Hochschule Magdeburg • Stendal

FI Test- und Messtechnik GmbH

Einführung in die Mikrowellenbasierte Zerstörungsfreie Prüfung

Johann H. Hinken

Bei neuartigen Materialien können herkömmliche Methoden der Zerstörungsfreien Prüfung an ihre Grenzen kommen. Dann werden neue Methoden erforderlich. So bietet sich zur Prüfung von Bauteilen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GfK) oder anderen elektrisch isolierenden Materialien die Mikrowellenbasierte Zerstörungsfreie Prüfung (MWZfP) an. Dieses Verfahren ist zwar in wissenschaftlicher Literatur mehrfach behandelt worden, jedoch steht die breite industrielle Nutzung noch bevor. Dieser Aufsatz will die Grundlagen der Mikrowellenbasierten Zerstörungsfreien Prüfung solchen Interessenten nahe bringen, die ein Grundverständnis für Physik und Zerstörungsfreie Prüfung besitzen. Der Aufsatz richtet sich daher sowohl an Studenten entsprechender Fachrichtungen wie auch an gestandene Prüfer, die Erfahrungen mit anderen ZfP-Methoden haben.
Das Grundprinzip der Mikrowellen-ZfP erfahren wir im Alltagsleben im optischen Bereich. Bild 1 zeigt ein Trinkglas mit sprudelndem Wasser. Obwohl die Materialien Luft, Glas und Wasser alle transparent sind, sind die doch voneinander zu unterscheiden, und zwar auf Grund ihrer unterschiedlichen Brechzahlen n. In ähnlicher Weise funktioniert die Mikrowellen-ZfP aufgrund unterschiedlicher Dielektrizitätszahlen $\varepsilon_r=n^2$.

Bild 1: Das sprudelnde Wasser im Trinkglas zeigt das Grundprinzip der Mikrowellen-ZfP.

In dieser Einführung wird die Mikrowellen-ZfP zur Materialprüfung im Allgemeinen beschrieben. Tiefergehende Abhandlungen findet man in [1]. Wie Mikrowellen zur Feuchtemessung verwendet werden können, findet man z.B. in [2].

1. Mikrowellen und ihre physikalischen Grundlagen

Es handelt sich um elektromagnetische Wellen, das heißt um fortschreitende, mit einander verknüpfte elektrische und magnetische Felder. Es handelt sich dabei um Wechselfelder, wobei mit "Mikrowellen" Wechselfelder mit Frequenzen im Bereich von 300 MHz bis 300 GHz bezeichnet werden. Bild 2 zeigt ausgewählte weitere Nutzungsarten von Mikrowellen, wie z.B. Mobilfunk. Mikrowellenherde werden bei 2,45 GHz betrieben, und direktes Satellitenfernsehen nutzt Frequenzen um 10 GHz.

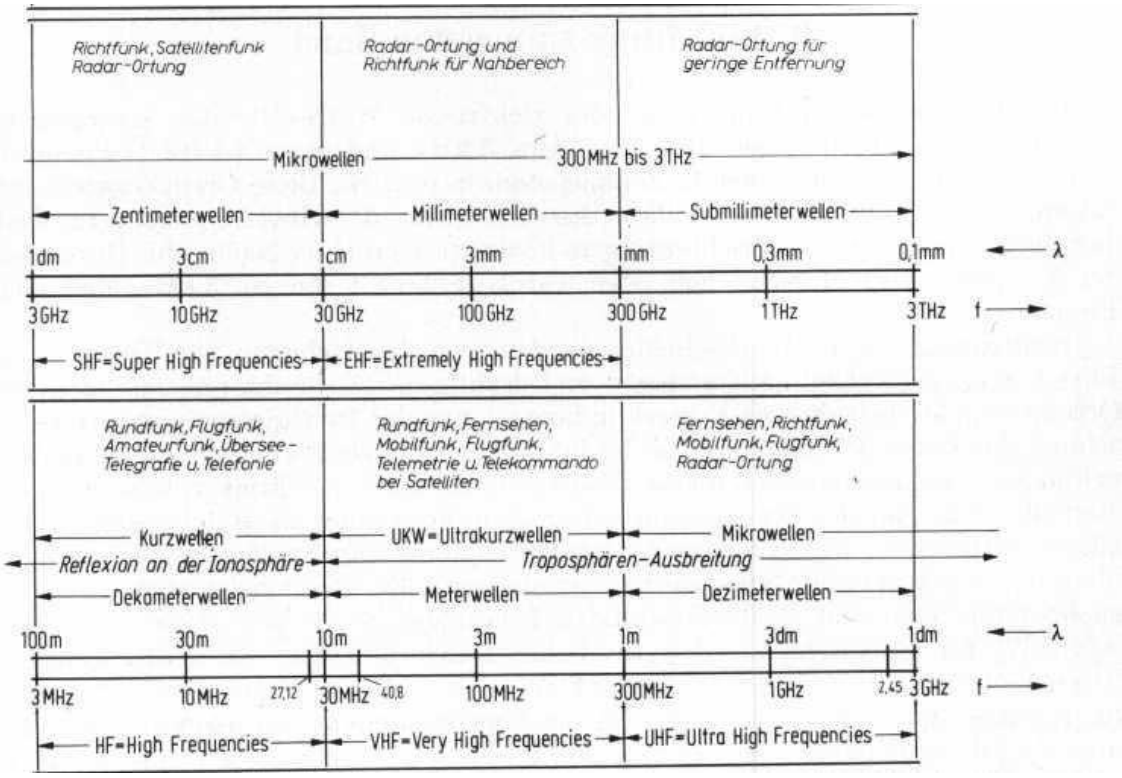


Bild 2: Frequenzbereiche von Kurzwellen, Ultrakurzwellen und Mikrowellen [3]

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt im Vakuum c_0=2,9979 x10^8 m/s. Sie beträgt daher in Luft in guter Näherung 3x10^8 m/s. In Materie ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon_r}} \tag{1}$$

Bei den für MWZfP geeigneten Materialien ist zumeist die magnetische Permeabilitätszahl μ_r=1. Die Dielektrizitätszahl ε_r liegt typischerweise zwischen 1 (Luft) und etwa 10 (Al_2O_3-Keramik).

Die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2}$$

liegt für Mikrowellen in Luft zwischen 30 cm und 0,3 mm. In Stoffen mit $\varepsilon_r>1$ ist sie entsprechend verkürzt.
In Abständen von der Sendeantenne, die groß gegenüber der Wellenlänge und groß gegenüber den Antennenquerabmessungen sind, stehen das elektrische und das magnetische Feld in festen Relationen zueinander. Bild 3 zeigt, dass in dieser "Fernfeld"-Situation die Vektoren des elektrischen Feldes und des magnetischen Feldes senkrecht zueinander stehen und darüber hinaus auch noch senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. So wie auf elektrischen Leitungen der Wellenwiderstand definiert ist aus dem Verhältnis von Spannung zu Strom einer Welle, so ist er im Falle der Wellenausbreitung im Raum durch das Verhältnis der Amplituden der elektrischen Feldstärke zur magnetischen Feldstärke definiert. Er hängt von den Materialkonstanten ab.

