

ITWissen



Das große Online-Lexikon
für Informationstechnologie

MIKROWELLENTÉCHNIK

KLAUS LIPINSKI (Hrsg.)

Copyright © 2008

ISBN 978-3-7089-1000-0

Inhalt

C-Band	Magnetron
D-Band	Microstrip
EMF, electromagnetic field	Mikrowelle
F-Band	Mikrowellentechnik
HEMT, high electron mobility transistor	Millimeterwelle
HF-Stecker	Q-Band
Hochfrequenzkabel	Rauschtemperatur
Hochfrequenztechnik	S-Band
Hohlleiter	Stripline
ISM, industrial, scientific and medical	TEM, transverse electromagnetic
K-Band	Terahertz
Ka-Band	<i>THz</i>
Klystron	TWT, travelling wave tube
Ku-Band	U-Band
L-Band	W-Band
LNB, low noise blockconverter	X-Band
LNC, low noise converter	Y-Band
	YIG, yttrium-iron garnet

Impressum:
Herausgeber: Klaus Lipinski
Mikrowellentechnik
Copyright 2007
DATACOM-Buchverlag GmbH
84378 Dietersburg
Alle Rechte vorbehalten.
Keine Haftung für die angegebenen
Informationen.
Produziert von Media-Schmid
www.media-schmid.de

C-Band (C band)

*Frequenz- und
Wellenlängenbereich nach
IEEE 521 (1984)*

Frequenz-band	Frequenz-bereich	Wellen-länge
G	200 ... 500 MHz	1,2 ... 0,6 m
P	0,5 ... 1,0 GHz	60 ... 30 cm
L	1,0 ... 2,0 GHz	30 ... 15 cm
S	2,0 ... 4,0 GHz	15 ... 7,5 cm
C	4,0 ... 8,0 GHz	7,5 ... 3,8 cm
X	8,0 ... 12,0 GHz	3,8 ... 2,5 cm
Ku	12 ... 18 GHz	2,5 ... 1,7 cm
K	18 ... 26 GHz	1,7 ... 1,1 cm
Ka	26 ... 40 GHz	1,1 ... 0,75 cm
V	40 ... 75 GHz	7,5 ... 4,0 mm
W	75 ... 110 GHz	4,0 ... 2,7 mm

In der *Mikrowellentechnik* ist das C-Band das Frequenzband zwischen 4 GHz und 8 GHz. In der Satellitenkommunikation wird als C-Band der Frequenzbereich zwischen 3,5 GHz und 6,4 GHz definiert. Dieser Bereich wird bevorzugt für die Satellitenübertragung mit GEO-Satelliten benutzt. Dabei werden für das Uplink das Frequenzband von 3,6 GHz bis 4,2 GHz als Empfangsband benutzt und für das

Downlink das Frequenzband von 5,8 GHz bis 6,4 GHz als Sendeband. Das "C" steht für "Compromise" ist stellt einen Kompromiss zwischen *S-Band* und *X-Band* dar.

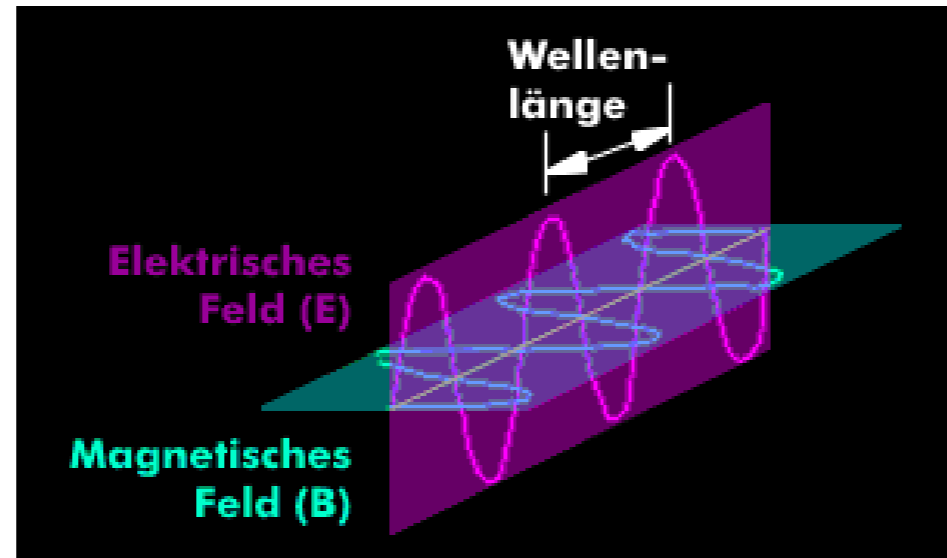
D-Band (D band)

In der *Mikrowellentechnik* belegt das D-Band den Frequenzbereich zwischen 110 GHz und 170 GHz und schließt damit an das *W-Band* an. In der Radartechnik gibt es kein D-Band.

EMF, electromagnetic field (Elektromagnetisches Feld)

Elektromagnetische Felder entstehen durch elektrischen Strom. Überall dort, wo Strom fließt, der sich in seiner Stärke oder Polarität ändert, werden elektrische Ladungen bewegt und erzeugen elektromagnetische Felder. Diese sind abhängig von der Stromstärke und der Frequenz und werden in der Feldstärke angegeben. Da elektromagnetische Felder bereits bei sehr niedrigen Frequenzen entstehen, vor allem aber bei hohen Frequenzen zur verstärkten Exposition führen, unterscheidet man zwischen niederfrequenten und hochfrequenten elektromagnetischen Feldern. Ein Maß für die Stärke von elektromagnetischen Feldern ist neben der Feldstärke, die bei höheren Frequenzen benutzt wird, die Energiedichte. Bei Niederfrequenz unterscheidet man zwischen niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern. Niederfrequente elektrische Felder entstehen durch

Die elektrischen und magnetischen Felder von elektromagnetischen Wellen



niederfrequente Spannungen. Sie sind auch dann vorhanden, wenn in den Leitern oder Geräten kein Strom fließt. Die Größe des elektrischen Feldes ist abhängig von der Spannung, die im Gebäudebereich bei 230 V/380 V und 50 Hz liegt. Im Außenbereich reichen die Werte von Mittelspannungen mit 20 kV bis hin zu Hochspannungen mit bis zu 380 kV.

Die niederfrequenten magnetischen Felder treten nur bei Stromfluss auf. Je höher der Strom, desto höher das magnetische Feld. Die magnetische Feldstärke wird in Ampere pro Meter angegeben und ist damit abhängig vom Abstand vom stromführenden Leiter. Die magnetische Flussdichte wird in Tesla (T) angegeben und bezieht sich auf die Leistung pro Fläche (W/qm).

Hochfrequente elektromagnetische Felder lösen sich als elektromagnetische Wellen von Leitern und Antennen und werden für die funktechnische Übertragung benutzt. In der *Hochfrequenztechnik* kommt diesen Feldern eine besondere Bedeutung zu, die sich in der Exposition und im Elektromog ausdrückt. Der Frequenzbereich der hochfrequenten elektromagnetischen Wellen umfasst alle Frequenzen zwischen 30 kHz und 300 GHz. Der wichtigste biologische Effekt von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern ist die Wärmewirkung, wie sie in der *Mikrowelle* zur Erhitzung von Speisen genutzt wird.

F-Band (F band)

In der *Mikrowellentechnik* liegt das F-Band im *Millimeterwellen-Bereich* zwischen den Frequenzen von 90 GHz und 140 GHz.

Als F-Band wird auch das Frequenzband bezeichnet, das für die Zwischenfrequenz von Low Noise Converter (LNC) in Parabolantennen benutzt wird. Der Frequenzbereich des F-Bandes liegt zwischen 950 MHz und 1,75 GHz. Das erweiterte F-Band reicht von 1,75 GHz bis 2,15 GHz.

HEMT, *high electron mobility transistor*

Für die Verstärkung von *Mikrowellen* werden besonders rauscharme Transistoren benötigt. Der High Electron Mobility Transistor (HEMT), der auf Gallium-Arsenid-Basis arbeitet, hat diese Eigenschaften und wird daher in Satelliten Transpondern aber auch in *LNBs* eingesetzt.

