

Kopierverfahren für Resonanzhohlräume.

Einleitung

Im Rahmen der in unserem Institut laufenden mikrowellentechnischen Arbeiten im Zusammenhang mit unserem Gravitationsprogramm ergab sich das Problem, eine größere Anzahl von Hohlraumresonatoren mit nicht einfachen geometrischen Begrenzungen zu beschaffen. Da die Herstellung derartiger Resonatoren wegen der geringen Toleranzen überaus schwierig ist, insbesondere dann, wenn es sich um eine Serie von mehreren hundert Exemplaren handelt, erschien es uns vernünftig, ein Kopierverfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe ein vorgegebener Hohlraumresonator in beliebiger Zahl abkopiert werden kann. Das zur Herstellung von Hohlraumresonatoren anwendbare Elektroformingverfahren erschien ungeeignet, weil einerseits die gewünschten Hohlräume im Bau zu kompliziert und ihre Anzahl zu groß war. Offenbar bietet sich eine Lösung des Problems an wenn es gelingt, ein leicht schmelzbares und leicht zu bearbeitendes Material zu finden, mit dessen Hilfe der getreue Abdruck eines Hohlraumes im Bereich der zulässigen Toleranzen gemacht und dessen Oberfläche metallisiert werden kann. Weiterhin müssen einzelne Werkstücke des Materials zusammenfügbar sein und der in einem Gefäß infolge der Adhäsion haftende Film des geschmolzenen Materials muß in einer geeigneten Flüssigkeit löslich sein.

Wir kamen zu dem Ergebnis, daß unter gewissen Voraussetzungen Hartparaffin mit einem Schmelzpunkt von ca 90°C diesen Anforderungen genügt, Im folgenden soll die Verwendung eines derartigen Paraffins zum Kopieren von Hohlräumen beschrieben werden.

1) Kopierformen.

Im ersten Schritt wird der im allgemeinsten Fall geometrisch komplizierte Hohlraum in geometrisch einfache Elemente, wie Zylinder, Zylinderringe, Quadvolumina u.s.w. aufgeteilt und diese geometrisch einfachen Elemente werden nach dem Elektroformingverfahren oder auf mechanischem Wege durch Drehen, fräsen oder durch das Zusammensetzen geschliffener Metallplatte so hergestellt, daß die Begrenzungen dieser Hohlräume bei Einhaltung der Toleranzgrenzen als Abdruckformen zu verwenden sind. Das Wandmaterial soll eine gute Wärmeleitfähigkeit haben und die Wandstärke soll mindestens so bemessen sein, daß sich bei geringen mechanischen Belastungen die Abmessung der Hohlraumbegrenzung nicht in unzulässiger Weise verändern. Auch sollen die Formen zerlegbar sein, damit die späteren Paraffinabdrücke ohne Beschädigung herausgenommen werden können.

2) Abdruck der einfachen Hohlräume.

Im Prinzip werden die nach 1. hergestellten Formen der einfachen Hohlräume mit geschmolzenem Hartparaffin ausgegossen; zu berücksichtigen sind dabei aber die nachstehend erwähnten Eigenschaften erstarrender Paraffinschmelzen:

- a) Beim Guß können sehr leicht Luftblasen in die Schmelze geraten, die später an der Wandung der Gußform haften und so als Schlieren die Oberfläche des Gußkörpers (auf die es allein ankommt) stören. Derartige Schlieren können auch durch das Verdampfen von Flüssigkeitsspuren im Hartparaffin entstehen.
- b) Wenn ein Gußkörper in einer metallischen Form abkühlt, dann gibt es innerhalb der halbfesten Phase einen Zeitpunkt, an welchem sich infolge der verschiedenartigen thermischen Kontraktion die Metallwandung der Form von dem noch halbfesten Gußkörper abhebt, sodaß beim weiteren Erstarren die Oberfläche des Gußkör-

pers äußerst unregelmäßig wird.

c) Die Volumenänderung, die das geschmolzene Hartparaffin beim Abkühlen bis zum Erstarren erfährt, ist verhältnismäßig groß.

