

Mikrowellenprüfung (μT) im Überblick

Johann Hinken, FI Test- und Messtechnik GmbH
Im Juli 2016

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung
2. Physikalische und technische Grundlagen der Mikrowellenprüfung
3. Anwendungen der Mikrowellenprüfung
 - 3.1 Fehlerdetektion
 - 3.1.1. Lokale und Scannende Verfahren
 - 3.1.2 Direkt bildgebende Verfahren
 - 3.2. Materialeigenschaften, Zustandsüberwachung, Messtechnik
4. Schluss
5. Weitere Literatur

1. Einleitung

Die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) nutzt nicht-invasive Techniken, um die Integrität von Materialien, Komponenten oder Strukturen festzustellen oder um bestimmte Größen eines Objekts zu messen. Je nach Aufgabe im Einzelnen werden dafür unterschiedliche physikalische Methoden verwendet, am häufigsten auf der Basis von Ultraschall, Röntgendurchstrahlung, Wirbelstrom, und Schallemission, ergänzt um die Sichtprüfung.

Weil sich der Prüfbedarf allgemein und insbesondere auch für dielektrische (=isolierende) Materialien erhöht hat und weil Mikrowellentechnik inzwischen in Konsumerprodukten Einzug gehalten hat und damit preiswerter geworden ist, wird zunehmend Zerstörungsfreie Prüfung auch mit Mikrowellen durchgeführt. So wurden aufgrund der zunehmenden Bedeutung 2011 der Fachausschuss Mikrowellen- und Terahertzverfahren (FA MTHz) der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) und 2014 das Microwave Testing Committee der American Society for Non-Destructive Testing (ASNT) gegründet. Normungsarbeiten zur Mikrowellenprüfung sind in der Anfangsphase.

2. Physikalische und technische Grundlagen der Mikrowellenprüfung

So wie auch Licht und Röntgenstrahlen sind Mikrowellen elektromagnetische Wellen. Sie liegen im Frequenzbereich von 300 MHz bis 300 GHz und damit zwischen den Radiowellen und dem Infrarot, s. Bild 1. (Der Übergangsbereich zum Infraroten wird gelegentlich auch Terahertzbereich genannt.) Die Freiraumwellenlängen erstrecken sich von 1 m bis zu 1 mm. Sie liegen damit in „handlichen“ Größenordnungen.

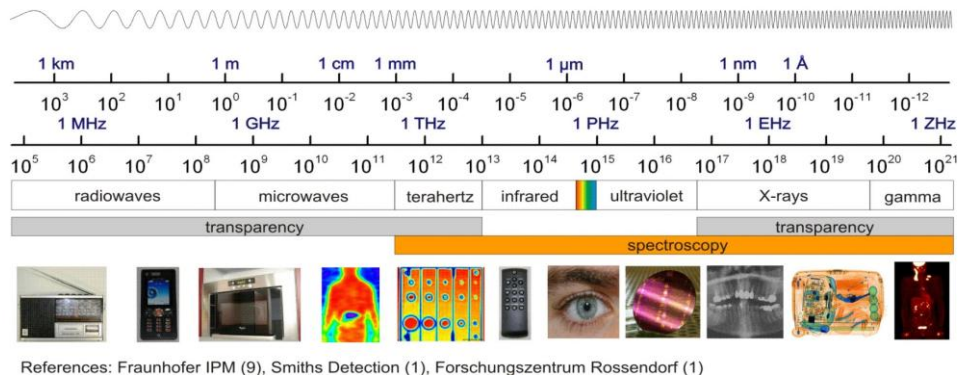


Bild 1: Elektromagnetisches Spektrum

Bezüglich der Frequenz der oben genannten elektromagnetischen Standard-ZfP-Verfahren liegt die Mikrowellenprüfung zwischen der Wirbelstromprüfung und der Sicht- bzw. Röntgendurchstrahlungsprüfung.



Bild 2: Sektglas

In der Situation des Bildes 2 erkennen wir visuell die unterschiedlichen einzelnen Materialien - nämlich Luft, Glas, Flüssigkeit, Gas der Perlen – aufgrund ihrer unterschiedlichen optischen Brechzahlen n und daraus folgender Phänomene wie Beugung, Brechung und Reflexion. Das ist auch die Grundlage der Mikrowellenprüfung. Nur charakterisiert man Material im Mikrowellenbereich üblicherweise durch die relative Permittivität (Dielektrizitätskonstante) $\epsilon_r = n^2$. Die Mikrowellenprüfung stellt also im Prinzip örtliche Änderungen in der relativen Permittivität in dielektrischen (= nichtleitenden) Materialien dar.

