

Monofrequente Mikrowellenprüfung mit B-Scan-Darstellung

Johann H. Hinken, fitm Hinken Consult, Magdeburg

Einleitung

Die Zerstörungsfreie Prüfung mit Mikrowellen wird bei Bauteilen aus elektrisch isolierenden, d. h. dielektrischen Materialien angewandt. Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen mit Frequenzen zwischen 300 MHz und 300 GHz. Bei Frequenzen oberhalb von etwa 100 GHz werden sie auch Terahertz-Wellen genannt. Die bei einem Oberflächenscan auf einem Bauteil erhaltenen Anzeigen geben als Ort zunächst nur die laterale Verteilung von Defekten unter der Bauteiloberfläche an. Beim Mikrowellen-Transmissionsverfahren ist keine Tiefenlagenbestimmung von Defekten möglich. Beim Mikrowellen-Reflexionsverfahren erreicht man eine Tiefenlagenbestimmung mit dem FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)-Radarverfahren. Hierbei ist die Frequenzdifferenz zwischen momentanem Sende- und Empfangssignal ein Maß für die Tiefenlage eines Defektes. Für die Anwendung des FMCW-Verfahrens ist ein Frequenzband signifikanter Breite erforderlich, das nur bei hohen Frequenzen, ab etwa 100 GHz, zur Verfügung steht. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie man eine Tiefenlageninformation und eine daraus folgende B-Scan-Darstellung auch bei Nutzung nur einer Frequenz erhalten kann.

Prinzip

Beim scannenden Mikrowellen-Reflexionsverfahren liegt im Grundsatz die in Abb. 1 beschriebene Situation vor.

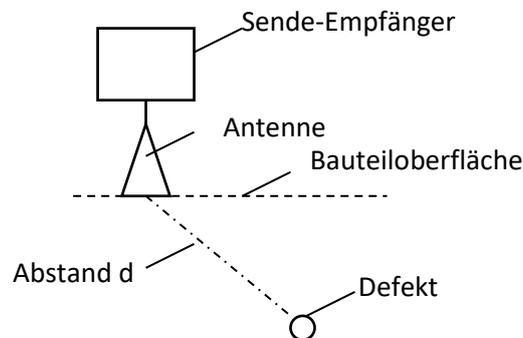


Abbildung 1: Mikrowellen-Reflexionsverfahren

Ein Sende-Empfänger mit einer Antenne wird auf der Bauteiloberfläche (x,y) über einen Defekt, d.h. eine dielektrischen Inhomogenität, hinweg z. B. mäanderförmig verschoben. Ziel ist es, den Defekt zu detektieren. Dafür wird das vom Sender erzeugte Signal über die Antenne abgestrahlt und das vom Defekt reflektierte Signal vom Empfänger als komplexe Größe $R(x,y)$ aufgenommen und dann weiter verarbeitet. Die Übertragungsfunktion von der Antenne auf den Defekt ist dabei im Grundsatz

$$U = \frac{1}{d} e^{-jkd} \quad (1)$$

mit dem Abstand d zwischen Antenne und dielektrischer Inhomogenität mit der Permittivität ε_d , der Wellenzahl $k = 2\pi f \sqrt{\varepsilon_r} / c_0$, der Frequenz f , der relativen Permittivität ε_r des Materials zwischen Antenne und dem Defekt, der imaginären Einheit $j = \sqrt{-1}$, sowie der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 . Der Weg d wird hin und her, also zweimal durchlaufen. Die Stärke des Empfangssignals ist proportional zum lokalen Reflexionsfaktor des Defektes an seinem Ort und in seiner Umgebung. Dieser lokale Reflexionsfaktor wiederum ist u. a. proportional zur Permittivitätsdifferenz ($\varepsilon_d - \varepsilon_r$) und zum Volumen des Defektes.

Abbildung 2 zeigt den Verlauf von $R(x,y)$ in der komplexen Ebene bei einem Scan entlang einer Linie über die Inhomogenität hinweg. Eine Nullung auf einer defektfreien Stelle ist vorausgesetzt. Dann wird der Ausschlag maximal, wenn der Abstand d minimal wird, d.h. die Antenne sich direkt über der Inhomogenität befindet. Die Länge des Vektors zum Maximalausschlag ist ein Maß für die Stärke der Inhomogenität, sein Winkel gegenüber der Realteil-Achse entspricht der Tiefenlage.

