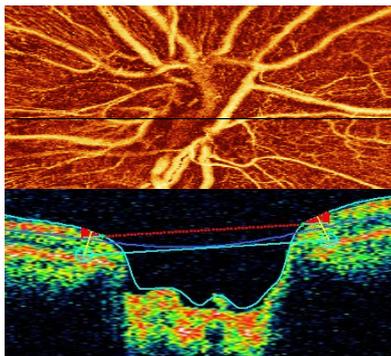
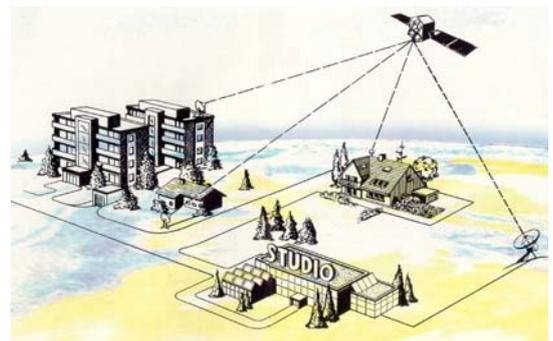


→ Beispiel 3: Zwei Seiten einer dicken Metallplatte sind entkoppelt!



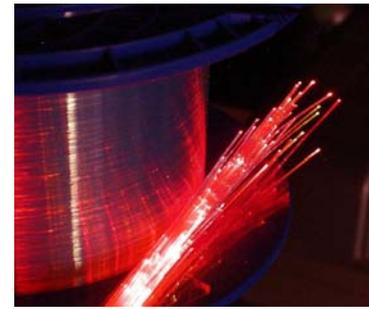
Einsatz der Hochfrequenztechnik

- Übertragung von Information
- Applikation von Energie
- Gewinnung von Messwerten



Einsatz der Hochfrequenztechnik

- **Übertragung von Information**
- Applikation von Energie
- Gewinnung von Messwerten



- Rundfunk
- Richtfunk
- Mobilfunk
- Telemetrie
- Optische Nachrichtenübertragung
- Satelliten- und Weltraumkommunikation

Einsatz der Hochfrequenztechnik

- Übertragung von Information
- **Applikation von Energie**
- Gewinnung von Messwerten



- Härten von Metallen
- Schweißen von Kunststoffen
- Lasermaterialbearbeitung
- Anregung von Gaslasern und Energiesparlampen
- Lebensmittelerwärmung im Mikrowellenherd
- Beschleunigung von Elektronen und Ionen

Einsatz der Hochfrequenztechnik

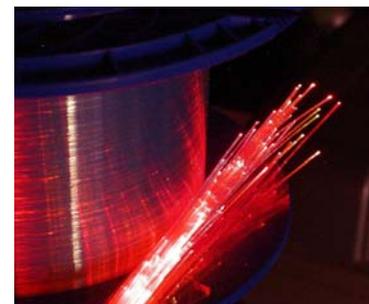
- Übertragung von Information
- Applikation von Energie
- **Gewinnung von Messwerten**



- Navigation (GPS)
- Radar in der Luftraumüberwachung und zur Abstandsmessung
- Fernerkundung im Umweltschutz
- Radioastronomie
- Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung
- Kernspin-Tomographie in der medizinischen Diagnostik
- Optische Sensorik

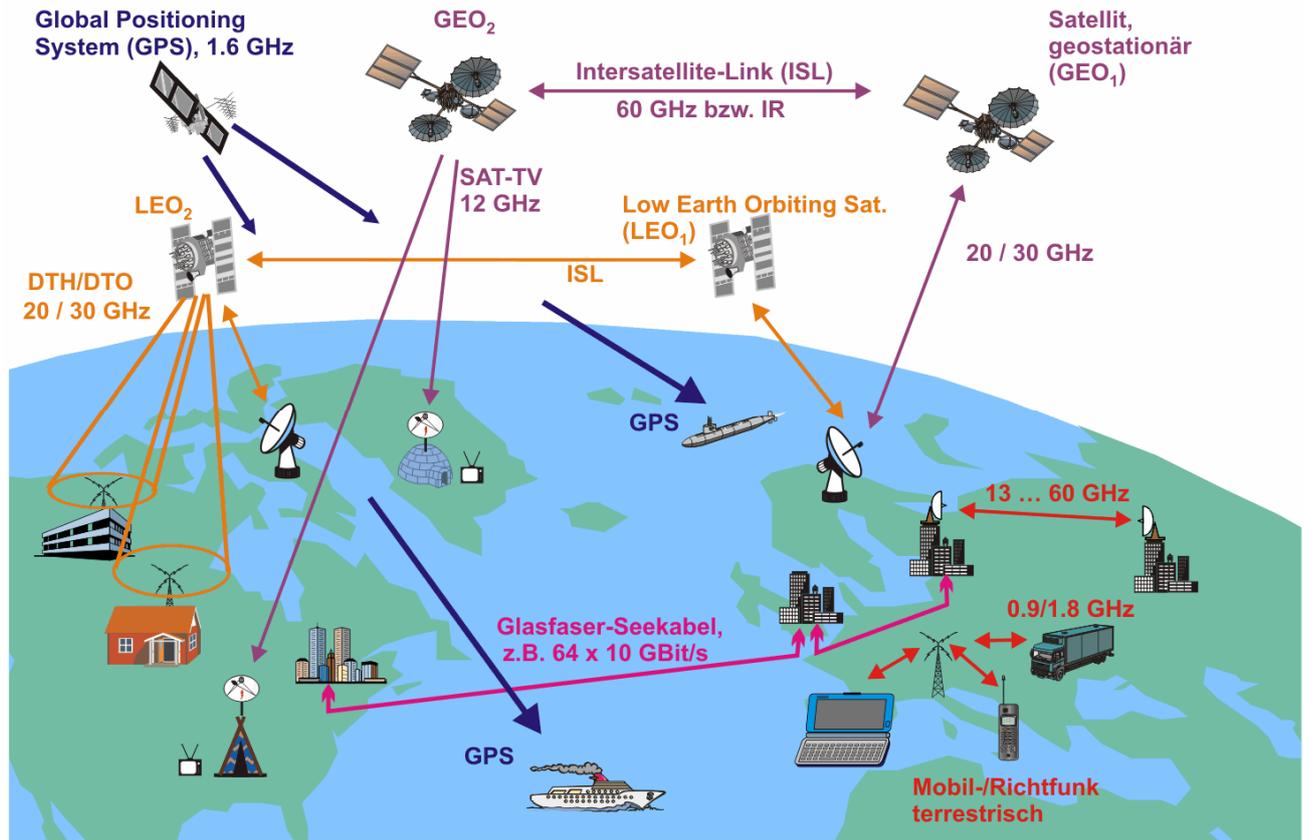
Einsatz der Hochfrequenztechnik

- **Übertragung von Information**
- Applikation von Energie
- Gewinnung von Messwerten

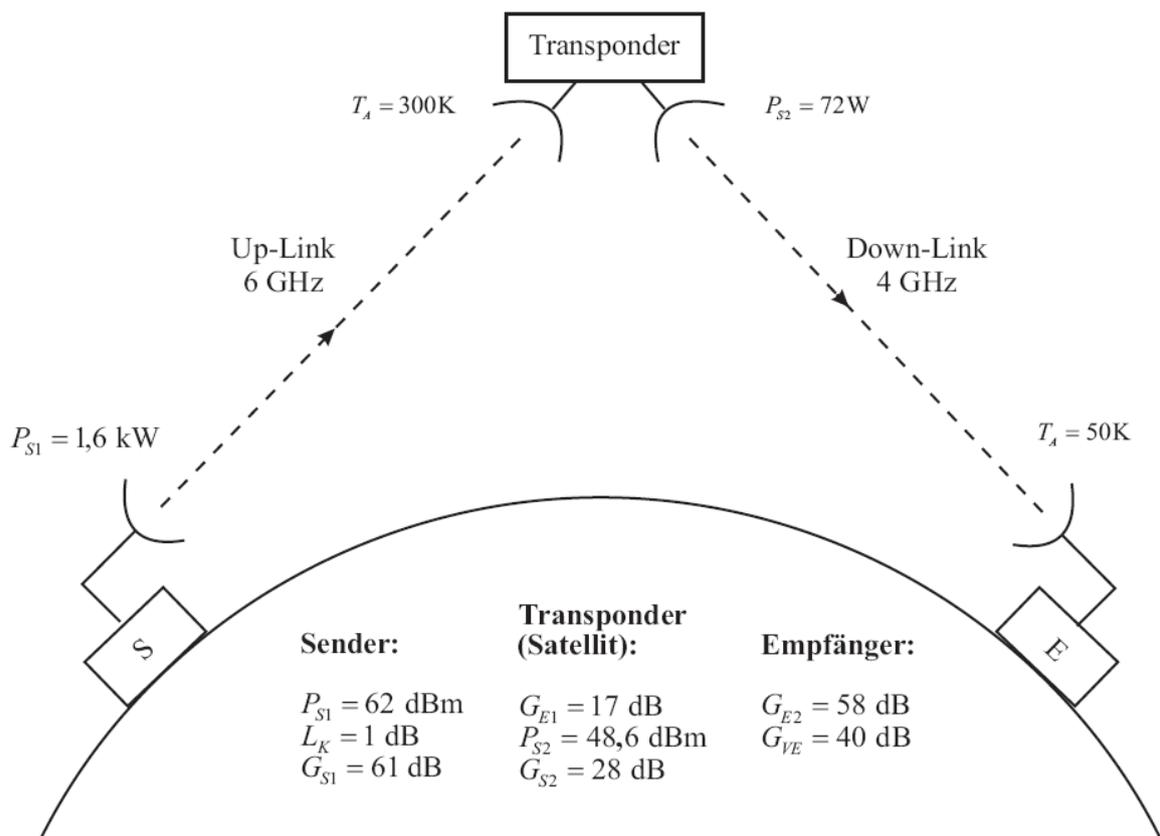


- Rundfunk
- Richtfunk
- Mobilfunk
- Telemetrie
- Optische Nachrichtenübertragung
- Satelliten- und Weltraumkommunikation

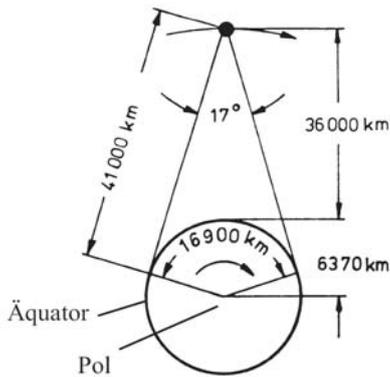
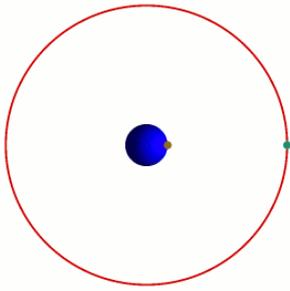
Systeme der Mobil- und Breitbandkommunikation



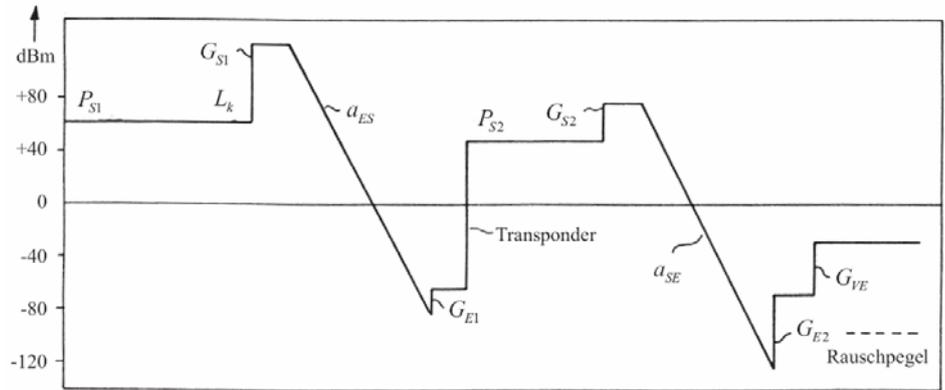
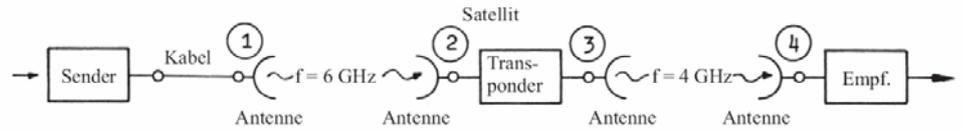
HF-Technik als Grundlage der Satellitenübertragung