Die Mikrowellenprüfung kann als Reflexionsverfahren oder als Transmissions- bzw. Durchstrahlungsverfahren durchgeführt werden, s. Bild 3.

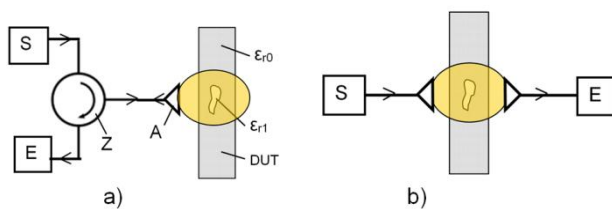


Bild 3: Mikrowellenprüfung im
a) Reflexionsverfahren und
b) Durchstrahlungsverfahren.
S – Sender, E – Empfänger,
Z – Zirkulator, A – Antenne,
DUT – Prüfbjekt (device under test)

Beim Reflexionsverfahren, Bild 3a, wird das Mikrowellensignal vom Sender S über den sogenannten Zirkulator Z geleitet und dann von einer Antenne auf das Prüfbjekt DUT gerichtet. Das reflektierte Signal wird von der Antenne wieder aufgenommen, im Zirkulator vom Sendesignal getrennt, dem Empfänger E zugeleitet und dort nach Betrag und Phase ausgewertet. Je nach mittlerer Permittivität im ausgeleuchteten Bereich des DUT wird das Signal mehr oder weniger stark und mit unterschiedlicher Phase reflektiert. So werden beim Abtasten örtliche Permittivitätsschwankungen und damit Materialfehler erkennbar.

Beim Durchstrahlungsverfahren, Bild 3b, wird das durch das DUT transmittierte Signal ausgewertet. Die Rückseite des DUT muss zugänglich sein.

Je nach Ausführung der Antennen ist der Mikrowellenstrahl mehr oder weniger gebündelt und damit die Ortsauflösung bei der ZfP entsprechend hoch oder niedrig.

Dielektrische Materialien können mit Wirbelstrom nicht geprüft werden, weil ihre elektrische Leitfähigkeit null ist. Gegenüber der Ultraschallprüfung ist die Mikrowellenprüfung vor allem dann vorteilhaft, wenn schalldämpfende Materialien oder große Beobachtungstiefen vorliegen. Die Röntgendurchstrahlung ist zwar das leistungsfähigste ZfP-Verfahren, wird jedoch wegen des erforderlichen hohen Sicherheitsaufwands häufig nicht eingesetzt. Die Mikrowellenprüfung bedarf dieses Sicherheitsaufwands nicht und ist daher einfacher zu handhaben und preiswerter.

3. Anwendungen der Mikrowellenprüfung

Anwendungen mikrowellentechnischer ZfP-Verfahren liegen in der Detektion von Fehlern in Bauteilen, in der Bestimmung von Materialeigenschaften, bei der Zustandsüberwachung und auch in der Messtechnik.

3.1 Fehlerdetektion

Die Antennen (=Sonden) basieren auf typischen Mikrowellenleitungen, s. Bild 4.

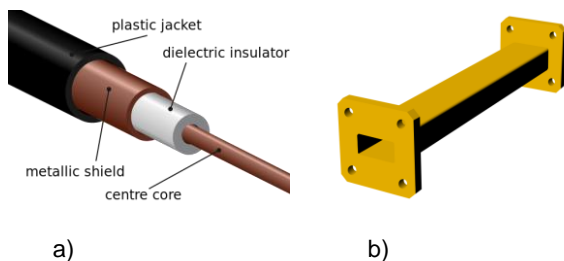


Bild 4: Typische Leitungen für Mikrowellen
a) Koaxialleitung
b) Rechteckhohlleiter

Die Koaxialleitung, Bild 4a, besteht aus konzentrischem Innen- (centre core) und Außenleiter (metallic shield). Sie ist bei hohen Frequenzen häufig zu verlustbehaftet. Dann wird ein Hohlleiter eingesetzt. Das ist ein metallisches Rohr, z. B. mit rechteckförmigem Querschnitt wie in Bild 4b. Ein Hohlleiter kann nur Frequenzen oberhalb einer Grenzfrequenz übertragen, die von den Querabmessungen abhängt.

