

# Mikrowellenerwärmungstechnik: Potentiale und Grenzen

**Abstract:** Seit ca. 50 Jahren ist die Mikrowellenerwärmungstechnik für den industriellen Einsatz verfügbar. Um die Vorteile dieser Technik darzustellen, wird anschaulich auf die Theorie der Mikrowellenerwärmung eingegangen. Zusätzlich werden die praktischen Effekte an einigen ausgewählten Beispielen demonstriert. Mikrowellen-Erwärmungseinrichtungen existieren mittlerweile in vielen verschiedenen Ausführungen. Neben den klassischen Kamersystemen wie der Küchenmikrowelle wird die Mikrowellenerwärmung auch in industriellen kontinuierlich betriebenen Trocknungs- und Erwärmungsanlagen eingesetzt. Langjährige Erfahrung im Mikrowellenbereich und innovative Ideen sind die Basis der Mikrowellenanlagen von LINN HIGH THERM. Dieser Artikel soll einen Überblick über die zurzeit verfügbaren Arten von industriellen Nieder- und Hochtemperatur-Mikrowellen-Erwärmungsanlagen geben. Die mit diesen Anlagen möglichen Trocknungs- und Erwärmungsprozesse sind so vielfältig wie in der konventionellen Thermoprozesstechnik. Die Mikrowellenerwärmung kann häufig den Trocknungs- bzw. Erwärmungsprozess deutlich beschleunigen und auf diese Art und Weise Zeit, Energie und Geld einsparen.

**Keywords:** Mikrowellenerwärmung, Mikrowellentechnologie, numerische Simulation, FEM, Elektrowärme, Mikrowellenofen, Trocknung, Aushärten, Backen, Entbindern, Sintern

## Einleitung

Die Behandlung von Materialien mittels Mikrowellen weist eine Anzahl vielversprechender Vorteile gegenüber konventionellen Erwärmungstechniken auf, z. B. eine bessere Qualität des Erzeugnisses, Verkürzung der Prozesszeit, Einsparung von Energie und Energiekosten durch einen höheren Wirkungsgrad, Umweltentlastung, geringere Anlagenkosten und höhere Flexibilität der Anlage [1–5]. Unter Mikrowellenerwärmung versteht man dabei einen Vorgang, bei dem Energie mit einer Frequenz von 300 MHz bis 300 GHz in ein Erwärmungsgut als elektromagnetische Welle mit Wellenlängen im Bereich von 1 m bis 1 mm eindringt und darin in Wärme umgewandelt wird (Bild 1).

Für die Mikrowellentechnik stehen im Wesentlichen 4 ISM-Frequenzen (Frequencies for Industrial, Scientific and Medical Radio-frequency Equipment) zur Verfügung, die je nach länderspezifischen Regeln auch abweichen können. Die höchste Frequenz ist 28 000 bzw. 30 000 MHz, wobei ein industrieller und kostengünstiger Einsatz in größerem Maßstab noch nicht in Sicht ist. Die niedrige Frequenz von 915 MHz unterliegt einem gewissen technischen Aufwand, der nur für bestimmte Fälle einen Einsatz rechtfertigt.

Die kostengünstigste „Frequenz“ ist die mit  $2450 \pm 50$  MHz, die weltweit bei Haushaltsmikrowellen genutzt wird. Vom Standpunkt der Mikrowellen-Thermoprozesstechnik findet das SHF-Band mit der Frequenz  $5800 \pm 75$  MHz auch eine industrielle Anwendung [5].

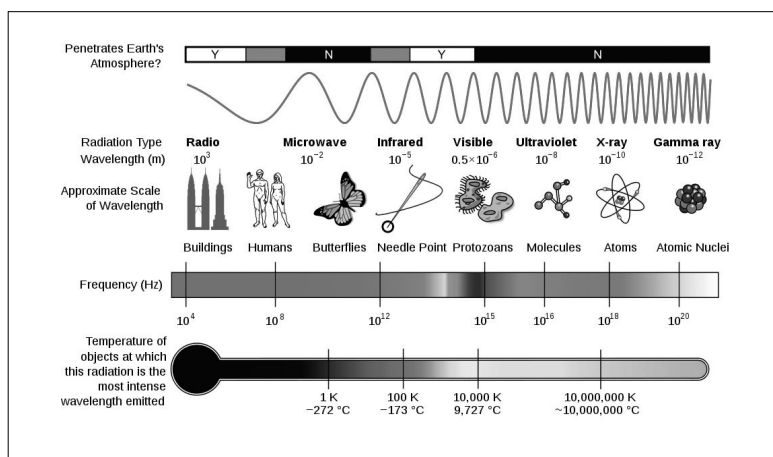


Bild 1 Spektrum elektromagnetischer Strahlung [6]

## Theoretische Grundlagen

Bevor das physikalische Prinzip der Mikrowellentechnik näher vorgestellt wird, wird der konventionelle Erwärmungsprozess betrachtet. Als Wärmequellen dienen z. B. Widerstands- oder Infrarotheizelemente, wobei sich diese in der Umgebung des zu erwärmenden Materials befinden. Über Wärmestrahlung und -konvektion wird deren Energie auf die Oberfläche des Materials übertragen und muss von dort in das Innere wandern, um eine Durchwärmung des Materials zu ermöglichen. Die Wärmeleitfähigkeit, Adsorption und die spezifische Wärmekapazität des Materials bestimmen hierbei im Wesentlichen den Erwärmungsprozess.

Empfindliche Materialien erlauben unter Umständen keine hohen Temperaturen. Weist das Material noch eine schlechte Wärmeleitfähigkeit auf, ist ein langer Prozess unausweichlich, so dass bei der Herstellung bestimmter Produkte mit den

konventionellen Erwärmungstechniken enge Grenzen gesetzt sind. Um diese Grenzen zu umgehen, muss nicht die Physik neu geschrieben werden, sondern nur die „Hochfrequenztechnik bzw. Radartechnik“ eine größere Beachtung finden.

Die Mikrowellenerwärmung unterscheidet sich von den konventionellen Erwärmungssystemen dadurch, dass die Wärme nicht über den Umweg einer Erwärmung des Umgebungsgases und Wärmeisolation in das Erwärmungsgut einge-

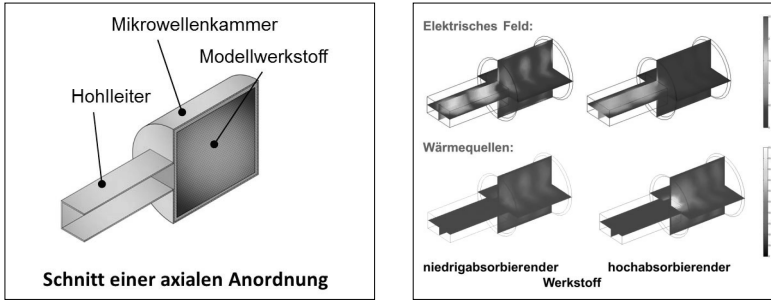
Ivan Imenokhoyev,  
Hans Windsheimer, Roland Waitz,  
Nadja Kintsel, Horst Linn

LINN HIGH THERM GmbH  
92275 Eschenfelden

Korrespondenz-Autor: I. Imenokhoyev  
E-Mail: Imenokhoyev@linn.de

www.linn.de

**Bild 2**  
FEM-Simulation:  
Verteilung des  
elektrischen Feldes  
und der Wärme-  
quellen im  
zylindrischen Multi-  
Mode-Applikator [4]



bracht werden muss, sondern direkt im Materialvolumen eingekoppelt werden kann. Dieses birgt das Potential einer überaus energieeffizienten Erwärmungsmethode, so dass schon eine Vielfalt an Forschungsarbeiten zur Mikrowellenerwärmung entstanden sind [1–3, 5, 7–8].

