

### 3. Öfen mit dielektrischer Erwärmung

#### 3.1 Physikalische und verfahrenstechnische Grundlagen

##### 3.1.1 Elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische Wellen wie Mikrowellen oder Hochfrequenzwellen sind wie Licht oder Radiowellen schnell-veränderliche, elektromagnetische Wechselfelder, die ihre Polarität in sehr kurzer Zeit ändern. Die schnelle Änderung der Polarität bewirkt, daß polare Moleküle durch Abstoßung bzw. Anziehung in Rotation versetzt werden. Dadurch wird Energie von dem Wechselfeld auf die Moleküle übertragen und in Wärme umgewandelt. Die Richtung der Rotation wird um so häufiger gewechselt und dadurch die Erwärmung der Moleküle um so größer, je höher die Frequenz des anregenden Wechselfeldes ist.

Neben der Frequenz hängt die durch die Wellen auf ein Material übertragbare Leistung noch von den dielektrischen Eigenschaften des Materials, seinem Volumen und der erzeugten elektrischen Feldstärke ab. Da die dielektrischen Eigenschaften und das Volumen des Materials zumeist nicht beliebig verändert werden können, kann die erzeugte Wärmemenge nur über die Frequenz und die Feldstärke des Wechselfeldes beeinflusst werden.

Aus diesem Zusammenhang ist ersichtlich, daß bei höheren Frequenzen die übertragbare Leistung prinzipiell größer ist [1].

Eine ältere aber noch gebräuchliche Formulierung bezieht den dielektrischen Verlustfaktor  $\tan\delta$  mit ein, dieser ist nach folgender Beziehung definiert [4].

Elektromagnetische Wellen interagieren auf verschiedene Weise mit Materialien auf die sie treffen. Diese Möglichkeiten sind: Reflexion, Transmission und Absorption.

Wellen die vollständig reflektiert werden, geben keine Energie an das Material ab auf das sie treffen. Daher können diese Stoffe nicht mit hochfrequenten Wellen erwärmt werden. Zu diesen Materialien gehören die meisten Metalle.

Stoffe die von den Wellen ungehindert durchstrahlt werden können, werden Mikrowellen- oder HF-transparent genannt. Dabei durchdringen die Wellen das Material ohne Energie an dieses abzugeben, daher können auch diese Stoffe nicht von hochfrequenten Wellen erwärmt werden. Dazu gehören z.B. Quarzglas, Teflon, PP, PE u.a.

Die meisten Materialien gehören in die Gruppe der Mikrowellen oder HF absorbierenden Materialien. Diese Materialien nehmen mehr oder weniger gut die Energie der hochfrequenten Wellen auf und wandeln sie in Wärme um. Da die Wellen in das Innere des Materials eindringen können, erfolgt die Erwärmung im Volumen des Materials.

Die Eindringtiefe der Wellen hängt von den elektromagnetischen Eigenschaften des Materials und der Frequenz der Wellen ab [4].

Sie ist definiert als die Tiefe in der die Anfangsintensität der Wellen auf 37% zurückgegangen ist. Das bedeutet, daß die Wellen auch in die Bereiche unterhalb der Eindringtiefe gelangen, aber die Erwärmung dort deutlich geringer ist als oberhalb.

Mit steigender Frequenz der Wellen nimmt die Eindringtiefe ab, aber die Energieumsetzung (wie in Gleichung 1 beschrieben) nimmt zu. Bei den gebräuchlichen Frequenzen ist die Eindringtiefe hoch genug um auch in Teile mit großer Wandstärke gleichmäßig einzudringen.

Es gibt verschiedene Frequenzbereiche bzw. Bandbereiche, die für eine Mikrowellen- oder HF-Erwärmung zugelassen sind. Diese Frequenzbereiche werden ISM-Bänder genannt.

### **3.1.2 Frequenzbereiche (ISM Band)**

Innerhalb des gesamten Frequenzspektrums sind einige Frequenzen zur Nutzung durch die Industrie, Wissenschaft und Medizin freigestellt worden. Anwendungen die dieses sog. ISM-Band (**I**ndustrial, **S**cientific and **M**edical) nutzen, müssen zusätzlich der Norm EN 55011 [7] und im Mikrowellenbereich (300 MHz – 300 GHz) der Norm EN 60519-6 [8] entsprechen.

Die in Tabelle 2 angegebenen ISM-Frequenzen können in den einzelnen Ländern abweichen, z.B. wird in England anstelle der Frequenz 915 MHz die Frequenz 896 MHz verwendet. In industriellen Mikrowellenanlagen wird zumeist die Frequenz von 2,45 GHz genutzt, da bei Mikrowellengeneratoren für diese Frequenz das Preis/Leistungs-Verhältnis am günstigsten ist. Vereinzelt sind auch Anlagen mit 915 MHz im Gebrauch, die aber einen größeren technischen Aufwand und deutlich höhere Kosten für die Mikrowellenkomponenten verursachen. Das gleiche gilt für Mikrowellenkomponenten, die bei höheren Frequenzen (ab 5,8 GHz ) eingesetzt werden.

Für die Hochfrequenzerwärmung (HF-Erwärmung) werden zumeist die Frequenzen 13,56 MHz und 27,12 MHz verwendet, da diese eine hohe Eindringtiefe der Wellen gestatten. Für spezielle Anwendungen können auch andere Frequenzen eingesetzt werden.

### **3.1.3 Mikrowellengeneratoren (Magnetrons)**

Der verbreitetste Mikrowellengenerator ist das Magnetron (Bild 1). Es wurde in den 50er Jahren für die Radartechnik entwickelt, wird aber mittlerweile auch zur Mikrowellenerwärmung genutzt. Magnetrons mit einer Leistung von 0,8 kW bis 1,2 kW werden in Großserie für Haushaltsmikrowellen gebaut und sind dementsprechend preiswert und robust. Magnetrons mit höherer bzw. niedrigerer Leistung werden nur in geringen Stückzahlen gebaut und haben daher ein schlechteres Preis/Leistungs-Verhältnis. Magnetrons mit einer Leistung bis etwa 2 kW sind in der Regel luftgekühlt, Magnetrons mit höheren Leistungen müssen wassergekühlt werden und benötigen daher eine aufwendigere Überwachungstechnik. Bei diesen höheren Leistungen sind zusätzliche Schutzeinrichtungen notwendig um die Magnetrons, die mit zunehmender Leistung empfindlicher werden, vor reflektierten Mikrowellen zu schützen, die die Magnetrons aufheizen oder zerstören können.

Andere Mikrowellengeneratoren werden in der Industrie nicht eingesetzt, da sie zu teuer sind und meist einen zu geringen Wirkungsgrad haben. [3]

Zumeist werden die Magnetrons auf einen speziellen Hohlleiter, den sog. „Launcher“ (Bild 2) aufgesetzt, der mit der Mikrowellenkammer verbunden ist. Andere Arten das Magnetron mit

der Mikrowellenkammer zu verbinden sind möglich, werden aber nur bei speziellen Anlagen verwendet.