Diesen drei Eigenschaften muß beim Guß Rechnung getragen werden da es darauf ankommt, Gußkörper mit Oberflächen zu erzeugen, die nur unwesentlich von den Oberflächen der Gußformen abweichen. Nachdem die unter 1) beschriebenen Gußformen vorbereitet sind und das Paraffin geschmolzen ist, empfiehlt es sich, die Temperatur des geschmolzenen Paraffins über den Schmelzpunkt hinaus auf ca 130°C zu bringen, denn auf diese Weise werden nicht nur Flüssigkeitsreste (meist Wasse) ausgedampft, sondern es wird auch ein zu schnelles Erstarren in der Gußform vermieden, was aus einem später noch zu nennenden Grund unerwünscht ist. Beim Guß selbst wird das Paraffin vorsichtig mit einer Laufrinne in die Gußformen gefüllt, wodurch das Auftreten von Schlierenbildungen stark herabgesetzt wird. Nunmehr werden die so gefüllten Gußformen mit Wasser von ca 20°C (diese Temperatur kann um $\pm 15^{\circ}$ schwanken) so gekühlt, daß das Kühlwasser die gesamte Oberfläche der Gußform erreicht. Da die Gußform aus einem Metall hoher Wärmeleitfähigkeit besteht und Wasser eine hohe Wärmekapazität hat, liegt die Wandtemperatur der Gußform wesentlich unter der Temperatur der Paraffinschmelze und die thermische Kontraktion der Wandung liegt im Mittel unter demjenigen Wert, bei dem nach b) der kritische Ablösungsprozeß einsetzt. Da das Paraffin im überhitzten Zustand (um ca 40° heißer als der Schmelzpunkt) eingefüllt worden ist, kommt es längs der Berührungsfläche zwischen Schmelze und gekühlter Wandung nicht zur sofortigen Erstarrung. Das abkühlende Paraffin liegt vielmehr während des ganzen Abkühlungsvorganges als Folge der Wasserkühlung

an der begrenzenden Wandung an, wodurch der Trennprozeß nach b) und damit die starke Störung der Oberfläche vermieden wird. Im Verlauf der Abkühlung kommt es zu einer starken Volumenkontraktion der Schmelze. Da diese Kontraktion nicht an der Wandung einsetzt sinkt der Spiegel der Schmelze trichterförmig ein. Dieses Einsinkvolumen wird ständig mit überhitzter Paraffinschmelze ausgegossen, wobei die Überhitzung aus dem folgenden Grunde wesentlich ist. Wenn die eingesunkene Oberfläche bereits ganz oder halb erstarrt ist, wird sie durch die Überhitzung des nachgegossenen Materials wieder eingeschmolzen, wodurch die Ausbildung von Trennflächen vermieden wird. Stets muß mehr als einmal nachgegossen werden, doch wird das Einsinkvolumen nach jedem Schritt kleiner. Es wird in so vielen Schritten nachgegossen, bis ein erstarrter Paraffinwulst über die Wandung der Form hinaussteht.

Ist schließlich die Paraffinfüllung auf ca 40°C abgekühlt und erstarrt, so wird das Kühlwasser abgelassen. Auf diese Weise wird die Temperatur von ca 40°C auf die Metallwandung übertragen, was eine geringfügige thermische Expansion zur Folge hat. Hierdurch wird ein mechanischer Druck auf die Oberfläche des Gußkörpers bedingt, der evt. Oberflächendefekte ausgleicht. Nach dem vollständigen Abkühlen schrumpft die Wandung wieder geringfügig, sodaß sich der Gußkörper in überaus geringer Toleranz von der Wandung trennt.

3) Nachbearbeitung der Gußkörper.

Bevor der erstarrte Paraffinkörper aus der Gußform gehoben wird, muß der in 2) beschriebene, überstehende Paraffinwulst mit einem geeigneten Paraffinhobel abgezogen werden. Anschließend empfiehlt es sich, die gehobelte Oberfläche mit einem weichen Lederballen und dem halbfesten

Paraffin Vaseline zu polieren. Eine thermische Glättung ist nach unseren Erfahrungen unzweckmäßig, weil der entstehende dünne Schmelzfilm beim Erstarren infolge der starken thermischen Kontraktion nicht glatt bleibt. Nach dieser Bearbeitung kann der Gußkörper aus der Form herausgenommen werden. Die im allgemeinen völlig glatte Oberfläche wird nun gegebenenfalls mit optischen Hilfsmitteln nach Fehlern abgesucht, die durch Schlierenbildungen (gemäß a)) entstanden sein können. Sollten derartige Schlieren auftreten, so können sie ohne Schwierigkeiten mit einer Legierung aus Hartparaffin und Vaseline ausgefüllt werden. Eine solche Legierung liegt in ihrem Schmelzpunkt um so mehr unter demjenigen des Hartparaffins, je höher der prozentuale Anteil der Legierung an Vaseline ist. Durch eine Variation der Zusammensetzung können also die Eigenschaften der Legierung dem jeweiligen Verwendungszweck angepasst werden. Zum Ausfüllen evtl. Schlieren eignet sich, nach unseren Erfahrungen, eine Legierung mit einem Schmelzpunkt von ca 50°C gut. Mit einem geeigneten kleinen Spachtel wird die halbfeste Legierung in die Schliere gedrückt und die entstehende Oberfläche nach dem Polierverfahren der Umgebung angepaßt.