Die Umwandlung von elektromagnetischer Energie in Wärmeenergie wird auf Grund der elektromagnetischen Eigenschaften der Materialien realisiert und ist prinzipiell material-, temperatur- und frequenzabhängig. Da in der Regel nur eine Frequenz beim Erwärmungsprozess verwendet wird und die Temperaturabhängigkeit der elektrodynamischen Eigenschaften nicht bekannt ist, erfolgt eine Betrachtung nur in Abhängigkeit von dem Material selbst.

Um ein beliebiges Material zu beschreiben, sind die drei Parameter elektrische Leitfähigkeit, Permeabilität und Permittivität nötig. Für letzteres wird noch häufig die alte Bezeichnung Dielektrizitätskonstante (DK) bzw. Dielektrizitätszahl und Verlustfaktor verwendet.

Eine komplexe Dielektrizitätskonstante wird nach Gleichung (1) dargestellt. Für die Permeabilitätskonstante gilt Gleichung (2).

$$\underline{\epsilon}_{ges} = \epsilon_0 \cdot [\epsilon_r' - j \epsilon_r''] = \epsilon_0 \cdot \underline{\epsilon}_r \quad (1)$$

$$\underline{\mu}_{ges} = \mu_0 \cdot [\mu_r' - j \mu_r''] = \mu_0 \cdot \underline{\mu}_r \quad (2)$$

Der entscheidende Faktor für die Energieumwandlung ist der Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r'' = \text{Verlustfaktor} (\tan \delta) \times \text{Dielektrizitätszahl} (\epsilon_r')$ . Fälschlicherweise

wird dieser oft mit dem Verlustfaktor gleichgesetzt. Der Zusammenhang ist in Gleichung (3) ersichtlich.

$$\epsilon_r'' = \tan \delta \cdot \epsilon_r' \quad \text{und} \quad \tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (3)$$

Dabei gilt

$\underline{\epsilon}_{ges}$  = komplexe Dielektrizitätskonstante (DK)

$\underline{\mu}_{ges}$  = komplexe Permeabilitätskonstante;

$$\epsilon_0 = 8,85418 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{E} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}}$$

elektrische Feldkonstante

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{E} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

magnetische Feldkonstante;

$\epsilon_r'$  = Realteil der DK;

$\mu_r'$  = Realteil der Permeabilität;

$\epsilon_r''$  = Imaginärteil der DK;

$\mu_r''$  = Imaginärteil der Permeabilität;

$\epsilon_r$  = relative Dielektrizitätszahl;

$\mu_r$  = relative Permeabilität;

$\tan \delta$  = Verlustfaktor und  $\delta$  = Verlustwinkel.

Mit dieser Darstellung der komplexen Dielektrizitätskonstante und der komplexen Permeabilitätskonstante wird die Behandlung der *Maxwell'schen* Gleichung im Frequenzbereich in Form von *Helmholtz*-Gleichungen (4) und (5), welche die Grundlage für die Mikrowellentechnik bilden, erheblich erleichtert. Für die numerische Simulation im Frequenzbereich werden diese Gleichungen weiter behandelt [2, 7].

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \underline{\mu}_{ges} \cdot \underline{\epsilon}_{ges} \cdot \vec{E}(\vec{r}) \quad (4)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \underline{\mu}_{ges} \cdot \underline{\epsilon}_{ges} \cdot \vec{H}(\vec{r}) \quad (5)$$

Die von den elektromagnetischen Wellen fortgeleitete Energie lässt sich aus den Maxwell'schen Gleichungen ableiten und führt zu dem bekannten *Poyntingschen* Satz im Frequenzbereich [7, 9]:

$$P_{ein} = \frac{1}{2} \int_V [\vec{E} \times \vec{H}] \cdot \vec{n} \cdot dF = \frac{1}{2} \int_V \vec{S} \cdot \vec{n} \cdot dF \quad (6)$$

Dieser besagt, dass die in eine Hüllfläche  $F$  hineinströmende mittlere Energie  $P_{ein}$  dem Betrag und der Pha-

se nach von der Amplitude, der Verteilung und der jeweiligen Phase des elektrischen und magnetischen Feldes abhängt. Formt man das Oberflächenintegral in Gleichung (6) nach dem *Gauß'schen* Satz in ein Volumenintegral um, so kommt man zu einer Bestimmung der Wirkverluste im beliebigen Dielektrikum:

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \cdot \iiint_V \epsilon_r'' \cdot |\vec{E}|^2 dV \quad (7)$$

Somit erhält man eine 3D-Wärmequellendichteverteilung in einem unmagnetischen Material. Bild 2 zeigt elektromagnetische Feldstärke- und Wärmequellendichteverteilungen als Beispiel einer numerischen 3D-Finite-Elemente-Methode (FEM)-Simulation. Es geht um einen zylindrischen Multi-Mode-Applikator (eine Mikrowellenkammer, Bild 2 links), der eine axiale Anordnung des Rechteckhohlleiters hat und mit einem Modellwerkstoff gefüllt ist. Als Modellwerkstoff sind niedrigabsorbierende und hochabsorbierende Werkstoffe mit unterschiedlichen Werten von DK eingesetzt [4].

Da das ganze Volumen des Körpers gleichzeitig erwärmt wird, baut sich im Inneren eine höhere Temperatur auf, weil die Oberfläche an die „kalte Umgebung“ angrenzt und somit gekühlt wird. Das Innere wirkt aber wärmeisolierend, da die Nachbarmoleküle die gleiche Temperatur aufweisen. Der Temperaturverlauf ist somit invers zu dem der konventionellen Erwärmung. Dieser Effekt ist in vielen Fällen erwünscht, da die Oberfläche geschont wird und die Wärme schneller im Inneren aufgebaut werden kann.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Mikrowellen ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum bzw. in Luft. Wird die Mikrowellenquelle eingeschaltet, ist sie unmittelbar in dem zu erwärmenden Körper präsent und beginnt auch sofort mit der Energieumwandlung. Bei Abschaltung wird der Aufheizvorgang sofort gestoppt. Lange Aufheiz- und Abkühlvorgänge des Ofens sind nicht vorhanden.

Unpolare Stoffe (z. B. Luft, Teflon, Quarzglas) können keine Energie umwandeln und somit auch nicht erwärmt werden. Die Mikrowellen durchdringen diese Stoffe und werden nicht abgeschwächt (keine Energieumwandlung). Allgemein kann das zu erwärmende Material, das in der Lage ist die Energieumwandlung durchzuführen, als „Heizer“ angesehen werden, da das Material selbst die Wärmequelle dar-

**Bild 3**  
MDBT-Anlage in  
Schnellkochreis-  
Herstellung  
(installierte  
Mikrowellenleistung  
21 kW, Durchsatz  
ca. 300 kg/h)



stellt. Das metallische Ofengehäuse (Mikrowellenkammer) dient nur dazu, die Mikrowellen wieder auf das Material zurückzulenken, so dass keine Mikrowellenenergie verloren geht und dass das Bedienpersonal keiner Mikrowellenstrahlung ausgesetzt wird.

Die Trocknung als ein Beispiel für industrielle Niedertemperaturanwendung hat eine besondere Stellung im Produktionsprozess und bestimmt in einigen Fällen sogar die Produktionsrate bzw. -dauer. Bei einer Optimierung des ganzen Prozesses wird somit der Trocknungsvorgang unter die Lupe genommen. In der Keramikindustrie sind Trocknungszeiten von 10–14 Tagen und bei großen Teilen sogar bis zu mehreren Monaten keine Seltenheit. Da kürzere Lieferzeiten und kleinere Lagerkapazitäten angestrebt werden, wird die Mikrowellentrocknung eine immer größer werdende Rolle einnehmen. Warum dies so ist, liegt in der Physik der Mikrowellentechnik bzw. an der Ausbreitung und den Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen. In speziellen Fällen kann mit Hilfe der Mikrowellenbehandlung sogar eine Materialverbesserung erzielt werden.