HF-Technik als Grundlage der Satellitenübertragung

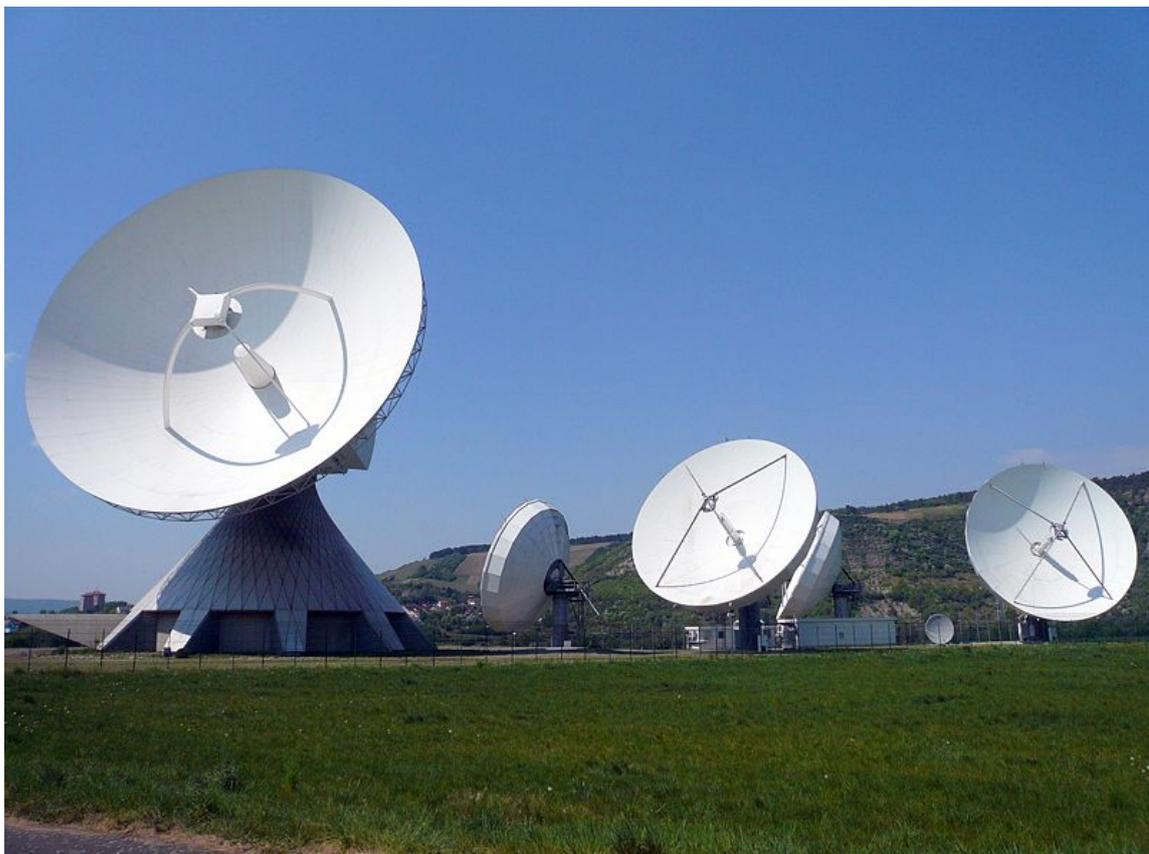


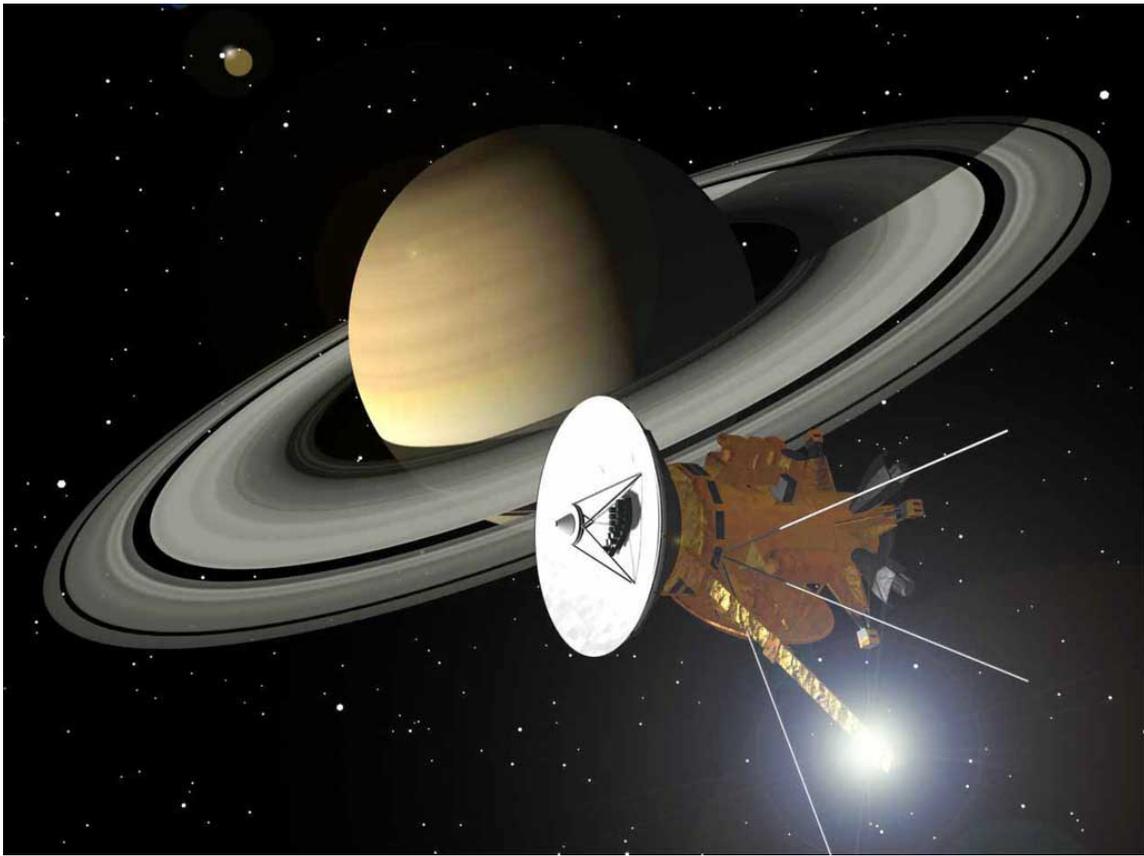
Bahndaten geostationärer Satelliten



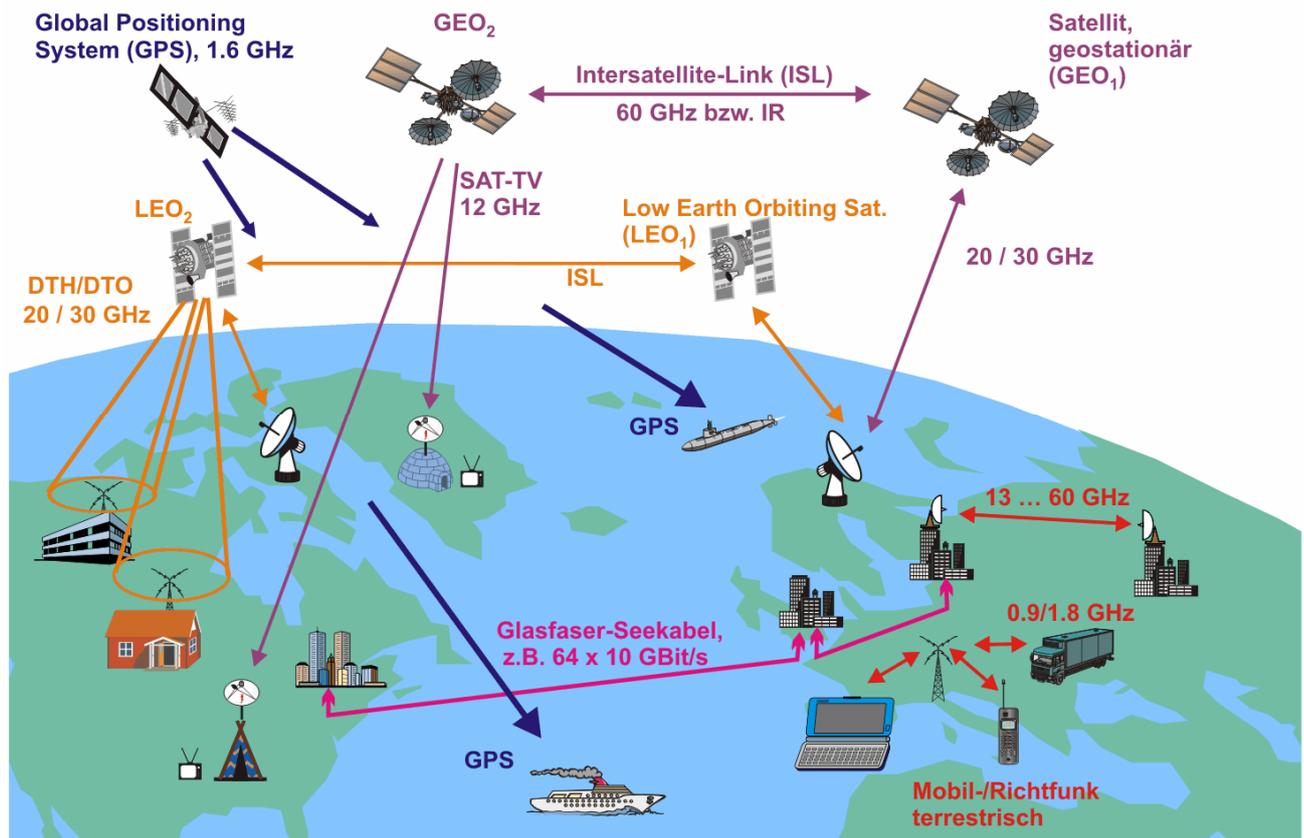
Satellitenübertragungssystem mit Pegelplan

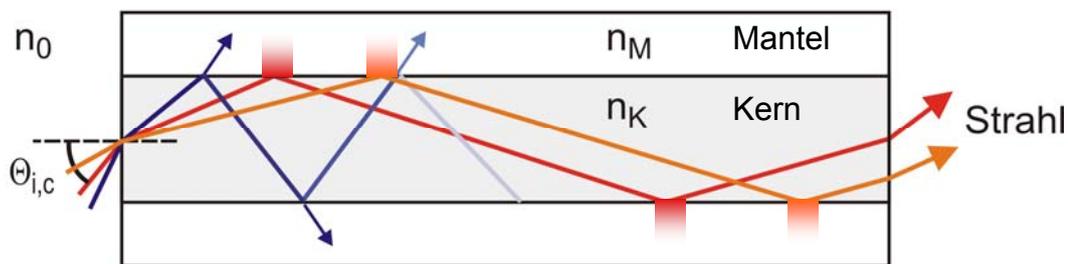
Erdfunkstelle Fuchsstadt





Systeme der Mobil- und Breitbandkommunikation





- Totalreflexion an der Kern-Mantelgrenzschicht, Brechungsindizes Kern $n_K > n_M$ Mantel

- Brechung an der Stirnseite, Brechungsgesetz

- Grenzwinkel, max. Eintrittswinkel für geführte Lichtstrahlen: $\Theta_{i,c} = \arcsin\left(\frac{1}{n_0} \sqrt{n_K^2 - n_M^2}\right)$

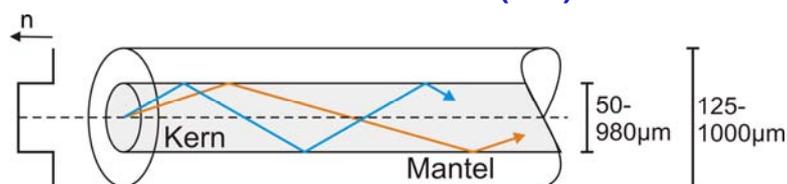
- Charakteristische Größe: Numerische Apertur

$$NA = \sin \Theta_{i,c} = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_K^2 - n_M^2}$$

- Evaneszente Felder: Bei Totalreflexion dringt das Lichtfeld etwas in den Mantel ein ($d < \lambda$)

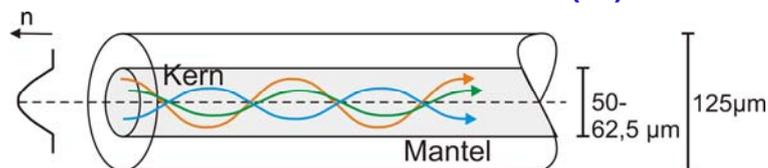
Optische Standard-Fasern: Bauformen

Stufenindex-Multimode-Fasern (MM)



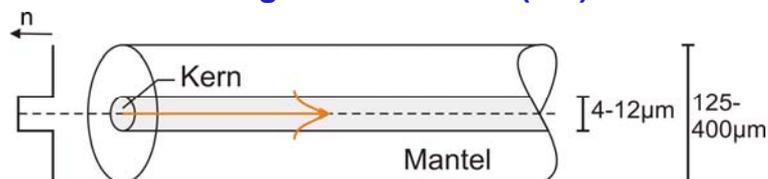
- Einfache Verbindungstechnik, preiswert, für hohe Leistungen
- Multimodig: Mäßige Strahlqualität
- Moden-Dispersion: Mäßige Bandbreite, große Pulsverzerrung

Gradientenindex-Multimode-Fasern (GI)



- Geringe Moden-Dispersion: Gute Bandbreite, mäßige Pulsverzerrung
- Multimodig: Mäßige Strahlqualität
- Für Messtechnik und optische Datenübertragung

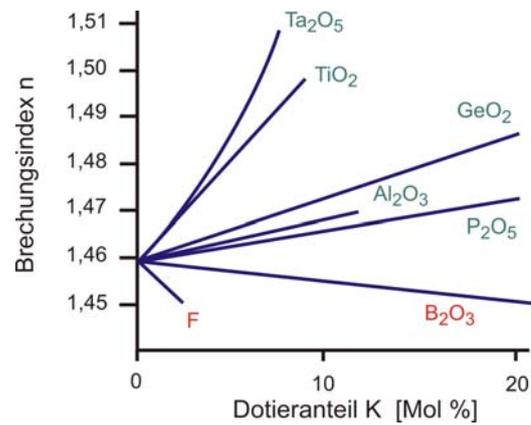
Stufenindex-Singlemode-Fasern (SM)



- Keine Moden-Dispersion: Hohe Bandbreite, geringe Pulsverzerrung
- Monomodig: Beste Strahlqualität
- Für optische Datenübertragung, Sensorik, Faserlaser

Quarzglasfasern:

- Basis: Hochreines SiO_2 -Glas
- Kern mit GeO_2 dotiert
- Alternativ: Mantel Fluor-dotiert
- Für MM-, GI- und SM-Fasern
- Geringste Dämpfung



Polymer-clad silica (PCS):

- Kern: Hochreines SiO_2 -Glas
- Mantel: z.B. Fluor- oder Silikon-Polymer
- Einfachere Herstellung, mäßige Dämpfung



Bild: CeramOptec

Polymer optische Faser (POF):

- Kern: Acrylglas ("Plexiglas"), PMMA
- Mantel: z.B. Fluor-Polymer
- Preisgünstig, sehr flexibel, hohe Dämpfung

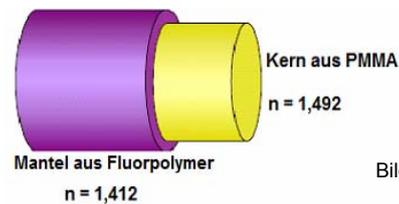
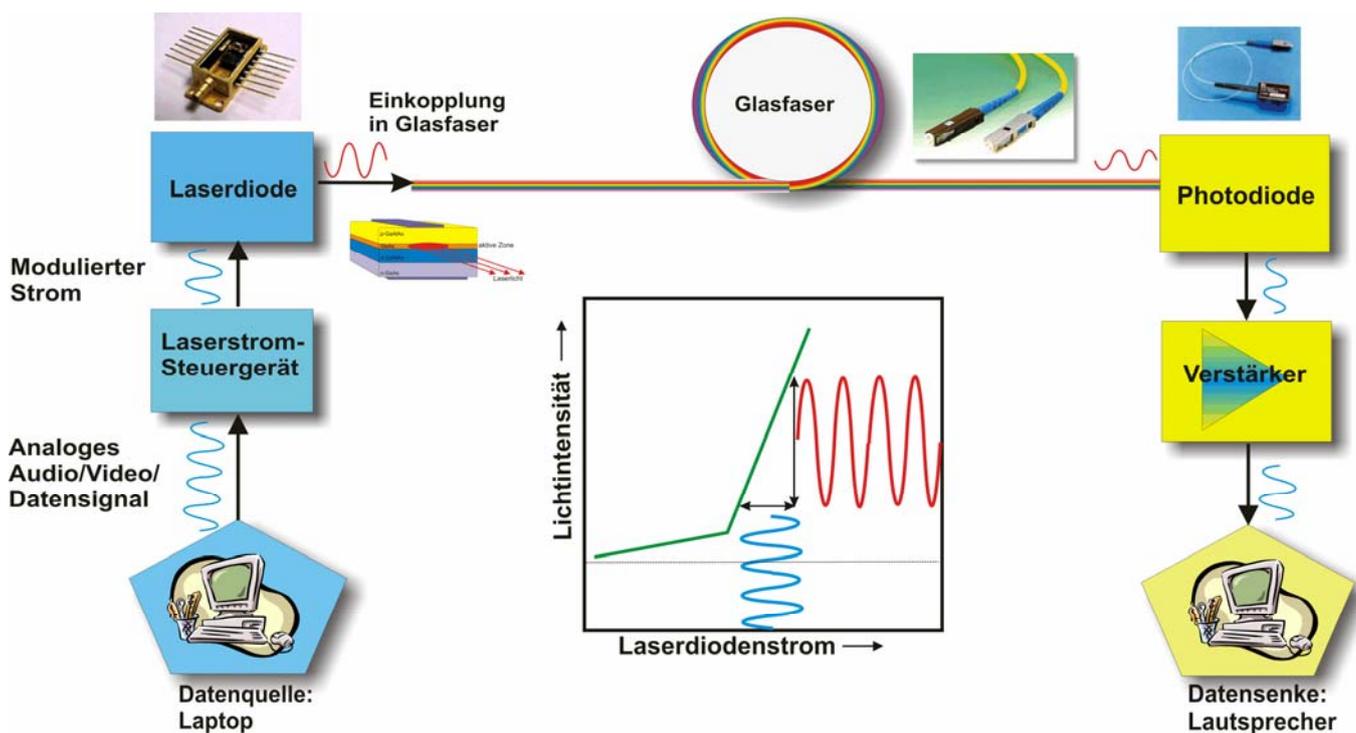
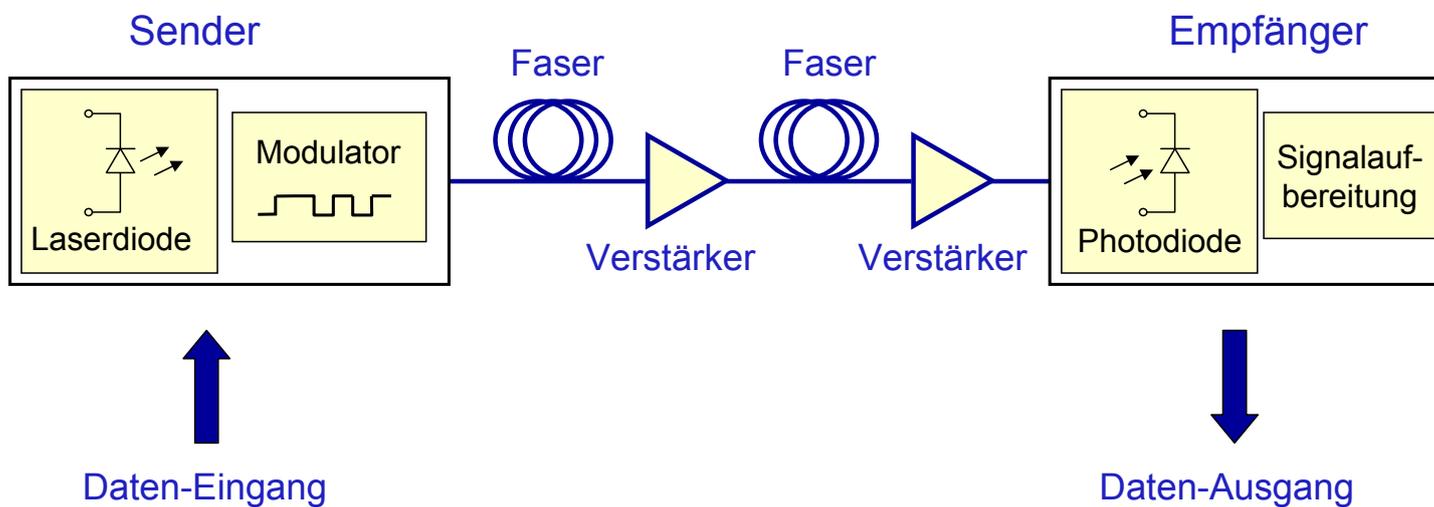