Nach diesem Guß- und Nachbearbeitungsverfahren können also beliebig viele Gußkörper mit mechanisch einwandfreien Oberflächen leicht und billig im Laboratorium hergestellt werden.

4) Zusammensetzen der Hohlraumvolumina.

Die einzelnen fertiggestellten Gußkörper stellen die geometrisch einfachen Elemente des gewünschten Hohlraumes dar, die nunmehr zu dem geometrisch komplizierten Hohlraum zusammengesetzt werden müssen. Dieses Zusammensetzen muß aber so erfolgen, daß die einzelnen Bauelemente

fugenfrei ineinander übergehen. An den Kontaktflächen werden zu diesem Zweck Bohrungen angebracht, derart, daß die Querschnittsfläche einer solchen Bohrung vollständig innerhalb der jeweiligen Kontaktfläche liegt.

Die einzelnen Gußkörper werden dann mit Holzstäbchen zusammengesteckt, die ungefähr in die Bohrlöcher passen. Zuvor werden aber die Bohrlöcher mit einer Hartparaffin-Vaselinlegierung ausgegossen, deren Schmelzpunkt bei ungefähr 40°C liegt. Beim Einführen des Holzstäbchens quillt dann ein Teil dieser Legierung heraus und verteilt sich als gut haftender Kitt zwischen den Kontaktflächen, wodurch ein fugenfreier Übergang erreichbar ist.

Jeder Resonanzhohlraum hat mindestens eine, im Allgemeinfall aber mehrere, geometrisch genau definierte Öffnungen für die Ein- bzw. Auskoppelung der Mikrowellenenergie. An diesen genau definierten Stellen werden zur vorläufigen Halterung des Gebildes Kupferhaken eingelassen, die aber auch aus Eisen bestehen können, wenn sie zumindest verkupfert sind. Dieses Einlassen der Haken erfolgt nach unseren Erfahrungen am zweckmäßigsten im Sinne eines Einschmelzens, d.h. der Haken wird über dem Schmelzpunkt des Hartparaffins hinaus erhitzt und an der späteren Koppelungsstelle in das Hartparaffin eingelassen. Hierbei ist allerdings unbedingt darauf zu achten, daß das an der betreffenden Stelle schmelzende und überquellende Paraffin nicht über die genau festliegende Fläche der späteren Koppelungsöffnung hinausläuft, die aus diesem Grunde zweckmäßig zuvor mit einem Farbstempel fixiert wird. Nach dem Abkühlen bettet das erstarrte Paraffin den Haken fest ein.

5) Metallisierung und Fertigstellung der Hohlräume.

a) Metallisierung der Hohlräume hoher Güte.

Die nach 4) fertiggestellten Gebilde werden an ihren Halterungshaken aufgehängt und mit metallischem Silber gespritzt. Der Silberfilm muß dabei mindestens so stark sein, daß beim anschließenden galvanoplastischen Prozess die Stromwärme hinreichend niedrig bleibt, d.h. sie soll nach Möglichkeit 30°C nicht übersteigen damit es zu keinen Veränderungen der Paraffinflächen kommt. Nach dem Spritzen wird galvanoplastisch ein Cu-Mantel von einigen mm Stärke aufgetragen. Ist dieser Prozeß abgeschlossen so kann man kurzfristig Kathode und Anode vertauschen, wodurch auch halbwegs glatte Außenflächen entstehen.

b) Metallisierung improvisierter Hohlräume niedrigerer Güte.

Werden an die Güte eines Hohlraumes nur geringe Anforderungen gestellt, so kann das Paraffingebilde mit kolloidalem Silber gespritzt werden. Nach unseren Erfahrungen eignet sich hierfür sehr gut das Leitsilber 200 von der Degussa, doch muß vor dem Spritzen die Paraffinfläche benetzbar gemacht werden. Dies geschieht durch Spritzen mit Seifenspiritus und anschließendes Trocknen. Zwar benetzt auch das Leitsilber die Paraffinfläche, doch entstehen beim Eintrocknen des Lösungsmittels in dem Silberfilm ohne den mikroskopischen Seifenfilm Haarrisse. Der Leitsilberfilm ist wiederum unbenetzbar und wird durch Benetzungsmittel, wie Azeton, Alkohol -also auch Seifenspiritus- zerstört. Die Benetzung kann aber elektrolytisch erzwungen werden. Das ganze Gebilde wird an den Halterungshaken in eine wässrige CuSO_4 -Lösung als Kathode gehängt, in welcher eine Cu-Platte als Anode liegt. Die Lösung darf allerdings keinen H_2SO_4 -Zusatz enthalten. Nimmehr wird ein Gleichstromstoß (8Vol.

von einigen Sekunden Dauer gegeben. Danach wird das Gebilde aus dem Elektrolyt genommen, kurz in Wasser getaucht und an der Luft getrocknet. Der kolloidale Silberfilm ist nunmehr mit Wasser gut benetzbar. Er ist außerdem fehlerfrei, denn wenn in ihm Haarrisse waren, würde er an diesen Stellen während des Stromstosses zerstört worden sein. Zur Galvanoplastik eignet sich nach unseren Erfahrungen ein Leitsilberfilm keinesfalls.