### **3.1.4 Hochfrequenzgeneratoren**

Als Hochfrequenzgenerator für industrielle HF-Erwärmung wird zumeist ein Röhrengenerator eingesetzt. Die hochfrequenten Wellen werden dabei von einer Generatorröhre erzeugt. Neuere Entwicklungen gehen hin zu Halbleiterbauelementen zur Erzeugung der Hochfrequenz. Diese Generatoren sind aber noch auf relativ geringe Leistungen begrenzt. Die Frequenz der Wellen liegt zwischen einigen MHz und ca. 50 MHz. Zumeist werden die ISM-Frequenzen 13,56 MHz, 27,12 MHz und 40,68 MHz eingesetzt. Die von einem einzelnen Generator erzeugte HF-Leistung kann bis zu einigen 100 kW betragen.

### **3.1.5 Mikrowellen- und HF-Erwärmung**

Die Mikrowellenerwärmung basiert auf der Interaktion der elektromagnetischen Wellen mit den elektrisch geladenen Teilchen des zu erwärmenden Materials.

Das Ankopplungsverhalten und damit die Erwärmbarkeit eines Materials wird von seinen elektromagnetischen Eigenschaften bestimmt. Diese Eigenschaften, dargestellt durch die Dielektrizitätskoeffizienten, sind abhängig von der Frequenz und der Temperatur.

Neben dem Ankoppelverhalten des Materials ist auch die Eindringtiefe der hochfrequenten Wellen von Bedeutung für die Erwärmung. Auch die Eindringtiefe wird von den Dielektrizitätskonstanten beschrieben und ist um so größer, je schlechter das Material an die Wellen ankoppelt, da bei gut ankoppelnden Materialien diese bereits in den oberen Schichten absorbiert werden.

Da bei der Erwärmung mittels Mikrowellen oder HF die Wärme im Material selber erzeugt wird, werden alle Teile eines Körpers relativ gleichmäßig erwärmt. Dadurch würde sich theoretisch ein gleichmäßiges Temperaturprofil im ganzen Körper bilden. Da aber an der Oberfläche des Körpers Wärme an die Umgebung abgegeben wird, kühlt die Oberfläche ab. Daher ist bei der Mikrowellen- und HF-Erwärmung üblicherweise der Kern eines Körpers wärmer als die Oberfläche. Damit ist das Temperaturprofil genau entgegengesetzt dem bei konventioneller Erwärmung (Bild 3).

Einige Materialien, wie z.B. Glas ändern ihre Dielektrizitätskonstanten mit der Temperatur sehr stark. Mit zunehmender Temperatur koppeln diese Materialien besser an die Mikrowellen an. Wird bei solch einem Material ein Gebiet wärmer als seine Umgebung, so erhöht sich die Ankopplung in diesem Gebiet und das Material wird dort noch wärmer, was wiederum zu einer noch besseren Ankopplung führt. Dieser Kreislauf kann so weit gehen, daß das Material in diesem Gebiet zu schmelzen beginnt. Diesen Effekt nennt man „thermal runaway“.

Bei solchen Materialien muß daher auf eine sehr gleichmäßige Feldverteilung der Mikrowelle geachtet werden um den „thermal runaway“ zu vermeiden.

### **Anwendungen der MW**

- Auftauen und Erwärmen von Lebensmitteln
- Vulkanisieren und Verschweißen von Gummi
- Trocknen und Entbindern von Keramiken
- Trocknen von chemischen und pharmazeutischen Produkten
- Trocknen von Gießkernen
- Vorwärmen von Kunstharzen
- Sterilisieren und Veraschen von medizinischen Abfällen
- Kalzinieren und Sintern von Keramiken (Forschung)

### **Vorteile der MW**

- Schnelle Erwärmung
- Gute Regelbarkeit
- Geringe Wärmeverluste
- Volumenerwärmung
- Hoher Wirkungsgrad

### **Anwendungen der HF**

- Trocknung von Hölzern und Holzleimen
- Trocknung von Textilprodukten
- Trocknen von Papierbahnen
- Verschweißen von Kunststoffprodukten
- Vulkanisieren von Gummi

### **Vorteile der HF**

- Schnelle Erwärmung
- Gute Regelbarkeit
- Geringe Wärmeverluste
- Volumenerwärmung
- Hohe Eindringtiefe

## **3.1 Aufbau, Ausführung und Einsatzgebiete**

### **3.2.1 Mikrowellenkammern**

Mikrowellenkammern werden generell aus Metall gefertigt, da die Mikrowellen an den Kammerwänden reflektiert werden sollen. Üblicherweise wird Aluminium wegen seiner guten elektrischen Eigenschaften verwendet, bei höheren atmosphärischen oder hygienischen Ansprüchen an die Kammer kann auch Edelstahl oder andere Metalle verwendet werden.

Grundsätzlich kann man zwei Arten von Mikrowellenkammern unterscheiden, die entsprechend der Mikrowellen-Feldverteilung in ihnen, als Single- oder Multi-Mode Kammern bezeichnet werden.

In Single-Mode Kammern wird ein spezieller Schwingungstyp (Mode) erzeugt. Es existieren viele verschiedene Schwingungstypen, die sich durch die Anzahl und Lage der Maxima des Mikrowellenfeldes unterscheiden. Welcher Schwingungstyp in einer Single-Mode Kammer erzeugt wird, hängt von der Frequenz der Mikrowelle und den Kammerdimensionen ab. Diese Art von Mikrowellenkammern haben physikalisch bedingt zumeist ein Volumen von nur wenigen Litern, daher ist die Größe der in ihnen zu erwärmenden Produkte sehr begrenzt. Single-Mode Kammern sind besonders geeignet auf kleinem Raum eine hohe Energiemenge zu übertragen. Daher werden sie zum schnellen Erwärmen und Sintern von Produkten mit geringem Volumen eingesetzt.

Die technisch bedeutendsten Schwingungstypen sind der  $TE_{10}$  und der  $TM_{01}$  Mode (Bild 4). Der  $TE_{10}$  Mode wird in einem rechteckigen Hohlleitern erzeugt. Das Maximum der Feldintensität befindet sich in der Mitte des Hohlleiters. Dünne Materialien können durch die Mitte des Hohlleiters geführt werden und erwärmen sich dadurch schnell (Bild 5 oben). Alternativ kann die hohe Feldstärke in der Mitte des Hohlleiters durch eine Schlitzstruktur aus diesem ausgekoppelt werden und so ein dünnes Material das über bzw. unter dem Hohlleiter entlanggeführt wird aufheizen (Bild 5 unten).

Der  $TM_{01}$  Mode wird in einer zylindrischen Kammer erzeugt und hat das Maximum der Feldintensität in der Achse der Kammer. Daher eignet sich diese Mikrowellenkammer besonders zum Erwärmen von strangförmigen Materialien oder Flüssigkeiten, die durch die Achse der Kammer geführt werden.