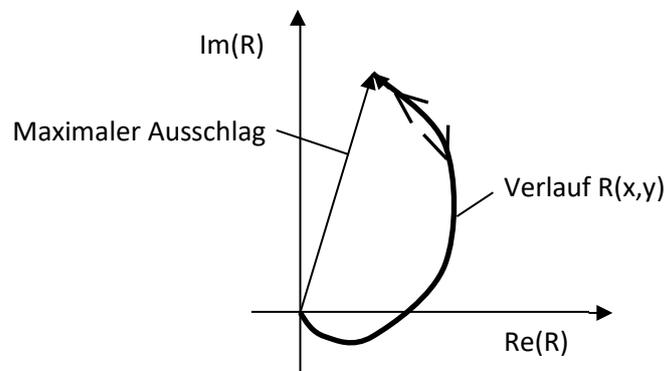


Abbildung 2: Verlauf des gemessenen Reflexionsfaktors $R(x,y)$ bei Annäherung an den Defekt und Entfernung von ihm

Wenn nicht nur eine lokalisierte dielektrische Inhomogenität als Defekt vorliegt sondern eine verteilte Inhomogenität mit dem verteilten lokalen Reflexionsfaktor $vi(\vec{r}')$ und mit dem Ortsvektor \vec{r}' im Raum V' , ergibt sich für das komplexe Empfangssignal $R(x,y)$ im Punkt x,y der Bauteiloberfläche

$$R(x,y) = \int vi(\vec{r}') U^2(d) dV' \quad (2)$$

Dabei ist der Abstand

$$d = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + z'^2} \quad (3)$$

und z' ist die Tiefenlage des Inhomogenitätselementes.

Bei einer digitalisierten Datenaufnahme und -auswertung geht der Ausdruck für das Empfangssignal über in

$$R(m,n) = \sum_{m',n',p'} DI(m',n',p') U^2(d(m',n',p',m,n)) \quad (4)$$

Dabei beschreiben die Pixelnummern m und n die Position der Antenne in x - bzw. y -Richtung sowie die Voxelnummern m' , n' und p' die laterale und die Tiefenposition des jeweils reflektierenden Elements mit dem lokalen Reflexionsfaktor DI .

Die Aufgabe ist nun, für diejenigen Voxel, deren lokaler Reflexionsfaktor ungleich null ist, ihren Ort und die Stärke ihres lokalen Reflexionsfaktors zu bestimmen. Das bedeutet, dass für Voxel mit $DI(m', n', p') \neq 0$ der Ort (m', n', p') und den Betrag $|DI(m', n', p')|$ zu bestimmen sind. Diese Aufgabe wird folgendermaßen näherungsweise gelöst.

Der Betrag der Übertragungsfunktion U ist nach Gl. (1) dann am größten, wenn d am kleinsten ist. Nach Gl. (3) trifft das bei $m = m'$ und $n = n'$ zu, wenn also die Antenne unmittelbar über dem Pixel bei (m', n') liegt. Nun wird die rechte Seite von Gl. (4) näherungsweise vereinfacht, indem alle Summanden außer diejenigen mit $m = m'$ und $n = n'$ vernachlässigt werden. So ergibt sich

$$R(m, n) \sim \sum_{p'} DI(m, n, p') U^2(d(m, n, p', m, n)) \quad (5)$$

mit der Übertragungsfunktion

$$U(d(m, n, p', m, n)) = \frac{1}{p' \Delta z} e^{-j k p' \Delta z} \quad (6)$$

und der Voxelstärke Δz . Dieser Zusammenhang wird nun bei der Auswertung gemessener Verteilungen des Reflexionsfaktors $R(m, n)$ genutzt. Es wird berücksichtigt, dass der lokale Reflexionsfaktor $DI(m, n, p')$ eine reelle Größe ist, die positiv oder negativ sein kann, je nachdem, ob ε_d kleiner oder größer als ε_r ist. Im Folgenden wird er zunächst als positiv angenommen, so wie er häufig vorliegt, z.B. bei Poren oder Benetzungsfehlern in glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Dann muss der Faktor U^2 in den Summanden aus Gl. (5) genau dann mit dem richtigen p' berechnet sein, wenn U^2 dieselbe Phase hat wie das betrachtete $R(m, n)$. So könnte das richtige p' analytisch bestimmt werden. Hier wird im Folgenden ein etwas anderer Weg beschrieben:

Der gemessene Reflexionsfaktor R an der Stelle (m, n) wird versuchsweise durch die Quadrate der Übertragungsfunktionen nach Gl. (1) bei verschiedenen Tiefenlagen $p' \Delta z$ dividiert. Weil DI positiv reell ist, ergibt sich bei der richtigen Tiefenlage ein positiver, rein reeller Wert. Je falscher die Tiefenlage, desto kleiner ist der Realteil. In der praktischen Ausführung wird daher jeweils der Realteil dieses Quotienten in Abhängigkeit von der Tiefenlage dargestellt. Ein negativer Realteil wird in diesem Fall unterdrückt. Der Realteil ist maximal bei der richtigen Tiefenlage.