Bei der Mikrowellentrocknung ist das inverse Temperaturprofil von Vorteil, da sich im Innern des Materials ein höherer Dampfdruck aufbaut und eine Trocknung von innen nach außen erfolgt. In den kälteren äußeren Schichten kondensiert ein Teil des Dampfes und hält die Oberfläche feucht und durchlässig, bis von innen kein Dampf mehr nachkommen kann und die Oberfläche anschließend zu trocknen beginnt. Da das Wasser auf Grund des hohen Verlustfaktors in der Regel die meiste Energie umwandelt, erfolgt je nach Trockensubstanz und je nach Trocknungsgrad im Innern eine geringere Energieumwandlung (die Mikrowellen wandern ungeschwächt weiter), wobei diese Energie an anderer Stelle genutzt werden kann. Somit ist eine effektive Trocknung mit Entfernung aller Wassernester möglich. Durch die unterschiedliche Energieaufnahme der zu trocknenden Materialien sind prinzipiell unterschiedliche Prozessabläufe möglich, wobei oberhalb eines Feuchtegehaltes von ca. 15 % kein wesentlicher Unterschied besteht. Hier bestimmt das Wasser den Prozessablauf. Im Bereich von 5–15 % kann die Trockensubstanz selbst eine zunehmende Rolle spielen. Ist das Material selbst in der Lage, Mikrowellenenergie um-

zusetzen, kann die Temperatur des Materials ansteigen, wobei die Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante den Prozess bestimmt. Bei gewissen Chemikalien kann dadurch das chemisch gebundene Wasser abgespalten werden. Unterhalb von 5 % kann die Mikrowellentrocknung mit dem abnehmenden Feuchtegehalt ineffektiv werden. Es ist jedoch ratsam, vorher Materialuntersuchungen durchzuführen, um sicherzustellen, dass die notwendige Temperatur erreicht werden kann.

## Mikrowellen-Banddurchlauföfen MDBT-Baureihe

Am Anfang der 1990er-Jahre begann die Fa. *LINN HIGH THERM GmbH* zusammen mit Fa. *Riedhammer GmbH* ihre Aktivitäten auf dem Gebiet der Mikrowellenerwärmung. Um dem Bedarf nach Industrietrocknern nachzukommen wurde ein modular aufgebauter Mikrowellen-Banddurchlaufofen entwickelt [10]. Auf Grund des einfachen und flexiblen Konzeptes sowie dem modularen Aufbau gelang es, einen kostengünstigen Mikrowellen-Banddurchlaufofen (MDBT) zu fertigen, der bei den verschiedensten Anwendungen eingesetzt werden kann. Die Hauptanwendung ist das Trocknen bei vielen Fertigungsprozessen.

Die Mikrowellen-Banddurchlauf-trockner von Typ MDBT bieten folgende Vorteile gegenüber konventioneller Erwärmungsanlagen:

- Schnellere, reproduzierbare und homogene Erwärmung.
- Sofortige Betriebsbereitschaft bzw. verzögerungsfreie Steuerung der Wärmeleistung.
- Gute Eignung für Prozessautomatisierung.
- Keine Speicherwärmeverluste.
- Niedriger spezifischer Energieverbrauch.
- Kürzere Produktionszeiten.
- Schnelleres Durchwärmen von dickeren Schichten.

Bei dickeren Materialien oder größeren Schüttdichten bewirkt das Eindringen der Mikrowelle in das Material und die sofortige Umwandlung der Mikrowellenenergie in Wärmeenergie eine schnellere Trocknung als bei konventioneller Trocknungstechnik. Die Trocknungsdauer bei einigen Materialien von bisher einigen Stunden oder sogar Tagen wird jetzt deutlich reduziert. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, eine verbesserte Produktqualität zu erreichen. Da die Erwärmung des Materials aus dem Volumen erfolgt, wird

auch eine Überhitzung weitgehend vermieden. Bei Isolationsmaterialien, die einen schlechten Wärmeleitwert haben, dauert der Trocknungsprozess lange, bis die konventionell erzeugte Wärme das Innere erreicht hat und dort die Trocknung beginnt. Bei der Mikrowellentrocknung spielt die Wärmeleitfähigkeit des Materials nur eine untergeordnete Rolle.

Die Anwendungen des Mikrowellendurchlaufofens beschränken sich natürlich nicht nur auf den Trocknungsbereich. In der Lebensmittelindustrie ist die Mikrowellenerwärmung seit ca. fünfzig Jahren im Einsatz. Als Beispiel sei hier die Schnittbrotherstellung genannt, wobei die Mikrowellenerwärmung zum Pasteurisieren verwendet wird [11]. Außerdem hat sich das Backen vom krustenlosen Brot mittels Mikrowellen sehr energiesparend gezeigt – mehr als 40 % weniger Energiebedarf durch Verkürzung des Backvorganges in Vergleich zu konventionellem Backofen (Backdauer mit Mikrowellen ca. 10 min und mit konventionellen Backofen ca. 24 min). Die Herstellung von schnellkochendem Reis mittels Mikrowellen bringt bis zu 90 % Energieersparnis bei gleichen gustatorischen Eigenschaften und vermeidet die Verwendung von Wasser bei der Produktion (Bild 3). Da die anschließende Trocknung wegfällt, lässt sich viel Energie einsparen [12].

Weiterhin wird dieses Erwärmungsprinzip zum Auftauen, Kalzinieren, Aushärten, Tempern und zur Synthesebeschleunigung verwendet.

Ältere Mikrowellen-Durchlaufanlagen basieren auf dem Konzept von wenigen Generatoren (Magnetrons) mit hoher Leistung auf einer rechteckigen Mikrowellenkammer. Daraus ergibt sich, dass es schwierig ist, in solch einer Anlage ein homogenes Mikrowellenfeld zu erzeugen. An den Einspeisestellen der Magnetrons wird eine hohe Leistung übertragen, die sich aber nicht gleichmäßig im Kammerolumen verteilen kann. Zusätzlich wird durch die rechteckige Bauform der Kammer die Reflexion der Mikrowellen zurück in die Magnetrons gefördert. Alles dies führt zu einer relativ ungleichmäßigen Mikrowellen-Feldverteilung.

Mikrowellen-Durchlaufanlagen von LHT basieren auf dem Konzept vieler kleiner Magnetrons und einer zylindrischen Mikrowellenkammer. Durch die Verteilung einer Vielzahl von Magnetrons an den Kammerwänden ergibt sich eine gleichmäßige Einspeisung von vielen kleinen



**Bild 4** Mikrowellen-Banddurchlaufrockner MDBT 70+24/1040/210/16300 von LINN HIGH THERM in der Produktion (installierte Mikrowellenleistung 70 kW, Heißluftleistung 24 kW, Durchsatz ca. 2000–3000 kg/h)

Mikrowellenleistungen. Dadurch wird eine homogenere Mikrowellenverteilung erzielt. Dieser Effekt wird noch durch die Rundung der Kammer unterstützt, welche die auftretenden Mikrowellen gleichmäßig in das Kammervolumen reflektiert. Als Beispiel für eine solche Anlage neuen Designs ist ein Mikrowellen-Banddurchlaufrockner MDBT 70+24/1040/210/16300 abgebildet, der zur Erwärmung und Trocknung von Hülsenfrüchten dient. Diese Anlage hat eine Heizlänge von ca. 16,3 m und eine Bandbreite von ca. 1 m (Bild 4).