HEMT-Transistoren werden aber auch als schnelle Schalter eingesetzt und zeichnen sich durch enorm hohe Durchbruchspannungen von mehreren Kilovolt aus.

HF-Stecker (*RF connector*)



*APC-7-Stecker,
Foto: NoCat*



*1-mm-Stecker,
Foto: Agilent*

Die Übertragung von Hochfrequenz und *Mikrowellen*, wie sie im Rundfunk- und Fernsehbereich, in der Satellitenübertragung und in WLANs vorkommen, kann nur über geschirmte Medien mit definierter Impedanz erfolgen.

Die Schirmung verhindert das Ein- und Ausstrahlung der Hoch- und Höchstfrequenz, der definierte Wellenwiderstand ist die Voraussetzung für eine breitbandige, dämpfungsarme Übertragung. Aus diesem Grund wird Hochfrequenz mit Frequenzen von bis zu 20 GHz über Koaxialkabel übertragen. Für höhere Frequenzen nutzt man *Hohlleiter*.

Um die Verbindung zwischen zwei Koaxialkabeln oder den Anschluss von Koaxialkabel an HF-Schaltungen realisieren zu können, sind lösbare Verbindungskomponenten erforderlich; bekannt als HF-Stecker.

HF-Stecker sind koaxial aufgebaut; sie bestehen aus einem Innenleiter, dem Dielektrikum und dem Außenleiter. Der Innenleiter ist beim Stecker als Stift ausgebildet, bei der Buchse als Kelch; der Außenleiter ist der metallische Schraub- oder Verriegelungsverschluss, der gleichzeitig den Stecker gegen Störeinstreuungen abschirmt.

HF-Stecker unterscheiden sich in der Größe, der Dicke des anschließbaren Koaxialkabels, dem Frequenzbereich, der HF-Dichtigkeit, der Impedanz und einigen weiteren Parametern.

Die Entwicklung begann mit dem UHF-Stecker und setzte sich fort in einer Vielzahl an Varianten, wie dem bekannten BNC-Stecker, dem N-Stecker, TNC-Stecker, APC-Stecker und dem F-Stecker und ging über zu den Miniatur-HF-Steckern, wie dem SMA-Stecker, SMB-Stecker, SMC-Stecker sowie den Subminiatur-Steckern wie dem

MC-Card-Stecker, dem U.FL-Stecker und dem MMCX-Stecker, die in Kleinstgeräten, in PC-Cards und direkt auf den Platinen eingebaut werden.

Es gibt eine ganze Reihe an Mikrowellensteckern deren Bezeichnung sich auf den Stecker-Durchmesser bezieht, so den 7-mm-Stecker, 3,5-mm-Stecker, 2,92-mm-Stecker, 1,85-mm-Stecker oder den 1-mm-Stecker. Diese Stecker decken den Frequenzbereich zwischen 20 GHz und 110 GHz ab.

Hochfrequenzkabel (high frequency cable)

Ein Hochfrequenzkabel ist, wie der Name schon sagt, ein Kabel, das hohe und höchste Frequenzen übertragen kann. Das klassische Hochfrequenzkabel ist das Koaxialkabel, das je nach Ausführung Frequenzen von über 10 Gigahertz übertragen kann, wie beispielsweise die HF-Kabel RG-214 und RG-223.

Koaxiale HF-Kabel bestehen aus einem Innenleiter, das kann ein Kupferdraht oder eine mehradrige Litze sein, dem Dielektrikum, einer oder zwei Schirmungen, das können Folien- oder Geflechschirmungen sein, und dem Außenmantel. Zur Verringerung des Skin-Effektes und damit der Dämpfung sind der Innenleiter und die Geflechschirmung versilbert.

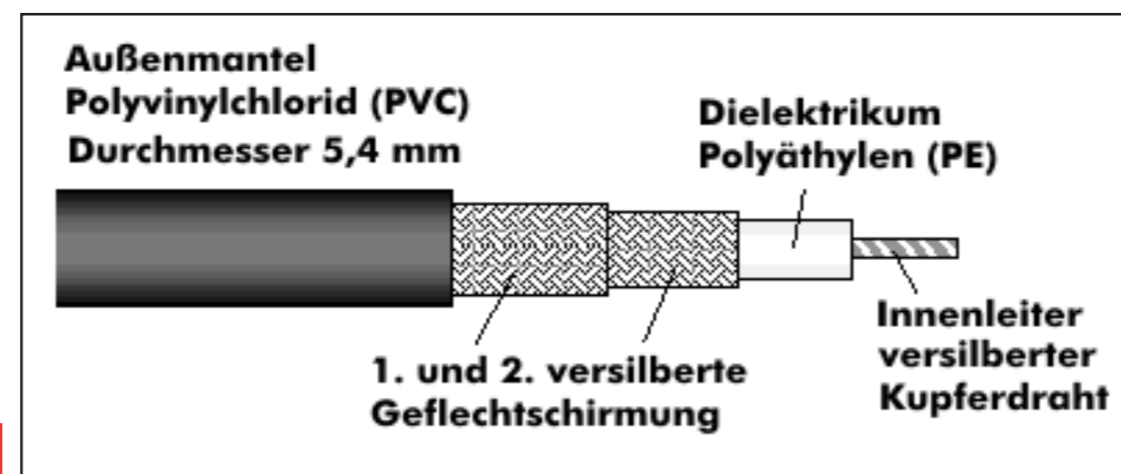
Die HF-Kabel unterscheiden sich im Frequenzgang, der Dämpfung und der Dicke und damit in der übertragbaren Leistung, um einige wichtige Kriterien zu nennen. Der Außendurchmesser liegt bei den dünnen Kabeln wie dem RG-174 bei etwa 2,5 mm, bei den etwas dickeren wie dem RG-58 oder dem H-155 bei etwa 5 mm und bei den dicken Kabeln wie dem RG-214 bei 10 mm und bei 15 mm.

Hochfrequenzkabel haben in aller Regel eine Impedanz von 50 Ohm. Dieser Wert ist

ein Kompromiss der sich aus der Kabeldämpfung ergibt. Die meisten Koaxialkabel haben nämlich zwischen 50 Ohm und 100 Ohm die geringste Impedanz. Hinzu kommt, dass bei einer Impedanz von 30 Ohm die

*Hochfrequenzkabel
RG-213-Kabel*

*Aufbau des
RG-223-Kabels*



maximale Leistung und bei einer Impedanz von ca. 70 Ohm die maximale Spannung übertragen werden kann.

Hochfrequenzkabel werden in hochfrequenten Anlagen, in der Sendetechnik und in Breitband-Kabelnetzen, in Antennenanlagen und Satellitenempfangseinrichtungen eingesetzt und dominierten in den siebziger und achtziger Jahren auch die Verkabelung von lokalen Netzen und Breitbandnetzen. Sie sind standardisiert nach dem amerikanischen MIL-Standard, MIL-C-17, nach IEC-61196 und nach der europäischen Norm EN 50117.

HF-Kabel werden an den Kabelenden mit *HF-Steckern* versehen, damit sie mit Geräten, Anlagen oder an andere HF-Kabeln verbunden werden können.

Mit der Entwicklung der breitbandigen Twisted-Pair-Kabel, die in der Klasse 7 Frequenzen bis 600 MHz übertragen können, und der Standardisierung der strukturierten Verkabelung, verschwanden die Koaxialkabel aus den lokalen Netzen.

Hochfrequenztechnik (*high frequency engineering*)

Die Bezeichnung Hochfrequenztechnik oder HF-Technik wird so umfassend eingesetzt, dass sie sich sowohl auf die frequenzmäßige als auch auf die übertragungstechnische Betrachtung beziehen kann, ebenso auf die Verbindungs-, Schaltungs-, Geräte- oder Analagentchnik.

Bei der frequenzmäßigen Betrachtung stellt man fest, dass die Bezeichnung HF-Technik nicht nur für den Frequenzbereich der Hochfrequenz (HF) zwischen 30 kHz und 300 MHz benutzt wird, sondern auch für wesentlich höhere Frequenzbereiche bis hinauf zur *Mikrowelle* und der damit verbundenen *Mikrowellentechnik*.