Bild: POF-AC, FH Nbg.

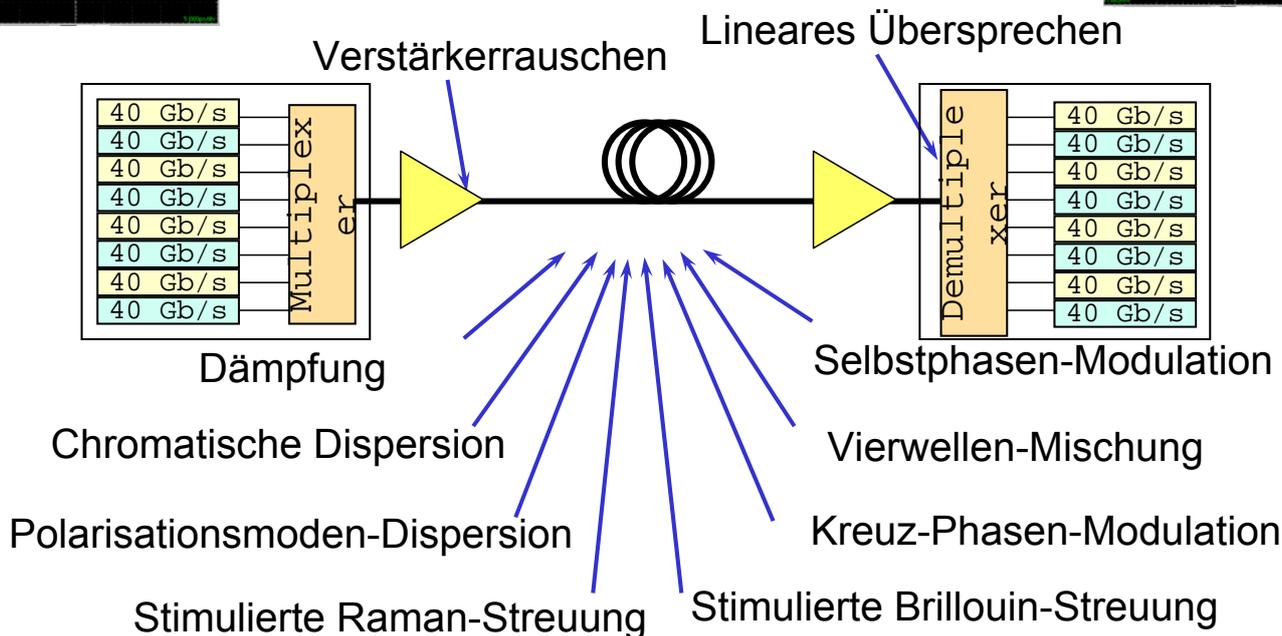
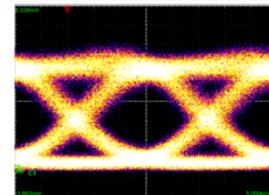
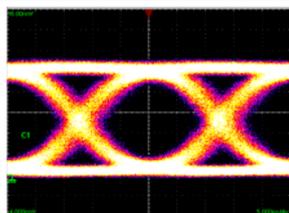
Analoge Übertragung von Audiosignalen über eine Glasfaser



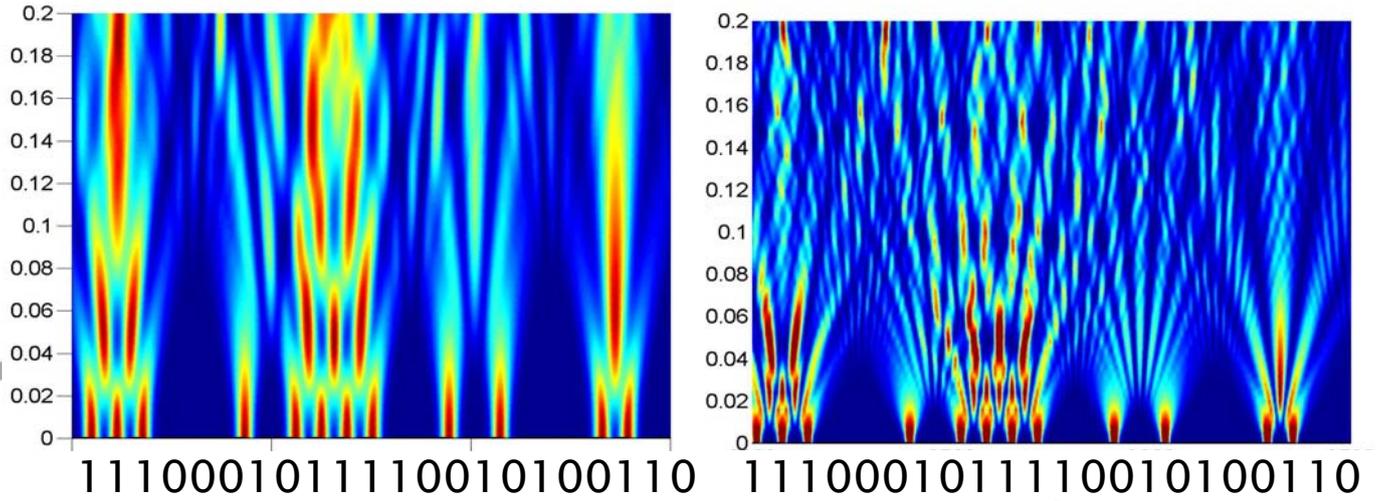
Optische Datenübertragung



Link Desing

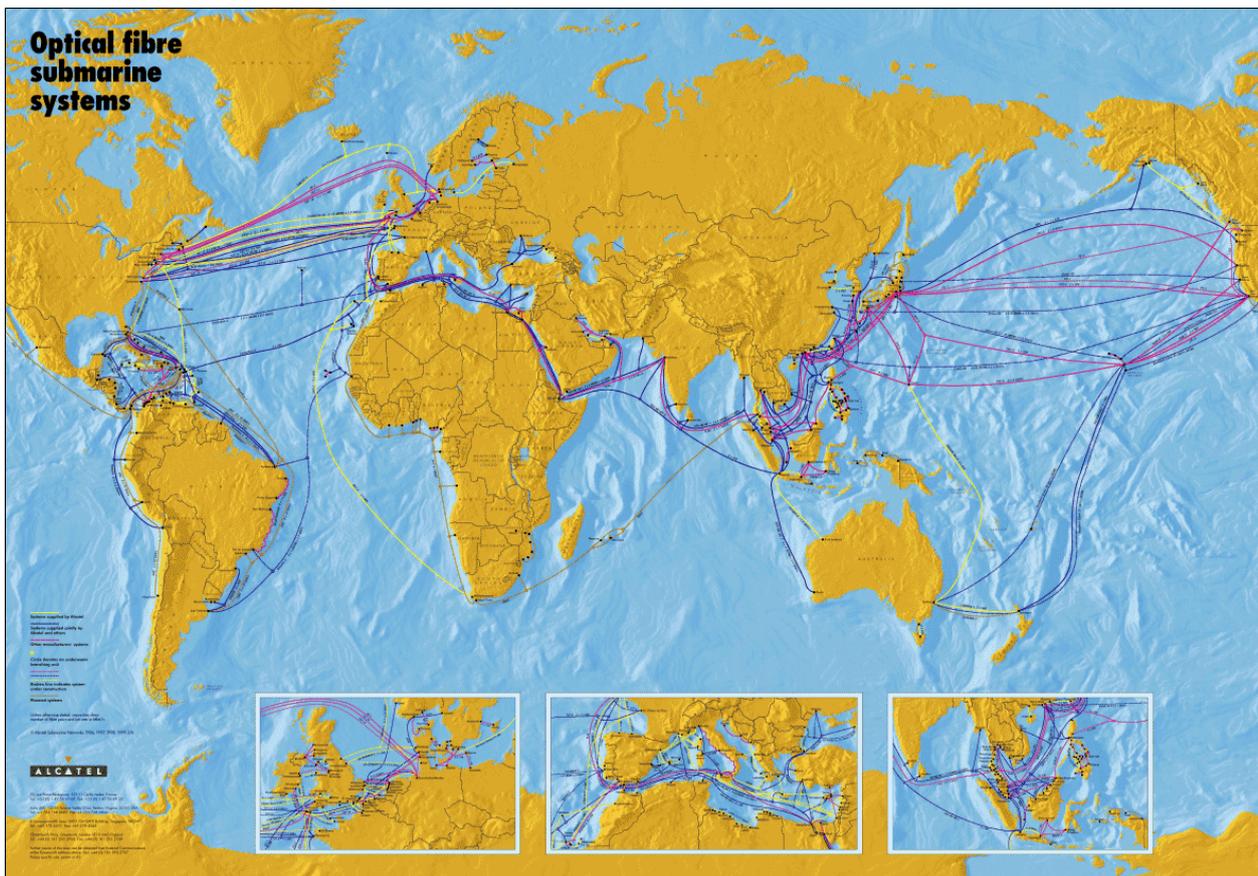


Ultra High Speed Transmission at 160Gbit/s

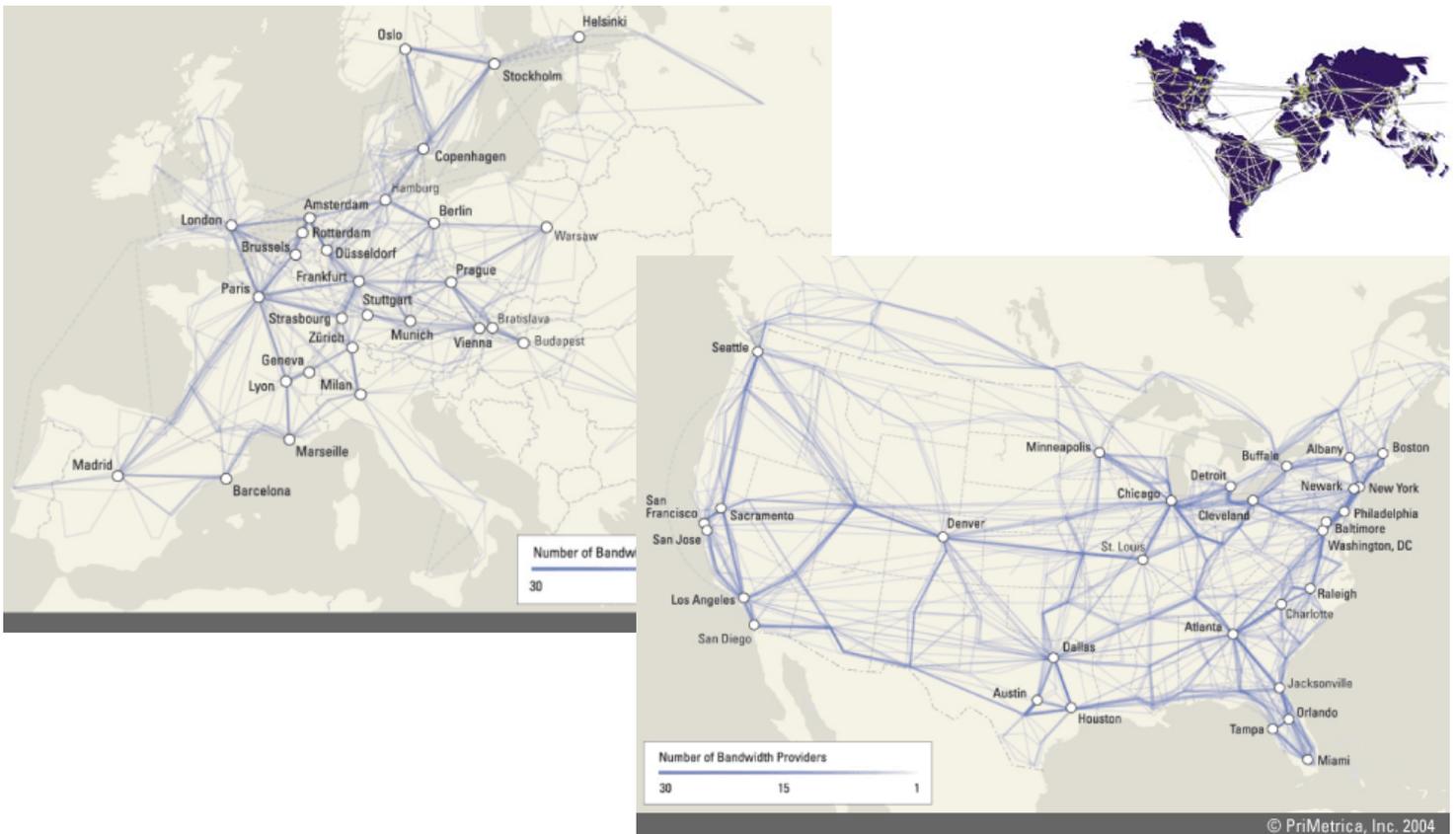


Pulsausbreitung bei unterschiedlicher Pulsbreite
Einfluss der chromatischen Dispersion