Beispiel

In Abb. 3 ist eine sehr inhomogene GFK-Platte, herausgeschnitten aus einer Bootswand, gezeigt. Die Platte hat eine sehr unregelmäßige Rückseite. Im Scanbereich von 140 mm x 100 mm ist sie 14 mm bis 18 mm dick. Es befindet sich auf etwa mittlerer Tiefenlage eine streifenförmige Harzanreicherung zusammen mit Delaminationen sowie auf der Rückseite, etwa im Zentrum des Scanbereichs, die künstlich eingebrachte etwa 2 mm tiefe Flachbodenbohrung Nr. 2. Der Scan wurde bei einer Frequenz von 5,8 GHz durchgeführt.

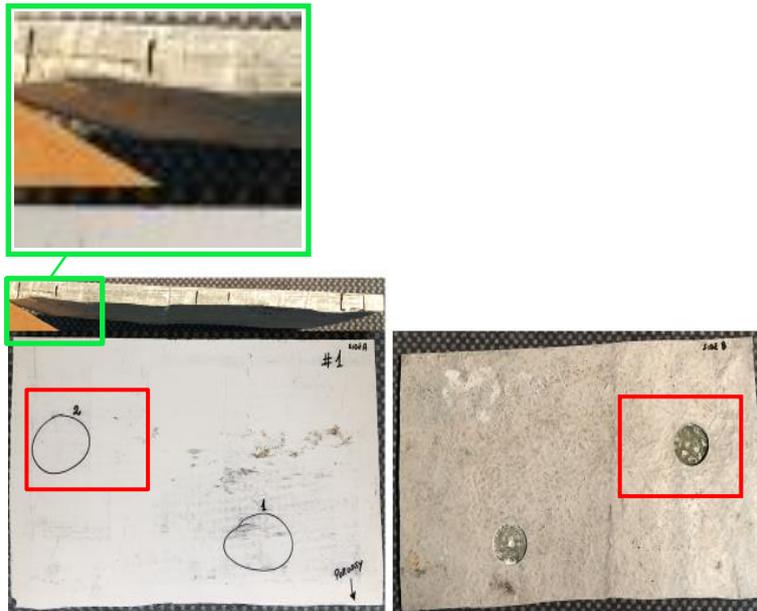


Abbildung 3: Bootswandausschnitt. Links: Oberseite und Seitenansicht mit Detailvergrößerung der Harzanreicherung (grün) sowie Scanbereich (rot). Rechts: Rückseite.

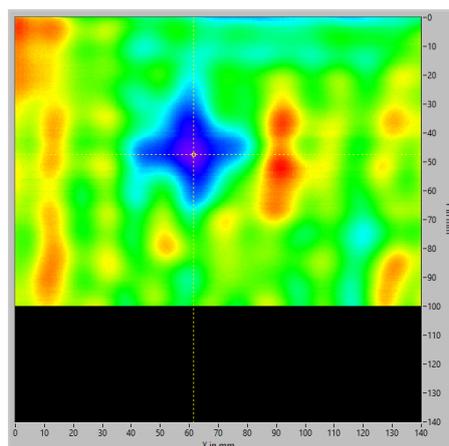


Abbildung 4: C-Scan des Bootswandausschnittes

Abb. 4 zeigt den Reflexionsscan als herkömmliches C-Bild. In blau ist die Anzeige der Flachbodenbohrung zu erkennen. Aus welcher Tiefenlage diese und die weiteren Anzeigen stammen, kann man zunächst nicht feststellen.

Aus demselben Reflexionsscan $R(x,y)$ wurde die Auswertung nach dem oben beschriebenen Verfahren durchgeführt. Als erstes ist das Ergebnis in Abb. 5 in Querschnitten, also B-Scans, dargestellt.



Abbildung 5: Scanergebnisse als B-Scans, nicht maßstäblich. Von links nach rechts: Koordinate y nahe der Oberkante, mittig und nahe der Unterkante des Scanbereichs.