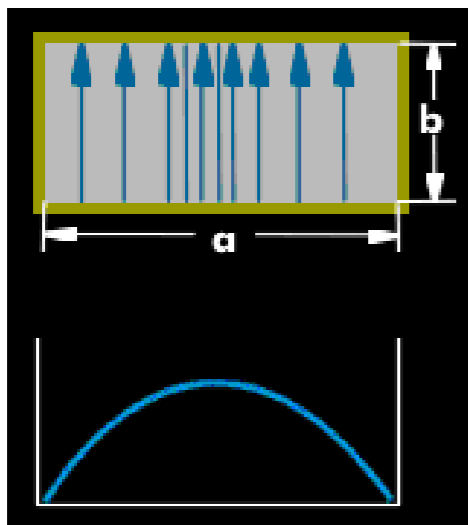
Übertragungstechnisch umfasst die HF-Technik die drahtlose Übertragung, also die Funktechnik, aber auch die drahtgebundene, wie die Übertragung über Kabel. Sie beinhaltet alle Modulationsverfahren und gleichermaßen die Übertragung von analogen und digitalen Signalen unabhängig vom Modulationssignal, das Sprache, Audio, Video, Daten oder ein anderes Signal sein kann.

Was die HF-Komponenten betrifft, so lässt sich hierbei zwischen passiven und aktiven Komponenten unterscheiden. Dazu gehören *HF-Kabel* und *HF-Stecker*, Antennen, *LNB-Converter*, HF-Transistoren und andere HF-Bauteile.

Schaltungstechnisch umfasst die HF-Technik alle elektronische Schaltungen, die HF-Signale generieren, wie Oszillatoren, mischen, wie Mischer, verstärken, wie HF-Verstärker und selektieren, wie HF-Filter und ZF-Verstärker.

Gerätetechnisch sind Sender, Transponder und Empfänger, HF-Messgeräte, HF-Generatoren und Head-Ends dem Begriff HF-Technik zuzuordnen, und system- bzw. anlagentechnisch reicht die Palette von der Antennenanlage über Gemeinschaftsantennen, Kabelverteilnetze, Funk-LANs, bis zu mobilen und stationären Sende- und Empfangsstationen.

Hohlleiter (hollow waveguide)



Energieverteilung des elektrischen Feldes in einem Hohlleiter

Für die Übertragung hochfrequenter Signale werden Koaxialkabel und *Microstrips* verwendet. Koaxialkabel haben bei Frequenzen von 1 GHz und darüber rapide ansteigende Dämpfungswerte und können daher nur für kurze Entfernungen eingesetzt werden. Solange leistungsschwache HF-Signale über solche Koaxialkabel übertragen werden, kann man die entstehenden Verluste kompensieren. Anders ist es bei leistungsstarken Signalen, wie sie in der Sende- und Radartechnik vorkommen. Bei diesen Hochleistungssignalen spielt neben den Dämpfungsverlusten auch die Überschlagsfestigkeit der Koaxialkabel eine entscheidende Rolle.

Die genannten Nachteile können mit Hohlleitern behoben werden. Es handelt sich dabei um metallische Rohre mit rundem oder eckigem Querschnitt, die so aufgebaut sind, dass sich in ihnen Wellen bestimmter Wellenlänge mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. In Hohlleitern können sich nur solche Frequenzen ausbreiten, die in einer bestimmten Relation zu den Abmessungen des Hohlleiters stehen. Bedingung ist, dass die Wellenlängen kleiner sind als die Grenzwellenlänge, die sich bei rechteckigen Hohlleitern der doppelten Länge der breiteren Hohlleiterseite ergibt. Physikalisch handelt es sich um *transversale Wellen* (TEM), deren elektrisches und magnetisches Feld senkrecht zueinander stehen. Das elektrische Feld baut sich zwischen den beiden breiteren Hohlleiterwänden auf, das magnetische zwischen den zwei schmaleren. Das elektrische Feld ist in der Mitte des Hohlleiters am stärksten und nimmt zu den Wänden hin ab. Es ändert sich mit der Frequenz und

*Bestimmung der
Grenzwellenlänge eines
Hohlleiters*

$$\lambda_{\text{Grenz}} = 2 \times a$$

λ_{Grenz} , Grenzwellenlänge (m)

a , längere Seite des Hohlleiter (m)

hat in Längsrichtung des Hohlleiters Maxima und Minima im Abstand der halben Wellenlänge. Die Dämpfung ist stark abhängig von den Abmessungen der Hohlleiter, die nach DIN 47302 in ihren Abmessungen spezifiziert sind. Dabei hat die breitere Hohlleiterseite (a) immer den doppelten Wert der schmaleren (b). Ist der a -Wert beispielsweise 19,05 mm, dann ist der b -Wert 9,53 mm. Das entsprechende Frequenzband liegt für diesen Hohlleiter zwischen 9,84 GHz und 15,0 GHz.

Die DIN-Spezifikationen und Bezeichnungen entsprechen denen von IEC 153. Die HF-Signale werden dabei über Schlitze, Trichter oder Löcher in den Hohlleiter ein- und ausgespeist.

Hohlleiter haben einige Vorteile gegenüber Koaxialkabeln oder Microstrips. Sie sind komplett geschirmt gegen Strahlung, können extreme Spitzenleistungen übertragen und haben bei der Übertragung von *Mikrowellen* einen vernachlässigbaren Verlust. Eingesetzt werden Hohlleiter in Sende- und Radaranlagen, in Mikrowellenherden und auch in Low Noise Blockconvertern (*LNB*), die in Parabolantennen eingesetzt und für den Satellitenempfang benutzt werden.

ISM, *industrial, scientific and medical*

Für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen gibt es mehrere Frequenzbänder für lizenzfreie Übertragungen. Bei diesen, weltweit nicht einheitlichen Frequenzbändern ist lediglich die Sendeleistung und die Störung für benachbarte Frequenzbereiche geregelt.

Einige Frequenzbereiche sind international als ISM-Band ausgewiesen, aber in Deutschland nicht als ISM-Bereich freigegeben. So der Frequenzbereich zwischen 6,765 MHz und 6,795 MHz. Dieses für ISM-Zwecke benutzte Band befindet sich ebenso im Kurzwellenbereich wie der Frequenzbereich zwischen 13,553 MHz und 13,567 MHz und der Teilbereich vom CB-Band zwischen 26,957 MHz und 27,283 MHz.

Am unteren Ende des VHF-Bandes ist der Frequenzbereich bei 40,680 MHz als ISM-

ISM-Band	Frequenzbereich	Anwendung
9 kHz bis 135 kHz	LF	Flug-, Schiffsnavigation, RFID, Zeitsender
6,765 MHz bis 6,795 MHz	HF	Wetter-, Flugfunk, Presseagenturen
13,553 MHz bis 13,567 MHz	HF	Presseagenturen, Telekommunikation, RFID
26,565 MHz bis 27,405 MHz	HF	CB-Funk, HF-Schweizer. RFID, Babyphone
40,660 MHz bis 40,700 MHz	VHF	Telemetrie-, Fernsteuersysteme
433,0 MHz bis 440,0 MHz	UHF	Amateurfunk, Babyphone, RFID
868,0 MHz bis 870,0 MHz	UHF	RFID SRD-Systeme
888,0 MHz bis 889,0 MHz	UHF	RFID-Systeme
902,0 MHz bis 928,0 MHz	UHF	RFID-Systeme
2,400 GHz bis 2,4835 GHz	SHF	Amateur-, Ortungsfunk, RFID
5,725 GHz bis 5,875 GHz	SHF	Amateur-, Ortungsfunk, RFID
24,00 GHz bis 24,25 GHz	EHF	Bewegungsmelder, Richtfunk

ISM-Bänder und deren Nutzung

Band ausgewiesen. Es folgen die verschiedenen ISM-Bänder im UHF-Bereich 433,920 MHz, sowie bei 868 MHz, 889 MHz und 915 MHz.