Bei diesem Ofen wurde ein modularer Aufbau gewählt, der es ermöglicht, den Ofen auch nachträglich ohne großen Aufwand umzubauen. Die Mikrowellengeneratoren (Magnetrons) sind hierbei spiralförmig um die Längsachse der Zylinderkammer angeordnet, so dass eine gleichmäßigere Feldverteilung erreicht wird. Das Transportband wird über Bodenbleche geführt, die mit Sekundärstrahlern (Schlitzantennen) ausgestattet sind, so dass eine weitere Feldbeeinflussung (Konzentration) stattfindet. Die Ein-/Auslassöffnungen sind mit einem speziellen Absorbiermaterial ausgekleidet, um die vorgeschriebenen maximalen Leckstrahlungswerte zu unterschreiten. Je nach Größe der Öffnung werden zusätzliche Absorbierzonen integriert, die eine weitere Reduzierung der Leckstrahlung bewirken. Bei noch größeren Öffnungen werden zusätzliche Absorbervorhänge eingesetzt. Die verwendeten Magne-

trons sind luftgekühlt, wobei die erwärmte Kühlluft in den Ofen einströmt und Feuchtigkeit aufnehmen kann. Die feuchte Luft wird dann über ein Absaugsystem aus dem Ofen abgesaugt. Dieser Mikrowellenbanddurchlaufrockner kann mit einer Mikrowellenleistung bis zu 100 kW ausgestattet sein.

## Mikrowellen-Kammer-Vakuum-Trockner MKST-Baureihe

Für die Vakuumtrocknung wird der patentierte Mikrowellenofen der MKST-Baureihe verwendet (Bild 5). Das ist eine universelle Versuchsanlage, anpassbar an verschiedenste Anwendungen z. B. zum Trocknen von Holz, Keramik, Chemie, Lebensmittel, Baustoffe, Aushärten faserverstärkte Kunststoffe (GFK/CFK) und vieles mehr.

Die Mikrowellenanlage besteht aus einer zylindrischen Mikrowellenkammer mit einem Innendurchmesser von ca. 550 mm und einer Länge von ca. 3485 mm. Die Mikrowellenanlage ist für einen Betrieb an Normaldruck, Grobvakuum (10 mbar) und leichtem Schutzgasüberdruck ausgelegt. Es sind 12 Magnetrons á 800 W/2,45 GHz (gesamt 9,6 kW) vorhanden, deren Leistung im Bereich von 15–100 % kontinuierlich eingestellt werden kann.

## Die Mikrowellen-In-Fass-Trocknung MIDD-Baureihe

Als Ergebnis einer langen Zusammenarbeit mit der deutschen Nuklearindustrie (Nukem) hat LINN einen Prozess patentiert, der Flüssigabfälle mittels Mikrowellen eindampft. Der ursprüngliche Anwendungshintergrund war dabei die Trocknung/Kristallisation leicht radioaktiver Salzlösungen, Rückbauschlämme, Kühl- und Waschflüssigkeiten, welche in zahlreichen Veröffentlichungen vor-

gestellt wurde [1]. Der Mikrowellen-In-Fass-Trocknungsprozess (Microwave In Drum Drying-MIDD-Prozess) ist ein durch Verdampfung gesteuerter Trocknungsprozess.

Die wichtigsten Eigenschaften und Vorteile des MIDD-Prozesses verglichen mit widerstandsbeheizten Systemen sind:

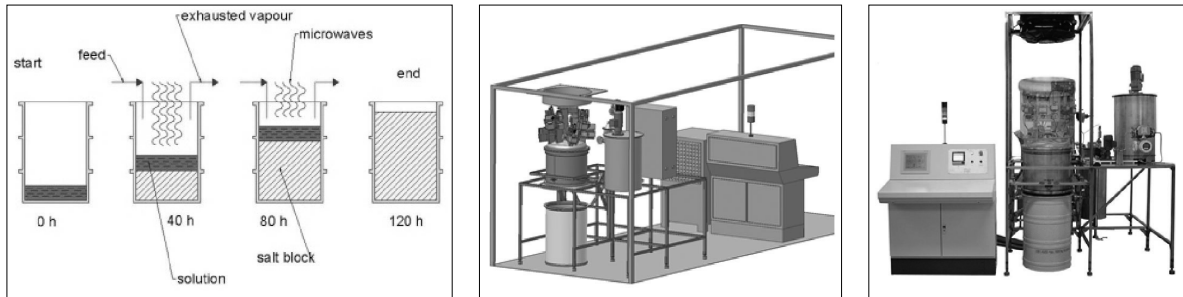
- Die Wärme wird direkt in der Lösung über das komplette Volumen erzeugt.
- Dabei entstehen nur minimale Temperaturgradienten und somit eine möglichst homogene Trocknung/Erstarrung.
- Die Prozessdauer ist im Vergleich zu widerstandsbeheizten Systemen signifikant verkürzt.

Die MIDD-Anlage wird semikontinuierlich betrieben. Zu Beginn wird eine definierte Menge an Flüssigabfall in den Endlagerbehälter gepumpt, während eine induktive Heizung (unter dem Fassboden) diesen vorwärmt. Anschließend beginnt die Mikrowellenerwärmung, und Flüssigabfall wird kontinuierlich zugeführt. Der Endlagerbehälter und der Mikrowellenapplikator werden auf einem Absolutdruck von ca. 900 mbar gehalten. Der entstehende Dampf wird mit einem Gebläse abgesogen. Ein Tröpfchenabscheider filtert Staubpartikel und mitgerissene Wassertropfen aus dem Dampfstrom, bevor dieser in einem Plattenwärmetauscher auskondensiert wird. Das Kondensat wird in einem separaten Behälter aufgefangen. Am Ende des Prozesses wird die Zufuhr von Flüssigabfall gestoppt, und die restliche Flüssigkeit im Endlagerbehälter mit angepasster Mikrowellenleistung verdampft. Nach dem Abkühlen des Behälters wird dieser durch ein neues Endlagergebäude ersetzt, und der Zyklus beginnt von Neuem.

Das Kondensat kann weiterverwendet oder recycelt werden, und der feste trockene Rückstand in dem Behälter kann endgelagert werden.

**Bild 5** Mikrowellen-Kammer-Trockner MKST-9,6 200/2500





**Bild 6** Schematische Darstellung des MIDD-Prozesses (l.) und neuer MIDD-Prototyp (r.)

Während des Prozesses sorgt ein Kühlwasserrückkühler dafür, dass die Kühlflüssigkeit des Plattenwärmetauschers unter einer definierten Temperaturgrenze liegt, um eine vollständige Kondensation sicherzustellen.

Die MIDD-Anlage wird über eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) betrieben. Neben allen Massenströmen werden Temperaturen, Füllstände sowie Differenzdrücke überwacht und gemessen, um über eine Gesamtmassenbilanz auf die Dicke der flüssigen Schicht oberhalb des bereits getrockneten Materials rückzuschließen.

Diese Schicht ist bedeutend für den automatisierten Betrieb der Anlage. Alle gemessenen Daten werden über einen separaten Datenschreiber visualisiert und dokumentiert. Der Prozess wird über ein Touchpanel visualisiert, alle Meldungen werden dokumentiert.

Als Ergebnis zahlreicher Tests und weiterer Entwicklungsarbeiten an diesem Prozess hat LINN HIGH THERM einen serienreifen Prototyp einer MIDD-Anlage gebaut (Bild 6). Die neue Anlage ist für einen dauerhaften industriellen Einsatz entwickelt und gebaut worden. Die von der Nuklearindustrie geforderten sicherheitstechnischen Einrichtungen wurden in Zusammenarbeit mit einem Partner der deutschen Nuklearindustrie umgesetzt.

Für den Prozess ist es wichtig, einen möglichst guten Wirkungsgrad sowie ein möglichst homogenes elektromagnetisches Feld zu erzielen. Dies wird durch neun 900-W-Standard-Magnetrons, welche neben deutlich geringeren Wartungs- und Reparaturkosten gleichzeitig sehr lange Lebensdauern aufweisen, realisiert.

Alle medienberührende Komponenten bestehen aus Edelstahl, Teflon oder Silikon. Bei der Entwicklung wurde ebenfalls darauf geachtet, dass alle Komponenten leicht zu reinigen, zu warten und zu wechseln sind [1].