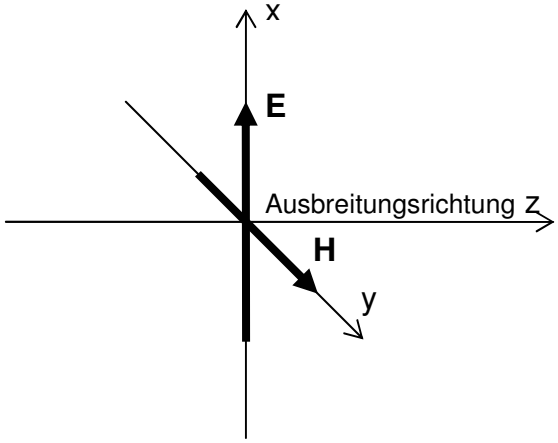


Bild 3: Elektrisches Feld E, magnetisches Feld H, Ausbreitungsrichtung z einer elektromagnetischen Welle im Fernfeld

Es gilt:

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}} = \frac{120 \cdot \pi\Omega}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{3}$$

Man bezeichnet diesen Wellenwiderstand dann auch als Feldwellenwiderstand. In Bild 3 ist der Ausschnitt einer Welle gezeigt, die in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung überall die gleiche Phase hat, z.B. momentan einen Nulldurchgang. Wenn über diese Ebene verteilt auch die Amplitude konstant ist, spricht man von einer homogenen ebenen Welle.

Wenn eine solche homogene ebene Welle aus einem Medium 1 auf ein Medium 2 trifft, so wird ein Teil der Welle reflektiert und ein Teil transmittiert. Der Reflexionskoeffizient ergibt sich aus den unterschiedlichen Wellenwiderständen zu

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{4}$$

Bei Vorhandensein mehrerer Grenzschichten, z.B. Kunststoffplatten in Luftumgebung treten Mehrfachreflexionen auf. Bei Schichtdicken, die größer als etwa eine viertel

Wellenlänge sind, können ausgeprägte stehende Wellen in Ausbreitungsrichtung auftreten.

Die Welle in Bild 3 hat eine elektrische Feldstärke, die in x-Richtung eingezeichnet ist. Das bedeutet, dass sie in einer Momentaufnahme zu einem gewissen Zeitpunkt in +x-Richtung zeigt und eine halbe Periodendauer später in -x-Richtung. Die Spitze des Vektors der elektrischen Feldstärke bewegt sich ausschließlich auf einer Geraden. Man nennt das elektrische Feld und die Welle dann auch "linear polarisiert". Wenn nicht anders angegeben, wird mit der Polarisationsrichtung einer Welle die Richtung ihrer elektrischen Feldstärke beschrieben. Hier handelt es sich also um eine in x-Richtung linear polarisierte Welle. Im Gegensatz dazu gibt es auch zirkular polarisierte Wellen. Bei diesen drehen sich die Vektoren der elektrischen und der magnetischen Feldstärke in der x/y-Ebene, wobei eine 90°-Drehung in einer viertel Periodendauer vollführt wird.

Elektromagnetische Wellen werden von Antennen angeregt. In der Nähe solcher Antennen, im so genannten Nahfeld, ist die Feldverteilung zumeist viel komplizierter als im oben beschriebenen Fernfeld. Je nach Antennenform kann es sich um eine vorwiegend elektrische oder vorwiegend magnetische Antenne handeln. In der Mikrowellenbasierten Zerstörungsfreien Prüfung liegen häufig die Verhältnisse des Nahfeldes vor. Und man wird Antennenformen wählen nach Art von Kondensatoren, die über ihre elektrischen Felder auf die Prüfobjekte einwirken. Je nach deren lokal wirkender Dielektrizitätszahl ε_r stellen sich die Kapazität am Ende einer Leitung und der dort vorliegende Reflexionsfaktor ein.

2. Komplexe Wechselstromdarstellung

Zur übersichtlichen Darstellung und vereinfachten Berechnung von Systemen mit Wechselspannungen und –strömen im sinusförmig eingeschwungenem Zustand fester Frequenz hat sich die Komplexe Wechselstromdarstellung bewährt. Dazu wird beispielsweise die Spannung als Zeiger in einer zweidimensionalen Ebene komplexer Zahlen aufgetragen: der Realteil nach rechts, der Imaginärteil nach oben. Die Länge des Zeigers entspricht der Amplitude der Wechselspannung. Sein Winkel gegenüber der reellen Achse entspricht der Phase gemessen gegenüber einer Bezugsspannung. In ähnlicher Weise lassen sich nicht nur zeitlich veränderliche Größen wie Wechselströme und Wechselspannungen, sondern auch zeitlich unveränderliche Größen, wie komplexe Widerstände (Impedanzen) darstellen, die aus einer Kombination von Ohmschen Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten bestehen, siehe Bild 4. In der Wirbelstromtechnik ist es üblich, Signaturen einzelner Defekte in einer solchen Impedanzebene aufzutragen.

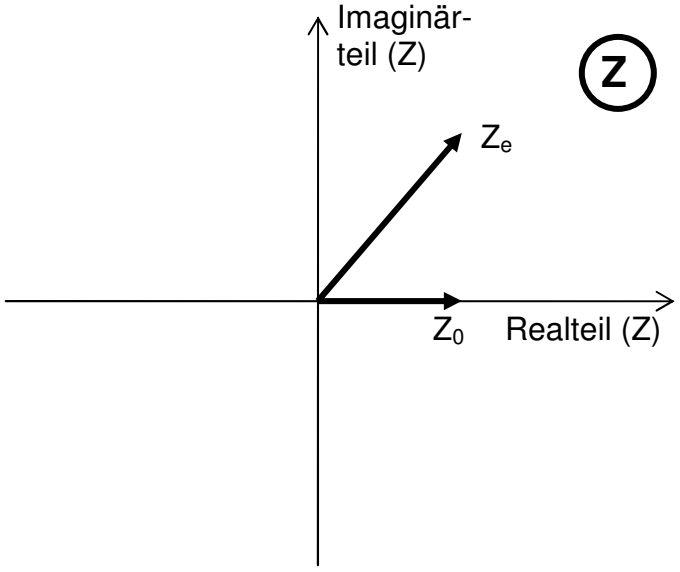


Bild 4: Darstellung eines komplexen Widerstandes, das heißt einer Impedanz Z, in der komplexen Impedanzebene

Die oben angesprochenen elektrischen und magnetischen Wechselfelder von Mikrowellen sind an jedem Ort im Raum durch ihre Richtung und darüber hinaus durch Amplitude und Phase bestimmt. Sie lassen sich damit auch in komplexen Ebenen darstellen. Das gilt auch für die Wechselspannungen und Wechselströme gleicher Frequenz auf den Zuleitungen der Sende- und Empfangsantennen, mit denen diese Felder erzeugt bzw. empfangen werden. Auch in dieser Situation ließe sich das Verhältnis von Spannungszeiger zu Stromzeiger in der komplexen Impedanzebene darstellen. Gebräuchlicher ist jedoch die Darstellung in der Ebene des Reflexionsfaktors r, der auch eine komplexe Größe ist. Den Zusammenhang zwischen der Impedanzebene und der Reflexionsfaktorebene zeigt Bild 5.

Die Ebenen gehen durch eine einfache Transformation in einander über, nämlich

$$r_e = \frac{Z_e - Z_0}{Z_e + Z_0} \tag{5}$$

Darin ist Z_e der zu charakterisierende Impedanzwert, Z_0 ist der Wellenwiderstand bzw. Feldwellenwiderstand der Bezugsleitung. Der so bestimmte Reflexionsfaktor r gilt nur für das Ende der Leitung als Bezugsebene. An anderen Stellen auf der Leitung , das heißt in anderen Bezugsebenen, hat der Reflexionsfaktor andere Werte. Bei verlustfreien Leitungen ändert sich dabei jedoch nur seine Phase und nicht sein Betrag.