In Multi-Mode Kammern werden viele verschiedene Schwingungstypen erzeugt, die sich gegenseitig überlagern. Dadurch wird erreicht, daß in der gesamten Kammer eine relativ homogene Feldstärke erzielt wird. Die Feldintensität ist zumeist nicht so hoch wie in einer Single-Mode Kammer, dafür können aber größere, komplex geformte Körper gleichmäßig erwärmt werden. Die Abmessungen einer Multi-Mode Kammer unterliegen nicht so engen Beschränkungen wie Single-Mode Kammern, zumeist werden kubische oder zylindrische Kammern genutzt, aber es sind auch andere Geometrien möglich. Das Volumen einer solchen Mikrowellenkammer kann von dem einer Haushaltsmikrowelle bis zu mehreren Kubikmetern reichen (Bild 6).

### **3.2.2 Hochfrequenz-Kammern**

Bei Hochfrequenzerwärmungsanlagen entsteht das erwärmende Hochfrequenzfeld zwischen zwei oder mehreren Elektroden (Bild 7).

Bei Stabelektroden ist das entstehende Wechselfeld nicht auf den Bereich zwischen den beiden Elektroden beschränkt, sondern breitet sich auch zu den Seiten hin aus. Das zu erwärmende Material kann daher entweder zwischen den beiden Elektroden oder über die beiden Elektroden geführt werden.

Eine die Elektroden umgebende Kammer dient nur dazu, das Bedienungspersonal vor den hochfrequenten Feldern zu schützen.

Die Form der Elektroden kann an die Form des zu erwärmenden Materials angepaßt werden. Neben der Frequenz bestimmt der Abstand der Elektroden, zusammen mit der angelegten Spannung, die Stärke des Feldes und damit die Erwärmungsleistung und damit die Erwärmungsgeschwindigkeit. Die Feldstärke darf nicht beliebig erhöht werden, da es sonst zu Überschlägen zwischen den Elektroden kommen kann.

Um bei steigendem Abstand zwischen den Elektroden eine ausreichende Feldstärke zur Erwärmung zu erhalten, muß die anliegende Spannung erhöht werden. Die Spannung kann jedoch nicht beliebig weit gesteigert werden, da der Aufwand zur Handhabung von Hochspannung mit zunehmender Spannung deutlich ansteigt. Daher ist dem Elektrodenabstand und damit der erwärmbaren Materialdicke eine Grenze gesetzt.

### **3.2.3 Ofenkonzepte**

#### **Chargenöfen**

##### Mikrowellen-Chargenöfen

Chargenöfen werden bei geringen Durchsätzen, großvolumigen Körpern oder langen Erwärmungszeiten eingesetzt. Auch die meisten Mikrowellen-Hochtemperatur Anwendungen werden noch in Chargenöfen durchgeführt, da diese leichter zu kontrollieren sind und sich einfacher gegen die hohen Temperaturen isolieren lassen.

Mikrowellen-Chargenöfen bestehen zumeist aus einer geschlossenen Mikrowellenkammer, die mit einer gegen Mikrowellenausstritt gesicherten Tür zur Beladung versehen ist (Bild 8). Die Mikrowelle wird von einem oder mehreren Magnetrons erzeugt. Die Magnetrons können direkt in die Wand der Mikrowellenkammer eingebaut sein und frei in die Kammer abstrahlen, über ein kurzes Hohlleiterstück mit der Kammer verbunden sein, oder entfernt von der Kammer aufgebaut und über einen Hohlleiter an die Kammer angebunden sein. Die ersten beiden Möglichkeiten werden zumeist beim Einsatz einer größeren Zahl Magnetrons mit relativ niedriger Leistung (bis 2 kW) angewendet, während die letzte Möglichkeit für den Einsatz von einem oder wenigen Magnetrons mit hoher Leistung (über 2 kW) vorgesehen ist, die besondere Schutzeinrichtungen benötigen.

Mikrowellen-Chargenöfen können mit Single- oder Multi-Mode Kammern ausgestattet sein. Für industrielle Erwärmungs- oder Trocknungsanwendungen werden zumeist Multi-Mode Kammern verwendet, da diese ein größeres Kammervolumen zulassen.

Um eine gleichmäßige Erwärmung in der Kammer zu erreichen, muß eine gleichmäßige Feldverteilung der Mikrowelle erzeugt werden. Um dies zu erreichen, sollten verschiedene Punkte beachtet werden:

- Einbringen der Mikrowellenleistung an mehreren Stellen der Kammer
- Je größer das Kammervolumen im Verhältnis zum Nutzvolumen ist, um so gleichmäßiger ist die Feldverteilung im Nutzvolumen
- Einsatz eines Mode-Stirrers (Ein rotierendes metallisches Flügelrad, das die Ausbildung von stehenden Wellen verhindern soll)
- Bewegen des Materials in der Kammer (z.B. Rotation)

Für Hochtemperatur Anwendungen muß die Kammer mit Isolationsmaterial ausgekleidet werden um die äußere Metallwand zu schützen und Wärmeverluste zu verringern. Als Isolationsmaterial werden zumeist Fasern mit hohem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Anteil eingesetzt. Jedoch ist die Erwärmung der Auskleidung durch die Mikrowellen grundsätzlich nicht zu verhindern, was bei der Auslegung der Mikrowellenleistung berücksichtigt werden muß.

Mikrowellen- und HF-Erwärmung unter Schutzgasatmosphäre oder Vakuum ist möglich, jedoch muß beachtet werden, daß viele Schutzgase und besonders Vakuum eine geringere Durchschlagfestigkeit als Luft besitzen. Daher können besonders unter Vakuum nicht so hohe Feldstärken eingesetzt werden, da sonst die Gefahr von Funken- oder Plasmabildung besteht.

Die Türen von Mikrowellenkammern müssen gegen Austritt von Leckstrahlung gesichert werden. Dies kann durch Federelemente geschehen, die einen durchgehenden metallischen Kontakt zwischen Tür und Rahmen gewährleisten oder durch sog. Choke-Strukturen, die ohne metallischen Kontakt die Mikrowellen dämpfen indem sie die Mikrowellen an diesen Stellen zur Auslöschung bringen.

### Hochfrequenz-Chargenöfen

Chargenöfen mit HF-Erwärmung bestehen aus dem HF-Generator und dem eigentlichen Erwärmungsbereich. Das zu erwärmende Material wird zwischen den Elektroden plaziert. Der Abstand der Elektroden läßt sich zumeist einstellen und an das Material anpassen. Die Elektroden können von einer Kammer oder einem Käfig umgeben sein, um Leckstrahlung zu verhindern. Ist die Leckstrahlung unterhalb der Grenzwerte, können die HF-Elektroden auch ohne diesen Schutz betrieben werden.