## Mikrowellen-Kammer-Trockner MKT-Baureihe

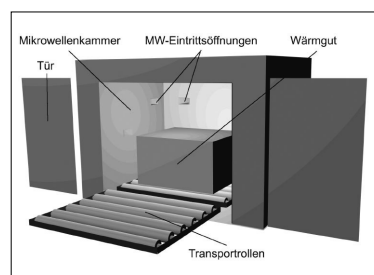
Bei der Mikrowellentrocknung kann zur Bestimmung der erforderlichen Mikrowellenleistung eine Faustregel verwendet werden, die besagt, dass zur Verdampfung von 1 kg Wasser pro Stunde eine Mikrowellenleistung von ca. 1 kW notwendig ist. Diese Regel ist gültig solange eine ausreichende Anfangsfeuchtigkeit gegeben ist.

Multi-Mode-Batchanlagen bestehen aus der Mikrowellenkammer, die mit einer Tür verschlossen wird. Die Mikrowellenleistung wird meist an den Seiten und/oder der Decke und der Rückwand eingebracht. Die Anlagen können wie in der Abbildung dargestellt mit einem Rollen-Transportsystem ausgestattet sein. In solchen Anlagen wird das Einsatzgut zumeist nicht bewegt, daher ist eine sehr homogene Mikrowellenverteilung in der Kammer notwendig, um eine ungleichmäßige Erwärmung zu vermeiden. Solche Anlagen werden zumeist eingesetzt, um Produkte zu trocknen oder zu erwärmen, die zu groß, zu schwer oder zu empfindlich sind, um sie in einer kontinuierlichen Anlage zu transportieren. Auch für lange Trocknungszeiten ist es oft vorteilhaft, eine Batchanlage zu verwenden.

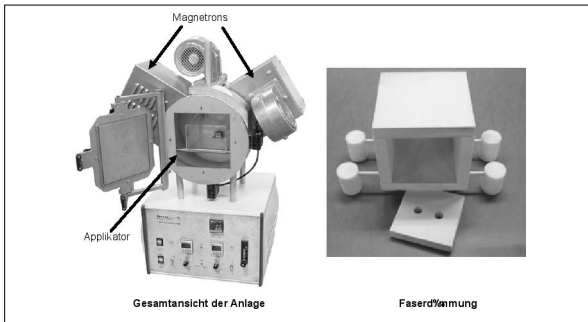
Ein Beispiel für eine Multi-Mode-Batchanlage ist der abgebildete Mikrowellen-Kammer-Trockner mit einer Mikrowellenleistung von 30 kW und einem Kammervolumen von ca. 21 m<sup>3</sup> (Bild 7).

Der Mikrowellen-Kammer-Trockner wird zur Trocknung von industriellen keramik- oder harzgebundenen Schleifscheiben eingesetzt, die auf Metallgestellen in die Anlage hineingefahren werden können. Die Mikrowellenenergie wird von 38 Magnetrons erzeugt, die an beiden Seiten der Kammer angeordnet sind, um eine gleichmäßige Erwärmung zu gewährleisten. Ebenfalls an beiden Seiten befindet sich das Belüftungssystem, so dass eine homogene Trocknung aller Teile sichergestellt ist. Um die Mikrowellendichtigkeit zu gewährleisten, wird das Rolltor bei Mikrowellenbetrieb pneumatisch angedrückt [13].

Eine weitere Anwendung ist die Natur- und Synthese-Kautschuk-Erwärmung. Bisher war für kalte Jahreszeiten die Vorwärmung von Naturkautschuk basierend auf großen Wärmekammern Stand der Technik, in denen die Standard-Kautschukpaletten in Tagen bis Wochen vorgewärmt werden. Insbesondere in den Wintermonaten ergeben sich sehr lange Vorwärmzeiten dadurch, dass die Paletten teilweise mit niedrigen Temperaturen von -10 °C oder darunter angeliefert werden. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Kautschuks und das große Volumen der Paletten ergibt sich zwangsläufig die lange Vorwärmzeit, da die Erwärmung über Warmluft mit maximal 60 °C erfolgt. Mikrowellen-Verfahren ermöglicht die Vorwärmung einzelner Paletten nach Bedarf in 0,5 bis 2 h. Der Vorteil der Mikrowellen ist, dass diese in das Material eindringen können und



**Bild 7** Prinzipielle Skizze einer Multi-Mode-Batchanlage (l.) und Mikrowellen-Kammer-Trockner MKT-30 (r.)



**Bild 8** Mikrowellen-Laborofen MKE-1,6

die Wärme auch im Inneren des Kautschuks erzeugt wird. Dadurch kann die gesamte Palette homogen und schnell erwärmt werden.

Somit kann durch den Einsatz von zwei Mikrowellenanlagen eine große Wärmehalle (mehrere 1000 m<sup>3</sup>) eingespart werden. Dies ergibt eine erhebliche Reduktion des Lagerbedarfs und der Kapitalbindung, da nicht mehr der Kautschuk für z. B. eine Woche Produktion in den Wärmehallen vorgehalten werden muss.

## Mikrowellen-Laboröfen MKE-Baureihe

Durch die Vielfalt von Materialien und Fertigungsprozessen muss zuerst untersucht werden, wie der stoffspezifische Mikrowellenprozess optimal angewandt werden kann. Zu diesem Zweck stehen spezielle Versuchs-Mikrowellenöfen zur Verfügung, mit denen im Hause LINN HIGH THERM entsprechende Versuche durchgeführt werden können. Die Multi-Mode-Anlage Typ MKE ist mit zwei Magnetrons ausgestattet. Diese können einzeln oder zusammen betrieben werden und stellen bei einer Frequenz von 2,45 GHz je 800 W Heizleistung zur Verfügung. Die Mikrowellen werden direkt in die zylindrische Mikrowellenkammer eingespeist. Die Steuerung der Mikrowellenleistung erfolgt über je ein Potentiometer. Zur Wärmedämmung wird eine quaderförmige Einhausung aus Faserdämmplatten mit

einem Nutzvolumen von einem Liter verwendet.

Die Messung der Probenoberflächentemperatur geschieht kontaktlos durch Pyrometer. Die Aufzeichnung und Auswertung dieser Daten erfolgt mit der Software DASYLab. Die Anlage ist für den Einsatz im Labor vor allem im niederen Temperaturbereich konzipiert. Mit ihr lassen sich erste allgemeine Erkenntnisse über Mikrowellenverhalten verschiedenster Materialien in Erfahrung bringen (Bild 8).

## Mikrowellenöfen MEK- und MFH-Baureihe

Als Sonderanlagen für die Erwärmung von flüssigen hochviskosen, Materialien werden Mikrowellen-Durchfluss-Anlagen eingesetzt. Die Flüssigkeit fließt in einem mikrowellentransparenten Teflonrohr (PTFE-Rohr) durch die Erwärmungszone und wird durch das von den Mikrowellen erwärmt. Die Flüssigkeit kann dabei homogen im gesamten Volumen erwärmt werden, ohne mit den Wänden der Mikrowellen-Erwärmungskammer in Kontakt zu kommen (Bild 9).