Der elektrolytisch benetzbar gemachte Leitsilberfilm wird nunmehr mit einer dünnen Schicht des kolloidalen Graphits Aquadag überzogen, die mit einem Pinsel aufgetragen werden kann. Nach dem Trocknen wird die Leitsilberschicht mit einem zusammenhängenden dünnen Graphitmantel umgeben. Auf diesen Mantel kann nunmehr ein, beim Schmelzpunkt des Hartparaffins nicht thermoplastisches Material aufgetragen werden, welches eine mechanisch stabile Wandung liefert. Wir sammelten gute Erfahrungen mit ~~Stonex~~ einer Kunststeinmasse Stonex, welcher Textilstoff eingelagert wurde. Eine solche Schicht kann nach dem vollständigen Abbinden noch in einem geeigneten Giesharz mit Glasfasereinlage eingeschlossen werden. Gute Erfahrungen wurden auch mit einem Gemisch aus Wasserglas und Kaolin mit Textileinlage (auf Glaselidengewebe) gesammelt, das auf dem Stonexmantel aufgetragen werden kann. Diese Außenschicht stabilisiert die Wandung des zukünftigen Hohlraumes mechanisch und schützt den Stonexmantel vor Umwelteinflüssen, wie Luftfeuchtigkeit, die zu störenden Umsetzungen führen können. Der Stonexmantel wiederum fängt die bei der unten d) erwähnten thermischen Behandlung auftretenden thermischen bzw. thermoplastischen Veränderungen der Außenschicht ab. Da beim Abbinden des Stonexmantels der Leitsilberfilm durch chemische Prozesse beschädigt würde, wurde die Graphitschicht dazwischen gelegt, durch deren Einfluß diese schädigenden Wirkung ausgeschlossen werden.

c) Hohlräume mit vorgegebener Dämpfung.

Soll die metallische Begrenzung des Hohlraumes durch stark absorbierende Flächen unterbrochen werden, d.h. soll auf diese Weise ein bestimmter Betrag der Mikrowellenenergie absorbiert werden und sind darüber hinaus die zulässigen Stehwellenverhältnisse bekannt, dann kann auf die Anpassung, also auf die geometrische Form der absorbierenden Teile der Hohlraumbegrenzung geschlossen werden.

Das zur Diskussion stehende Gebilde aus Paraffingußkörpern wird, wie unter b), mit Seifenspirituss gespritzt. Nach dem Trocknen können dann an den späteren Absorptionsstellen die absorbierenden Begrenzungsflächen des späteren Hohlraumes in ihrer vorgeschriebenen geometrischen Form mit dem kolloidalen Graphit Aquadac auf das mit Seifenspirituss benetzbar gemachte Paraffin aufgezeichnet werden. Anschließend wird gemäß a) oder b) weiter behandelt.

d) Fertigstellung der Hohlräume.

Zunächst werden aus den Wandungen die zukünftigen Ein- und Auskoppelungsstellen ausgeschnitten, wobei zugleich die Halterungen entfernt werden. Anschließend wird bei ca 90°C das Hartparaffin ausgeschmolzen. Ist der Hohlraum schließlich völlig leer, dann wird er mit ebenso heißem Flüssigparaffin ausgespült, welches die an der Wandung haftenden Reste des geschmolzenen Hartparaffins löst. Nach dem Erkalten haftet an den Wandungen ein dünner Film von einem Hartparaffin-Flüssigkeitsparaffingemisch von Vaselineartiger Konsistenz, welches in Benzin leicht löslich ist. Eine anschließende Benzinspülung entfernt diesen Film vollständig. Nach dem Trocknen des Benzins können die nach a) hergestellten Hohlräume mit einer verdünnten Zaponlacklösung gespült werden, sodaß der dünne Zaponlackfilm die silberne Be-

grenzungsfläche gegen Korrosionen schützt. Im Falle der nach b) hergestellten Hohlräume ist dies nicht möglich, weil der Leitsilberfilm durch Zaponlack zerstört wird. Hier kann mit einer verdünnten Styrolösung in Benzol gespült werden. Der sehr dünne Styrolfilm wirkt dann ebenfalls als Korrosionsschutz.