An der linken Kante ist die in mittlerer Höhenlage gelegene, in y -Richtung durchgehende Harzanreicherung zu erkennen. Im mittleren Bild ist prägnant die Flachbodenbohrung an der Rückseite zu erkennen. Die restlichen Anzeigen stammen von weiteren dielektrischen Inhomogenitäten. Der Grad der Schwärzung entspricht der Stärke des jeweiligen lokalen Reflexionsfaktors, also der Länge des Vektors in Abb. 2.

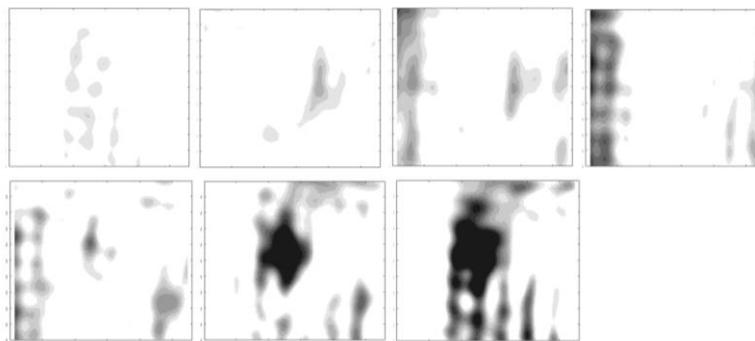


Abbildung 6: Scanergebnisse als Höhenschnitte in Tiefenlagen von 2 mm bis 14 mm (von links oben nach rechts unten) in 2 mm Abstand

Aus den derartig ermittelten Daten lassen sich auch Höhenschnitte durch das Bauteil erzeugen. Abb. 6 zeigt diese durch Tiefenlagen von 2 mm bis 14 mm mit 2 mm Abstand, dargestellt von links oben nach rechts unten. Die Höhenschnitte bei 6 mm, 8 mm und 10 mm zeigen am linken Rand die streifenförmige Harzanreicherung. Die Höhenschnitte bei 12 mm und 14 mm zeigen im Zentrum die 2 mm tiefe Flachbodenbohrung, allerdings nicht formgetreu.

Es sind noch einige Feinheiten zu erwähnen, die bei der Anwendung des beschriebenen Verfahrens angewandt wurden:

- Die oben bereits angesprochene Nullung wurde zeilenweise durchgeführt.
- Zur besseren Übersichtlichkeit der Ergebnisse wurde die Darstellung schwacher Signale wie z. B. Rauschsignale dadurch unterdrückt, dass nur Werte oberhalb eines Schwellenwertes zur Anzeige kamen.
- Die oben dargestellte Übertragungsfunktion gilt für infinitesimal kleine Antennen und im Fernfeld. In der Praxis verwendete Antennen haben eine von null verschiedene Ausdehnung. Ihre Amplitudencharakteristik im Nahfeld kann von der oben beschriebenen $1/d$ -Charakteristik abweichen. So ist im praktischen Fall ggf. eine Korrektur an der Übertragungsfunktion anzubringen. Im vorliegenden Beispiel wurde anstelle von

$1/z$ die Funktion $1/(z+b)$ gewählt, wobei b die Schmalseitenabmessung des als Antenne verwendeten dielektrisch gefüllten offenen Hohlleiters ist.

Schluss

Das vorgestellte Auswerteverfahren für Mikrowellen ergibt Höhen- und Querschnittsdarstellungen der Defektverteilung. Der Vorteil dieses Auswerteverfahrens liegt vor allem darin, dass die Darstellungsmöglichkeiten bei Verwendung von nur einer Prüffrequenz erreicht werden. Denn das erlaubt die Nutzung von Frequenzen innerhalb der schmalen ISM-Frequenzbänder, z.B. bei 2,4 GHz, 5,8 GHz oder 24 GHz, für die keine spezielle Zulassung beantragt werden muss, sondern für die die Allgemeinzulassung von ISM-Bändern genutzt werden kann. Außerdem ist die monofrequente Technik einfacher und damit preisgünstiger als die breitbandige FMCW-Technik. Darüber hinaus erlaubt dieses Verfahren die Nutzung vergleichsweise niedriger Frequenzen, deren Technik ebenfalls nur niedrige Kosten verursacht. Die Verwendung genügend niedriger Frequenzen ist sogar notwendig, um keine Mehrdeutigkeiten in der Tiefenlagenbestimmung zu erhalten. Das gilt insbesondere bei metallenen Defekten und Defekten mit Permittivitäten, die größer sind als die der Umgebung.