Eine industrielle Anwendung ist das Vorwärmen von Gießharzen [14]. Dabei werden Kunststoff-Isolatoren für Hochspannungsanlagen produziert, indem ein Gießharz in eine erwärmte Metallform eingebracht wird. Die Zeit zum Aushärten des Harzes in der Form, die sogenannte Gelierzeit bestimmt, wie hoch die Produktivität einer Anlage ist. Um die Gelierzeit zu verringern und damit die Produktivität zu erhöhen, ist es möglich, das Gießharz bis 50 % Massenanteil Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- und SiO<sub>2</sub>-Mineralfüllung vorzuwärmen, bevor es in die Form kommt. Als optimal hat sich dabei eine Erwärmung auf ca. 100 °C erwiesen, wobei die Gelierzeit um bis zu 40 % reduziert werden konnte. Um diesen Effekt zu erzielen, ist es notwendig, das Gießharz gleichmäßig auf die Tempera-

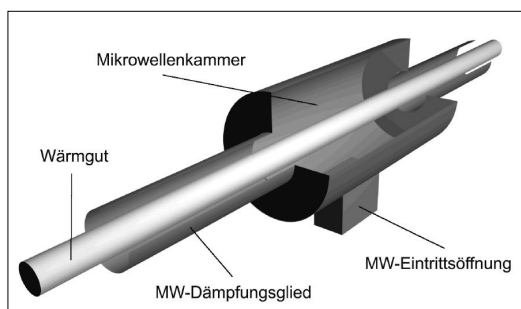
tur zu erwärmen. Ist dies nicht der Fall, kann das Harz bei der verringerten Gelierzeit nicht vollständig aushärten. Mit konventionellen Heizern, die eine metallische Rohrleitung erwärmen, durch die das Harz fließt, war eine gleichmäßige Erwärmung nicht zu erreichen, da nur die Teile des Harzes erwärmt werden, die mit dem Rohr in Kontakt sind.

Bei der Mikrowellenerwärmung fließt das Gießharz durch ein mikrowellentransparentes PTFE-Rohr. Die Mikrowellen können somit von außen durch das Rohr hindurch das Harz erwärmen. Da die Mikrowellen in das Gießharz eindringen können, wird das gesamte Volumen des Harzes gleichmäßig erwärmt.

Neben der Reduzierung der Gelierzeit hat die Mikrowellenerwärmung noch weitere Vorteile erbracht, so konnte die Farbbeständigkeit und die Festigkeit gesteigert werden.

Als eine weitere Anwendung kann man das Aushärten von GFK-Stäben erwähnen. Stäbe aus glasfaserverstärktem Kunststoff werden in einem Pultrusionsprozess hergestellt und z. B. als Kerne für Glasfaserkabel-Angelruten verwendet. Die mit einem Kunstharz getränkten Glasfasern müssen ausgehärtet werden, um ihre endgültige Festigkeit zu erhalten. Dabei ist es besonders wichtig, die Stäbe vollständig durchzuhärten, um optimale Produkteigenschaften zu erhalten. Mit konventionellen Methoden war dies nicht immer sichergestellt, da der Kern der Stäbe wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit teilweise nicht vollständig ausgehärtet war.

Mit der Mikrowellenerwärmung konnte dieses Problem beseitigt werden, da die Mikrowellen die Stäbe von innen heraus aufheizen, so dass sichergestellt ist, dass sie vollständig ausgehärtet sind. Die dazu verwendeten Mikrowellenanlagen sind sehr kompakt und erzielen die notwendige Erwärmung im Durchlauf bei einer Heizlänge von nur ca. 30 cm. Bei Glasfaserkabelkerntträger wird



**Bild 9** Mikrowellen-Durchfluss-Anlagen von Typ MEK (l. bzw. mittig) und MFH (r.)

z. B. dadurch ein 6 m langer Rohr-Ofen konventioneller Bauart ersetzt.

## Mikrowellen-Drehrohr-Trockner MDRT-Baureihe

Als Sonderanlage für Pulver und Granulate kommen Mikrowellen-Drehrohr-Anlagen von Typ MDRT zum Einsatz [15]. Das Material wird in einem rotierenden PTFE- oder Quarzglasrohr durch die Erwärmungszone geführt und dabei von den Mikrowellen erwärmt. Die Anlage kann unter Vakuum oder Schutzgas betrieben werden. Die Mikrowellen-Drehrohr-Anlage kann zur Wärmebehandlung und Beschichtung von Granulaten, Pulvern und Fasern eingesetzt werden. Auch bei dieser Anlage kommt das Material nicht mit der Erwärmungszone in Kontakt (Bild 10).

## Mikrowellen-Hybridöfen MHT-Baureihe

Bei dieser Anlage handelt es sich um einen Mikrowellen-Hybridofen, der für den Hochtemperatureinsatz konzipiert ist. Die Erwärmung kann mit Heizwiderständen bzw. mittels Mikrowellen oder kombiniert durchgeführt werden. Die Mikrowellenkammer ist quaderförmig und besteht aus Edelstahl. Die Wärmedämmung besteht aus drei bzw. vier Schichten spezieller Keramikwolle-Platten und ist innerhalb der Mikrowellenkammerwand angeordnet. Die Isolation des Mikrowellen-Hybridofens ist für einen Einsatz bis maximal 1800 °C ausgelegt. Er ist mit acht Magnetrons ausgestattet, welche bei einer Frequenz von 2,45 GHz je 900 W Heizleistung zur Verfügung stellen und einzeln geschaltet werden können. Die gesamte verfügbare Mikrowellenheizleistung beträgt somit 7,2 kW.

Die Magnetrons sind unmittelbar an der Mikrowellenkammer befestigt, so dass eine direkte Einstrahlung der Mikrowellen in die Kammer erfolgt. Es sind je zwei Magnetrons an der Rückwand, an den beiden Seitenwänden und am Boden der Mikrowellenkammer angebracht. Die Mikrowelleneinlässe sind versetzt angeordnet, um die Gleichmäßigkeit des Mikrowellenfelds zu verbessern. Varianten mit der Einsatztemperatur bis 1400 °C, 1600 °C und 1800 °C sind möglich. Die Steuerung der gesamten Mikrowellenleistung kann wahlweise durch ein Potentiometer oder durch einen Programmregler erfolgen. Zur konven-

tionellen Beheizung dienen sechs Widerstandsheizelemente z. B. aus Molybdänsilizid mit einer Gesamtheizleistung von 9 kW (Bild 11).

Bei der Mikrowellen-Hybrid-Erwärmung wird die Mikrowelle mit einem konventionellen Erwärmungsverfahren kombiniert. Die gängigsten Erwärmungsarten sind Heißluft- und Widerstandserwärmung, aber andere sind ebenfalls möglich, wie z. B. eine Gasfeuerung oder Infrarot Erwärmung.

Die Mikrowellen-Hybrid-Erwärmung mit Heißluft-Zusatzheizung erzielt eine hohe konventionelle Temperaturhomogenität durch Umwälzung der Luft in der Kammer. Eine Isolation ist notwendig, um die metallische Mikrowellenkammer zu schützen und die Wärmeverluste zu verringern. Heißluft wird meist bei mittleren Temperaturen eingesetzt, wie sie z. B. beim Entbindern von keramischen Teilen benötigt werden.

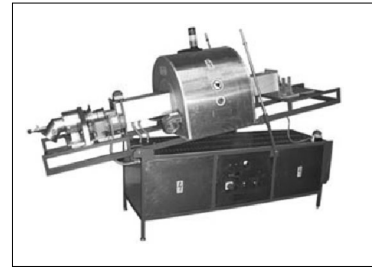
Bei der Mikrowellen-Hybrid-Erwärmung mit Widerstand-Zusatzheizung werden Heizelemente eingesetzt, um hohe Vorwärmtemperaturen z. B. zum Sintern zu erzielen. Auch hier ist eine Isolation der Kammer notwendig. Mit der Widerstandszusatzheizung lassen sich Materialien vorwärmen, die erst bei hohen Temperaturen Mikrowellenenergie absorbieren. Im Niedertemperaturbereich findet daher eine nahezu konventionelle Erwärmung mit Heißluft- oder Widerstandserwärmung statt, die Mikrowellen tragen erst bei höheren Temperaturen zur Erwärmung bei. Das zusätzliche Einbringen von Heißluft kann auch bei Niedertemperaturprozessen wie der Trocknung von Vorteil sein, um beispielsweise die Feuchtigkeitsabfuhr zu beschleunigen.

Die Anwendungen für beide Hybrid-Erwärmungen sind hauptsächlich das Entbindern und Sintern von Keramiken und Pulvermetallen.