Interkontinentale submarine Glasfaser-Verbindungen



Terrestrische Weitverkehrsverbindungen



Einsatz der Hochfrequenztechnik

- Übertragung von Information
- **Applikation von Energie**
- Gewinnung von Messwerten



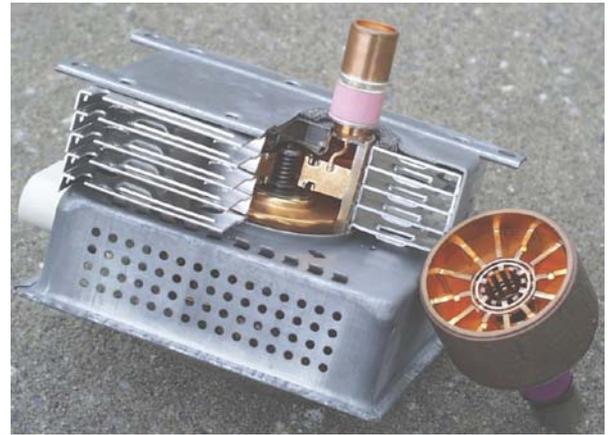
- Härten von Metallen
- Schweißen von Kunststoffen
- Lasermaterialbearbeitung
- Anregung von Gaslasern und Energiesparlampen
- Lebensmittelerwärmung im Mikrowellenherd
- Beschleunigung von Elektronen und Ionen



Mikrowellengeneratoren

Magnetron

- Hocheffizienter Oszillator im GHz-Bereich
- Nutzung des Laufzeiteffekts
- Gekreuzte elektromagnetische Felder
- z.B. bei der ISM-Frequenz $f = 2,45 \text{ GHz}$
- Mittlere Leistungen: $P = 0,3 \dots 10 \text{ kW}$
(Küche: ca. 600 W)
- Pulsleistungen MW-Bereich möglich



Beispiele:

Panasonic 2M137



Frequenz 2,45 GHz
Leistung 1,26 kW
Anode 4,5 kV / 400 mA
Heizung 4,4 V / 14 A
Kühlung 1700 l/min Luftstrom
Wirkungsgrad 70 % !

→ Küchenmagnetron

e2v M5028

Frequenz 2,856 GHz
Leistung 5,5 MW
Anode 55 kV / 265 A
Pulsdauer 2,3 μs
Wiederholrate 4,2 ms
Wirkungsgrad 37 %

→ Linearbeschleuniger



Industrielle Mikrowellenöfen

Mikrowellenofen mit Bandvorschub



- HF-Leistung: 8 kW
- 10 Magnetrons mit je 800 W
- Vorschubband
- Anwendung: z.B. Sterilisierung von Korken

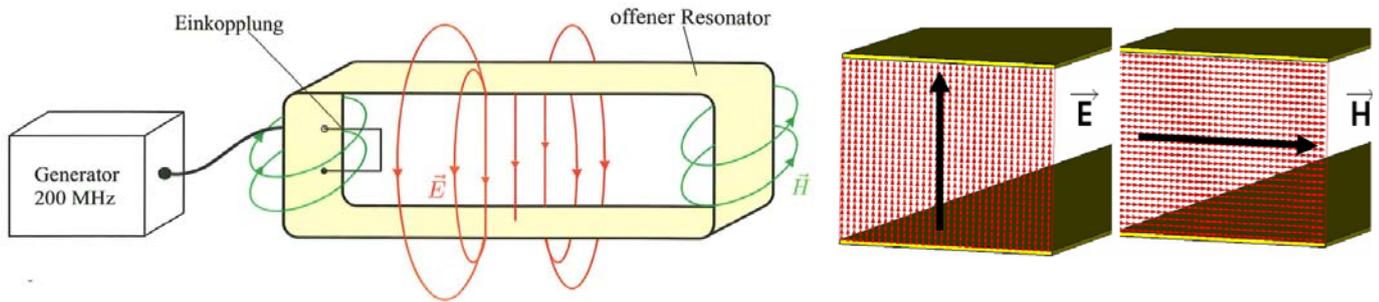
Mikrowellenofen mit Rolltor



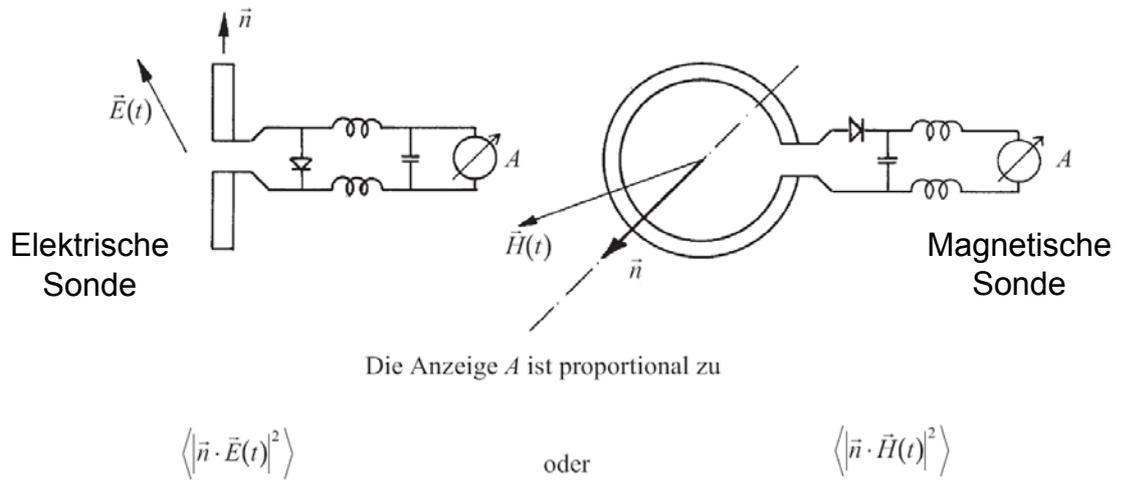
- HF-Leistung: 25 kW
- 32 Magnetrons mit je 800 W
- Rolltor
- Anwendung: z.B. Trocknen von Keramiken

Kontaktloser Leistungstransport mit elektromagn. Feldern

Experiment: Anregung einer Leuchtstoffröhre im Feld einer Bandleitung



Sondengeometrien:

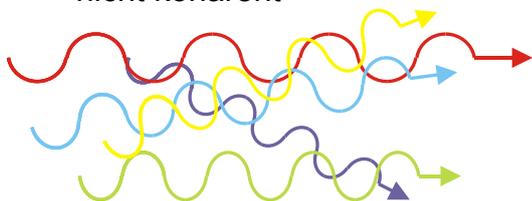


Laserlicht

Alltägliche Lichtquellen:



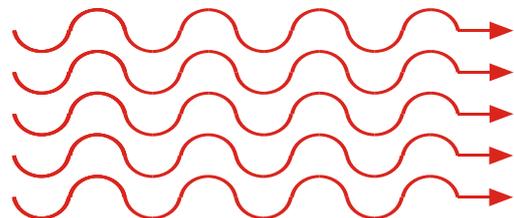
- emittieren breites Spektrum,
- „weißes Licht“
- Lichtleistung mW ... W
- ungerichtete Abstrahlung
- nicht kohärent



• Laser:



- monochromatisch
- Lichtleistung mW ... MW
- gerichtete Abstrahlung, „Laserstrahl“
- kohärent: räumlich und zeitlich in Phase



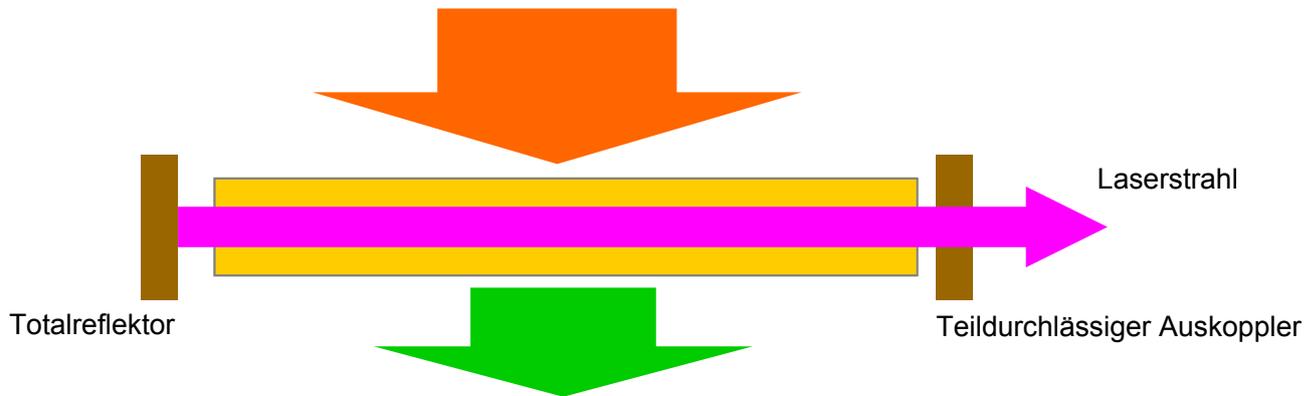
Laser: Aufbau

Optischer Resonator:

- Licht-Rückkopplung durch Spiegel
- Auskoppeln durch teildurchlässigen Spiegel
- Legt Strahlachse und -form fest

Pumpe:

- Energiequelle, Anregung des aktiven Mediums
- Kann sein: - Elektrisch: Strom, Gasentladung
- Optisch: Spezielle Lampen, Laser



Aktives Medium:

- Gas, Flüssigkeit, Festkörper, Halbleiter
- Lichtverstärkung durch stimulierte Emission
- Legt Laserwellenlänge fest (Energie-Niveaus)

Kühlung:

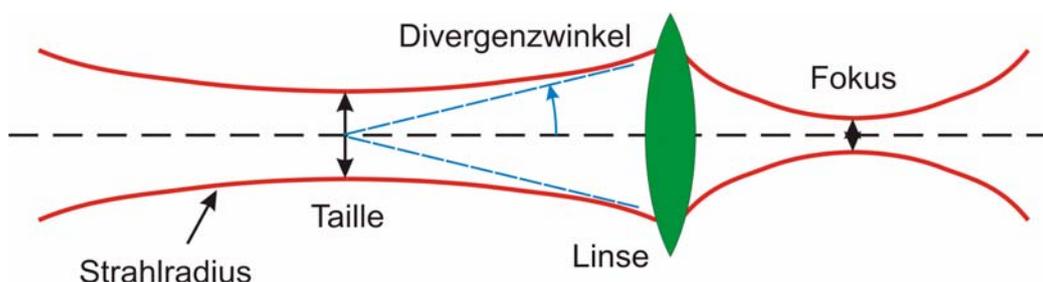
- Führt nicht in Laserstrahlung umgesetzte Pumpleistung ab
- Verhindert Aufheizung

Laser - Strahlqualität

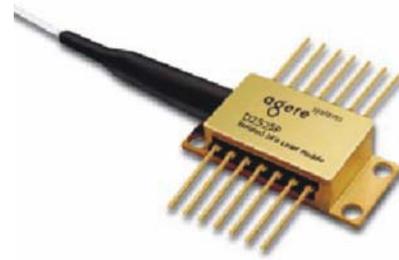
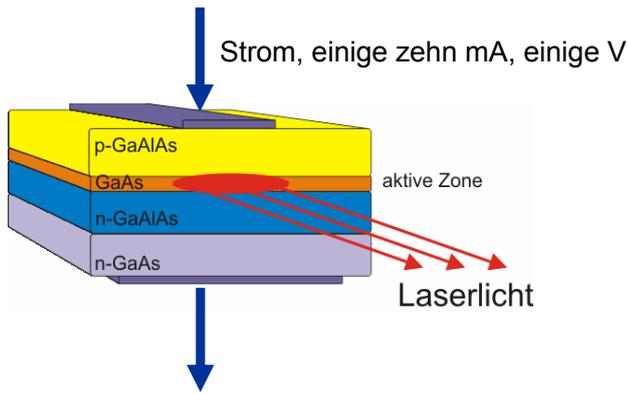
- Wunschvorstellung:**
- Beliebig dünner "Strahl", der sich ohne Aufweitung ausbreitet
 - Auf beliebig kleinen "Brennpunkt" fokussierbar



- Real:**
- Unvermeidliche Aufweitung des Strahles (phys. Prinzip der Beugung)
 - Aufweitung (Divergenz q) um so stärker, je kleiner die dünnste Stelle (Tailenradius w_0)



Halbleiter-Diodenlaser



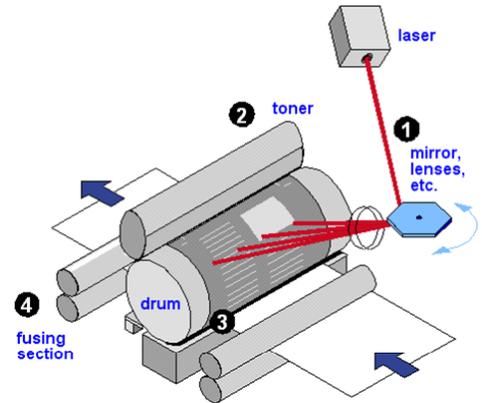
Laser für die optische Kommunikationstechnik