### **Durchlauföfen**

#### Mikrowellen-Durchlauföfen

Mikrowellen-Durchlauföfen werden in vielen verschiedenen Formen gebaut. Allen gemein ist, daß sich das Material durch den Ofen bewegt. Daher kann auf den Einsatz eines Mode Stirrers verzichtet werden, da bereits durch die Bewegung das Entstehen einer ungleichmäßigen Erwärmung verhindert wird. Daher ist in diesem Ofentyp eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Erwärmungsergebnisse gewährleistet.

Mikrowellen-Durchlauföfen sind für größere Durchsätze und kurze bis mittlere Erwärmungszeiten geeignet.

#### -Band-Durchlauföfen

Bei dieser Bauart wird das Material auf einem mikrowellentransparenten Transportband (zumeist Glasfasern oder Teflon) durch die Mikrowellenkammer bewegt (andere Transportarten wie Rollen sind möglich).

Die Mikrowellenkammer kann kubisch oder zylindrisch aufgebaut sein. Wie bei den Chargenöfen können die Mikrowellen an einer oder mehreren Stellen in den Ofen eingebracht werden. Letzteres führt meist zu einer besseren Feldverteilung im Ofen.

Dieser Ofentyp wird fast ausschließlich als Multi-Mode Ofen gebaut, da er zumeist für größere Volumina eingesetzt wird (Bild 9).

Die Ein- und Auslaßöffnungen müssen gegen Mikrowellenaustritt gesichert werden. Dazu werden meistens Auslaßtunnel verwendet, die den Querschnitt der Mikrowellenkammer so weit verringern, daß nur wenig Mikrowellenenergie zwischen Wand und Erwärmungsmaterial entweichen kann. Zusätzlich sind die Tunnel mit Absorbermaterial ausgekleidet, das entweichende Mikrowellen absorbiert. Es können auch Vorhänge aus Mikrowellen reflektierendem Material (zumeist Graphitfasern oder metallbeschichteter Kunststoff) verwendet werden.

#### -Single-Mode Durchlauföfen

Single-Mode Öfen im Durchlauf mit zylindrischen Kammern werden zumeist zum Erwärmen von kontinuierlichen stabförmigen Materialien mit kleinen Querschnitten und Flüssigkeiten eingesetzt (Bild 10). Üblicherweise wird dazu ein Schwingungstyp erzeugt, der ein bis zwei Maxima entlang der Achse der Kammer aufweist. Das Stabmaterial bzw. die Flüssigkeit wird durch das Maximum der Feldstärke geleitet. Dadurch wird eine schnelle Erwärmung und damit eine hohen Durchlaufgeschwindigkeit ermöglicht. Der Schwingungstyp mit zwei Maxima wird zur gleichzeitigen Erwärmung von zwei Stäben oder zum Erhitzen eines Stabes mit größerem Durchmesser eingesetzt.

Dieser Ofentyp kann mit kleinen bis mittleren Mikrowellenleistungen ausgestattet werden. Wenn größere Leistungen benötigt werden, können mehrere Kammern hintereinandergeschaltet werden.

Zur Verhinderung von Leckstrahlung können hier Dämpfungsglieder eingesetzt werden. Diese bestehen aus einem Metallrohr, dessen Durchmesser-Längen Verhältnis so gewählt ist, daß die Mikrowellen sich darin nicht ausbreiten können. Je größer der Durchmesser des Rohres ist, um so länger muß das Rohr sein um keine Mikrowellen herauszulassen. Dabei ist zu beachten, daß ab einem bestimmten Durchmesser-Wellenlängen-Verhältnis keine Dämpfung mehr vorhanden ist [1].

Rechteckige Single-Mode Durchlauföfen werden zum Erwärmen/Trocknen von dünnen Materialien wie Papier oder Folien eingesetzt. Die Mikrowellenkammer besteht dabei aus einem Hohlleiter mit Schlitz zur Durchführung des Materials.

Um eine größere Erwärmung oder höhere Durchlaufgeschwindigkeiten zu erreichen, können mehrere der Hohlleiter hintereinander positioniert werden.

Es ist ebenfalls möglich, die Hohlleiter über das Material zu führen und die Mikrowellen über Schlitz aus dem Hohlleiter auf das Material zu führen. Dieses Verfahren wird ebenfalls für dünne Materialien eingesetzt. Um den Austritt der Mikrowellen in die Umgebung zu verhindern, muß das gesamte System gekapselt werden.

#### Hochfrequenz-Durchlauföfen

Bei Durchlauföfen mit HF-Erwärmung wird das zu erwärmende Material zwischen den beiden Kondensatorelektroden hindurchgeführt oder an ihnen entlanggeführt. Diese Öfen sind sehr einfach aufgebaut und können besonders zur Erwärmung von dünnen Materialien wie

Papier oder Folien eingesetzt werden, da sich zwischen den beiden Platten ein sehr konzentriertes Feld erzeugen läßt.

### **Sonderformen**

Auch andere Ofenkonzepte können mit Mikrowellen als Heizenergie ausgestattet werden. Realisiert wurden bereits Drehrohröfen mit Mikrowellenbeheizung (Bild 11). Weitere Ofenarten wie Wirbelbettrockner und Sprühtrockner mit Mikrowellen sind ebenfalls machbar.

### **3.2.4 Einsatzgebiete**

Das Einsatzgebiet der Mikrowellen(MW)- und HF-Erwärmung ist so vielfältig wie das der konventionellen Erwärmungsverfahren. Erwärmungsprozesse sind in vielen Industrien anzutreffen, daher ist das potenzielle Einsatzgebiet entsprechend groß.

Da die Mikrowellen- und HF-Technik aber im allgemeinen teurer ist als konventionelle Verfahren, wird sie in den meisten Fällen nur dort eingesetzt, wo die Vorteile der Mikrowellen- und HF-Erwärmung einen Einsatz trotz der höheren Kosten wegen der Verfahrensvorteile rechtfertigen.

Diese Vorteile sind die hohe Aufheizgeschwindigkeit die mit Mikrowellen und HF erzielt werden kann, die schonende Erwärmung, die durch das inverse Temperaturprofil erreicht wird, die schnelle Durchwärmung des Materials und die mögliche Verbesserung der Produktqualität. Andere Vorteile der Mikrowellen- und HF-Erwärmung wie die gute Regelbarkeit, der hohe Wirkungsgrad und die Vermeidung von Speicherwärmeverlusten, reichen alleine zumeist nicht aus, um die Verwendung von Mikrowellen oder HF wirtschaftlich zu rechtfertigen.

Die hohe Aufheizgeschwindigkeit der MW oder HF ermöglicht es, die Erwärmungszeiten deutlich zu senken. Dies ist besonders bedeutend in Prozessen, bei denen die Produktionskapazität durch den Erwärmungsprozeß limitiert wird. Viele Produktionsprozesse sind mittlerweile so optimiert, daß die Erwärmungs- bzw. Trocknungszeiten einen hohen Anteil an der gesamten Herstellungszeit haben. Mittels der MW- oder HF-Technik lassen sich die Erwärmungszeiten so verkürzen, daß die gesamte Herstellungszeit reduziert wird und somit eine Produktionssteigerung erzielt werden kann.