Im *Mikrowellenbereich* liegt bei 2,45 GHz das für viele Anwendungen genutzte ISM-Band. So wird das 2,45-GHz-Band u.a. von Mikrowellenherden, Telemetriesendern, Funktechniken, WLANs, Bluetooth, ZigBee, HiperLAN, WirelessUSB, ZigBee, HomeRF und Richtfunk genutzt. Ein weiteres Mikrowellenband liegt zwischen 5,725 GHz und 5,875 GHz. Im EHF-Band stehen die Frequenzbereiche zwischen 24,0 GHz und 24,25 GHz sowie zwischen 61,0 GHz und 61,5 GHz als ISM-Band zur Verfügung.

K-Band (K band)

Das K-Band ist ein Mikrowellenband im Frequenzbereich zwischen 18 GHz und 26 GHz.

Unterhalb des K-Bandes liegt das *Ku-Band*, oberhalb das *Ka-Band*. Die Bezeichnung "K" ist auf das deutsche Wort "kurz" zurückzuführen, was auf eine

Ka-Band
(K band)

Frequenz- und Wellenlängenbereich nach IEEE 521 (1984)

Frequenzband	Frequenzbereich	Wellenlänge
G	200 ... 500 MHz	1,2 ... 0,6 m
P	0,5 ... 1,0 GHz	60 ... 30 cm
L	1,0 ... 2,0 GHz	30 ... 15 cm
S	2,0 ... 4,0 GHz	15 ... 7,5 cm
C	4,0 ... 8,0 GHz	7,5 ... 3,8 cm
X	8,0 ... 12,0 GHz	3,8 ... 2,5 cm
Ku	12 ... 18 GHz	2,5 ... 1,7 cm
K	18 ... 26 GHz	1,7 ... 1,1 cm
Ka	26 ... 40 GHz	1,1 ... 0,75 cm
V	40 ... 75 GHz	7,5 ... 4,0 mm
W	75 ... 110 GHz	4,0 ... 2,7 mm

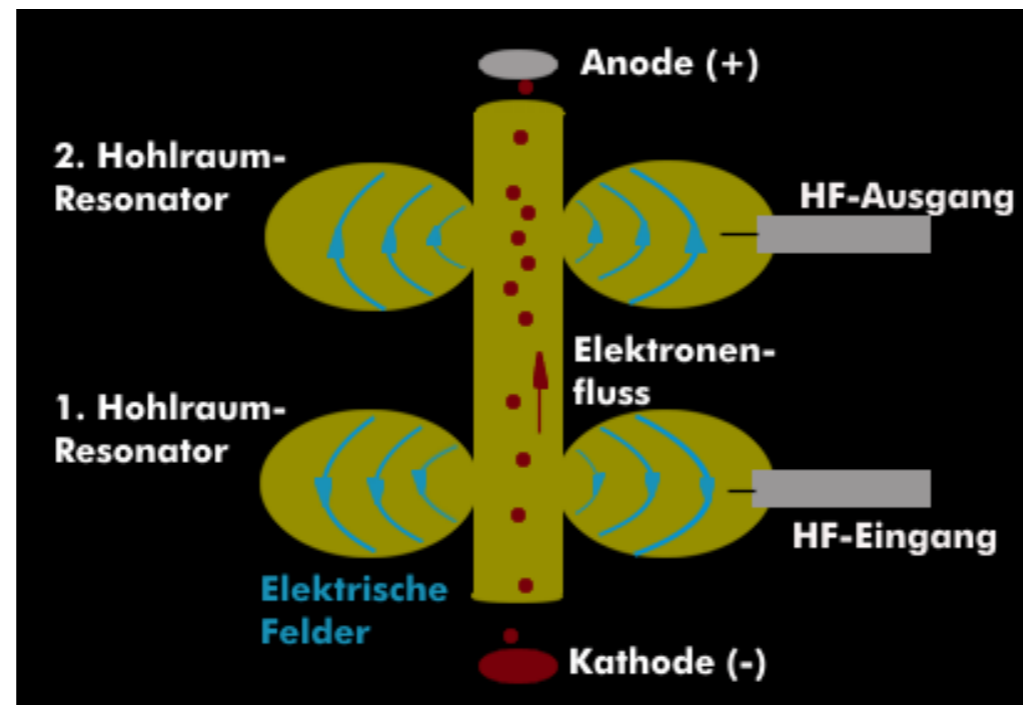
kurze Wellenlänge hindeutet. Diese liegen zwischen 1,7 cm und 1,1 cm.

Das Ka-Band ist ein Frequenzband, das in der Satellitenkommunikation und bei WLANs verwendet wird. Das Ka-Band gliedert sich frequenzmäßig oberhalb des K-Bandes an und liegt im Frequenzbereich zwischen 27 GHz und 40 GHz. Der Wellenlängenbereich liegt zwischen 1,1 cm und 0,75 cm.

In der Satellitenkommunikation wird das Ka-Band im Uplink zwischen 18 GHz und 31 GHz verwendet, der Downlink findet im Ku-Band und im K-Band zwischen 17,7 GHz und 21,2 GHz statt.

Klystron
(klystron)

Klystrone werden zur Erzeugung und Verstärkung von *Mikrowellen* benutzt. Es handelt sich um Elektronenröhren mit Resonatoren.



Ein Klystron besteht aus einem Elektrodensystem mit Kathode, die die Elektronen emittiert und der Anode, die den Elektronenfluss aufnimmt. Der Elektronenfluss wird durch die Anodenspannung beschleunigt und in seiner Geschwindigkeit durch die angelegte HF-Spannung moduliert. Diese Eingangsspannung wird über einen Hohlraumresonator

Aufbau eines Klystrons mit zwei Hohlraumkörpern

zugeführt und bildet sich dort als Stehwelle aus. Das elektrische Feld der Stehwelle steuert die Geschwindigkeit des Elektronenstroms, der verzögert und dann wieder beschleunigt wird. Der Steuerungseffekt verstärkt sich dadurch.

In einem zweiten Hohlraumresonator wird die Ausgangsenergie, die in dem Hohlraum mit einer hohen Energie ansteht, ausgekoppelt. Dabei muss der zweite Hohlraumresonator an der Stelle platziert sein, an der die Änderungsdichte des Elektronenstrahls ein Maximum hat. Nur dann kann in dem zweiten Hohlraumresonator eine Mikrowelle erzeugt werden, die wesentlich energiereicher ist als die Eingangs-HF-Spannung. Das verstärkte Mikrowellensignal kann dann aus dem zweiten Hohlkörper ausgekoppelt werden.

Klystrone benötigen mindestens zwei Hohlraumresonatoren, sie können aber auch mehrere benutzen. Die Größe der Hohlraumkörper entspricht der Wellenlänge der Mikrowellen.

In Klystron-Oszillatoren arbeitet man mit Rückkopplung und koppelt einen Teil des Ausgangssignals zurück an den ersten Resonator. Dadurch wird eine freischwingende Oszillation erreicht.

Ku-Band (*Ku band*)

Das Ku-Band liegt unterhalb des *K-Bandes* im Frequenzbereich zwischen 12 GHz und 18 GHz. Der Wellenlängenbereich liegt zwischen 2,5 cm und 1,7 cm. Die Bezeichnung "Ku" kommt von "kurz unter" und soll aussagen, dass das Ku-Band direkt unter dem K-Band liegt.

Das Ku-Band wird in der Satellitenkommunikation benutzt und zwar für den Uplink im Frequenzband zwischen 14 GHz und 18 GHz und im Downlink im Frequenzband zwischen 10,7 GHz bis 12,75 GHz.

Die Frequenzangaben für die *Mikrowellen*-Frequenzbänder sind nicht standardisiert und weichen in Abhängigkeit von der Anwendung beträchtlich voneinander ab.

L-Band (*L band*)

Das L-Band liegt im Bereich der Dezimeterwellen zwischen 0,390 GHz und 1,550 GHz. Das L-Band wird für Satellitenkommunikation und Satellitenradio benutzt, ebenso wie für *Mikrowellen*- und Radaranwendungen. Die Frequenzbereiche sind

bei den verschiedenen Anwendungen unterschiedlich. So wird das L-Band für Radaranwendungen zwischen 1 GHz und 2 GHz spezifiziert, für *Hohlleiter* zwischen 1,12 GHz und 1,7 GHz.