Bild 5 zeigt typische Sonden für die Mikrowellenprüfung. Bild 5a zeigt Sonden auf Basis von Koaxialleitungen. Diese Antennen tasten das DUT vor allem im Bereich des Nahfeldes ab, haben also Beobachtungstiefen von maximal etwa 1 bis 2 Wellenlängen. Sie bieten dann aber eine Ortsauflösung, die viel feiner als die Wellenlänge ist und hauptsächlich von den Antennenabmessungen abhängt.

In Bild 5b ist eine Sonde auf Basis eines Rechteckhohlleiters dargestellt, wobei an der Öffnung noch eine Blende angebracht ist. Hohlleiterantennen bieten in der Regel eine größere Beobachtungstiefe als Koaxialantennen, die laterale Ortsauflösung ist allerdings grober.

Bild 5c zeigt eine Linsenantenne, wobei als Primärstrahler ein offener Hohlleiter dient, der die hier grüne Mikrowellenlinse durchstrahlt. Der Mikrowellenstrahl wird in der Tiefe des DUT fokussiert, die Ortsauflösung kann auch in größerer Tiefe noch im Bereich einer Wellenlänge liegen. 60 mm Beobachtungstiefe in glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) wurden nachgewiesen. Dieser Antennentyp ist allerdings relativ sperrig.

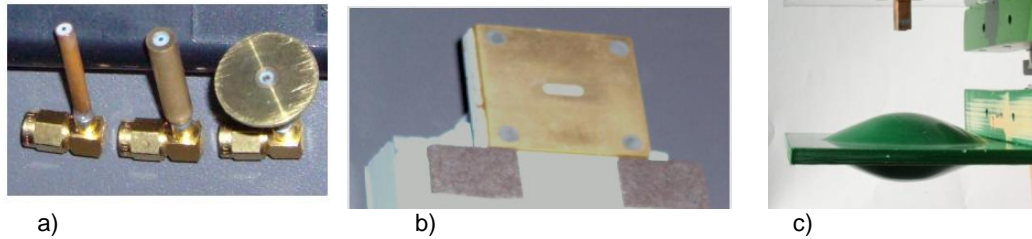


Bild 5: Mikrowellensonden. a) Koaxialantenne. b) Hohlleiterantenne mit Blende. c) Linsenantenne mit offenem Hohlleiter als Primärstrahler

3.1.1 Lokale und Scannende Verfahren

Bild 6 zeigt ein einfaches handgeführtes Gerät zur Mikrowellenprüfung, bestehend aus Sondenmodul und Bedien- und Anzeigegerät. Defektanzeigen stellen sich ähnlich wie in der

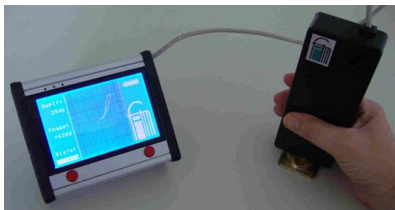


Bild 6: Handgerät

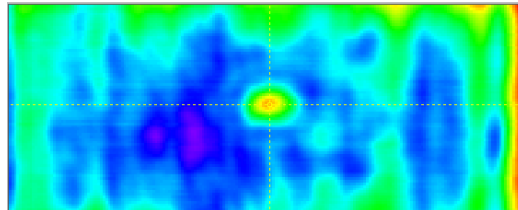


Bild 7: GFK-Rohrwand. C-Bild eines Fehlers in 60 mm Tiefe, 24 GHz

Wirbelstromprüfung dar. Bei Prüfsystemen mit automatischer, z. B. mäanderförmiger Abtastung lassen sich die Anzeigen als C-Bilder (Draufsicht auf die DUT-Oberfläche) darstellen, s. Bild 7. Bei hohen Mikrowellenfrequenzen lassen sich auch B-Bilder (Tiefenschnitte) mit bemerkenswerter Tiefenauflösung erstellen, siehe Bild 8.