Die schonende Erwärmung ist besonders vorteilhaft für Materialien, die trocknungsempfindlich sind. Dies trifft besonders auf Keramiken zu, die bei zu schneller Trocknung Risse bekommen können. Da die MW und HF die Wärme hauptsächlich im Inneren der Materialien erzeugen, lassen sich Probleme vermeiden, die bei konventionellen Methoden durch das Einbringen der Wärme über die Oberfläche auftreten. Dazu gehört z.B. die Gefahr, daß sich die Poren im Material an der Oberfläche schließen bevor die Feuchte aus dem Inneren vollkommen ausgetrieben ist.

Für besonders empfindliche Materialien, die durch die mechanischen Spannungen, die infolge unterschiedlicher Temperatur von Oberfläche und Kern entstehen, beschädigt werden können, ist der Hybrid-Betrieb ideal. Durch die Kombination von MW oder HF und konventionellen Erwärmungsmethoden, läßt sich ein ebenes Temperaturprofil erzeugen, das an allen Stellen die gleiche Temperatur aufweist. Dadurch können diese Materialien besonders schonend erwärmt und getrocknet werden.

Dämmstoffe und andere Materialien mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit sind mit konventionellen Methoden nur sehr langsam zu erwärmen. Besonders bei empfindlichen Materialien die nicht über eine maximale Temperatur erwärmt werden dürfen, ist dieses Problem besonders ausgeprägt. Die MW und HF hat hier den Vorteil, daß sie wegen ihrer hohen Eindringtiefe in das Innere des Materials gelangen und dort die Wärme erzeugen. Deshalb können auch dickwandige Produkte aus diesen Materialien schnell erwärmt werden.

Die besonderen Vorteile der HF-Erwärmung liegen in der Erwärmung bzw. Trocknung von sehr dünnen Materialien. Da sich das elektromagnetische Feld zwischen den Elektroden sehr konzentrieren läßt, können besonders dünne Materialien schnell erwärmt und/oder getrocknet werden.

Anwendungen sind z.B. Trocknen von Lacken, Papier und Folien im Durchlauf.

Mit speziellen Mikrowellen-Systemen können diese Anwendungen ebenfalls verwirklicht werden.

### **3.2.5 Beispiele für den Einsatz von Mikrowellenerwärmung**

#### **Trocknung von Dämmplatten**

Die Trocknung von Dämmmaterialien mit konventionellen Verfahren ist sehr zeit- und energieaufwendig, da die geringe Wärmeleitfähigkeit dieser Produkte ein schnelles Durchwärmen des Materials verhindert. Daraus resultieren lange Trocknungszeiten, die eine flexible Produktion verhindern.

Durch den Einsatz von Mikrowellen konnte die Trocknungszeit deutlich verkürzt werden, da die Mikrowellen in das Dämmmaterial eindringen können und die Platten gleichmäßig, auch im Inneren erwärmen. Wegen der Verkürzung der Trockenzeit ist es möglich den Trocknungsvorgang im Durchlauf zu realisieren, was zu einer deutlichen Produktionssteigerung und einem flexibleren Prozeß führte.

Der eingesetzte Mikrowellentrockner ist ein Band-Durchlauf-Trockner mit einer Multi-Mode Mikrowellenkammer, wodurch Dämmplatten bis zu einer Dicke von 240 mm getrocknet werden können. Der Trockner ist mit einer Gesamtleistung von ca. 60 kW ausgestattet und arbeitet bei einer Frequenz von 2,45 GHz (Bild 12).

#### **Trocknung und Dekontamination von Weinkorken**

Bei der Trocknung von Weinkorken mit konventionellen Methoden ist es innerhalb von wirtschaftlich vertretbaren Zeiten nicht möglich, im Inneren der Korken die für die Trocknung und Dekontamination notwendige Temperatur zu erreichen. Daher sind im Inneren des Korken nach dem Trocknen noch Feuchte und verunreinigende Stoffe (Trichloranisol) vorhanden, die bei der nachfolgenden Lagerung die Korken wieder kontaminieren können. Daher ist es möglich, daß diese Korken den Wein geschmacklich verschlechtern. Mittels Mikrowellen ist es gelungen, die Korken in kurzer Zeit auf die notwendige Temperatur zu erwärmen. Diese Temperatur wird dabei gleichmäßig im gesamten Korken erzielt, daher werden die Feuchte und verunreinigende Stoffe fast vollständig ausgetrieben (Bild 13). Dadurch wird das Risiko von Korkgeschmack im Wein auf ein Minimum gesenkt.

## **Erwärmung von GFK Stäben**

GFK Stäbe müssen vor der Weiterverarbeitung im Durchlauf gleichmäßig auf 70°C erwärmt werden.

Für diesen Anwendungsfall ist eine zylindrische Single-Mode Mikrowellenkammer am geeignetsten, da in diesen Kammern ein sehr konzentriertes, aber gleichzeitig homogenes Mikrowellenfeld erzeugt werden kann. Dies führt zu einer hohen Aufheizgeschwindigkeit und stellt sicher, daß die Stäbe gleichmäßig erwärmt werden.

Die Anlage ist mit einem Magnetron mit 1,2 kW Leistung ausgestattet, das mit einer Frequenz von 2,45 GHz arbeitet. Die Mikrowellenleistung kann kontinuierlich von 15% bis 100% geregelt werden (Bild 14).

### **3.2.6 Beispiele für den Einsatz von HF-Erwärmung**

#### **Holzverleimung**

Die Verleimung von Holz mittels HF-Erwärmung erfolgt bei gleichzeitiger Ausübung von Druck. Durch den aufgebracht Druck werden die einzelnen Teile die verleimt werden sollen in Position gehalten und es wird sichergestellt, daß während der Verleimung ein guter Kontakt zwischen den Leimflächen besteht.

Der Druck wird immer senkrecht zu den Leimfugen aufgebracht. Je nach Lage der Leimfugen zu den Elektroden kann der Druck direkt über die Elektroden aufgebracht werden oder über ein separates System.

Die unterschiedlichen Anordnungen sind:

#### **- Parallel- oder Längsheizung**

Die Leimfugen liegen senkrecht zu den Elektrodenplatten und parallel zu den Feldlinien. Die Feldlinien bündeln sich in den Leimfugen, da diese die HF-Wellen deutlich besser absorbieren als das Holz. Der Preßdruck wird parallel zu den Elektrodenplatten aufgebracht.

#### **- Quer- oder Reihenheizung**

Die Leimfugen verlaufen parallel zu den Elektrodenplatten und senkrecht zu den Feldlinien. Die Feldlinien müssen daher sowohl das Holz, als auch die Leimfuge durchdringen. Der Preßdruck kann direkt über die Elektrodenplatten aufgebracht werden.