In der Satellitenkommunikation mit LEO-Satelliten werden im L-Band beispielsweise über den Downlink die Nutzdaten von den Iridium-Satelliten hin zu den Mobilstationen übertragen.

Bei dem Global Positioning System (GPS) ist das L-Band in die zwei Frequenzbänder L1 und L2 unterteilt. Die Mittenfrequenz von L1 beträgt 1,57542 GHz, die von L2 1,22760 GHz. Das L1-Band wird für militärische Anwendungen benutzt, die Signale sind verschlüsselt, das L2-Band arbeitet unverschlüsselt und ist für die zivile Nutzung.

LNB, low noise blockconverter (LNB-Converter)

Ein Low Noise Blockconverter (LNB) ist ein rauscharmer Konverter, der die Antennensignale von Parabolantennen verstärkt und frequenzmäßig umsetzt. Da Parabolantennen für den Fernseh-Satellitenempfang im *Mikrowellenbereich* bei 10,7 GHz bis 12,75 GHz arbeiten, müssen diese HF-Signale in tiefere Frequenzen konvertiert werden, damit sie übertragen und empfangen werden können. LNBs arbeiten mit Hochfrequenztransistoren, den *HEMTs*, und erreichen Verstärkungen von 50 dB bis 60 dB.

Dabei werden im LNB die Empfangsfrequenzen mit der Lokaloszillatorfrequenz (LOF) gemischt und das untere Seitenband als Zwischenfrequenz ausgefiltert. Die Zwischenfrequenzen liegen im *F-Band* zwischen 950 MHz und 2,050 GHz. Diese Frequenzen werden dem Receiver zugeführt, der daraus die einzelnen Satellitenkanäle selektiert.

Der LNB ist als Singleband-LNB für ein Frequenzband ausgelegt, er kann aber auch mehrere Frequenzbänder in vertikaler und horizontaler Polarisationssebene empfangen. Diese LNBs eignen sich für Gemeinschafts-Antennenanlagen. Die Umschaltung der Empfangsebene erfolgt mittels Gleichspannung.

Für den gleichzeitigen Empfang von mehreren Satelliten mit einer einzigen Parabolantenne, gibt es das so genannte Multifeed. Bei dieser Technik sind an dem



Parabolantenne (Ausschnitt) mit zwei LNBs, Foto: Kathrein

Parabolspiegel mehrere LNBS angebracht, wobei der Parabolspiegel allerdings eine Defokussierung aufweist um die verschieden positionierten Satelliten empfangen zu können. Die Multifeed-Technik kann wegen der Defokussierung nur dann eingesetzt werden, wenn die Satelliten nicht weiter als 10 Grad auseinander liegen.

LNBS gibt es in einfacher universeller Version als Single-LNB, in universeller Doppelausführung als Dual-LNB, Dualband-LNB oder Twin-LNB und in Vierfachausführung als Quatro-LNB, wobei sich das Universelle auf den Empfang des gesamten Frequenzbandes und somit für analoges Fernsehen und Digital-TV bezieht.

LNC, low noise converter (LNC-Converter)

Wie der Name Low Noise Converter (LNC) oder Low Noise Blockconverter (LNB) bereits aussagt, handelt es sich um einen rauscharmen Konverter, der die Antennensignale von Parabolantennen verstärkt und frequenzmäßig umsetzt. Da Parabolantennen für den Fernseh-Satellitenempfang im *Mikrowellenbereich* bei 10,70 GHz bis 12,75 GHz arbeiten, müssen diese HF-Signale in tiefere Frequenzen konvertiert werden, damit sie übertragen und empfangen werden können. Der LNC, der bei der Antenne im Brennpunkt der Parabolantenne installiert ist, mischt die Empfangsfrequenzen mit einer Lokalszillatorfrequenz (LOF) und filtert das untere Seitenband als Zwischenfrequenz aus. Die Zwischenfrequenzen liegen im *F-Band* zwischen 950 MHz und 2,050 GHz. Diese Frequenzen werden dem Receiver zugeführt, der daraus die einzelnen Satellitenkanäle selektiert.

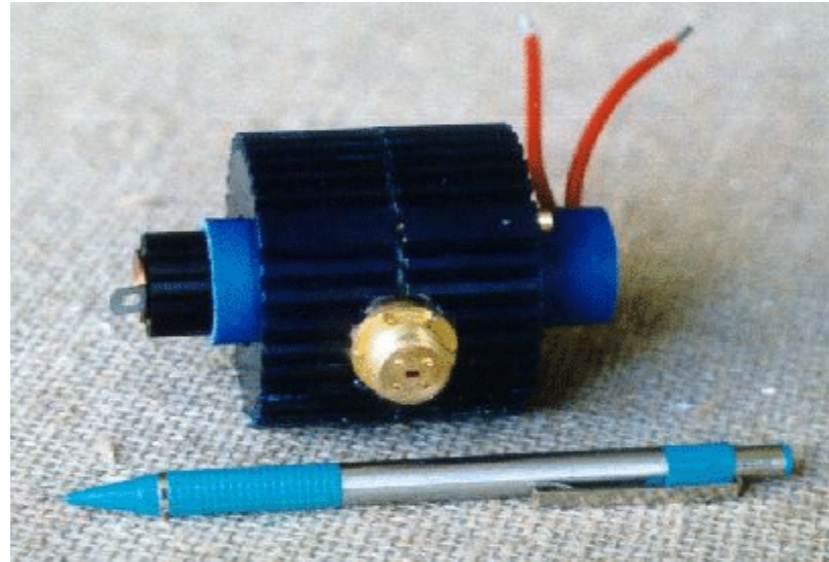
Es gibt LNCs und LNBS für einen oder mehrere Frequenzbänder. Bei universellen LNCs für mehrere Frequenzbänder erfolgt die Umschaltung der Frequenzbänder mit einem 22-kHz-Steuersignal. Außerdem kann die Polarisationssebene des LNCs verändert werden.

Dies erfolgt durch verschiedene Gleichspannungspegel.

Daneben gibt es Dualband-LNBS zum Empfang der Frequenzbereiche von 10,70 GHz bis 11,7 GHz für analoges Fernsehen und 11,7 GHz bis 12,75 GHz für Digital-TV, Twin-LNBS mit zwei Ausgängen und Quatro-LNBS mit vier Anschlüssen, die den Polarisationssebenen und Frequenzbändern fest zugeordnet sind.

Magnetron (magnetron)

Magnetron,
Foto: Inside Product



Magnetrone sind elektronische Bauelemente für die Generierung von *Mikrowellen*. Es handelt sich um Vakuumröhren bestehend aus Kathode, Hohlraumresonatoren und Anode, die von einem Permanentmagneten umschlossen sind. Die Kathode wird beheizt und zur besseren Emission von Elektronen wird sie mit Hochspannung versorgt. Das permanente Magnetfeld lenkt die

Elektronen in eine kreisförmige Umlaufbahn, an die mehrere Resonatoren über schmale Schlitze angeschlossen sind. Auf dem Weg zur Anode streichen die Elektronen entlang der schmalen Schlitze in der Anode und regen die Hohlraumresonatoren zum Schwingen an.

Die Auskopplung der Mikrowellenschwingung erfolgt über *Hohlleiter* und Antennen.