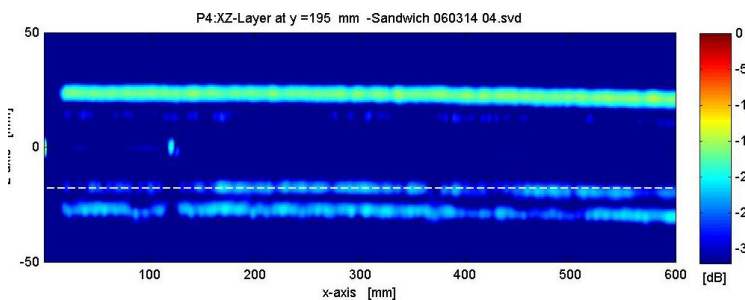


Bild 8: B-Bild eines Schaum-GFK-Sandwich bei 100 GHz. Die Anzeige bei $x = 120$ mm stammt von Feuchtigkeit an der Schaum-GFK-Grenzfläche, ca. 35 mm tief unter der DUT-Oberfläche. (Becker, Keil: Jahrestagung DGZfP 2017, Beitrag Mi3C2)

Ortsfeste Prüfsysteme sind dann der jeweiligen Prüfaufgabe angepasst, s. Bild 9.

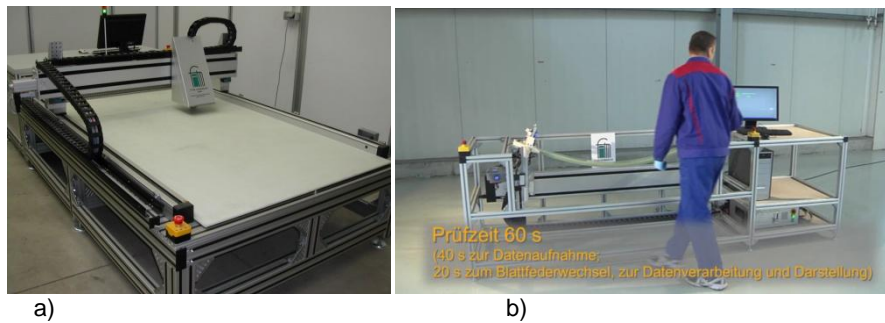


Bild 9: Ortsfeste Mikrowellenprüfsysteme für a) planare Laminat, b) GFK-Blattfedern für Automobile

3.1.2 Direkt bildgebende Verfahren

Scannende Verfahren mit einzelnen verfahrenen Sensoren sind zeitaufwändig, selbst wenn wie im System von Bild 9b zwei Arrays mit je 30 Einzelsensoren verwendet werden und damit eine Taktzeit von 60 Sekunden realisiert werden kann. Unmittelbar bildgebende Prüfverfahren wie die Röntgenprüfung und die Thermographie, aber dann mit Mikrowellen, wären häufig attraktiver.

Bild 10 zeigt einen feststehenden, nur elektronisch abtastenden Scanner. Dieser Körperscanner dient der Sicherheitsüberprüfung von Personen, z. B. an Flughäfen. Es sei darauf hingewiesen, dass Mikrowellenstrahlung im Gegensatz zu Röntgenstrahlung nicht ionisierend ist und damit für den Menschen ungefährlich ist.



Bild 10: Der Körperscanner R&SR®PS arbeitet im Frequenzbereich von 70 GHz bis 80 GHz mit einer Sendeleistung von 1 mW und jeweils 3008 Sende- und Empfangsantennen. Nacheinander werden einzelne Antennen aktiviert und 128 Frequenzkanäle durchgeschaltet. So beträgt die Scanzzeit für eine Person 32 ms.

https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_news_from_rs/216/NEWS_216_QPS_english.pdf

Ein anderes unmittelbar bildgebendes Mikrowellenprüfverfahren ist das NIDIT-Verfahren (NIDIT – Non-Ionizing Direct Imaging Testing). Bild 11a zeigt die prinzipielle Funktion. Von