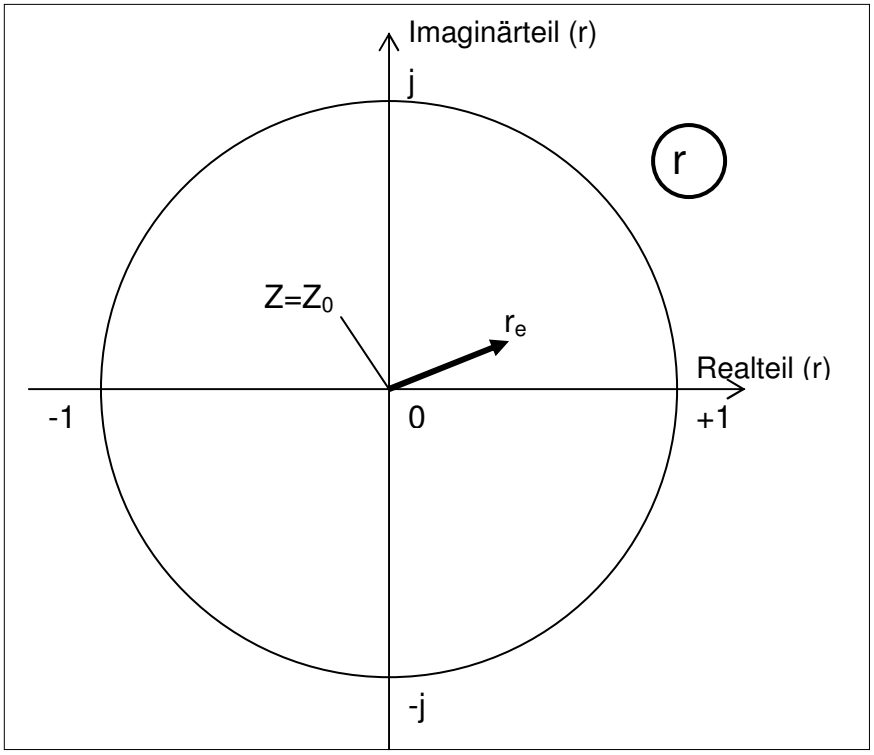


Bild 5: Komplexe Ebene des Reflexionsfaktors r

3. Geeignete Materialien

Der oben beschriebene Blick auf das Sektglas mit sprudelndem Inhalt zeigt, wie Inhomogenitäten im Brechzahlverlauf über örtliche Änderungen des Reflexionsfaktors wahrgenommen werden können. Ähnlich funktioniert auch die Mikrowellen-ZfP: Eine Antenne strahlt eine Mikrowelle lokal auf das Prüfobjekt ein. Die Mikrowelle dringt ein und wird nach Maßgabe der an und unter der Oberfläche vorhandenen Dielektrizitätszahl reflektiert. Dieses reflektierte Signal wird von der Antenne wieder aufgenommen und zur Anzeige gebracht. Ein Abtasten der Bauteiloberfläche mit der Antenne (Applikator) führt bei Inhomogenitäten zu auswertbaren Anzeigen.

Neben diesen Reflexionsverfahren kann auch ein Transmissionsverfahren zur Anwendung kommen.

Eine Voraussetzung für die Funktion der Mikrowellen-ZfP ist, dass das Material die Mikrowelle genügend wenig bedämpft. Das heißt, dass der dielektrische Verlustfaktor $\tan\delta$ genügend klein sein muss. Das Material wird dann vor allem durch seine Dielektrizitätszahl ε_r charakterisiert. Beide Größen, das heißt $\tan\delta$ und ε_r, sind im Allgemeinen frequenzabhängig, zumeist ist diese Frequenzabhängigkeit nicht sehr stark ausgeprägt.

Tabelle 1 gibt für einige relevante Materialien die Dielektrizitätszahl sowie den dielektrischen Verlustfaktor an. Ausführliche Daten von Kunststoffen finden sich im Anhang.

Tabelle 1: Dielektrizitätszahl und dielektrischer Verlustfaktor isolierender Materialien

Material	Dielektrizitäts-zahl ε_r	Diel. Verlustfaktor tanδ	Quelle
E-Glas	6,4 - 6,7	0,0025 (@1MHz)	[4]
E-CR-Glas	6,9	0,0028 (@1MHz)	[4]
D-Glas	3,85	0,0005 (@1MHz)	[4]
R-Glas	6,0	0,0019 (@1MHz)	[4]
AR-Glas	8,1	0,0031 (@1MHz)	[4]
C-Glas	6,9	0,0085 (@1MHz)	[4]
SMC 25% Glass reinforced	4 (@ 1MHz)	$\approx 0{,}02$	[5]
Al_2O_3-Keramik	9,4...9,8	0,0001	[6]
Vakuum	1		
Luft	1		
Teflon	2,1	0,0003	[6]

4. Geräte der Mikrowellen-ZfP

Die Mikrowellen-ZfP hat starke Ähnlichkeit mit dem herkömmlichen Wirbelstromprüfverfahren. Das gilt hinsichtlich der physikalischen Natur der Testfelder, der Gerätetechnik und auch der Fehlersignaturen. Deshalb kann es zweckmäßig sein, bestehende Wirbelstromprüfgeräte so aufzurüsten, dass mit ihnen Mikrowellen-ZfP durchgeführt werden kann. Bild 6 zeigt das Blockschaltbild eines solchen Vorschaltgerätes.

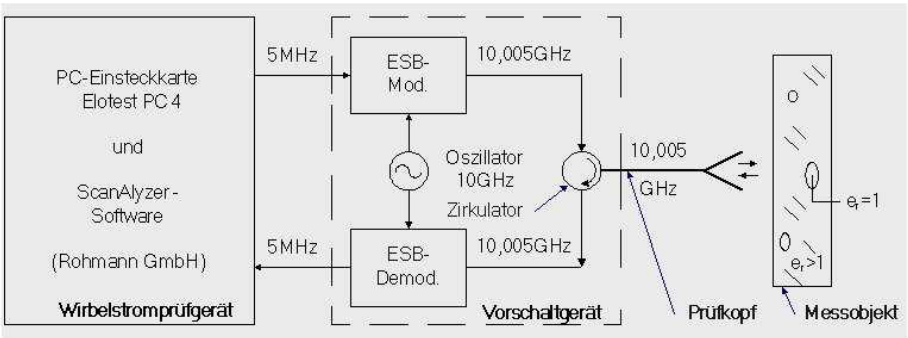


Bild 6: MWZfP-Prüfsystem mit Vorschaltgerät. Angedeutet ist auch das Messobjekt.