#### **- Streufeldheizung**

Dies ist eine Kombination der ersten beiden Elektrodenanordnungen. Durch die Verwendung stabförmiger Elektroden wird hier nur ein Teil der Leimfuge erwärmt und zur Abbindung gebracht. Der nicht erwärmte Teil der Fuge muß anschließend bei Raumtemperatur aushärten.

Die Auswahl der Elektrodenanordnung erfolgt anhand des gewünschten Prozesses. Anwendungen für die HF-Verleimung sind z.B. das Verleimen von Spanplatten, das Auftragen von Furnier oder das Anleimen von Kanten.

### **3.3 Prozeßtechnik, Prozeßführung und Prozeßüberwachung**

#### **3.3.1 Regelung von MW- und HF-Anlagen**

##### **Regelung von MW-Anlagen**

Je nach Ofenart oder Prozeß stehen verschiedene Steuerungsausführungen zur Verfügung. Bei Chargenöfen kann eine repräsentative Temperaturmeßstelle oder, bei Trocknungsprozessen, das Gewicht der Charge als Führungsgröße dienen. Diese Führungsgröße wird einem Regler oder SPS-System zugeführt, um die Mikrowellen-Leistungszufuhr zu regeln. Die einzelnen MW-Generatoren können hierbei kontinuierlich im Bereich von ca. 15%-100% ihre Leistungsabgabe verändern. Dies erfordert jedoch ein leistungsfähiges steuerbares Netzteil, das entsprechend teuer ist. Für einen industriellen Einsatz sollte dies berücksichtigt werden.

Bei großen Ofensystemen werden die MW-Generatoren zumeist nur zu- oder abgeschaltet. Wegen der großen Anzahl von Magnetrons läßt sich dabei durch Zu- und Abschalten eine quasi-kontinuierliche Steuerung erreichen.

Bei großen Durchlaufsystemen sind kurzfristige Regeländerungen nur mit großem Aufwand zu erreichen, da ein entsprechend langer Ofen aufgrund der Verweilzeit eine lange Totzeit besitzt. Da in den meisten Fällen der Massendurchsatz relativ konstant bleibt, reicht häufig eine Einstellung der Leistungsparameter aus, die aus einer entsprechenden Prozeßentwicklung gewonnen wurden.

In solchen Durchlauföfen werden die MW-Leistungskomponenten in der Regel über eine SPS-System eingeschaltet und überwacht. Auf kurzen Durchlaufstrecken ist eine Regelung über eine Temperaturmessung möglich. In diesem Fall werden stufenlos steuerbare Netzteile eingesetzt.

##### **Regelung von HF-Anlagen**

Industrielle HF-Erwärmungsanlagen werden zumeist über eine SPS gesteuert. Alle prozeßrelevanten Daten können daher aufgenommen, überwacht und gespeichert werden.

Die Anpassung des HF-Generators an die Elektroden und das zu erwärmende Material erfolgt über ein Hochfrequenz-Anpaßglied. Dadurch kann der Generator und die abgegebene Leistung an den Erwärmungsvorgang angepaßt werden.

#### **3.3.2 Überwachungsgeräte**

##### **Allgemeines**

Die bedeutendste Größe, die in Erwärmungsanlagen überwacht wird, ist die Temperatur. Es muß sichergestellt sein, daß das Wärmgut nicht überhitzt wird, aber gleichzeitig darf die Temperatur nicht zu niedrig sein, sonst wird das Ziel der Wärmebehandlung nicht erreicht.

Bei konventionellen Erwärmungsmethoden wird zumeist die Ofenraumtemperatur gemessen, um daraus auf die Materialtemperatur zu schließen. Bei Mikrowellen- und HF-Erwärmung ist dies nicht möglich, da die Ofenatmosphäre bei diesen Erwärmungsarten relativ kalt bleibt und daher keine Rückschlüsse auf die Materialtemperatur erlaubt.

Bei Mikrowellen- und HF-Anwendungen muß darauf geachtet werden, daß elektrische Geräte oder mit diesen verbundene Leitungen nicht innerhalb der elektromagnetischen Felder betrieben werden können. Die bei Mikrowelle und Hochfrequenz erzeugten elektromagnetischen Wellen beeinträchtigen die Funktion der Geräte, wodurch z.B. keine verlässlichen Temperaturdaten ermittelt werden können.

Daher ist die Temperaturmessung in Mikrowellen- und HF-Anlagen nur mit optischen Geräten möglich, deren Auswerteelektronik außerhalb der elektromagnetischen Felder liegt. Daher kommen nur Pyrometer und faseroptische Temperaturmeßgeräte in Frage.

Bei Anwendungen mit geringen Leistungsdichten ist es möglich, mit Thermoelementen verwertbare Ergebnisse zu erzielen. Dazu müssen diese als Mantelthermoelemente ausgeführt sein und geerdet werden. Für industrielle Anlagen sind diese nur bedingt einsetzbar.

### **Pyrometer**

Pyrometer werden außerhalb der MW-/HF-Kammern angebracht und messen durch ein Fenster, das gegen Austritt der Wellen geschützt ist. Pyrometer können in Anlagen mit bewegtem oder stillstehendem Wärmgut eingesetzt werden. Hinsichtlich der verwendbaren Meßfrequenzen im Infrarotbereich, oder der maximal meßbaren Temperaturen, entstehen keine Einschränkungen durch die hochfrequenten Wellen.

Pyrometer messen nur die Oberflächentemperaturen; dies muß berücksichtigt werden, wenn man eine Regelung anhand der Temperaturdaten vorsieht, da bei Mikrowellen- und HF-Anwendungen die höchsten Temperaturen im Inneren des Wärmgutes auftreten. Die Regelung muß entsprechend ausgelegt werden, da es sonst zu Überhitzungen im Inneren kommen kann.

### **Faseroptische Temperaturmeßgeräte**

Dieses optische Meßsystem wurde speziell für Messungen in hochfrequenten Feldern entwickelt und basiert auf einem nichtmetallischen Sensor, der über einen Lichtleiter mit der Auswerteelektronik verbunden ist. Die Temperaturmessung erfolgt, wie bei einem Thermoelement, an der Spitze des Sensors. Durch den nichtmetallischen, faseroptischen Aufbau kann der Sensor und der Lichtleiter innerhalb der MW-/HF-Kammer verlegt werden, ohne das eine Störung des Meßsignals auftritt.

Wenn der Sensor über ein Loch in das Innere des Wärmgutes eingebracht wird, können die Temperaturen im Kern gemessen werden.