Laserpointer



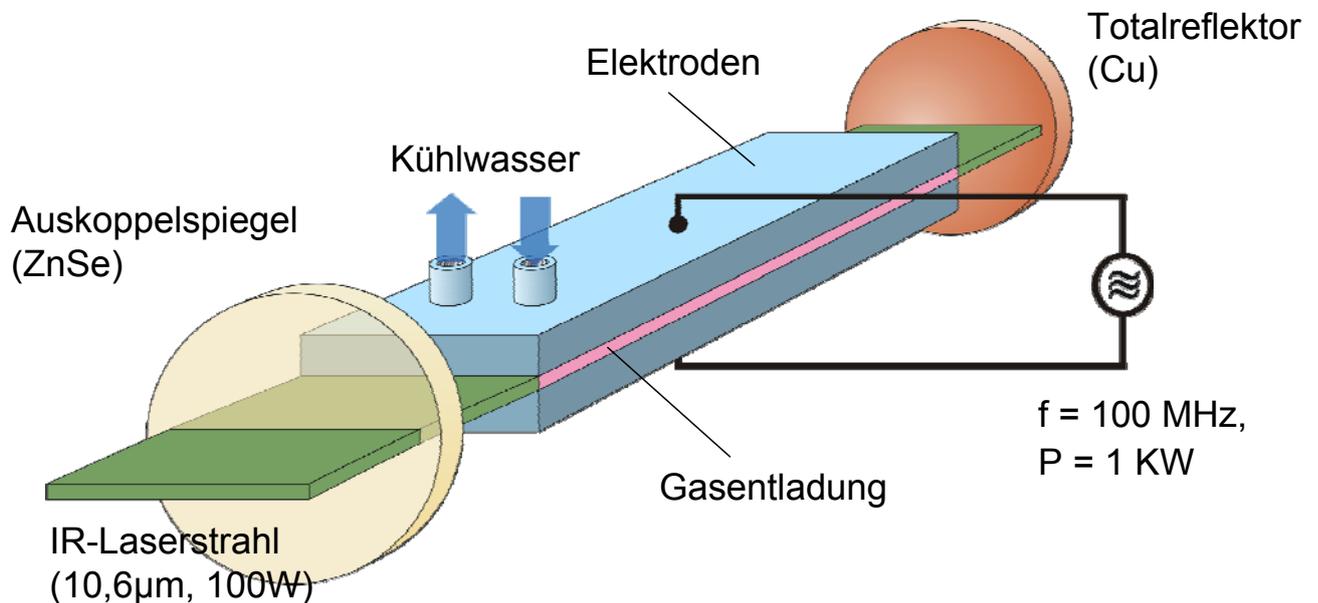
Optische Speicherlaufwerke



Laserdrucker

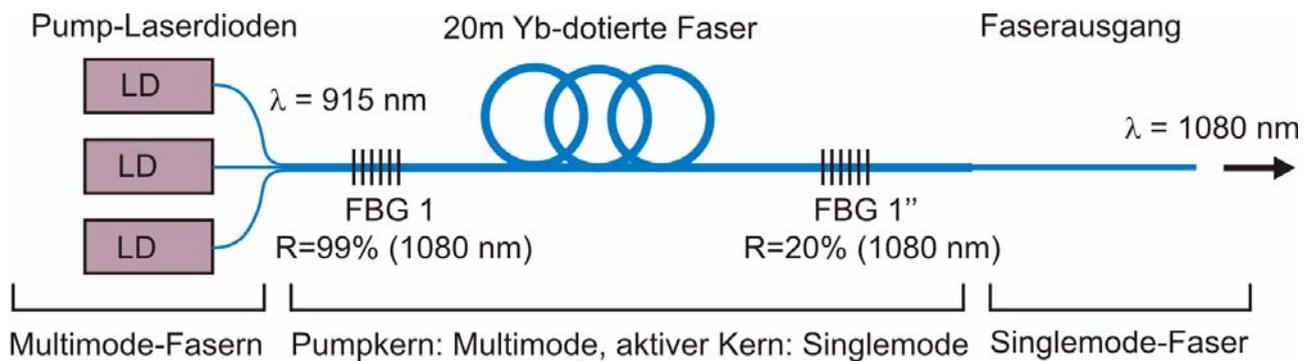
Laser: Aufbau eines HF-angeregten CO₂-Laser

- Aktives Medium: CO₂-haltige Gasmischung
- Pumpe: Hochfrequenzangeregte Gasentladung
- Resonator: Totalreflektor aus Kupfer, teildurchlässiger Spiegel aus ZnSe
- Kühlung: Wasserdurchströmte Aluminium-Elektroden



Faserlaser:

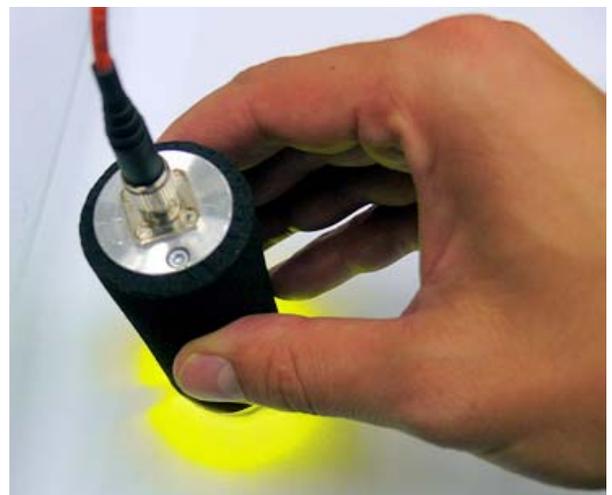
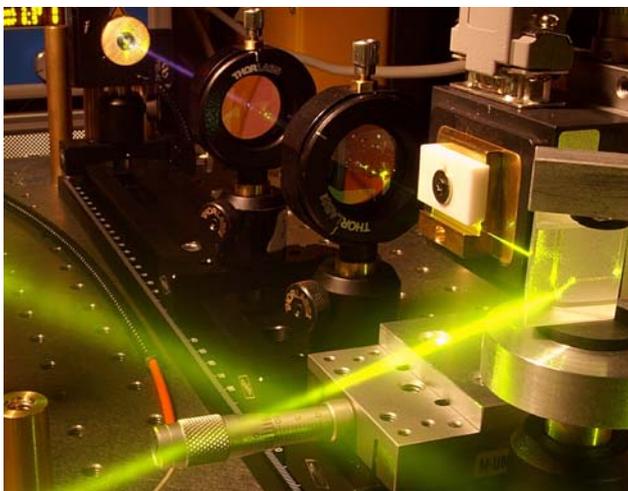
- Aktives Medium: z.B. Ytterbium- oder Erbium-dotierte Singlemode-Glasfaser
- Pumpe: Nahinfrarot-Laserdioden, die in die Glasfaser eingekoppelt werden
- Resonator: FBGs abgestimmt auf die Wellenlänge der Dotierung (Yb: 1080 nm, Er: 1553 nm)
- Kühlung: Sehr gut möglich durch große Länge (...10m) und große Oberfläche/Durchmesser



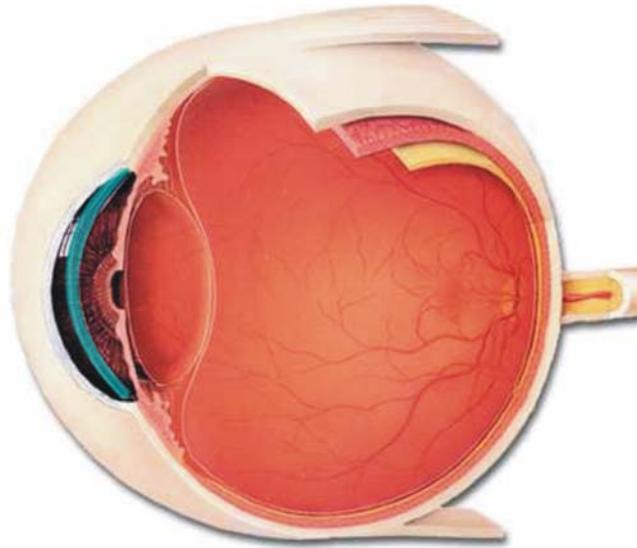
Laserentwicklung am LHFT: Gelber Laser für die Medizintechnik

Frequenzverdoppelter gelber Raman-Faserlaser:

- Laserquelle im sichtbaren Bereich (gelb, 578nm)
- Anwendungen in der Medizintechnik (Dermatologie)



Augenoperationen mit dem Laser



Hornhaut-Korrektur mit LASIK

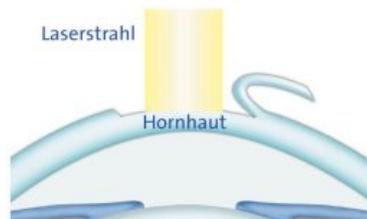
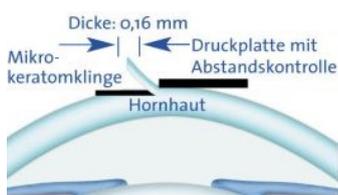
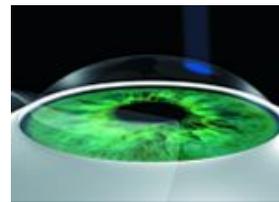
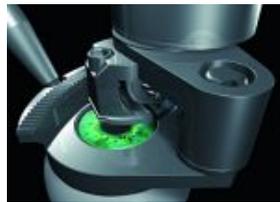
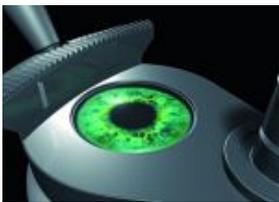
Ansetzen des Trackerrings

Anschneiden der Hornhaut

Abheben des Flaps

Gewebsabtragung

Operationsende



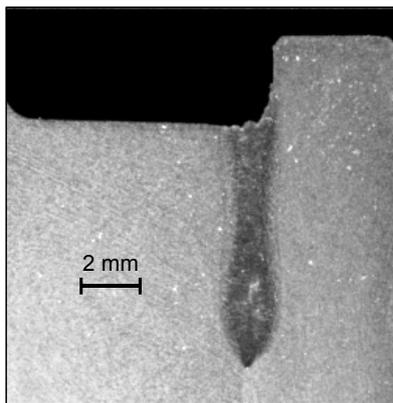
LASIK: Laser In Situ Keratomileusis

Laser: Einsatz in der Materialbearbeitung

▪ Schneiden



▪ Schweißen



▪ Beschriften



- Löten, Härten, Beschichten, Biegen, Trimmen

Einsatz der Hochfrequenztechnik

- Übertragung von Information
- Applikation von Energie
- Gewinnung von Messwerten



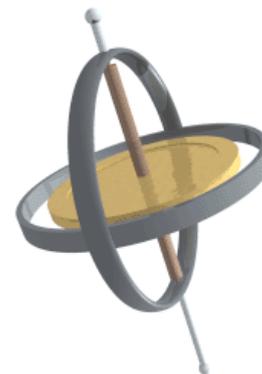
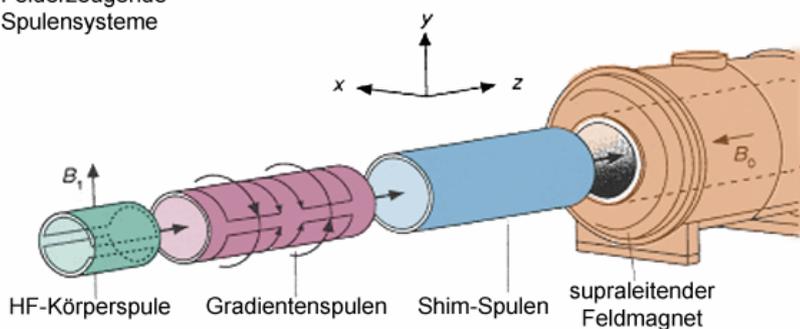
- Navigation (GPS)
- Radar in der Luftraumüberwachung und zur Abstandsmessung
- Fernerkundung im Umweltschutz
- Radioastronomie
- Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung
- Kernspin-Tomographie in der medizinischen Diagnostik
- Optische Sensorik



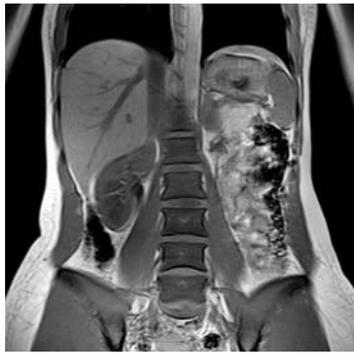
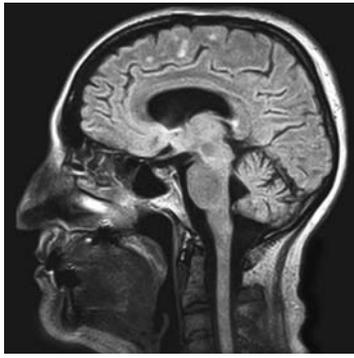
- Kernspin-Tomograph, auch Magnet-Resonanz-Tomograph (MRT) genannt
- Bilder aus dem Körperinneren, gemessen mit Magnetfeldern

HF in der Medizintechnik: Aufbau eines MRT

Felderzeugende
Spulensysteme

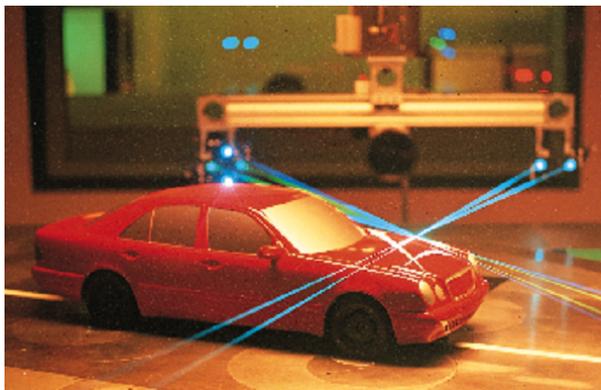


- Supraleitender Grundfeld-Magnet (z.B. $B_0 = 3\text{T}$), Shim-Spulen zur Homogenisierung
- Gradientenspulen zur räumlichen Zuordnung $B_0(x,y,z)$
- Hochfrequenz-Sendespulen (ca. 125 MHz) zur Auslenkung der Kern-Spins des Wasserstoff
- Hochfrequenz-Empfangsspulen für die schwachen Magnetfelder des Spin-Echos
- Digitale Signalverarbeitung für die Bildrekonstruktion (Fourier-Transformation)



- Guter Kontrast zwischen Geweben (Muskel, Fett, Knorpel, Knochen, Tumor)
- Funktionelle MR: z.B. Blutfluss, Gehirnaktivität

Laser und Photonik in der Messtechnik



Laser-Doppler-Strömungsmessung



Infrarot-Thermographie



Puls-Oximeter

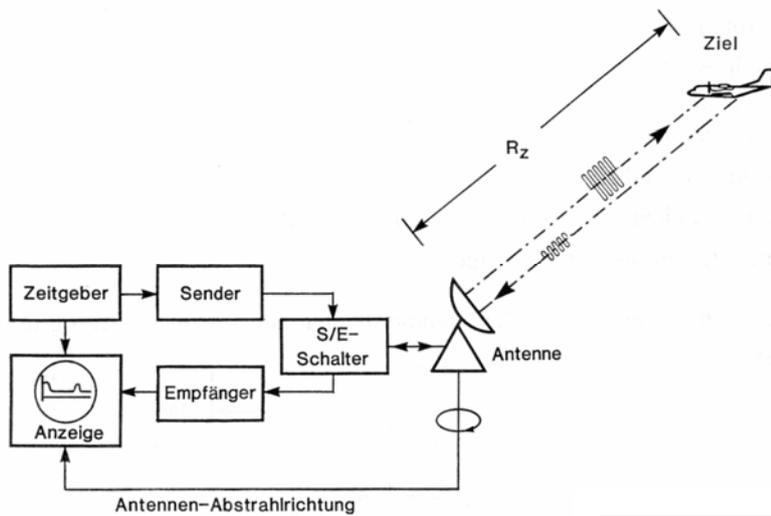


Laser-Vibrometer



Faserkreisel zur Navigation

Pulsradar



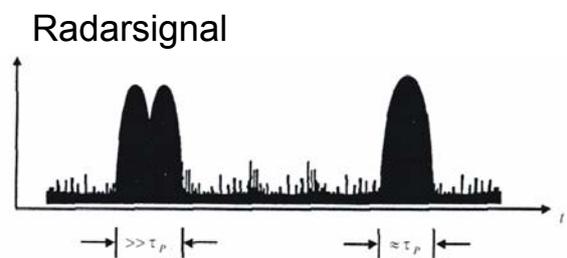
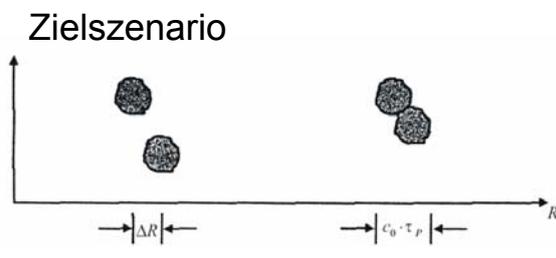
Entfernungsmessung:

Durch Messung der Pulslaufzeit t_l zum Ziel und zurück kann direkt die Entfernung angegeben werden:

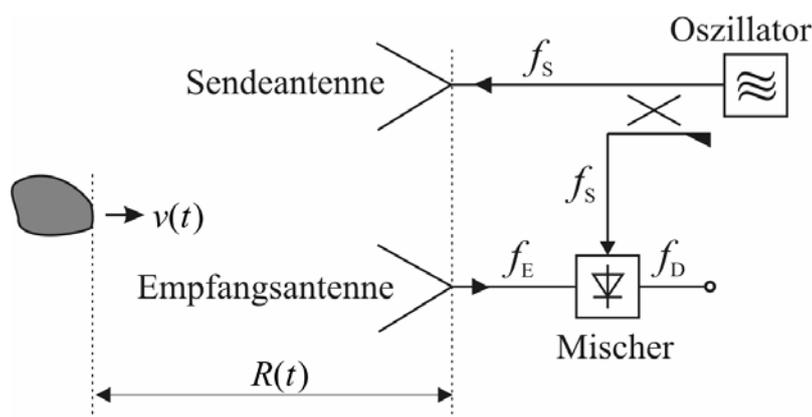
$$R_Z = \frac{t_l}{2} \cdot c_0$$

Auflösungsvermögen:

$$\Delta R_{min} = \frac{c_0 \cdot \tau_P}{2}$$



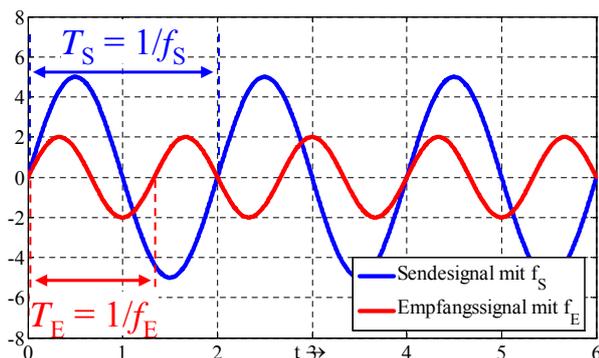
Dopplerradar



Geschwindigkeitsmessung:

- monofrequentes Sendesignal mit Frequenz f_D
- Empfangssignal mit Frequenz f_E ist um Dopplerfrequenz f_D versetzt

$$f_E = f_S \left(1 + 2 \frac{v(t)}{c} \right) = f_S + f_D$$



- Mischung beider Signale, f_S und f_E , an nichtlinearer Diodenkennlinie
- Auswertung der Differenz- bzw. Dopplerfrequenz f_D bzgl. Geschwindigkeit

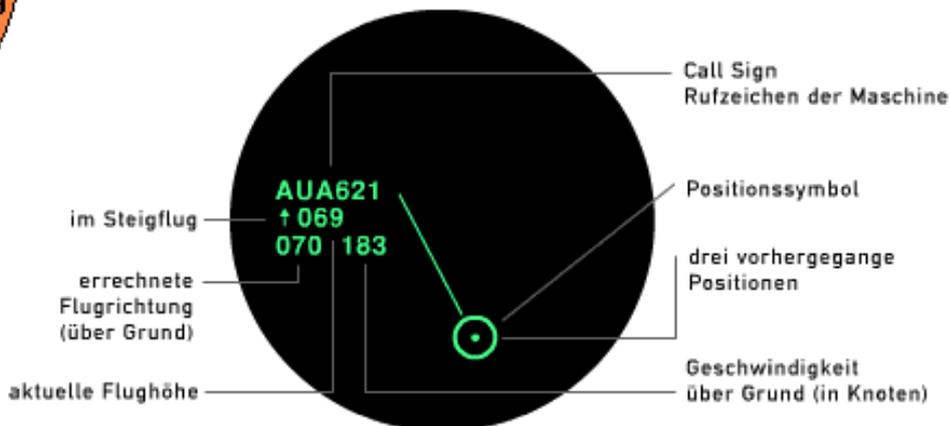
$$v = \frac{1}{2} \frac{f_D}{f_S} c$$

Luftraumüberwachung

Konventionelles Radarbild mit Kennungsdaten aus den Sekundärradarinformationen



Synthetisches Radarbild mit Zusatzdaten

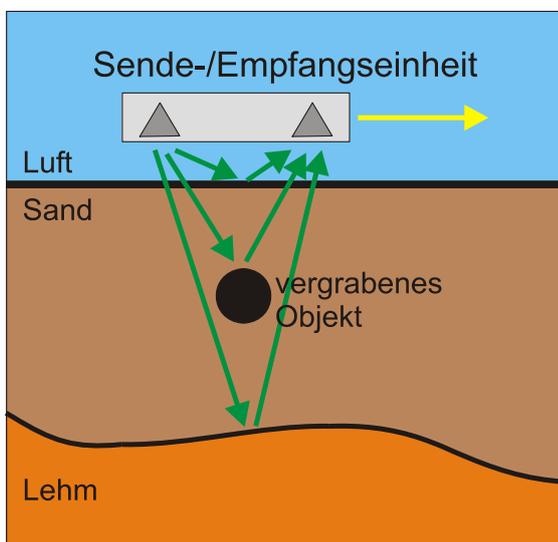


Radar Reflektorantenne

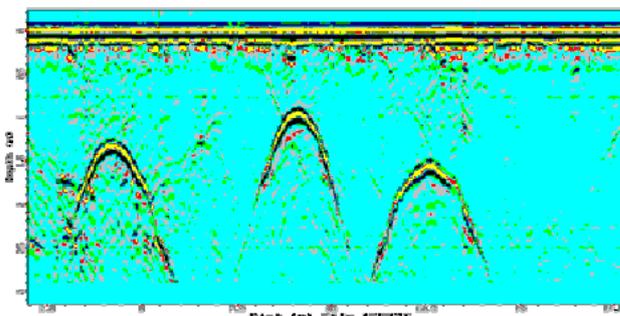
Ground Penetrating Radar

Detektion von verborgenen Objekten und Strukturen im Boden durch Laufzeitauswertung:

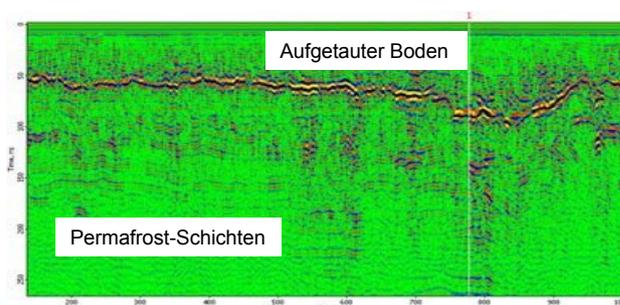
- Minendetektion
- Untersuchung von Mauerwerk, Fahrbahn, etc.
- geologische Untersuchungen

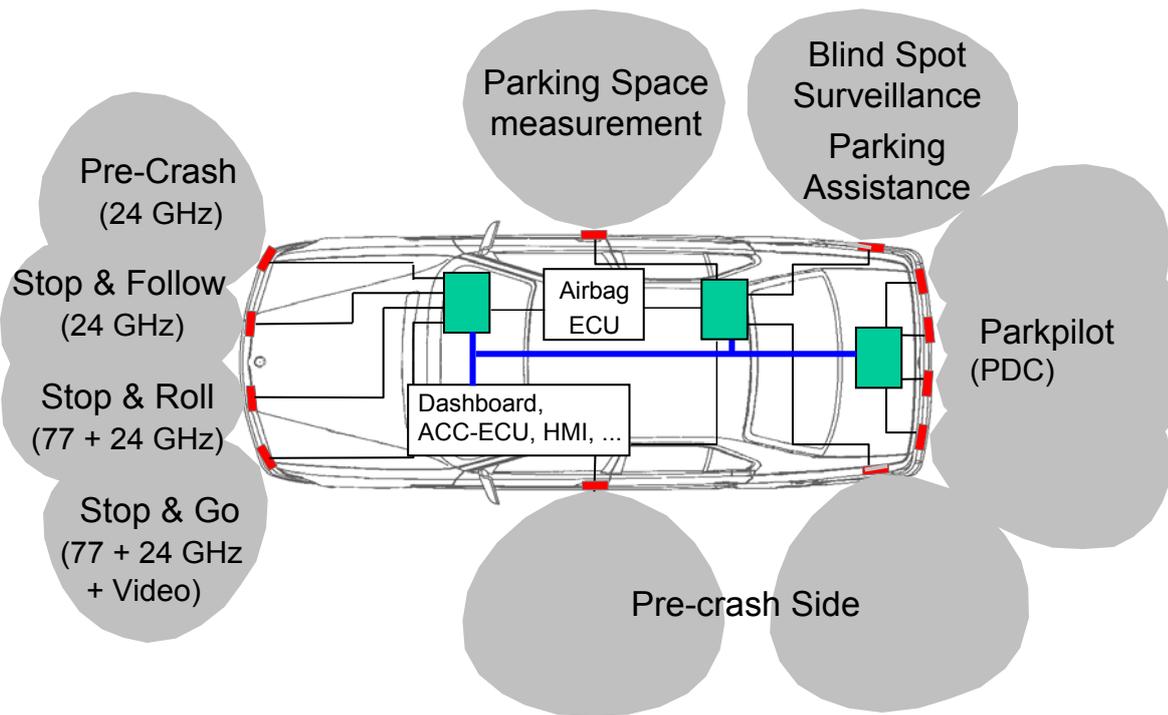


Detektion von Metallrohren in der Erde:
Arbeitsfrequenz: 900 MHz
Tiefe: 1 ... 1,5 m



Aufnahme von Permafrostboden in Sibirien:
Arbeitsfrequenz: 150 MHz
max. Tiefe: 10 m





Adaptive Cruise Control

ACC ist ein Komfortsystem das einen Mindestabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug sicherstellt.

Anforderungen:

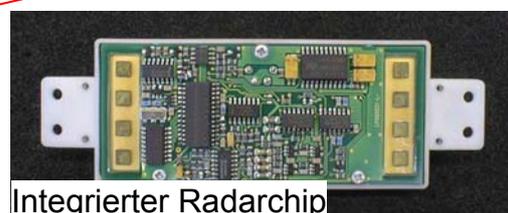
- Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung
- grobe Winkelmessung
- Unterscheidung von Fest- und Bewegzielen
- Geschwindigkeits- und Abstandskontrolle



Einbauort Antenne



- Sensor für Sendefrequenz 76.5 GHz
- Entwicklung von Radarsensoren bei 140 GHz (RoCC „Radar on Chips for Car“ – Projekt am LFHT)



Integrierter Radarchip

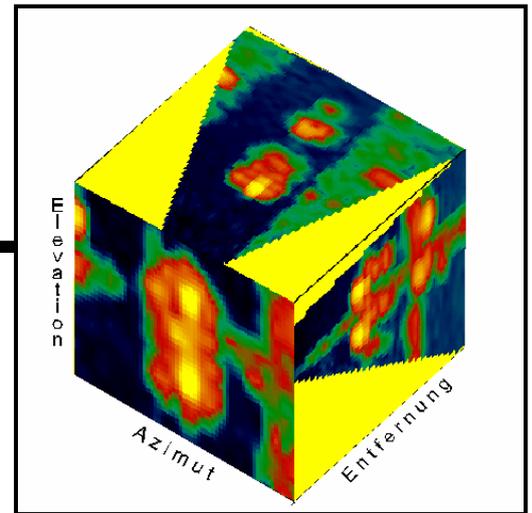
Radaraufnahmen



**Instrumentationsradar
für statische Messungen**



Verkehrsszene



**3-dimensionale
Radar-Daten**

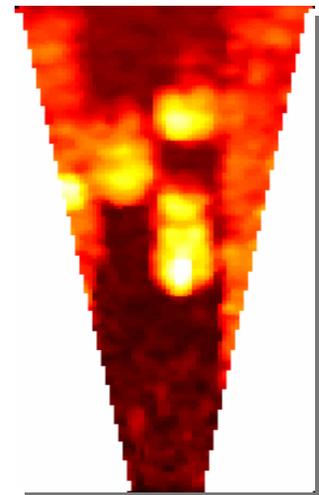
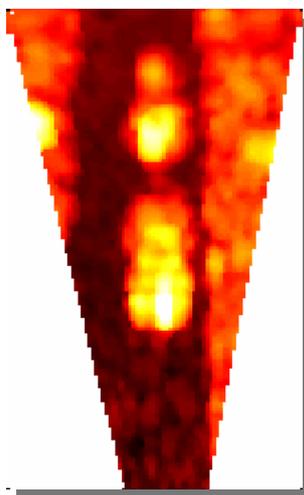
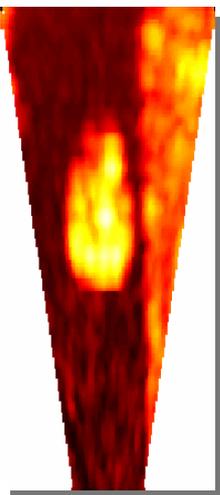
Eigenschaften:

laterale Winkelauflösung 1.2°

Entfernungsauflösung 1 m

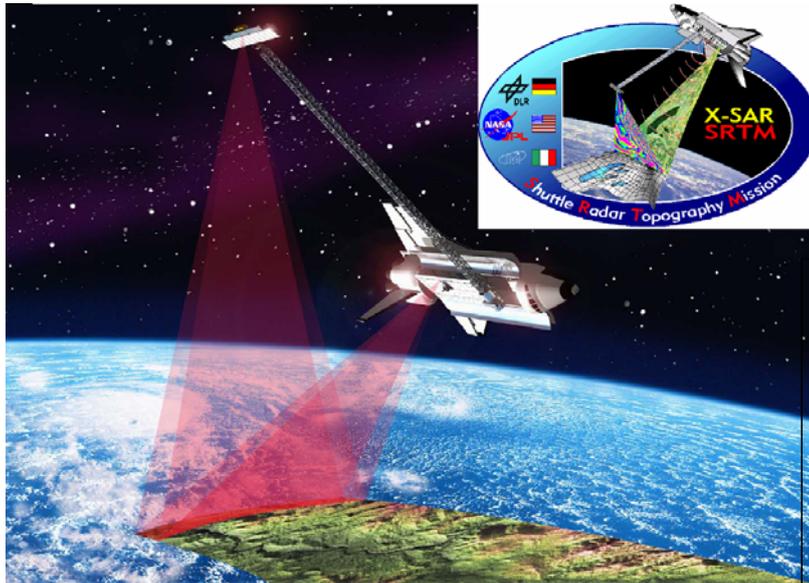
Empfindlichkeit -23 dBsm in 150 m

Fahrbahnreflexionen

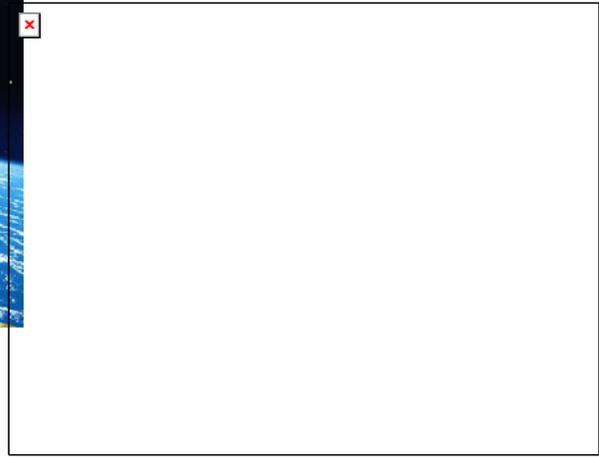


Erzeugung 3D-Radarbilder: Interferometrie

Radar im Weltraum mit Space Shuttle: SRTM - Mission

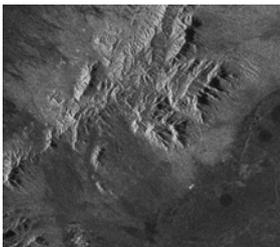


- Erzeugung von 3D-Bildern mit zwei Empfangsantennen („Stereoaufnahme“)
- Vergleich der Phaseninformation (Laufzeitinformation) beider Empfangsantennen