Das Wirbelstromprüfgerät wird auf 5 MHz eingestellt. Sein Ausgangssignal wird auf das Vorschaltgerät gegeben und dort phasenstarr mit dem Prüfsignal von 10 GHz verkoppelt. Dieses Prüfsignal wird über einen Applikator (Antenne) auf das Prüfobjekt gerichtet, dort nach Maßgabe der lokal vorliegenden Defekte reflektiert, von der Antenne wieder aufgenommen, im Vorschaltgerät vom Sendesignal separiert und auf

die Frequenz 5 MHz zurück gesetzt. Dieses 5-MHz-Ausgangssignal des Vorschaltgerätes hat die Phase und Amplitude des reflektierten 10-GHz-Signals und wird auf das Wirbelstromprüfgerät gegeben. Das Vorschaltgerät wirkt damit auf das Wirbelstromgerät wie eine Prüfsonde. Das Rohsignal kann nun vom Wirbelstromgerät mit allen seinen Möglichkeiten weiter verarbeitet werden: Frequenzfilterung, Schwellenwertanzeigen, C-Scan-Darstellung, statistische Auswertungen, usw. Bild 7 zeigt das Foto eines solchen Vorschaltgerätes vom Typ FVG1. Es ist hier mit einem Applikator bestückt, der im wesentlichen aus einem Krümmer, einer Anpaßschaltung (Tuner) und einer rechteckförmigen Lochblende am Ende eines Hohlleiters besteht.

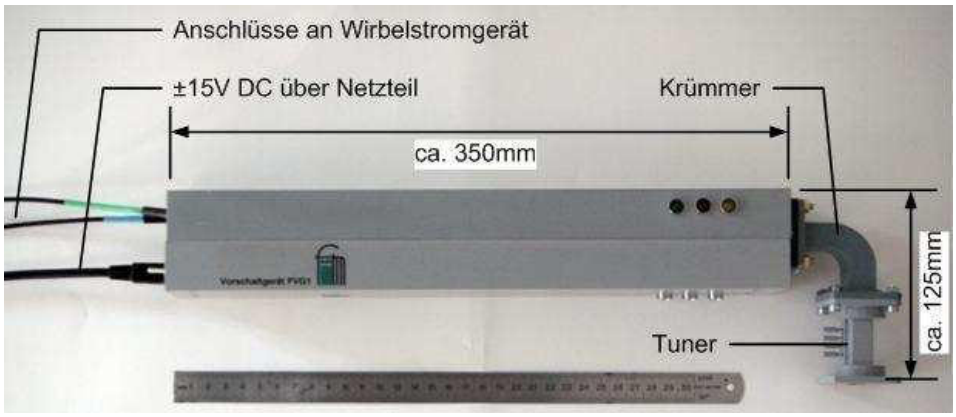


Bild 7: Foto des Vorschaltgerätes FVG1

Bild 8 zeigt das FVG1 zusammen mit dem Wirbelstromprüfgerät B300 in einem Prüfaufbau zum Abscannen eines flächigen Prüfobjektes. Das FVG1 ist für einen Einsatz geeignet, bei dem es ortsfest gehalten wird und das Prüfobjekt vorbei geführt wird oder bei dem es gehalten und mechanisch am Prüfobjekt vorbei geführt wird.

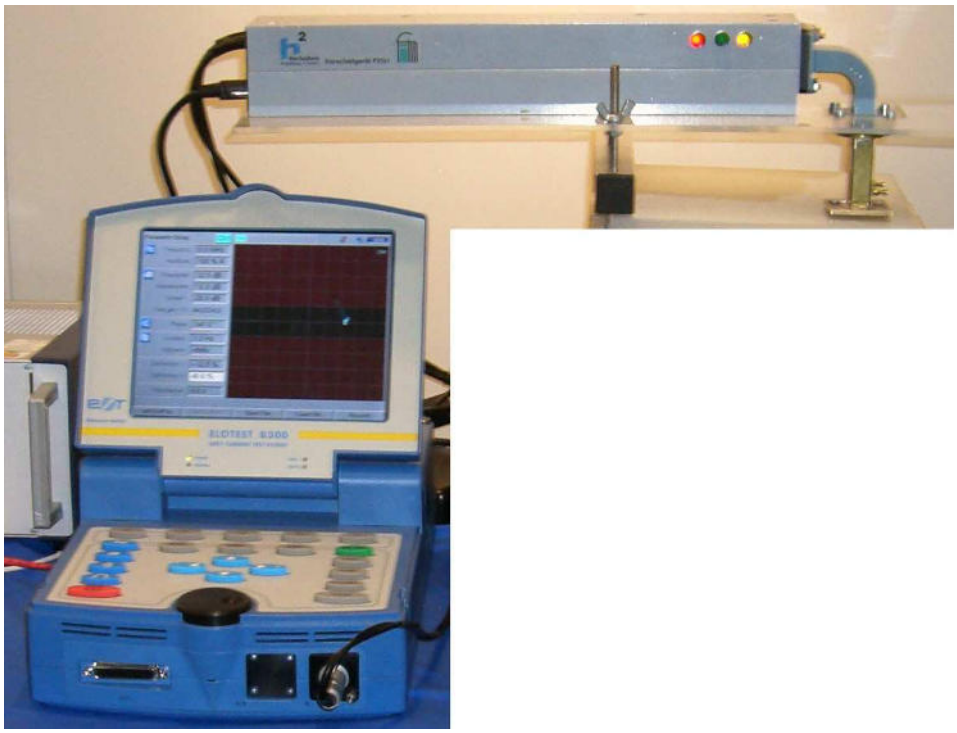


Bild 8: Foto des FVG1 zusammen mit dem Wirbelstromprüfgerät B300

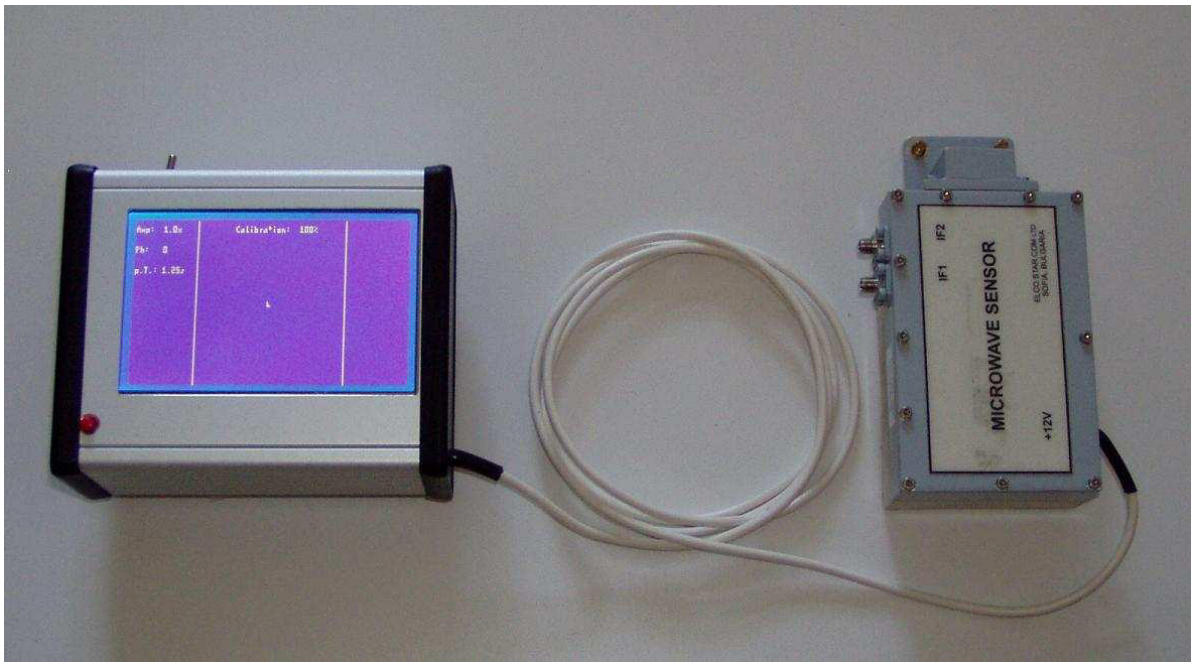


Bild 9: Prototyp eines Mikrowellen-ZfP-Gerätes, das von Hand geführt werden kann

Der Prototyp eines Mikrowellen-ZfP-Gerätes, das von Hand geführt werden kann, ist in Bild 9 dargestellt. Es enthält das am Prüfobjekt entlang zu führende Sensormodul und ein über Kabel angeschlossenes Bedien- und Displaymodul. Dieses Stand-alone-Gerät kann unmittelbar eine Defektanzeige in der komplexen Ebene wieder gegeben. Denkbar ist auch hierbei ein zusätzlicher Signalausgang zu einem Wirbelstromprüfgerät, mit dem die Signale weiter verarbeitet werden können.