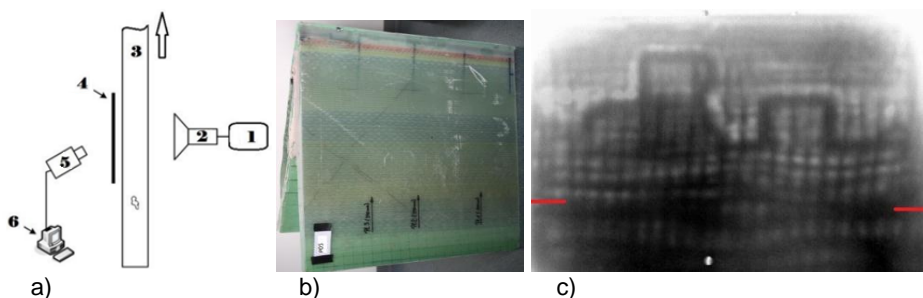


Bild 11: Das unmittelbar bildgebende NIDIT-Verfahren: a) Prinzip, b) Prüfling: Hinterkantenverklebung eines Rotorblatts (Ausschnitt), c) NIDIT-Bild von b) mit Klebverteilung.

einer **Mikrowellenquelle** (1) wird über die **Antenne** (2) das **Prüfobjekt** (3) großflächig bestrahlt. Die gleichmäßig einfallende Mikrowellenstrahlung wird im Prüfobjekt in ihrer Verteilung durch zu erkennende Fehler beeinflusst und trifft entsprechend ungleichmäßig auf die **mikrowellenabsorbierende Folie** (4). So erhält die Folie eine den vorhandenen Fehlern entsprechende Wärmeverteilung, die von der **Infrarotkamera** (5) aufgenommen und z.B. über einen **Computer** (6) unmittelbar als Flächenbild dargestellt wird. Bei bewegtem Prüfobjekt können auch Videos aufgenommen werden. Bild 11b zeigt als beispielhaftes Prüfobjekt die Rotorblatthinterkante (Ausschnitt) einer Windkraftanlage, deren visuell nicht erkennbare innere Klebverteilung erkannt werden soll. Bild 11c zeigt als Teil eines Videos das NIDIT-Durchstrahlungsbild dieser Hinterkante, aufgenommen in einem Blindtest mit künstlicher Klebverteilung. Im Bereich dieser Aufnahme ist das Bauteil ca. 20 cm dick.

3.2 Materialeigenschaften, Zustandsüberwachung, Messtechnik

Für die Bestimmung der Materialeigenschaften dielektrischer Proben im Labor wurden im Laufe der letzten Jahrzehnte unterschiedliche Verfahren entwickelt. So werden z. B. Proben in Hohlleiterabschnitte eingebracht und dann zunächst typische Kenngrößen dieser Anordnung mit einem sogenannten vektoriellen Netzwerkanalysator gemessen. Die Auswertung ergibt dann die Permittivität und die Dämpfungseigenschaften des Materials.

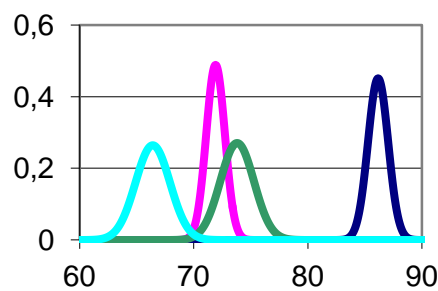
Sonden zum Aufsetzen auf Bauteiloberflächen, die dann z. B. auch Faserrichtungen und Faservolumenverhältnisse in GFK bestimmen können, sind in der Entwicklung.

Nicht nur in technischen Bauteilen sondern auch im Bauwesen wird die Feuchtigkeitsbestimmung häufig mit Mikrowellen durchgeführt.

Bei entsprechenden Aufgaben ist eine Zustandsüberwachung mit Mikrowellen einfach möglich. Bild 12 zeigt ein Beispiel: In der Endkontrolle ist festzustellen, ob nach der Montage



a)



b)

Bild 12: Anwesenheitsprüfung einer Dichtung in Kunststoff-Kugelhahnventil über die Phasenmessung einer aufgesetzten Mikrowellensonde
a) Foto des Ventils. b) Statistische Auswertung der Vermessung von ca. 100 Ventilen mit und ohne Dichtung. Über der Phase des Reflexionsfaktors (in Grad) ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser Phase aufgetragen. Dunkelblau: ohne Dichtung. Türkis, rosa, grün: mit Dichtungen unterschiedlicher Materialien

von Kugelhahnventilen eine kritische Dichtung eingebaut ist (Vollständigkeits-, Anwesenheitsprüfung). Eine Sichtkontrolle ist nicht möglich. Die Lösung der Aufgabe besteht in einer an entsprechender Stelle von außen aufgesetzten Mikrowellensonde und der Messung des Reflexionsfaktors. Bild 9b zeigt, dass bei einer Entscheidungsschwelle von 81° die ja/nein-Entscheidung sicher getroffen werden kann.