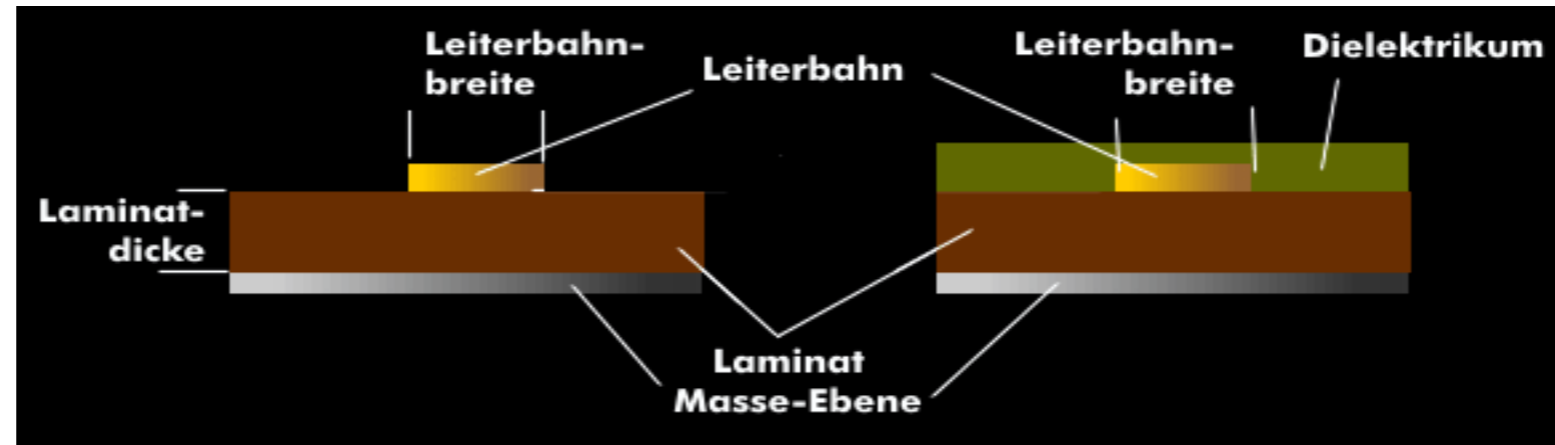
Microstrip (microstrip)

Microstrips wurden für die Übertragung von hochfrequenten Signalen auf Leiterplatten entwickelt. Bei der Übertragung von hochfrequenten und Digitalsignalen spielt die Leiterbahnführung auf der Leiterplatte eine funktionsentscheidende Rolle. undefinierte Impedanzen der Leiterbahnen verursachen bei hohen Frequenzen Phasenverschiebungen und bei kurzzeitigen Anstiegsflanken können sie die Schaltzeiten beeinträchtigen. Die Probleme, die undefinierte Impedanzen von Leiterbahnen auslösen können, führen bei High-Speed-Logiken zu Funktionsbeeinträchtigungen.

Microstrips und *Striplines* sind Techniken mit denen Leiterbahnen so konstruiert werden, dass sie definierte Impedanzen haben.

Microstrips sind flache, planare Leiterbahnen für die Übertragung von hochfrequenten Signalen. Sie werden auf Leiterplatten und in monolithischen *Mikrowellen-ICs* (MMIC) eingesetzt. Entwickelt wurden sie von den ITT-Labs in die 50er Jahren.

*Aufbau eines Microstrips,
als Surface und Coated
Microstrip*



Microstrips bestehen aus einer Leiterbahn, dem Microstreifen, aufgebracht auf dem Basislaminat oder einem dielektrischen Substrat, und der Masse-Ebene mit der Potentialreferenz. Das Laminat separiert die Leiterbahn von der Masse-Ebene und bildet mit dieser eine Kapazität. Das Dielektrikum oberhalb der Leiterbahn kann Luft sein oder ein dielektrischer Überzug aus Lötstopplack.

Die Impedanz des Microstrips ist abhängig von der Leiterbahn-Induktivität, der effektiven Dielektrizitätskonstante und der Kapazität. Letztere wird bestimmt durch die Breite der planaren Leiterbahn, durch die Dicke des Laminats und dessen Dielektrizitätskonstante.

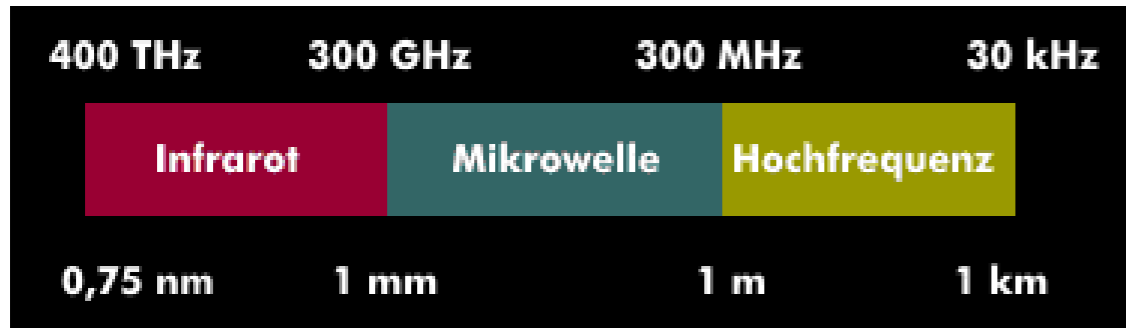
Wenn sich oberhalb der Leiterbahn Luft befindet, spricht man von einem Surface Microstrip, ist oberhalb der ein Lötstopplack aufgetragen, dann handelt es sich um einen Coated Microstrip. Beim Surface Microstrip ist die effektive Dielektrizitätskonstante geringer als die des dielektrischen Laminats.

In der Praxis liegt die Impedanz eines Microstrips mit einer Leiterbahnbreite von 200 μm , der sich auf einem Laminat mit einer Dicke von 200 μm befindet, das eine Dielektrizitätskonstante von 5 hat, zwischen 40 Ohm und 50 Ohm. Die Leiterbahndicke reduziert die Impedanz nur unwesentlich.

Je nach dielektrischem Substrat und dessen Dicke können mit Microstrips Frequenzen zwischen 20 GHz und 160 GHz übertragen werden.

Mikrowelle (*micro wave*)

Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen mit Frequenzen von 1 GHz bis 100 GHz. Sie haben Wellenlängen von ca. 30 cm bis zu 3 mm. Das bedeutet, dass zu



Frequenzen und Wellenlängen von Infrarot, Mikrowelle und Hochfrequenz

den Mikrowellen sowohl Zentimeter- als die *Millimeterwellen* gehören.

Die Angaben über den Mikrowellenbereich schwanken beträchtlich. Es gibt Angaben in denen die untere Frequenz des Mikrowellenbereiches mit 300 MHz angegeben wird, womit sie sich dieser direkt an den Hochfrequenzbereich

anschließen würde. Die oberen Frequenzangaben schwanken zwischen 20 GHz und 300 GHz.

Gleiches gilt für die verschiedenen Frequenzbänder, die anwendungsspezifisch unterschiedlich sein können. Daher weichen die Frequenzbänder für die Satellitenübertragung von denen für Radarsysteme oder *Hohlleiter* ab.

Mikrowellen haben das gleiche physikalische Verhalten wie Licht oder andere elektromagnetische Wellen. Sie breiten sich im Raum mit Lichtgeschwindigkeit aus und transportieren Energie. Die Effekte der Beugung, Brechung, Interferenz, Reflexion und Polarisation entsprechen denen des Lichts. Je nach Molekularstruktur können Mikrowellen von Materialien reflektiert oder absorbiert und auch durchstrahlt werden.

Metalle reflektieren Mikrowellen, Keramiken, Glas und Kunststoffe hingegen werden von ihnen durchstrahlt und polare Flüssigkeiten absorbieren sie.

Mikrowellentechnik (*microwave technics*)

Die Mikrowellentechnik ist eine Technik mit der Informationen oder Energie mit *Mikrowelle* übertragen werden. Die Mikrowellentechnik befasst sich mit der Generierung, Verstärkung, Übertragung und Abstrahlung von Mikrowellen. Der Mikrowellenbereich reicht von 300 MHz bis 300 GHz.

Mikrowellen werden mit elektronischen Bauelementen und Resonatoren erzeugt, die in diesem Hochfrequenzbereich besondere Eigenschaften aufweisen. Neben dem *Magnetron* und *Klystron*, die Mikrowellen mit hoher Energie erzeugen können, sind DRO-Oszillatoren und *YIG-Oszillatoren* zu nennen; an Bauteilen Transistoren, FETs, Gunn-Dioden, *HEMTs* und *Wanderwellenröhren*.