Applikatoren mit schlitzförmigen Blendenöffnungen und Hohlleiterzuleitungen haben ein Wirkfeld, das relativ weit ausgebreitet ist. Sie ermöglichen damit eine Prüfung mit großer Beobachtungstiefe in das Prüfobjekt hinein. Die Ortsauflösung ist jedoch beschränkt.

Um eine höhere Ortsauflösung zu erreichen, sind Applikatoren mit kleineren strahlenden Öffnungen erforderlich, z.B. den Enden von leer laufenden Koaxialleitungen mit kleinen Durchmessern. Die Beobachtungstiefe im Werkstück ist dabei jedoch eingeschränkt.

5. Anzeigen

Zur Prüfung eines Werkstückes auf Defekte wird zweckmäßigerweise zunächst der Prüfkopf im vorgesehenen Prüfabstand (kontaktierend oder in geringem, definiertem Abstand) auf eine defektfreie Stelle an der Oberfläche des Prüfobjektes aufgesetzt. Dann wird mit einer "Balancierung" die Reflexionsfaktorebene so verschoben, dass das Signal in der Mitte des dargestellten Koordinatenkreuzes zu liegen kommt. Dann wird am Gerät die "Phasendrehung" so eingestellt, dass kleine Liftoffvergrößerungen einen Ausschlag nach rechts (positive reelle Achse) bewirken. Nach einer möglicherweise später nötigen Änderung der "Verstärkung" müssen die Schritte "Balancierung" und "Phasendrehung" wiederholt werden.

Wenn der Prüfkopf nun von einer defektfreien Stelle über den Defekt hinweg zu einer weiteren defektfreien Stelle geführt wird, so durchläuft die Anzeige auf dem

Bildschirm eine bestimmte Kurve, nämlich die Signatur dieses Defektes. In Bild 10 sind derartige Signaturen von sechs Flachbodenbohrungen in einer Polypropylen-Platte, gemessen von der verdeckten Seite, sowie von drei durchgehenden Bohrungen dargestellt.

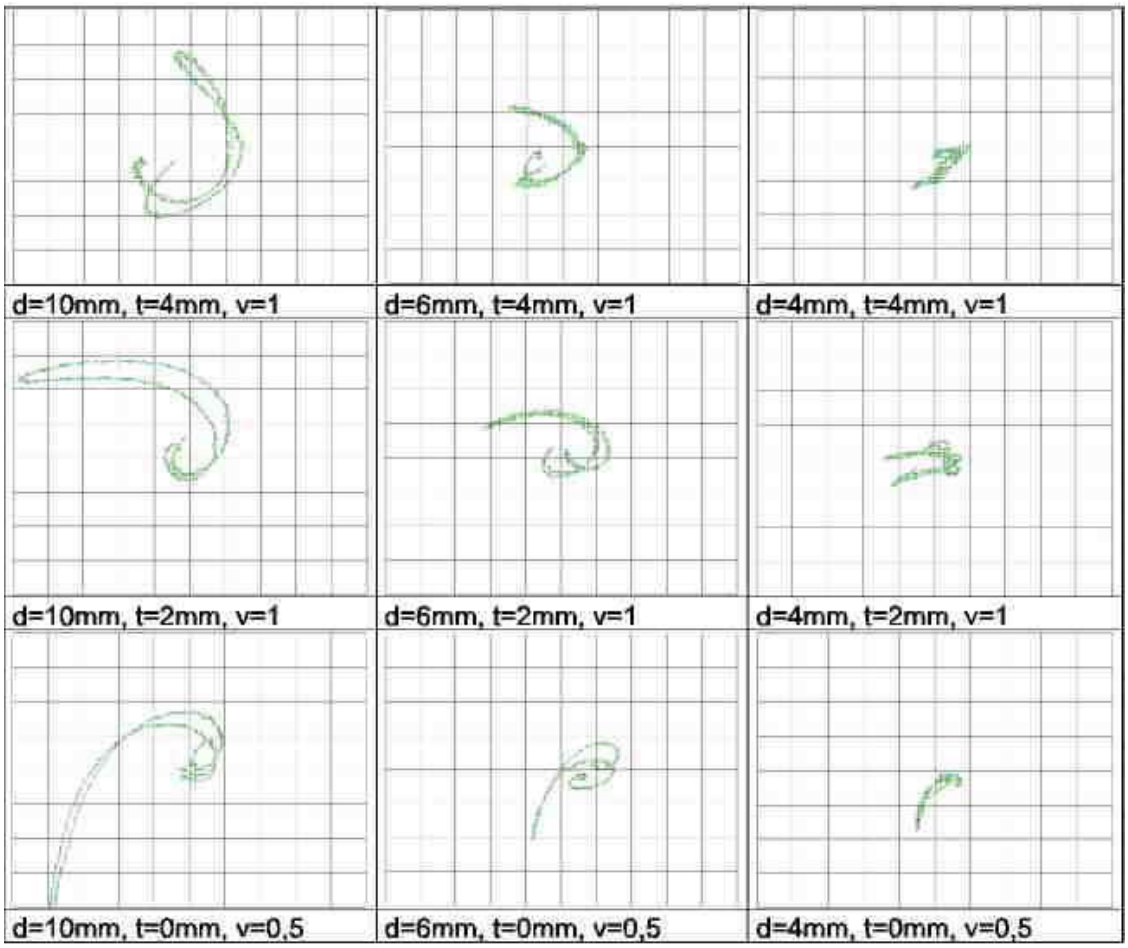


Bild 10: Polyproplenplatte, 10mm dick, mit Flachbodenbohrungen und durchgehenden Bohrungen. Durchmesser d, Ligatur t, Verstärkung v.

In der Waagerechten sind die Signaturen für gleiche Ligatur (Überdeckung) angeordnet, in der Senkrechten für gleiche Bohrungsdurchmesser. Der Maximalausschlag ist jeweils durch einen bestimmten Winkel gegen die reelle Achse und einen Abstand vom Ursprung gekennzeichnet. Es zeigt sich, dass der Abstand ein Maß für den Bohrungsdurchmesser ist und der Winkel ein Maß für die Tiefenlage der Flachbodenbohrung (Ligatur). So kann der Prüfer charakteristische Größen des Defektes aus der Signatur ableiten.

Einen guten Eindruck von einer Defektverteilung erhält man häufig durch Abscannen der Bauteiloberfläche mit anschließender Falschfarben(C-Scan-)darstellung. Dabei muss man sich entscheiden, welche Größe aus der Darstellung in der komplexen Ebenen man einem Farbwert zuordnen will: Realteil, Imaginärteil, Betrag oder Phase. Weil nach den obigen Einstellungen ungewollte Liftoff-Änderungen vor allem den Realteil beeinflussen, wird es häufig zweckmäßig sein, eine C-Scan-Darstellung des Imaginärteils vorzunehmen.