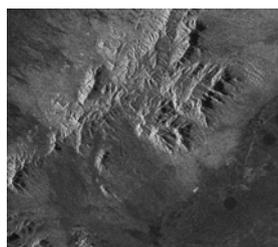


SAR-Interferometrie

SAR-, Radar-Bild 1



SAR-, Radar-Bild 2



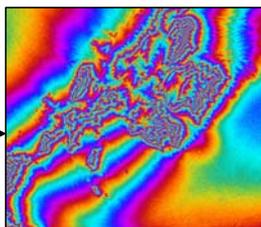
$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi \Delta r}{\lambda}$$

$$z = H - r \sin \xi$$

1. Phasen-
information

φ_1

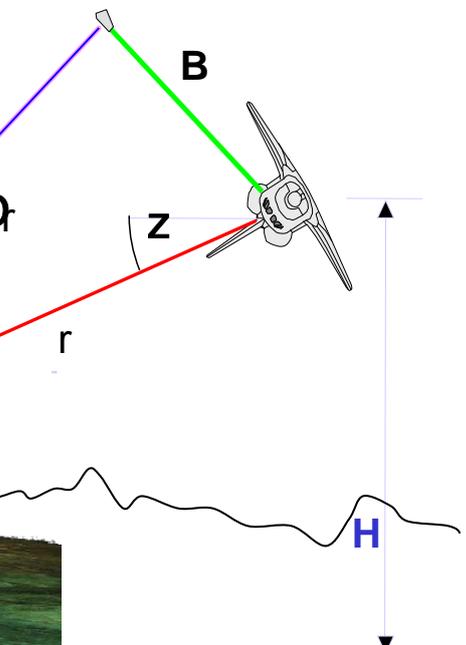
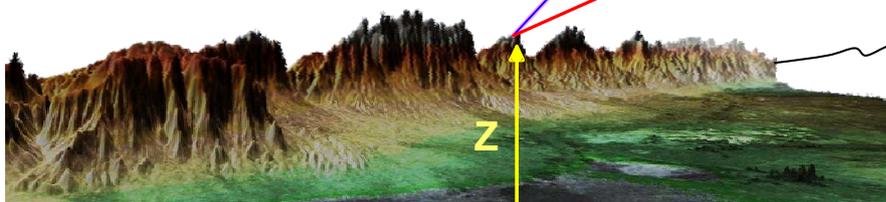
Interferogramm



2. Phasen-
information

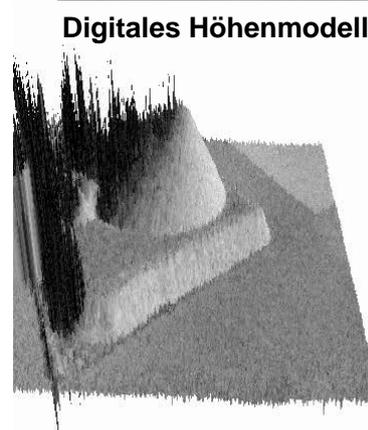
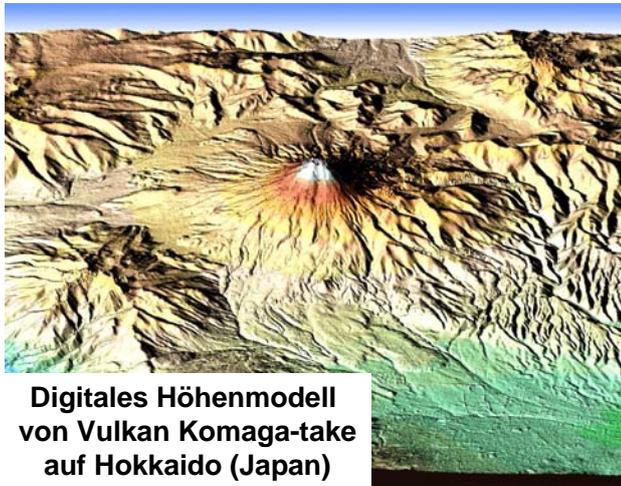
φ_2

Digitales Höhenmodell



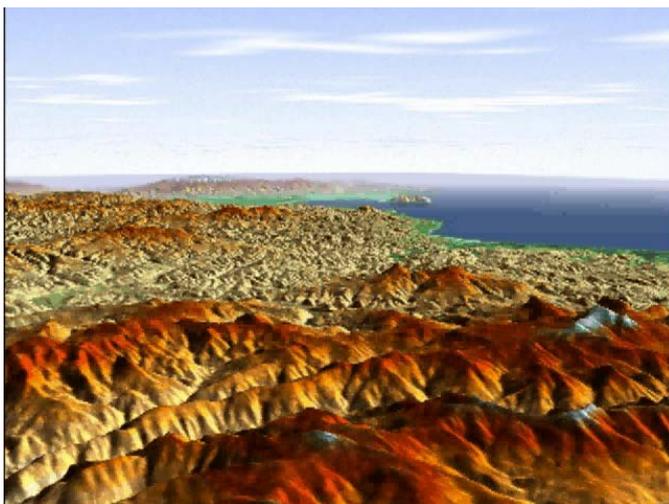
SAR-Interferometrie: Beispiele

3D-Radar-Bilder vom Weltraum aus gemacht: Berge und Vulkane

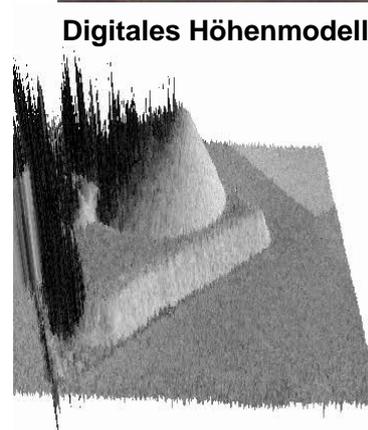


SAR-Interferometrie: Beispiele

3D-Radar-Bilder vom Weltraum aus gemacht: Berge und Vulkane

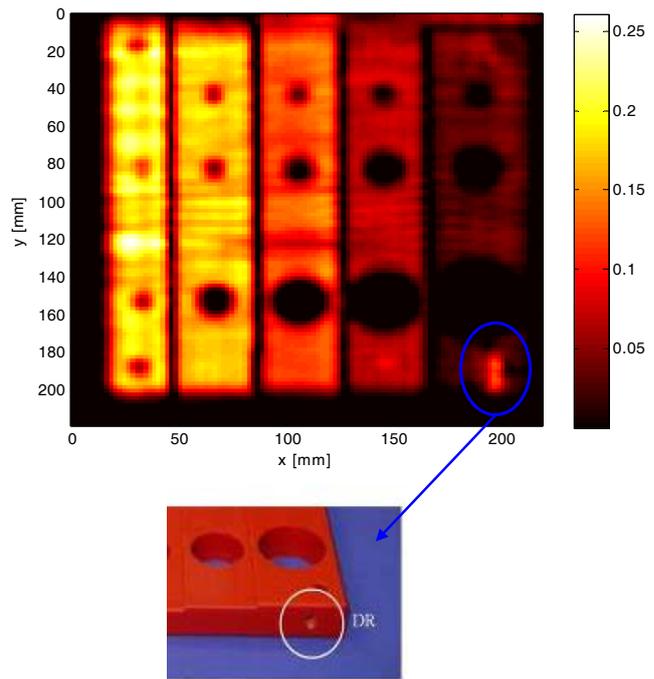
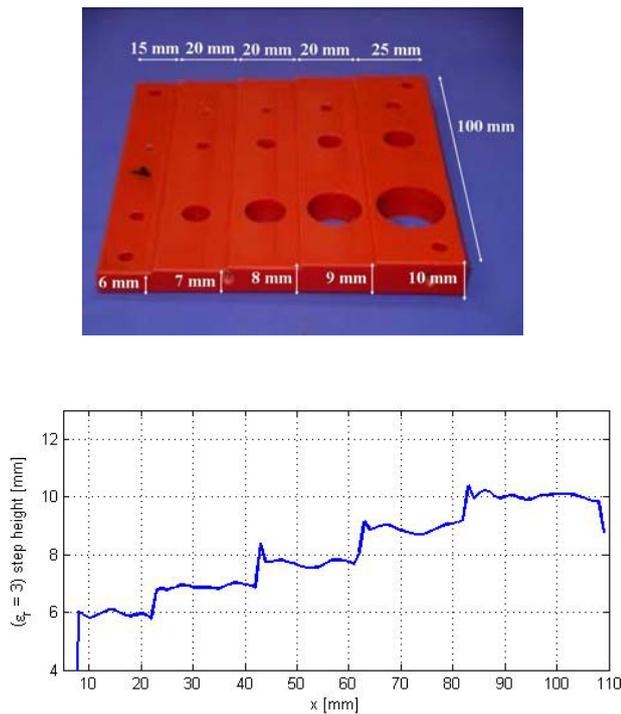


Digitales Höhenmodell von Vulkan Komaga-take auf Hokkaido (Japan)



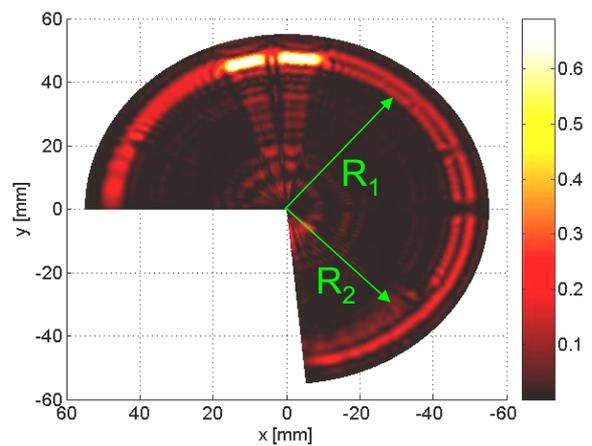
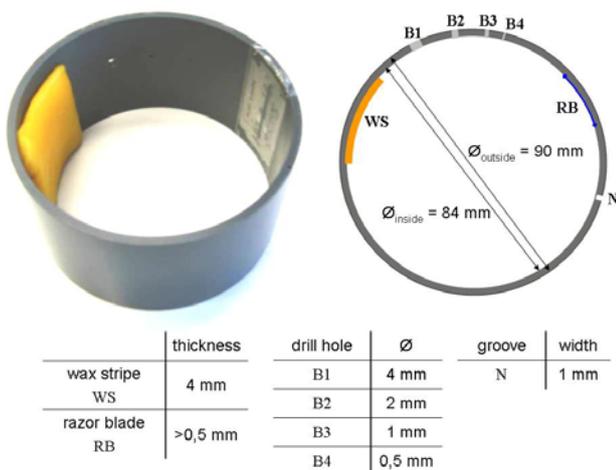
Bildgebende mmW-Systeme am LHFT (75 – 110 GHz): Vektorielle Reflexionsmessungen

Abbildendes NDT-Verfahren an präparierten PVC Keilen mit SAR-Verarbeitung

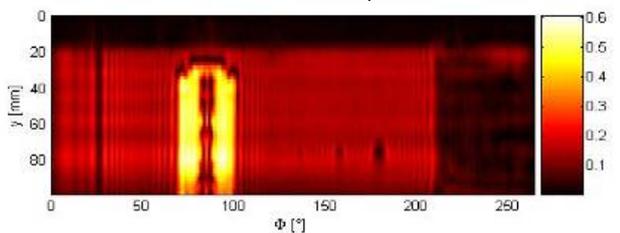


Bildgebende mmW-Systeme am LHFT (75 – 110 GHz): Vektorielle Reflexionsmessungen

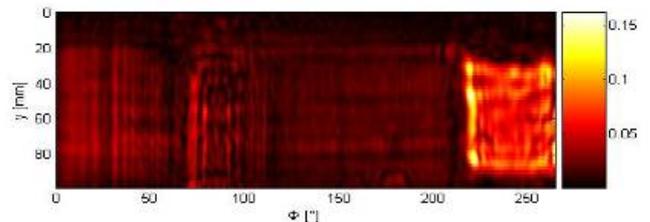
Abbildendes NDT-Verfahren an präparierten PVC Rohren mit SAR-Verarbeitung



Reflektivität bei $R_1 = 45 \text{ mm}$



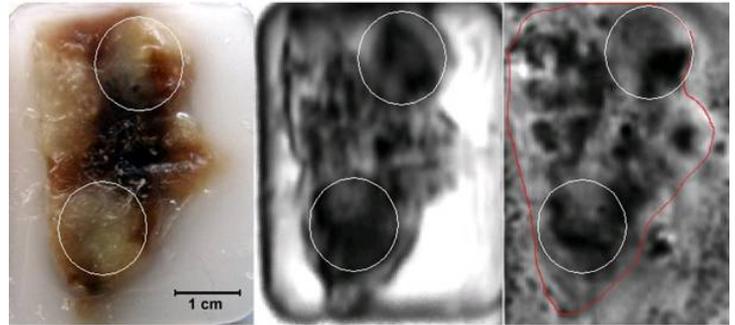
Reflektivität bei $R_2 = 40 \text{ mm}$



z.B. Erkennung versteckter Waffen

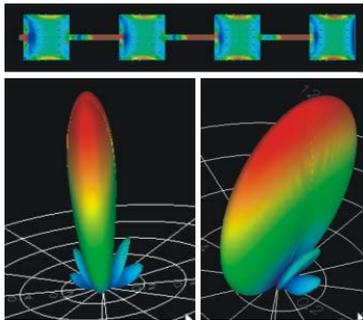


z.B. Krebserkennung



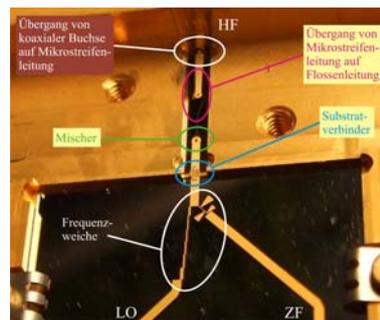
Mikrowellentechnik am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik

Antennen



Antennensimulationen

Mikrowellenschaltungen



Breitbandmischer 40-70 GHz

Radiometrie



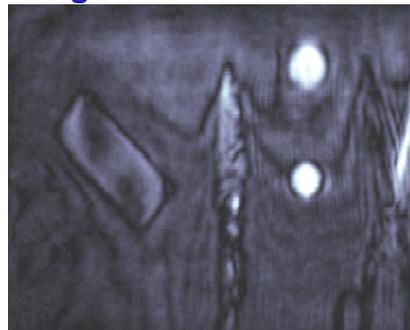
94 GHz Radiometer

Flugverkehrsradar



Sekundärradar-Empfänger

Bildgebende Radarverfahren



Detektion verdeckter Objekte

THz-Technik



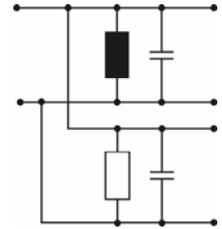
600 GHz Schottkydioden-Mischer

Breitbandiger Diodenmischer:

- Eingangsfrequenz: 40 - 70 GHz
- Zwischenfrequenz: 0 - 30 GHz

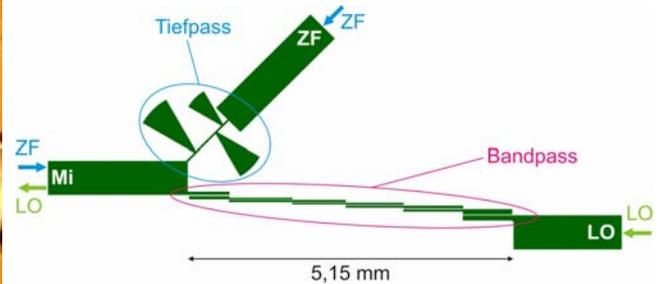
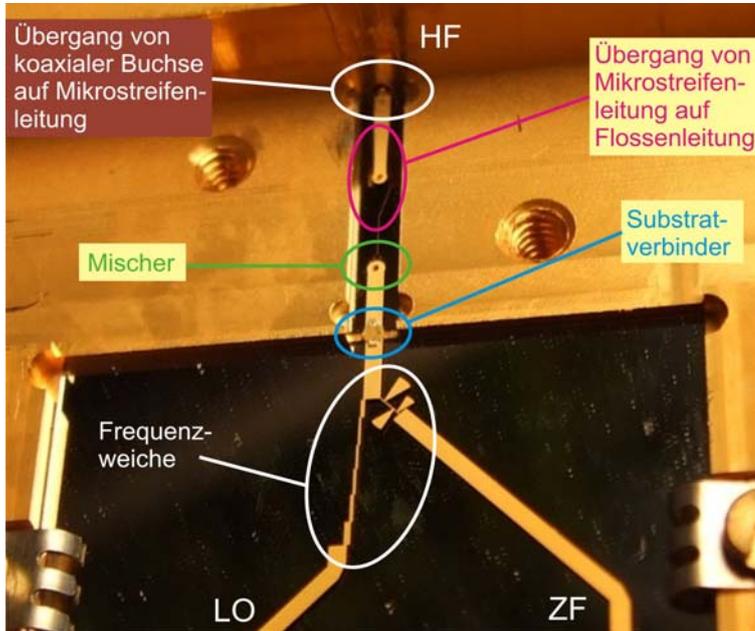
- Hochfrequenztechnische Herausforderung am Beispiel der Frequenzweiche

Bei niedrigen Frequenzen einfach aufzubauen



In der Hochfrequenztechnik so nicht realisierbar!

→ Filter aus Leitungselementen!

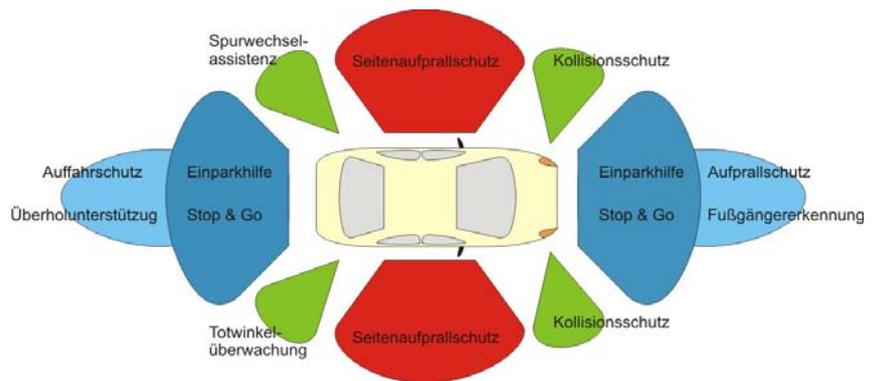


Antennenentwicklung: Radarantennen in Autos

Sonderforschungsbereich 694: Integration elektronischer Komponenten in mobile Systeme

- Radarsensorik für Sicherheits- und Komfortfunktionen

→ große Anzahl an Radarsensoren, die möglichst unsichtbar am Fahrzeug angebracht werden sollen

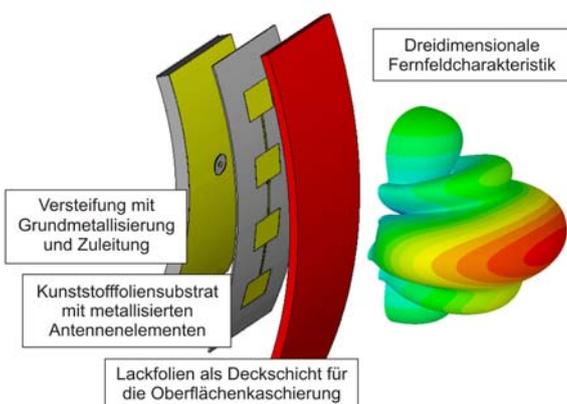


Lösungsansatz:

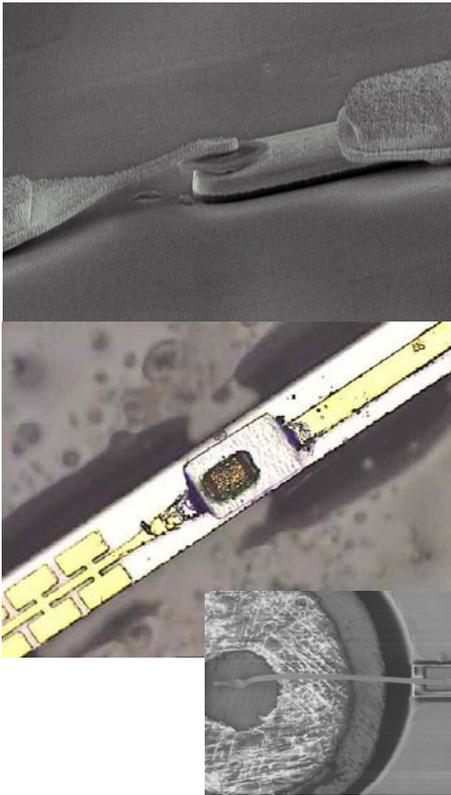
Integration der Radarantennen in die Fahrzeugaußenhaut

Technologische Herausforderungen:

- Simulation und Design geeigneter Antennen
- Herstellung der Antennen

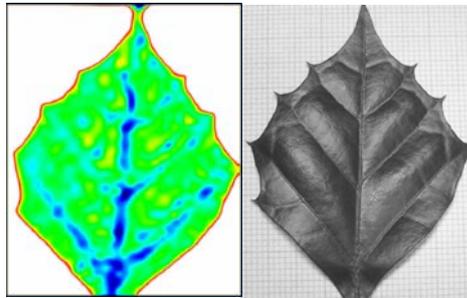


- Abwärtsmischer mit THz-Schottkydioden

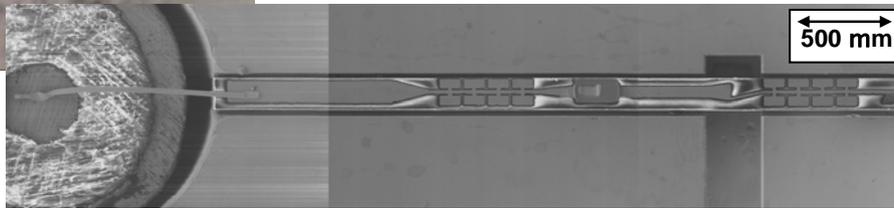


Für den Empfang von THz-Signalen mit Mixern sind Schottkydioden mit sehr kleinen Verlusten nötig

→ Bauweise der Dioden muss sehr klein sein hier: Anodendurchmesser 0,8 mm

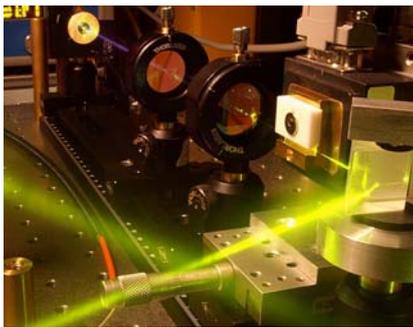


Exemplarische Messung:
Feuchtigkeitsverteilung in einem Blatt. Radiometrisch gemessen bei 600 GHz



Photonik am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik

Faserlaser



Gelber Raman-Faserlaser

Laser und Medizintechnik



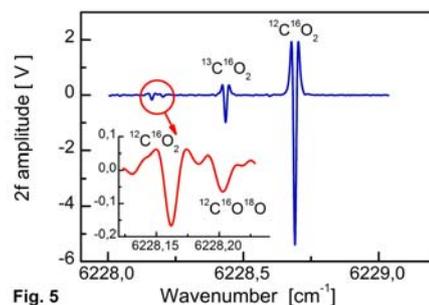
Messung von Lithotripter-Pulsen

Sensorik



FBG-Sensoren im Kraftwerk

Spektroskopie und Analytik



Isotopenaufgelöste Gasanalyse

Optische Kommunikation



Faseroptik-Labor und Simulation

Exzellenzinitiativen



Advanced Optical Technologies

▪ Passive Bauelemente und deren HF-Verhalten

Wellenausbreitung elektromagnetischer Felder - elektromagnetische Leistungsbilanz - Skineffekt - Widerstände - Dielektrika und Kondensatoren - Magnetische Stoffeigenschaften und Spulen - Leitungstheorie - Lecherleitung - Leitung als Transformationselement - Leitungsresonatoren - Dispersion - wichtige Wellenleiter (Koaxleitung, Streifenleitungen, Hohlleiter, optische Wellenleiter).

▪ Hochfrequenztechnik I und II

Streuparameter, HF-Leitungsnetzwerke - Zirkulatoren, Richtkoppler, Resonatoren, Filter - Antennen, Wellenausbreitung - Sender und Empfänger - Rauschen - Nutzung des Frequenzspektrums - Rundfunk, Richtfunk, Satellitenfunk - Radar und Radiometrie.

Nichtlineare Kennlinien, Kleinsignal- und Großsignalanalyse - Mischung, Detektion und Frequenzvervielfachung mit HF-Dioden und Transistoren - HF-Kleinsignal- und Großsignal-Verstärkung mit Transistoren und Laufzeitröhren - Zweipol- und Vierpol-Oszillatoren - passive und aktive Stabilisierung von Oszillatoren - Frequenz-Synthese.

▪ Integrierte Mikrowellenschaltungen I und II

Planare Hochfrequenzleitungen - planar integrierte Filter und Koppler - Integration von HF-Halbleitern - technologische Anforderungen im Millimeterwellenbereich - Ferrit-Bauelemente in integrierter Bauweise - Dünnschicht-, Dickfilm- und SMD-Technologie - V und Ü mit begleitender Anwendung eines HF-Schaltungssimulators an 13 Rechner-Arbeitsplätzen.

HF-Dioden für Detektoren und Mischer - integrierbare Verstärker und Oszillatoren mit Bipolar- und Feldeffekt-Transistoren - elektronisch einstellbare Phasenschieber - monolithisch integrierte Mikrowellenschaltungen - rechnergestützter Schaltungsentwurf - V und Ü mit begleitender Anwendung eines HF-Schaltungssimulators an 13 Rechner-Arbeitsplätzen.

Lehrveranstaltungen

▪ Hochfrequenz-Messtechnik

Messsysteme und Standards - Messaufbauten für den HF-Bereich - Messgeneratoren - Messung von Leistung, Frequenzen, Spektren, Reflexions- und Übertragungsfaktoren - Rauschgeneratoren und Rauschzahlmessungen an Verstärkern - Einsatz von Resonatoren - Messung der Materialparameter ϵ_r , μ_r und σ .

▪ Antennen

Strahlungsfeld, Berechnungsgrundlagen und Kenngrößen - Einzelstrahler und Gruppenstrahler - Linearantennen - Aperturstrahler - Mobilfunk-Antennen - Transponderantennen - Radar-Antennen - Breitband-Antennen - planare und konforme Antennen - elektronische Strahlschwenkung - Antennen-Messtechnik.

▪ Radarsysteme für Umweltdiagnostik und Verkehr

Wirkung der Erde und ihrer Atmosphäre auf EM-Strahlung - Treibhauseffekt - Radar mit realer und synthetischer Apertur - Glanzwinkel, MIE-Streuung und DIAL - radiometrische Messung der Eigenstrahlung der Erde - Radarsysteme in der Flugsicherung - Nahbereichsradar und Transponderkonzepte - Verkehrs- und Fahrzeugradar - Messung von Schadstoffen und Ozon in der Stratosphäre.

▪ Hochauflösende Radarsysteme

Synthetische Apertur Radar (SAR) Verfahren und Systeme (Übersicht) - Interferometrie, Polarimetrie, Tomographie - Bi- und Multistatische Systeme - aktuelle SAR-Systeme auf Flugzeugen und Satelliten - Kalibrierung von SAR-Systemen - künftige Entwicklungen

▪ **Photonik 1 und 2**

Phys. Grundlagen der Laser-Photonik: Mikro- und Makrosysteme, Linienbreiten, Aktivierung von Lasermedien, Wellenführung in Gaußstrahlen und Glasfasern, Laser-Resonatoren - Funktionsweise von Festkörper-, Gas- und Halbleiterlasern als Verstärker und Oszillatoren - Modulatoren und passive optische Komponenten - Anwendungen in der Mess- und Informationstechnik sowie Materialbearbeitung.

Messtechnik von Laserleistung und Strahleigenschaften wie Strahlqualität oder Polarisation - Räumliche und zeitliche Kohärenz - Interferenz und interferometrische Messtechnik - Elektronische Schaltungstechnik von Laserdioden und Photodioden - Kurzpulslaser und optische Frequenzumsetzung - Q-Switching und sättigbare Absorber - Glasfaser-Laser - nichtlineare Optik - Erzeugung von UV-Licht durch Frequenzvervielfachung - RAMAN-Effekt.

▪ **Komponenten optischer Kommunikationssysteme**

Eigenschaften, Herstellung und Systemverhalten von Komponenten für optische Kommunikationssysteme - Übersicht, Stand der Technik - Absorption und Emission von Licht - Laserdioden - Externe Modulatoren - Glasfasern - Optische Verstärker - Photodioden - Empfänger - Sonderbauelemente - Systemaspekte.

▪ **Optische Übertragungstechnik**

Zeitbereichs- und Wellenlängenmultiplex - Modulationsformate - Dispersionsmanagement - Nichtlinearitätsmanagement - Systemauslegung - Linkdesignstrategien - Kapazitätsoptimierung
Optische Signalverarbeitung - Simulationsverfahren.

▪ **Bildgebende Verfahren in der Medizin-Technik**

Funktionsprinzip und Geräte für die Computer-Tomographie und Magnetresonanz-Tomographie - Einsatz von Ultraschallgeräten in der Medizin - Signalerzeugung und -verarbeitung in bildgebenden Geräten.

▪ **Kommunikation in Technik-Wissenschaften**

Einführung: Was ist Kommunikation? - Physikalische/Biologische Grundlagen - Sprachen für Technik-Wissenschaften - Lehren, Lernen, Prüfen, Forschen - Normen - Literatur - Patente - Publikationen herstellen, prüfen - Vorträge vorbereiten, aufbereiten, präsentieren - Prüfungen vorbereiten und bestehen.

Lehrveranstaltungen

- Hochfrequenztechnisches Praktikum 1 und 2
- Photonik Praktikum 1 und 2
- Seminar Hochfrequenztechnik
- Seminar Photonik und Lasertechnik
- Bachelorarbeiten
- Masterarbeiten

Aktuelle Informationen: www.lhft.de oder www.univis.uni-erlangen.de



Aktuelle Informationen: www.lhft.de oder www.univis.uni-erlangen.de