## **3.4 Auslegungskriterien, Grenzen**

### **3.4.1 Auslegungskriterien**

Bei der Auslegung müssen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- a) Bevor eine industrielle Mikrowellen- oder HF-Erwärmungsanlage ausgelegt werden kann, ist es in den meisten Fällen notwendig, Tests mit dem zu erwärmenden Material

durchzuführen. Wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, hängt die Erwärmbarkeit mittels hochfrequenten Wellen entscheidend von dem Material selbst ab. Bereits kleine Unterschiede in der Zusammensetzung, wie sie z.B. von Additiven verursacht werden, können einen deutlichen Einfluß auf das Erwärmungsverhalten mittels elektromagnetischer Wellen haben.

b) Anhand der Versuchsergebnisse und des gewünschten Prozesses muß festgelegt werden, ob eine Durchlauf- oder eine Chargenanlage besser geeignet ist. Dabei ist darauf zu achten, daß einige Prozesse mit Mikrowellen oder HF wegen der höheren Aufheizgeschwindigkeit, dem unterschiedlichen Temperaturprofil und der kürzeren Erwärmungsdauer im Durchlauf geführt werden können, die mit konventionellen Methoden nur als Chargen zu erwärmen sind.

c) Die Festlegung auf eine spezielle Ofenart kann anhand des gewählten Prozesses (Durchlauf oder Charge) und der Form des zu erwärmenden Materials erfolgen:

#### Mikrowellenerwärmung

Strangförmige oder flüssige Materialien lassen sich am besten in Mikrowellenkammern erwärmen, die die Mikrowellenleistung in einem eng begrenzten Bereich konzentrieren. Daher sind besonders Single-Mode-Öfen für diesen Anwendungsfall von Bedeutung. Flüssige Stoffe können in einem mikrowellentransparenten Rohr durch die Kammer geführt werden und so schnell und gleichmäßig erwärmt werden.

Die meisten anderen Materialformen, wie Pulver, Granulate, stückige Materialien, u.a., werden in Multi-Mode Kammern erwärmt, da diese ein größeres Nutzvolumen bieten und somit auch für höhere Durchsätze oder größere Chargen eingesetzt werden können. Bei Durchlauf-Anlagen dieses Typs ist besonders auf die Ein- und Auslaßöffnungen zu achten. Um das Austreten von Mikrowellen an diesen Öffnungen zu verhindern, werden zumeist Absorbieretunnel verwendet. Die Länge dieser Tunnel, die notwendig ist, um den Austritt von Wellen auf das zulässige Maß zu reduzieren, hängt von dem Öffnungsquerschnitt ab, daher sollte die Öffnung so klein wie möglich gehalten werden.

Bei sehr großen Öffnungen ist es in den meisten Fällen nicht sinnvoll zur Abschirmung einen Tunnel zu verwenden, da diese dann sehr lang sein müßten. Bei solchen Öffnungen werden zumeist Türen eingesetzt, die die Mikrowellenkammer verschließen. Diese Türen werden so gesteuert, daß sie sich automatisch, durch Sensoren gesteuert, öffnen und schließen.

#### HF-Erwärmung

Die Form der Elektroden muß entsprechend der Form des zu erwärmenden Materials gewählt werden. Plattenelektroden werden für gleichmäßige, großflächige Erwärmungsarten verwendet. Stabelektroden werden verwendet um gezielt spezielle Bereiche eines Materials zu erwärmen (z.B. Klebestellen). Dabei ist es erforderlich, die Form der Elektroden an das Material anzupassen um eine gleichmäßige, intensive Erwärmung zu erhalten.

Eine Vielzahl von hintereinander Angeordneten Stabelektroden kann zur Erwärmung von dünnen Materialien (z.B. Papier, Folien) verwendet werden.

d) Die benötigte Mikrowellen- oder HF-Leistung kann anhand des Durchsatzes und der gewünschten Temperaturerhöhung festgelegt werden. Produktionsnahe Versuche zeigen ob die berechnete Leistung realistisch ist.

### 3.4.2 Grenzen

Unabhängig von dem Design der Mikrowellen- oder HF-Anlage, die jeweils für ein spezielles Gebiet besonders geeignet sind, gibt es einige Prozesse, die mit hochfrequenten Wellen nicht durchgeführt werden können.

Die bedeutendste Einschränkung der Mikrowellen- und HF-Erwärmung ist, daß nur Materialien erwärmt werden können, die diese hochfrequenten Wellen absorbieren. Metalle und andere leitende Materialien, die die Wellen reflektieren, lassen sich nicht erwärmen. Eine Ausnahme hierzu bilden pulverförmige Materialien, da ihre elektrische Leitfähigkeit durch die vielen Korngrenzen so weit herabgesetzt sein kann, daß sie die Wellen absorbieren können.

Teflon, Polypropylen, Quarzglas u.a. Materialien die transparent für die hochfrequenten Wellen sind, lassen sich ebenfalls nicht erwärmen, da die Wellen sie ungehindert durchdringen können. Jedoch können diese Stoffe durch Beimengungen von absorbierendem Material, z.B. Graphitpulver, so verändert werden, daß sie sich erwärmen lassen.

Da der Effekt der Mikrowellen- und HF-Erwärmung darauf beruht, daß die Wellen in das Innere des Materials eindringen und es von dort aus erwärmen, die Eindringtiefe der Wellen aber durchaus begrenzt ist, kann die Dicke der Materialien nicht beliebig groß sein. Genauere Werte, ab wann ein Material zu dick für die Erwärmung mit Mikrowellen oder HF ist, hängen von der verwendeten Frequenz, dem Material selbst und der eingesetzten Erwärmungskammer ab.

Bei vielen Materialien liegt die Eindringtiefe im Bereich von 10 cm, somit sind die meisten Produkte geeignet, insbesondere wenn die Wellen von allen Seiten in das Produkt eindringen können. Die erwärmbare Materialdicke kann daher bei 20 cm -30 cm liegen. Bei niedrigerer Absorption des Materials sind auch deutlich größere Dicken möglich.

Die in einer Anlage zusammengefaßte Mikrowellen-Gesamtleistung wird in den meisten Fällen auf wenige hundert kW begrenzt. Anlagen mit höheren Leistungen sind durch ihre Vielzahl von MW-Generatoren und anderen Komponenten sehr komplex und daher teuer. Ist eine derart hohe Leistung notwendig, wird sie zumeist auf mehrere kleine Anlagen verteilt, die dann parallel oder in Reihe betrieben werden. Dies hat zudem den Vorteil, daß die Produktion flexibler ist und daher besser auf Durchsatz- oder Produktänderungen reagieren kann.

HF-Anlagen können generell mit höherer Leistung ausgestattet werden. Die Leistung je Anlage kann bis zu 1 MW betragen.

Eine weitere technische Einschränkung bei Mikrowellen- oder HF-Anwendungen besteht hinsichtlich der Atmosphäre innerhalb der Erwärmungskammer. Insbesondere die elektrische Durchschlagfestigkeit der Kammeratmosphäre ist dabei von Bedeutung. Je geringer diese Durchschlagfestigkeit ist, um so weniger Leistung kann in ein bestimmtes Kammervolumen eingebracht werden, ohne daß es zu Überschlügen in der Kammer kommt.

Schutzgase, wie z.B. Argon, weisen eine deutlich geringere Durchschlagfestigkeit als Luft auf, dies muß bei der Auslegung der Erwärmungsanlage berücksichtigt werden.