Die Mikrowellenprüfung eignet sich auch für dimensionale Messtechnik, etwa für Wand- und Schichtdickenmessungen. Wanddickenmessungen an nichtleitenden Rohren können durch Aufsetzen einer Mikrowellensonde von außen und Messen des Reflexionsfaktors durchgeführt werden. Bild 13 zeigt ein Beispiel. Dabei zeigt Bild 13b die Kalibrierspirale, die sich von außen (Wanddicke 4,9 mm) nach innen (9,6 mm) erstreckt. Aktuelle Messwerte des Reflexionsfaktors sind mit Hilfe dieser Kurve den Wanddickenwerten zuzuordnen.

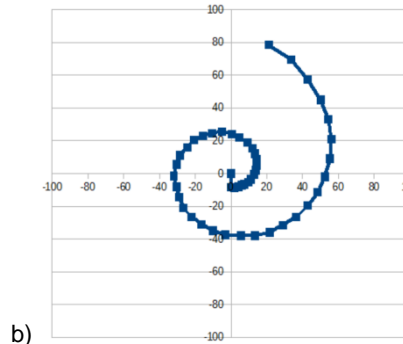


Bild 13: Wanddickenmessungen von Rohren aus Thermoplastic Copolyester Elastomer (TPC-ET).
 a) Foto eines Rohrabschnittes. Rohrdurchmesser ca. 60 mm.
 b) Kalibrierspirale für Dickenmessungen im Bereich von 4,9 (außen) bis 9,6 mm (innen). Dargestellt ist der komplexe Reflexionsfaktor einer auf das Rohr aufgesetzten Mikrowellensonde.

Ein weiteres Beispiel für die mikrowellenbasierte Messtechnik ist das FSC, mit dem Lackdicken auf Carbon Compositen (CFK) zerstörungsfrei gemessen werden können. Auf diesen, insbesondere im Luftfahrtbereich angewendeten Leichtbaumaterialien, sind die sonst auf Metall eingesetzten Wirbelstrom- und Ultraschallgeräte nicht oder nur unsicher einsetzbar.



Bild 14: Messgerät FSC zur zerstörungsfreien Messung von Lackdicken auf Carbon Compositen.
 a) Übersichtsbild
 b) Detailbild mit Handmodul (grün) und Bedien- und Anzeigemodul (schwarz)

Bild 14 zeigt das FSC, eingesetzt zur Lackdickenmessung auf einem CFK-Kunstflugzeug. Das Messgerät wird inzwischen bei der Herstellung und Wartung moderner Großraum- und weiterer Flugzeuge routinemäßig eingesetzt.

4. Schluss

Die Mikrowellenprüfung (μT) wird als aufkommende Technik zur Prüfung dielektrischer, d. h. elektrisch isolierender Materialien und Bauteile angesehen. Der Einsatz in der Praxis sowie Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten nehmen signifikant zu. Die Bilderstellung bei der Defekterkennung erfolgt weitgehend über mechanisches Abtasten. Aber unmittelbar bildgebende Verfahren werden im Fall der Körperscanner auch schon in der Praxis eingesetzt. Weitere sind in der Entwicklung. Über die Defekterkennung hinaus eignet sich die Mikrowellenprüfung auch für die Bestimmung von Materialeigenschaften, für Zustandsüberwachung und für dimensionale Messtechnik. - Normungsarbeiten zur Mikrowellenprüfung sind in der Anfangsphase.

5. Weitere Literatur

- Joseph T. Case, Shant Kenderian: MWNDT – An Inspection Method, Materials Evaluation, März 2017, 339-346. (Dieser Artikel enthält viele Literaturhinweise zur Mikrowellenprüfung)
- Reza Zoughi: Microwave Non-Destructive Testing and Evaluation, Kluwer Academic Publishers, 2000