Bild 11 zeigt ein solches Bild der beschriebenen PP-Platte.

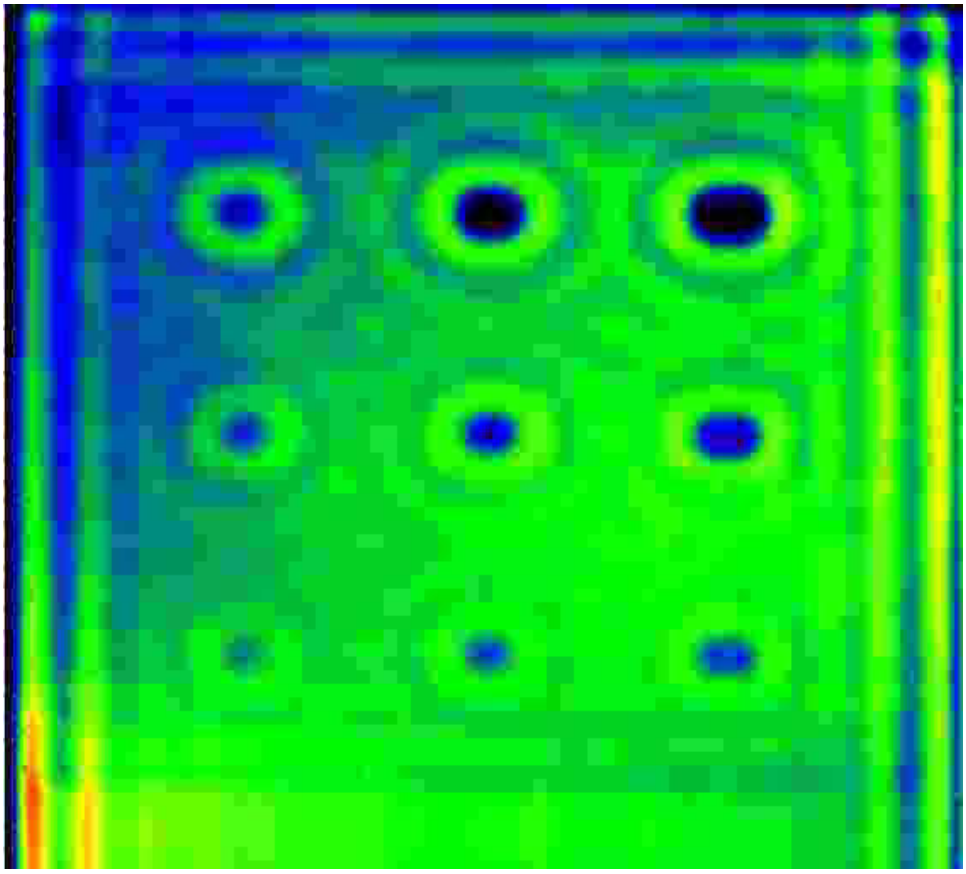


Bild 11: C-Scandarstellung des Imaginärteils. Aufnahme der Platte gemäß Bild 10, jedoch oben und unten sowie links und rechts vertauscht.

In Bild 11 ist neben Anzeigen der Flachbodenbohrungen und durchgehenden Bohrungen auch andeutungsweise eine regelmäßige Gitterstruktur zu erkennen. Diese stammt von stehenden Wellen in der Platte, die sich parallel zu ihren Kanten ausbilden. Die Platte bildet also einen zweidimensionalen Resonator. Solche stehenden Wellen können bei sehr verlustarmen Material und regelmäßigen Formen des Prüfobjektes gelegentlich auftreten. Sie können durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. Absorberfolien, unterdrückt werden.

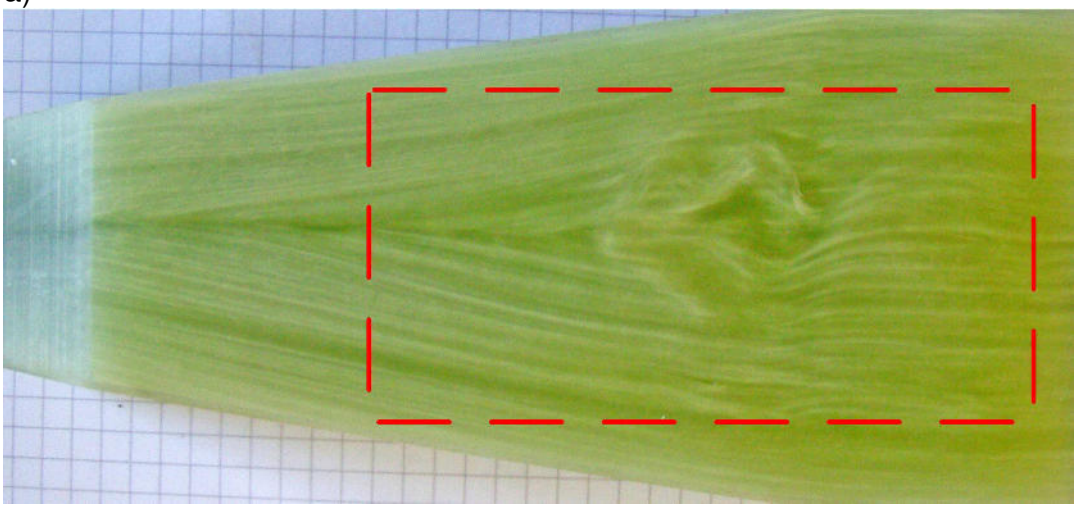
Die Mikrowellen-ZfP kann in elektrisch isolierenden Materialien unter anderem zur Erkennung folgender Defekte eingesetzt werden: Poren, Fremdmaterialeinschlüsse, Risse und Delaminationen.

Darüber hinaus kann die Mikrowellen-ZfP zur Materialcharakterisierung und Dickenmessung eingesetzt werden. Hierzu gehören die Bestimmung des Faser/Matrix-Verhältnisses in GfK und der Faserorientierung in GfK, die Messung von Lackdicken auf CFK und die Wanddickenmessung von Glasbehältern in der Produktion. Im Folgenden sind zwei Beispiele beschrieben.

Bild 12 zeigt einen Ausschnitt aus einer GfK-Blattfeder. Dabei ist Bild 12a eine Fotografie. Bild 12b stellt einen Mikrowellen-C-Scan mit hoher Ortsauflösung dar. Das Mikrowellenbild gibt an den meisten Stellen das fotografische Bild mit hoher Ortsauflösung wieder. Im Bereich der Schlingerung von Glasfaserbündeln sind

jedoch zusätzliche Strukturen zu erkennen, die aus der Tiefe stammen und einer visuellen Inspektion nicht zugänglich sind.

a)



b)

Bild 12: GfK-Blattfeder. a) Fotografie, b) Mikrowellen-C-Scan

Bild 13 zeigt Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie zur Zerstörungsfreien Dickenmessung von Lackschichten auf CFK. Es ist der Reflexionsfaktor in Abhängigkeit von der Schichtdicke aufgetragen. Der eindeutige Zusammenhang bietet eine ideale Grundlage für eine derartiges Messgerät.