Da die Durchschlagfestigkeit mit abnehmendem Druck sinkt, sind hohe Unterdrücke bei Mikrowellen- und HF-Anwendungen nur bei niedriger Feldstärke und damit geringer Erwärmungsleistung zu realisieren.

### **3.5 Zukünftige Entwicklungen**

Obwohl die Mikrowellenerwärmung bereits vor über 50 Jahren entdeckt wurde, gibt es noch viele Möglichkeiten und Anwendungen die nicht ausgeschöpft worden sind. In der industriellen Erwärmungstechnik gehört dazu die Hybrid-Erwärmung, die Hochtemperatur Anwendungen und die Nutzung der Mikrowellen zur Unterstützung chemischer Reaktionen.

Unter Hybrid-Erwärmung versteht man die Kombination von Mikrowellen mit konventionellen Erwärmungsmethoden (hauptsächlich Heißgas oder Elektrowärme). Diese Kombination hat den Vorteil, daß der Energieeintrag in den Ofen deutlich gesteigert werden kann, wodurch die Leistung und damit der mögliche Durchsatz je Ofen erhöht werden können. Reine Mikrowellenöfen haben zumeist nur eine begrenzte Mikrowellenleistung, da höhere Leistungen zu sehr komplexen und großen Anlagen führen würden. Durch das Einbringen von Heißgas oder Elektrowärme in den Mikrowellenofen, ohne das Ofenvolumen deutlich zu erhöhen, sind Gesamtleistungen von mehreren 100 kW in einem Ofen zu verwirklichen. Dementsprechend ist der Durchsatz eines solchen Ofens deutlich höher als der eines reinen Mikrowellenofens gleicher Größe, aber mit deutlich niedrigerer Leistung. Solche Hybrid-Öfen werden billiger sein als reine Mikrowellenöfen gleicher Leistung, da, besonders bei Heißgasnutzung, die konventionelle Erwärmungstechnik billiger ist als die Mikrowellen.

Durch die Kombination der Vorteile der Mikrowellen und der konventionellen Erwärmung läßt sich eine sehr schonende Trocknung/Erwärmung erzielen, da sich die verschiedenen Temperaturprofile der einzelnen Erwärmungsmethoden (das übliche bei konventioneller Erwärmung und das inverse bei MW/HF) zu einer gleichmäßigen Temperatur in dem gesamten Material kombinieren lassen.

Mit der Hybrid-Technik lassen sich also kleinere, günstigere Öfen mit großer Leistung verwirklichen.

Vor der Verwirklichung von Hochtemperaturanwendungen im Durchlauf müssen für industrielle Prozesse, insbesondere zum Brennen/Sintern von Keramik, noch einige Probleme gelöst werden. Die Mikrowellenkomponenten und die Mikrowellenkammer müssen einerseits vor den hohen Temperaturen geschützt werden, andererseits soll aber die notwendige Auskleidung möglichst wenig Mikrowellenenergie aufnehmen. Dazu muß ein Material gefunden werden, das sowohl für Mikrowellen- als auch Hochtemperaturanwendungen geeignet ist.

In den meisten Fällen wird man die hohen Temperaturen nur mittels einer Hybrid-Erwärmung erzielen können, da sich nur wenige Materialien allein mit Mikrowellen auf die notwendigen hohen Temperaturen bringen lassen.

Neben den bereits beschriebenen Ofenarten für den Durchlauf ist es prinzipiell möglich, die Mikrowellentechnik bei einer Vielzahl von speziellen Ofentypen anzuwenden. Beispielfhaft sind hier nur Schuböfen, Rollenöfen und Hubbalkenöfen genannt.

Durch die Verwendung von Mikrowellen zur Unterstützung von chemischen Reaktionen ist es teilweise möglich, diese zu beschleunigen, ihre Ausbeute zu erhöhen oder sogar vollkommen neue Reaktionsprodukte zu erhalten.

Mikrowellen-Mehrfrequenzöfen werden es in Zukunft ermöglichen eine höhere Mikrowellen-Leistungsdichte zu erzielen, ohne die heute damit verbundenen Probleme wie Funken oder Plasmabildung zu bekommen. Bei diesen Öfen werden Mikrowellen mit zwei oder mehr unterschiedlichen Frequenzen verwendet. Neben der üblichen Frequenz von 2,45 GHz kommen dafür besonders die 915 MHz und die 5,8 GHz in Frage.

Um Materialien zu erwärmen die für die üblicherweise verwendeten Mikrowellenfrequenzen weitgehend transparent sind (z.B.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Quarzglas) können Mikrowellen mit deutlich höheren Frequenzen verwendet werden, bei denen diese Materialien dann ankoppeln. Der dazu notwendige Frequenzbereich liegt etwa zwischen 18 GHz und 28 GHz.

Mikrowellengeneratoren für diese Frequenzen existieren bereits (z.B. Gyrotrons), werden bisher aber nur in der Medizin und der Forschung eingesetzt. Diese Generatoren sind sehr teuer und empfindlich, was einer industriellen Nutzung entgegensteht.

Mit steigender Frequenz erhöht sich zudem der Aufwand, der zur Abschirmung der Mikrowellenanlagen gegen Leckstrahlung betrieben werden muß, da mit abnehmender Wellenlänge die Mikrowellen auch aus kleinen Löchern in der Mikrowellenkammer austreten können.

### 3.6 Literatur

- [1] Lange, K.; Löcherer, K.-H.; Meinke-Gundlach Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, 4. Auflage 1986, Springer Verlag Berlin
- [2] Roussy, G.; Pearce, J.A.; Foundations and industrial applications of microwaves and radio frequency fields, 1995, John Wiley & Sons
- [3] Thuery, J.; Microwaves: Industrial, Scientific and Medical Applications, 1992, Artech House Inc.
- [4] Metaxas, A.C.; Meredith, R.J.; Industrial Microwave Heating, 1988, Peter Peregrinus Ltd.
- [5] Suhm, J., Mikrowellentechnik zur schonenden Trocknung von keramischen Materialien, Keramische Zeitschrift, 52 [8], 2000
- [6] Gast, H., Hochfrequenz in der Holzverarbeitungstechnik, Holz.Zentralblatt Messeheft 1979, Ligna/Interzum Nr. 54
- [7] DIN EN 55011 Industrielle, wissenschaftliche und medizinische Hochfrequenzgeräte (ISM-Geräte) – Funkstörungen – Grenzwerte und Messverfahren
- [8] DIN EN 60519-6 Sicherheit in Elektrowärmeanlagen – Teil 6: Sicherheitsanforderungen für industrielle Mikrowellen-Erwärmungseinrichtungen
- [9] Gefahrt, J., Hochfrequenzerhitzung im Holz, Holz Zentralblatt Verlags-GmbH, Stuttgart, 1963

- [10] Buffler, C.R., A new, low power 915 MHz microwave system for efficient industrial scale-up prototyping, Microwave Industrial Food Processing, Chicago, 1998