Im Hochtemperaturbereich stellt die Fa. LINN HIGH THERM GmbH spezielle Sonder-Mikrowellen-Hybrid-Banddurchlauföfen für das Recycling von Kohlenstofffasern, Produktionsabfällen und End-of-Life-Teilen her (Bild 12).

## Modellierung von Mikrowellenerwärmungsanlagen

In den letzten zwei Jahrzehnten sind große Fortschritte, bei der Entwicklung und Anwendung numerischer Methoden zu Berechnungen von elektromagnetischen Feldverteilungen



**Bild 10** Mikrowellen-Drehrohr-Trockner Typ MDRT (Mikrowellenleistung 2,7 kW bzw. 5,4 kW)

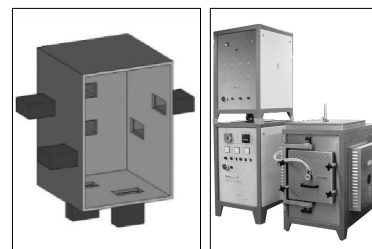
gen sowie Temperaturverteilungen zu verzeichnen. Auf Grund der parallel dazu verlaufenden rasanten Entwicklung der Rechentechnik ist es heute möglich, elektromagnetische und thermische Felder in technischen Problemstellungen auch bei komplizierter Geometrie und nichtlinearem Materialverhalten für dreidimensionale Fälle zu berechnen.

Die Modellierung von Mikrowellen-Erwärmungsanlagen ist in der Literatur bereits häufig behandelt worden [2–4, 16]. Jedoch bleibt die numerische Simulation von Mikrowellen-Applikatoren immer noch Gegenstand vieler Arbeiten, da die Ergebnisse anderer Autoren auf weitere zu untersuchende Konfigurationen nicht direkt übertragbar und somit kaum anwendbar sind.

Bei der Entwicklung von Mikrowellen-Erwärmungsanlagen ist die Verteilung des elektromagnetischen Feldes entscheidend. Doch eine ausschließlich elektromagnetische Simulation wird zur Planung von Mikrowellen-Erwärmungsanlagen nicht ausreichen.

Bei der Mikrowellenerwärmung spielt neben der Dissipation von elektromagnetischer Energie auch der thermische Vorgang eine bedeutende Rolle. Um den Heizvorgang genau zu bestimmen, sollen verschiedene Wärmeübertragungsmechanismen sowie dabei entstehende Effekte ebenfalls berücksichtigt werden.

Zum Thema der Wärmeübertragung gibt es eine Anzahl ausgezeichnete Fachbücher, die mit den bekannten



**Bild 11** Position der Magnetrons an der Mikrowellenkammer (l.) und Mikrowellen-Hybridofen MHT-1600 (r.)



**Bild 12** Recycling von Kohlenstofffasern (l. und r.) und Mikrowellen-Hybrid-Banddurchlaufofen (Mitte)

mathematischen Methoden die Mechanismen der Wärmeübertragung behandeln. Aus der Fülle sollen die Bücher von *Metaxas* [17] sowie *Kramer* und *Mühlbauer* [18] erwähnt werden. Speziell dem Thema der Wärmeübertragung bei der Mikrowellenerwärmung sind die Arbeiten von *Metaxas* und *Meredith* [19], *Zhao* und *Turner* [20] und *Fehér* [3] gewidmet.

Die sowohl thermischen als auch elektromagnetischen temperaturabhängigen Eigenschaften der betrachteten Materialien sind, in der Literatur zu finden [21]. Messungen von temperaturabhängigen Materialeigenschaften sind sehr aufwendig und widerspruchsvoll [22]. Sie stellen ein großes wissenschaftliches und technisches Problem dar, was zurzeit noch unbefriedigend gelöst ist [23].

Als Beispiel für eine FEM-Validierung durch das Experiment soll ein zylindrischer Multimode-Applikator mit einem rußbeladenen Cordierit-Dieselrußpartikelfilter (Cordierit-DPF) betrachtet werden. Zum Transport der Mikrowellenleistung von einem Magnetron in den Applikator wird ein offener Hohlleiter eingesetzt. Bei dieser Art der Einspeisung mündet der tangential angeordnete speisende Rechteckhohlleiter in den zylindrischen Multi-Mode-Applikator. Das Gehäuse des Applikators besteht aus dem metallischen Zylinder (Durchmesser = 155 mm, Länge = 162 mm) mit 8 mm dicken Stahlwänden. Die Metallgitter dienen als

Schirme gegen die unerwünschte Mikrowellen-Leckstrahlung.

Der zylindrische Filter wird mit einem Durchmesser von 143,76 mm und einer Länge von 152,4 mm hergestellt und hat eine Masse von 1255,5 g. Als Filtermedium wird Cordierit ( $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$ ) gewählt. Die Rußbelastung beträgt ca. 18,4 g. Der DPF mit Ruß beladen hat eine Masse von 1273,9 g. Der Ruß ist im Cordierit-DPF ungleichmäßig verteilt. Aus makroskopischer Sicht stellt der Cordierit-DPF mit dem Ruß ein heterogenes Medium mit den sechs erkennbaren homogenen Gebieten dar.

Die weiteren zur Modellierung notwendigen Details und physikalischen Parameter sind in den Veröffentlichungen [2, 4] ausführlich dargestellt.

Auf den Bildern 13–15 sind, der Versuchsstand und Ergebnisse der experimentellen Validierung von der 3D-Modellierung des zylinderförmigen Multimode-Applikators zu sehen [4]. In den Bildern 13–15 sieht man eine sehr gute qualitative und quantitative Übereinstimmungen der numerisch berechneten und experimentell gemessenen Temperaturfeldverteilungen.

Die reflektierte Leistung wird aus der Gleichung (8)

$$P_{\text{ref}} = P_{\text{cin}} - P_{\text{abs}} \quad (8)$$

als Differenz zwischen der einfallenden Leistung  $P_{\text{cin}}$  und der absorbierten Leistung  $P_{\text{abs}}$  bestimmt.

Der Wirkungsgrad wird aus dem bekannten Verhältnis nach Gleichung (9) bestimmt.

$$\eta = \frac{P_{\text{abs}}}{P_{\text{cin}}} = \frac{P_{\text{cin}} - P_{\text{ref}}}{P_{\text{cin}}} = 1 - \frac{P_{\text{ref}}}{P_{\text{cin}}} \quad (9)$$

Nach Gleichung (10) kann man den Betrag des Reflexionsfaktors bestimmen.

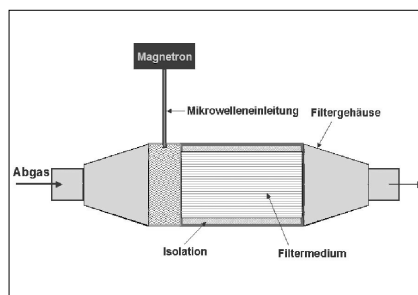
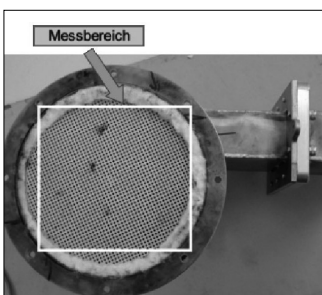
$$R_0 = \sqrt{\frac{P_{\text{ref}}}{P_{\text{cin}}}} = \sqrt{1 - \frac{P_{\text{abs}}}{P_{\text{cin}}}} = \sqrt{1 - \eta} \quad (10)$$

Anschließend wird nach Gleichung (11) das sogenannte Stehwellenverhältnis VSWR (engl. Voltage Standing Wave Ratio) berechnet [7].

$$VSWR = \frac{1 + R_0}{1 - R_0} \quad (11)$$

Die erzielten Resultate der experimentellen Validierung lassen Folgendes feststellen:

- Die numerisch und experimentell ermittelten Temperaturfeldverteilungen stimmen qualitativ und quantitativ sehr gut überein.
- Die experimentell überprüfte Mikrowellen-Versuchsanlage ist energieeffizient, der tatsächliche Wirkungsgrad liegt bei ca. 95,3 %.
- Die Feldverteilung beim Einsatz von einem Magnetron bleibt jedoch inhomogen (Bild 14–15).
- Es ist klar ersichtlich, dass das Konzept von LINN HIGH THERM mit vielen eingesetzten Magnetrons bessere Feldverteilungen liefert und dadurch eine homogene Erwärmung von unterschiedlichen Materialien bedingt (Mikrowellen-Banddurchlaufofen MDBT-Baureihe).
- Die 3D-FEM-Modelle liefern praxisrelevante, mehr belastbare Ergebnisse.
- Sie bieten generell die Möglichkeit an, das Entstehen von lokalen Hot-Spots zu visualisieren und durch die schnelle Anlagen-Designanpassung weiter zu optimieren.
- Die 3D-Modelle von Mikrowellenerwärmungsanlagen können zur computergestützten Optimierung von industriellen Mikrowellenerwärmungsanlagen eingesetzt werden.