Die Übertragung von Mikrowellen muss das Materialverhalten berücksichtigen und

Frequenzbereiche für Mikrowellen

Kurzbezeichnung	Bezeichnung	Frequenzbereich	Metrische Bezeichnung
UHF	ultra high frequency	300 MHz bis 3 GHz	Dezimeter-Wellen
SHF	super high frequency	3 GHz bis 30 GHz	Zentimeter-Wellen
EHF	extremely high frequency	30 GHz bis 300 GHz	Millimeter-Wellen
keine	keine Bezeichnung	300 GHz bis 3 THz	Dezimeter-Wellen

kann nur in einem begrenzten Frequenzbereich über *Hochfrequenzkabel* erfolgen. Bei ca. 10 GHz stößt die

leitungsgebundene Übertragung an gewisse Grenzen, die sich in einer stark steigenden Dämpfung zeigen. Es gibt zwar Mikrowellen- und *HF-Stecker* mit denen Frequenzen bis über 100 GHz übertragen werden können, aber dies geht nur über einen begrenzten Entfernungsbereich. Für Leiterplatten wurden *Striplines* und *Microstrips* entwickelt, über die Frequenzen von 50 GHz und mehr übertragen werden können. Leistungsstarke Mikrowellensignale können ohnehin nicht über HF-Kabel übertragen werden, da deren Dämpfung für Mikrowellen zu hoch ist. Aus diesem Grund werden höhere Gigahertz-Wellen in *Hohlleitern* übertragen, wobei die Reflexion von Metall ausgenutzt wird. Da bestimmte Materialien für Mikrowellen durchlässig sind, kann man Mikrowellen mit Kunststofflinsen bündeln.

Andererseits können Mikrowellen von bestimmten Stoffen absorbiert werden und geben ihre Energie an die Stoffe ab. Diese Fähigkeit wird durch den dielektrischen Verlustfaktor des Stoffes bestimmt, der abhängig ist vom Material, der Mikrowellenfrequenz und der Temperatur. Das bekannteste Beispiel hierfür ist Wasser, das in Mikrowellenherden zum Kochen gebracht werden kann.

Die Mikrowellentechnik hat in den verschiedensten Anwendungen Einzug gehalten. So als Funktechnik für Babyphones und Garagentüröffner, in WLANs, Bluetooth und RFID, Satellitenübertragung und Mikrowellen-Richtfunk, WiMax, LMDS und ZigBee, Radarsysteme und Mobilfunk. Darüber hinaus in Mikrowellenherden, Plasmaanlagen und in der Materialprüfung, um nur einige von vielen Beispielen zu nennen.

Millimeterwelle
(*millimeter wave*)

Frequenzen mit Wellenlängen, die größer als 1 mm und kleiner als 1 cm sind, werden als Millimeterwellen bezeichnet, die die größer als 1 cm sind, als

Zentimeterwellen. Das Frequenzspektrum für Millimeterwellen liegt zwischen 30 GHz und 300 GHz, das der Zentimeterwellen zwischen 3 GHz und 30 GHz. Oberhalb von 300 GHz beginnt der Bereich der Sub-Millimeterwellen. Beide Wellenlängen, die Zentimeter- und die Millimeterwellen gehören zu den *Mikrowellen*.

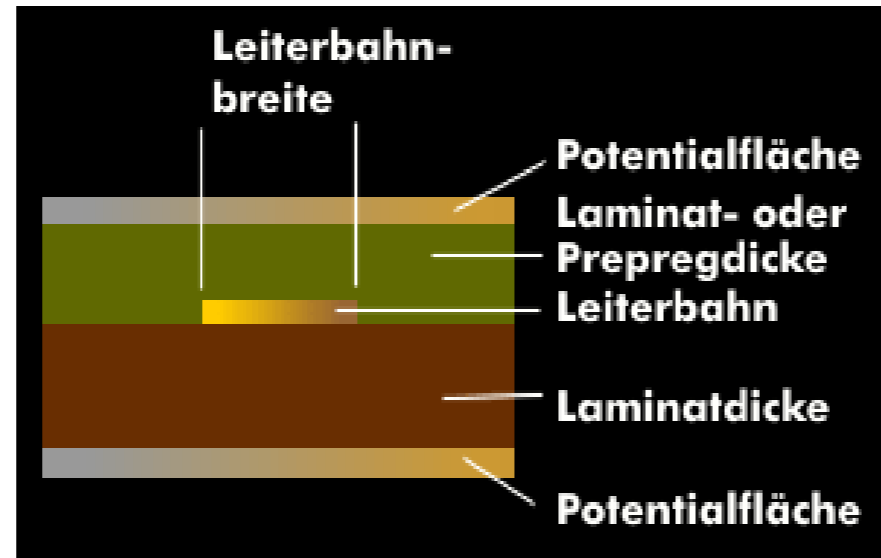
Q-Band
(*Q band*) Das Q-Band liegt im *Millimeterwellen-Bereich* (EHF) zwischen 30 GHz und 50 GHz und überdeckt Teile des V-Bands und des Ka-Bands. Diese Angaben beziehen sich auf die *Mikrowellentechnik*. Die Radartechnik ist das entsprechende Frequenzband das V-Band zwischen 40 GHz und 75 GHz.

Rauschtemperatur
(*noise temperature*) Die Rauschtemperatur ist ein äquivalentes Maß für das thermische Rauschen von *Mikrowellen*-Empfangssystemen. Die in Kelvin (K) angegebene Rauschtemperatur summiert sich bei den einzelnen Empfangskomponenten wie der Antenne, des *LNB-Converters* und anderer Misch- und Verstärkungseinrichtungen zu der Rauschtemperatur des gesamten Empfangssystems. Für die Signalverarbeitung ist das Verhältnis von Gain to Noise Temperature (G/T) die entscheidende Rolle, da mit steigender Rauschtemperatur eine Verschlechterung der Empfindlichkeit einher geht.

S-Band
(*S band*) Das S-Band umfasst den Frequenzbereich zwischen 2 GHz und 4 GHz. In der Satellitenübertragung und bei Interkontinentalverbindungen handelt es sich um den Frequenzbereich von 1,55 GHz bis 5,20 GHz. Die mittlere Wellenlänge liegt bei 10 cm. Das S-Band ist in sich nochmal unterteilt. Für die *Mikrowellentechnik* und Radaranwendungen hat die IEEE das S-Band zwischen 2 GHz und 4 GHz spezifiziert.

Stripline
(*Streifenleitung*) Streifenleitungen und *Microstrips* sind Übertragungsleitungen um hochfrequente Signale mit definiertem Übertragungsverhalten über Leiterplatten zu übertragen. Beide Techniken wurde Mitte des letzten Jahrhunderts entwickelt und unterscheiden sich in einigen Details. Während bei der Streifenleitung die Leiterbahnen in einer Art

Aufbau der Stripline



Sandwich zwischen zwei Potentialflächen eingebettet sind, arbeitet das Microstrip nur mit einer Potentialfläche.

Technisch wird mit der Stripline ein *Hochfrequenzkabel* mit definierter Impedanz nachgebildet. Die beiden äußeren Potentialflächen bilden den Außenleiter, die dazwischen liegende Leiterbahn den Innenleiter. Zwischen der unteren Potentialfläche und der inneren

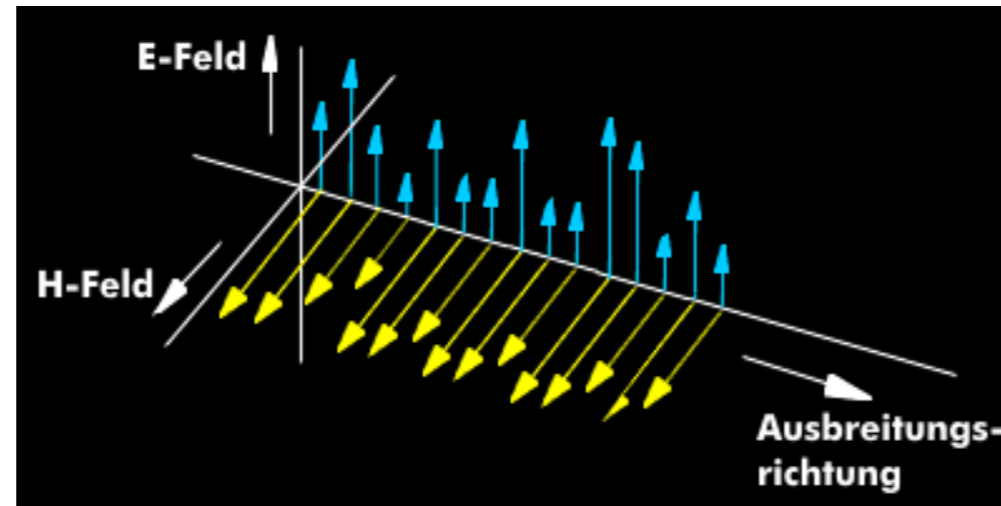
Leiterbahn liegt als Dielektrikum das Laminat der Leiterplatte. Oberhalb der Leiterbahn das Prepreg. Die Impedanz der Streifenleitung wird durch die Leiterbahnbreite sowie durch die Dicke des Laminats und des Prepregs und deren Dielektrizitätskonstanten bestimmt. Je größer die Laminat- und Prepregdicke, desto höher die Impedanz. Dagegen beeinflusst die Leiterbahndicke die Impedanz der Stripline nur unwesentlich: Je dicker die Leiterbahn, desto geringer die Impedanz. Eine Verdoppelung der Leiterbahndicke führt zu einer Impedanzreduzierung von etwa 1 % bis 2 %.