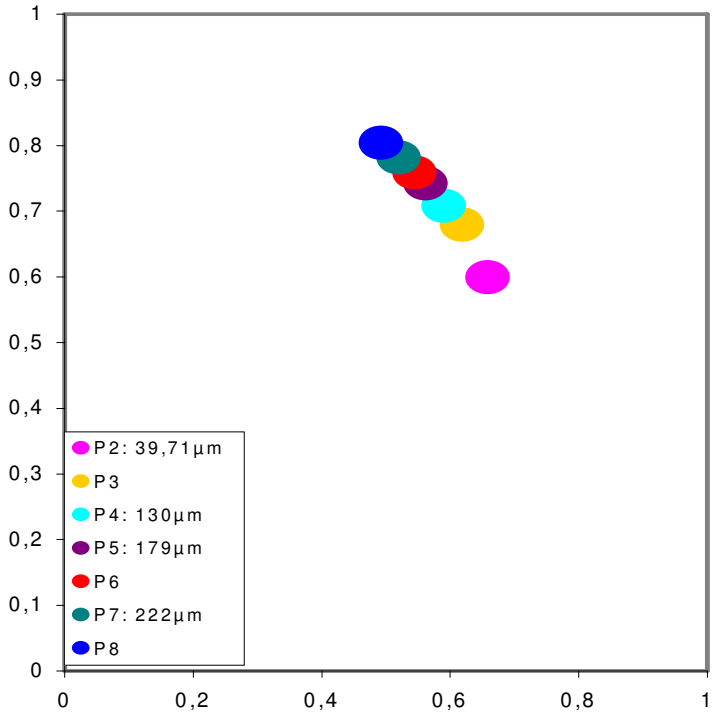


Bild 13: Komplexer Reflexionsfaktor von CFK-Proben mit unterschiedlichen Lackdicken

Die Beschreibung weiterer Applikationsbeispiele stellen wir Ihnen auf Anfrage gern zur Verfügung.

6. Literatur

[1] R. Zoughi: Microwave Non-Destructive Testing and Evaluation, A Graduate Textbook, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2000

[2] F. Daschner, R. Knöchel: Determination of the Composition of Foodstuffs Using Microwave Dielectric Spectra and Multivariate Calibration Methods, Electromagnetic Aquametry, Springer, Heidelberg, 2005, S. 443-465

[3] O. Zinke, A. Vlcek, Hrsg.: Zinke/Brunswig, Lehrbuch der Hochfrequenztechnik 1.Band Springer Berlin 1986

[4] Das AVK-TV Handbuch, CD-ROM, AVK-TV e.V., 2004

[5] SMC/BMC: Design for Success, European Alliance for SCM, 2001

[6] R.K. Hoffmann: Integrierte Mikrowellenschaltungen, Springer, Berlin 1983

[7] Charles A. Harper, ed.: Handbook of Plastics and Elastomers, Mc Graw-Hill, New York usw., 1975

7. Kontaktadressen

Für weitere Informationen stehen wir Ihnen gern zur Verfügung

Hochschule Magdeburg-Stendal (FH)
Prof. Dr.-Ing. Johann H. Hinken
Breitscheidstr. 2
D-39114 Magdeburg

Tel.: 0391/886 4719
johann.hinken@hs-magdeburg.de

FI Test- und Messtechnik GmbH
Breitscheidstr. 17
D-39114 Magdeburg

Tel.: 0391/886 8129
info@fitm.de
www.fitm.de

23.Januar 2007

A Anhang:

Tabelle A1: Dielektrizitätszahlen einiger Kunststoffmaterialien bei 1MHz [7]

Plastic	Constant
Epoxy (low-density)	2.00–3.00
Fluorocarbon (FEP)	2.10
Polytetrafluoroethylene (TFE)	2.10
Methylpentene polymer	2.12
Acrylics	2.20–3.20
Polypropylene (unmodified)	2.20–2.60
Polypropylene (copolymer filler)	2.24–2.30
Polybutylene	2.25
Polyethylene (low-density)	2.25–2.35
Polyethylene (medium-density)	2.25–2.35
Polyallomer	2.30
Polypropylene (impact rubber modified)	2.30
Polyethylene (high-density)	2.30–2.35
Chlorotrifluoroethylene (CTFE)	2.30–2.50
Polypropylene (glass filler)	2.38
Polystyrene (general-purpose)	2.40–2.65
Polystyrene (heat and chemical)	2.40–3.10
Polystyrene (medium- and high-impact)	2.40–3.80
ABS (high-impact)	2.40–3.80
ABS (heat-resistant)	2.40–3.80
ABS (medium-impact)	2.40–3.80
ABS (self-extinguishing)	2.40–3.80
ABS polycarbonate alloy	2.40–3.80
Acrylics impact	2.50–3.00
Polypropylene (inert filler)	2.50–2.60
Styrene butadiene thermoplastic elastomers	2.50–3.40
Polyphenylene oxides (unfilled) (PPO)	2.58
Styrene acrylonitrile copolymer	2.60–3.10
Ethylene vinyl acetate copolymer	2.60–3.20
Polyethylene cross-linkable grades	2.63–3.11
Polyphenylene oxide modified (unfilled)	2.64
Ethylene ethyl acrylate copolymer	2.70–2.80
Acrylics multipolymer	2.80–2.90
PVC (rigid)	2.80–3.10
Polypropylene modified vinyl chloride (rigid)	2.80–3.30
Ethyl cellulose	2.80–3.90
Chlorinated polyether	2.90
Polyphenylene oxides modified (20–30% glass filler)	2.92
Polycarbonate (unfilled)	2.92–2.93
Polycarbonate (10–40% glass filler)	3.00–3.48
Polycarbonate (10% glass filler)	3.05
Polyaryl ether	3.10
Nylon (polyamide) type 12	3.10
Polysulfone	3.10
Nylons (polyamide) type 11	3.20
Silicones (glass filler)	3.20–4.70
Cellulose acetate butyrate	3.20–6.20
Cellulose acetate	3.20–7.00
Polyphenylene sulfides (unfilled)	3.22
Diallyl phthalate (synthetic-fiber filler)	3.30–3.60
Cellulose propionate	3.30–3.80
PVC flexible (unfilled)	3.30–4.50
Polyesters (thermoplastic)	3.37

Fortsetzung Tabelle A1: Dielektrizitätszahlen einiger Kunststoffmaterialien bei 1MHz [7]

Plastic	Constant
Polyimides aromatic	3.40
Styrene acrylonitrile (glass filler)	3.40
Acrylic-PVC Alloy	3.40
Nylons (polyamide) type 6/6	3.40–3.60
Phenol formaldehyde type 6/12 (glass filler)	3.40–4.00
Diallyl phthalate (glass filler)	3.40–4.50
Silicones (mineral filler)	3.40–6.30
Nylons (polyamide) type 6/10 (20–40% glass filler)	3.50
Nylon (polyamide) type 6/10	3.50
Polyesters (18% glass filler)	3.50
PVC flexible (filled)	3.50–4.50
Nylons (polyamide) (20–40% glass filler)	3.50–4.10
Nylon (polyamide) type 6	3.50–4.70
Epoxy (glass filler)	3.50–5.00
Epoxy (mineral filler)	3.50–5.00
Epoxy encapsulating (glass filler)	3.50–5.00
Epoxy encapsulating (mineral filler)	3.50–5.00
Polyester (preformed chopped rovings)	3.50–5.50
Polyester alkyd granular putty type (synthetic filler)	3.60–4.70
Acetal homopolymer	3.70
Acetal copolymer	3.70
Polyaryl sulfone	3.70
Polyphenylene sulfides (40% glass filler)	3.88
Acetal (20% glass filler)	3.90
Diallyl phthalate (mineral filler)	3.90–4.00
Nylon (polyamide) type 6 (20–40% glass filler)	3.90–4.00
Phenol formaldehyde type 6/12	4.00
Phenolic acrylonitrile copolymer (rag filler)	4.00–6.00
Polyester woven cloth	4.00–5.50
Phenol formaldehyde (wood-flour filler)	4.00–6.00
Phenolic (mica filler)	4.20–5.20
Urethanes elastomers	4.20–5.10
Polyesters (sheet-molding compound)	4.20–5.80
Polyester alkyd granular putty type (asbestos filler)	4.50
Phenolic (glass filler)	4.50–6.60
Phenolic (fabric and cord filler)	4.50–7.00
Polyester alkyd granular putty type (mineral filler)	4.60–6.10
Polyester (low-shrink)	4.70
Melamine cellulose	4.70–7.00
Phenolic acrylonitrile copolymer (wood-flour and flock filler)	5.00
Phenolic acrylonitrile copolymer (asbestos filler)	5.00
Phenol formaldehyde (asbestos filler)	5.00–10.00
Melamine phenol filler	5.20–6.00
Polyester (premixed glass filler)	5.20–6.40
Polyester alkyd granular putty type (glass filler)	5.20–6.80
Cold-mold nonrefractory (organic)	6.00
Melamine (asbestos filler)	6.10–6.70
Melamine (fabric filler phenolic modified)	6.10–6.70
Cellulose nitrate	6.40
Melamine (fabric filler)	6.50–6.90
Polyvinylidene fluoride (VF2)	6.60
Urea formaldehyde	6.80
Melamine alpha cellulose	7.20–8.40

Tabelle A2: Dielektischer Verlustfaktor einiger Kunststoffmaterialien bei 1MHz [7]

Plastic	Factor
Methylpentene polymer (TPX)	0.000025
Polystyrenes (general-purpose)	0.0001–0.0004
Polypropylene (copolymer filler)	>0.0001–0.0018
Polypropylene impact rubber modified	>0.0003
Polystyrene (medium- and high-impact)	0.0004–0.0020
Polyallomer	$>5 \times 10^{-4}$
Polyethylenes (low-density)	>0.0005
Polyethylenes (medium-density)	>0.0005
Polyethylenes (high-density)	>0.0005
Polypropylene (unmodified)	>0.0005–0.0018
Polystyrenes (heat and chemical)	0.0005–0.0050
Polyphenylene sulfides (unfilled)	0.0007
Polyphenylene oxides (unfilled) PPO	0.0009
Polyphenylene oxides (modified unfilled)	0.0009
Polyethylenes cross-linkable grades	0.001–0.002
Polystyrenes (20–30% glass filler)	0.001–0.003
Styrene butadiene thermoplastic elastomers	0.001–0.003
Polyphenylene oxides (modified 20–30% glass filler)	0.0015
Ionomers	0.0019
Silicones (mineral filler)	0.002–0.005
Silicones (glass filler)	0.002–0.020
Polypropylene (inert filler)	0.0021
Polysulfone	0.0034
Polypropylene (glass filler)	0.0035
Acrylics (impact)	0.004–0.02
Polyphenylene (40% glass filler)	0.0041
Acetal homopolymer	0.0048
Polyamides aromatic	0.005
Polybutylene	0.005
Epoxy (low-density)	0.005–0.012
Phenolic (mica filler)	0.005–0.013
Acetal copolymer	0.006
ABS polycarbonate alloy	0.006–0.013
PVC rigid	0.006–0.019
Polyester alkyd granular putty type (mineral filler)	0.006–0.04
-> Acetal (20% glass filler)	0.0062
Styrene acrylonitrile (glass filler)	0.00668
Polycarbonate (10–40% glass filler)	0.0067–0.0075
Polyaryl ether	0.007
Styrene acrylonitrile copolymer (SAN)	0.007–0.010
ABS (high-impact)	0.007–0.015
ABS (heat-resistant)	0.007–0.015
ABS (medium-impact)	0.007–0.015
ABS (self-extinguishing)	0.007–0.015
ABS (20–40% glass filler)	0.007–0.015
Polycarbonate (10% glass filler)	0.0075
Polyester (premixed chopped glass filler)	0.008–0.022
Polyester alkyd granular putty type (glass filler)	0.008–0.023
Diallyl phthalate (glass filler)	0.009–0.014
Chlorinated polyether	0.01
Epoxy (glass filler)	0.01

Fortsetzung Tabelle A2: Dielektischer Verlustfaktor einiger Kunststoffmaterialien bei 1MHz [7]

Plastic	Factor
Epoxy (mineral filler)	0.01
Epoxy encapsulating (glass filler)	0.01
Epoxy encapsulating (mineral filler)	0.01
Phenolic acrylonitrile copolymer (asbestos filler)	0.010
Polycarbonate (unfilled)	0.010
Polyester alkyd granular putty type (synthetic filler)	0.010–0.016
Ethylene ethyl acrylate copolymer (EEA)	0.01–0.02
Polypropylene modified vinyl chloride (rigid)	0.01–0.02
Phenolic (glass filler)	0.010–0.026
Polyester woven cloth	0.01–0.03
Polyester preformed chopped rovings	0.01–0.03
Cellulose acetate butyrate	0.01–0.04
Cellulose propionate	0.01–0.05
Ethyl cellulose	0.010–0.060
Cellulose acetate	0.01–0.10
Diallyl phthalate (synthetic-fiber filler)	0.012–0.020
Polyaryl sulfone	0.013
Nylons (polyamide) type 6/10 (20–40% glass filler)	0.016–0.022
Polyester sheet-molding compound	0.016–0.024
Nylons (polyamide) type 6/6 (20–40% glass filler)	0.017–0.018
Polyester (low-shrink)	0.019
Nylons (polyamide) type 6 (20–40% glass filler)	0.019–0.021
Acrylics multipolymer	0.02
Nylons (polyamide) type 6/12	0.02
Polyesters (18% glass filler)	0.0120
Acrylics	0.02–0.03
Diallyl phthalate (mineral filler)	0.02–0.04
Thermoplastic polyesters	0.0208
Melamine alpha cellulose	0.027–0.045
Acrylic-PVC	0.03
Nylons (polyamide) type 12	0.03
Ethylene vinyl acetate copolymer EVA	0.03–0.05
Phenolic formaldehyde (cotton filler)	0.03–0.07
Phenolic formaldehyde (wood-flour filler)	0.03–0.07
Phenolic (fabric and cord filler)	0.03–0.09
Melamine (cellulose filler)	0.032–0.060
Melamine (fabric filler)	0.036–0.041
Melamine (phenolic filler)	0.04–0.06
Polyester alkyd granular putty type (asbestos filler)	0.04–0.06
Melamine (asbestos filler)	0.041–0.050
PVC (flexible unfilled)	0.04–0.14
Melamine (phenolic modified fabric filler)	0.050–0.065
Urethanes elastomers	0.050–0.075
Cellulose nitrate	0.06–0.09
Cold-mold nonrefractory (organic)	0.07
Phenolic acrylonitrile copolymer (wood-flour and flock filler)	0.08–0.10
Phenolic acrylonitrile copolymer (rag filler)	0.08–0.15
PVC (flexible filler)	0.09–0.10
Nylon (polyamide) type 6/12 (glass filler)	0.16–0.17
Urea formaldehyde	0.25–0.35
Phenolic formaldehyde (asbestos filler)	0.35–0.80