Die Vorteile beider Techniken, der der Stripline und der des Microstrips, liegen in der Herstellungstechnik, da sie bereits in der Leiterplattenplanung berücksichtigt werden können und auf der Leiterplatte selbst keine *HF-Stecker* eingebaut werden müssen. Im Gegensatz zum Microstrip ist die Stripline durch die beiden Potentialflächen beidseitig gegen *elektromagnetische Felder* abgeschirmt.

TEM, *transverse electromagnetic*
(*Transversale Welle*)

Transversale, elektromagnetische Strahlung zeichnet sich durch ein besonderes Strahlungsmuster aus, bei dem das elektrische Feld, das E-Feld, und das magnetischen Feld, dem H-Feld, senkrecht aufeinander stehen. Beide Wellen sind nicht miteinander in Phase, variieren in ihrer Stärke unabhängig voneinander und stehen im rechten Winkel zur Ausbreitungsrichtung. In Ausbreitungsrichtung treten weder elektrische noch magnetische Felder auf.

Transversale Wellen mit rechtwinklig aufeinander stehenden magnetischen und elektrischen Feldern



Bei der transversalen Welle sind die Amplitude des H-Felds und die des E-Felds über die Impedanz des freien Raums voneinander abhängig. Die transversale Ausbreitungsform tritt bei Hochfrequenzwellen und *Mikrowellen* auf, die in *Hohlleitern* übertragen werden. Aber auch bei

Licht in Lichtwellenleitern und in optischen Resonatoren. Darüber hinaus gibt es so genannte TEM-Zellen, das sind rechteckförmig aufgeweitete Koaxialleitung zur Erzeugung transversaler elektrischer Felder. Sie werden beispielsweise für die Untersuchung der EMV-Störfestigkeit benutzt.

Terahertz THz, (tera hertz)

Technisch betrachtet handelt es sich bei Terahertz-Frequenzen um hochfrequente *Mikrowellen* oder um langwelliges Licht. Ihr Frequenzbereich liegt zwischen 100 GHz und 10 THz. Die Wellenlängen dieser THz-Frequenzen wird auch dem fernen Infrarotlicht (FIR) zugerechnet, dessen Wellenlängenbereich zwischen 15 μm und 1 mm liegt. Es geht somit um den Frequenzbereich zwischen Mikrowellen und Infrarotlicht. Da dieser Frequenzbereich lange Zeit nur eingeschränkt nutzbar war, wurde er auch als Terahertz-Lücke bezeichnet.

Da Terahertz-Strahlung viele Materialien und biologische Gewebe durchdringt, ist diese Technik von besonderem Interesse für die Materialforschung und kann für das Durchleuchten von Körpern benutzt werden. Der Vorteil der THz-Strahlung gegenüber der Röntgenstrahlung ist darin zu sehen, dass, bedingt durch die geringe Energie, die die Photonen haben, diese nicht ionisierend wirken. Wie bei der Bestrahlung mit Mikrowelle absorbieren verschiedene Materialien THz-Schwingungen und wandeln sie in Wärme um.

Anwendungstechnisch eignet sich die THz-Technik u.a. für Detektor-Systeme zur Überprüfung von Flugpassagieren, für WLANs, für militärisch und privat einsetzbare

Kontrollsysteme wie die Durchleuchtung von Passagieren, Paketen oder Briefen und auch für die Medizintechnik.

Mit der Entwicklung von Gigabit-WLANs im THz-Bereich beschäftigt sich die Arbeitsgruppe VHT SG von IEEE 802.11.

TWT, *travelling wave tube*
(*Wanderwellenröhre*)

Wanderwellenröhren werden zur Verstärkung von *Mikrowellen* verwendet und in Satelliten zur Signalverstärkung eingesetzt.

Eine Wanderwellenröhre ist eine leistungsstarke Höchstfrequenzröhre für Mikrowellensender bei der das Steuersignal mit dem Elektronenfluss innerhalb der Röhre wandert. Der Elektronenfluss wird zu jedem Zeitpunkt durch das mitlaufende Steuersignal beeinflusst.

U-Band
(*U band*)

In der *Mikrowellentechnik* belegt das U-Band den Frequenzbereich zwischen 40 GHz und 60 GHz. In der Radartechnik ist dieser Bereich von dem V-Band von 40 GHz bis 75 GHz belegt.

W-Band
(*W band*)

In der *Mikrowellentechnik* und der Radartechnik liegt das W-Band im *Millimeterwellen-Bereich* zwischen den Frequenzen von 75 GHz und 110 GHz. Der Wellenlängenbereich liegt zwischen 4 mm und 2,7 mm. In der Radartechnik liegt das W-Band oberhalb des V-Bandes.

X-Band
(*X band*)

In der *Mikrowellentechnik* und der Radartechnik belegt das X-Band den Frequenzbereich zwischen 8 GHz und 12 GHz. Es handelt sich also um Zentimeterwellen (SHF) mit Wellenlängen zwischen 3,75 cm und 2,5 cm. Innerhalb des X-Bandes gibt es das Xc-Band zwischen 7,25 GHz und 8,4 GHz, das für militärische Anwendungen reserviert ist.

Y-Band
(*Y band*)

Das Y-Band ist ein Frequenzband im *Mikrowellenbereich*. Es reicht von 1,605 GHz bis 3,80 GHz, die Wellenlängen liegen zwischen 50 cm und 12 cm.

YIG, yttrium-iron garnet
(YIG-Oszillator)

*YIG-Oszillator,
Foto: Teledyne*



YIG-Oszillatoren sind *Mikrowellen*-Oszillatoren, die mit einem externen magnetischen Feld über mehrere Oktaven abgestimmt werden können. Es handelt sich um Festkörper-Resonatoren, deren frequenzbestimmendes Element eine Kugel aus Yttrium-Iron-Granat ist. Dieses Material hat einen extrem hohen Gütefaktor (Q) und kann durch Anlegen eines externen Magnetfeldes in seiner Frequenz variiert werden. Wird der YIG-Resonator zusätzlich mit Gallium dotiert, kann dadurch der Frequenzbereich noch vergrößert werden.

Die Frequenzbereiche für YIG-Oszillatoren liegen zwischen 0,5 GHz und 25 GHz. Dank der hohen Güte haben YIG-Oszillatoren nur geringes Phasenrauschen und eine hohe Linearität der Abstimmung, die proportional des angelegten Magnetfeldes ist. Das Phasenrauschen liegt unter -100 dBc/Hz, typische Linearitätswerte unter 0,1 % bei einer relativ konstanten Ausgangsspannung von +/- 2 dB über den gesamten Abstimmbereich. Um die Frequenzstabilität temperaturunabhängig zu machen, werden die YIG-Resonatoren in einem geschlossenen, geheizten Gehäuse (Ofen) mit konstanter Temperatur von etwa 80 °C betrieben.

YIG-Oszillatoren werden im Mikrowellenbereich überall dort eingesetzt, wo es auf den großen Abstimmbereich ankommt. So beispielsweise bei Spektrumanalysatoren, in Mikrowellen-Empfängern und Militärgeräten.

YIG-Resonatoren können ebenso als abstimmbare YIG-Mikrowellenfilter eingesetzt werden.