**Bild 13** Versuchsstand (Rückseite) und Versuchsanordnung zur experimentellen Validierung der 3D-FEM-Simulation [4]



- Die Simulationsergebnisse sollen in jedem Fall idealerweise experimentell überprüft werden.

## Schlussfolgerungen

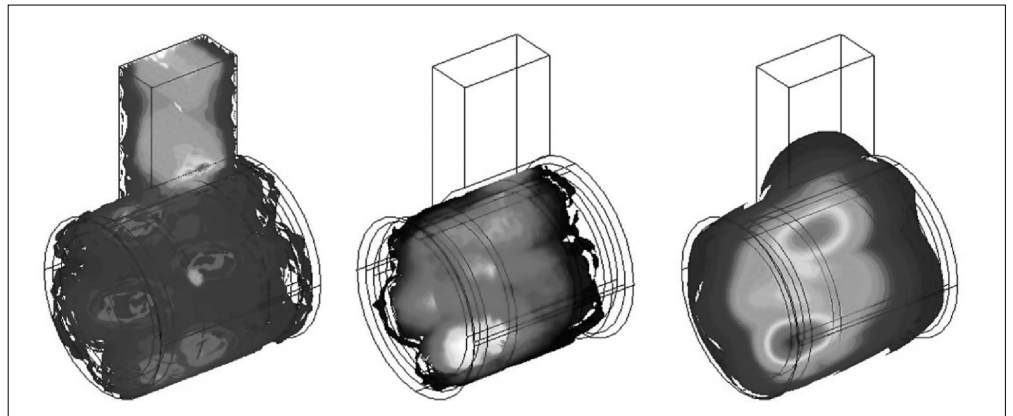
Dieser Artikel gibt einen Überblick über die innovativen Mikrowellen-Erwärmungsanlagen zum Anwenden in Nieder- und Hochtemperaturbereichen für unterschiedlichen Industriebranchen, die von der Fa. LINN HIGH THERM GmbH basierend auf langjährigen Erfahrungen für Labor und Produktion entwickelt und weltweit erfolgreich eingesetzt werden. An konkreten Beispielen werden die Effizienz und Ersparnis-potentiale der Mikrowellenerwärmungstechnik gezeigt und die Fragen der computergestützten 3D-FEM-Simulation von industriellen Mikrowellenerwärmungsanlagen diskutiert.

## Danksagung

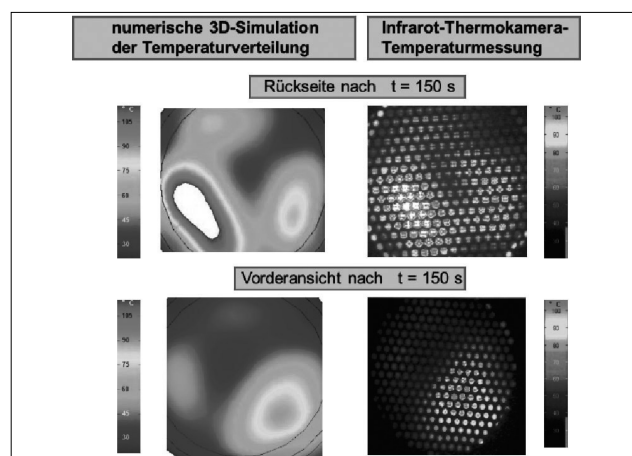
Die Autoren möchten sich bei allen Kunden und Partnern der Fa. LINN HIGH THERM, die durch ihr langjähriges produktives Arbeiten und Erfahrungssammeln zur Entwicklung von mehreren innovativen hocheffizienten Mikrowellenanlagen erfolgreich beigetragen haben, ganz herzlich bedanken.

## Literatur

- [1] Möller, M.; Waitz, R.: Mikrowellen In-Fass Trocknung. Effektives Eindampfen von radioaktiven Flüssigabfällen. Atw. Int. Z. für Kernenergie 52 (2007) [12] 807–810
- [2] Imenokhoyev, I.: Computergestützte 3D-Modellierung von Mikrowellen-Erwärmungsanlagen. Berichte aus der Verfahrenstechnik (Diss. TU Bergakademie Freiberg). Aachen 2007
- [3] Feher, L.: Energy efficient microwave systems. Berlin 2009
- [4] Imenokhoyev, I.; Matthes, A.; Walter, G.: Numerical 3D-FEM-Simulation made by COMSOL. Multiphysics of a microwave assisted cleaning system for a diesel sooty particle filter and its experimental validation. In: Proceeding Book, Int. COMSOL Multiphysics Conf., Ludwigsburg 26.–28.10. 2011
- [5] DKG-Fachtagung: Moderne Verfahren in der Trocknungstechnik. 14.–15.02.2012, Eschenfelden



**Bild 14** Ergebnisse der FEM-Simulation: (a) elektrische Feld-, (b) Wärmequellendichte- und (c) Temperaturverteilung [4]



**Bild 15** Ergebnisse der experimentellen Simulationsvalidierung [4]

Parameter	Modell	Experiment
Pein, W	572	572
Pabs, W	532	545
Pref, W	40	27
Pabs Wand, W	0,02	-
$\eta$ , %	93	95,3
R <sub>0</sub>	0,26	0,22
VSWR	1,72	1,56
T <sub>0</sub> , °C	20	20
T <sub>max</sub> , °C	165,6	~170

- [6] [www.en.wikipedia.org/wiki/File:EM\\_Spectrum\\_Properties\\_edit.svg](http://www.en.wikipedia.org/wiki/File:EM_Spectrum_Properties_edit.svg), Stand 06.08.2012
- [7] Kummer, M.: Grundlagen der Mikrowellentechnik. Berlin 1986
- [8] Meredith, R.: Engineers handbook of industrial microwave heating. London 1998
- [9] Simonyi, K.: Theoretische Elektrotechnik. 9. Aufl. Berlin 1989
- [10] Patent DE 198 47 299
- [11] Wübben, P.; Kintsel, N.: Sparsam erwärmen mit Mikrowellen. VDMA-Nachrichten Mai 2011
- [12] Patent WO 03/073867
- [13] Patent DE 101 53 944
- [14] Patent WO 94/26077
- [15] Patent DE 198 28 843
- [16] Haala, J.: Analyse von Mikrowellenheizprozessen mittels selbstkonsistenter finiter Integrationsverfahren. Diss. Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 2000
- [17] Metaxas, A. C.: Foundations of electroheat. Chichester u. a. 1996
- [18] Praxishandbuch Thermoprozess-Technik. A1: Grundlagen und Verfahren. Hrsg. Kramer, C.; Mühlbauer, A. Essen 2002
- [19] Metaxas, A. C.; Meredith, R. J.: Industrial microwave heating. Power Engineering Series. London 1983, reprinted 1993
- [20] Zhao, H.; Turner I. W.: An analysis of the finite-difference time-domain method for modelling the microwave heating of dielectric materials within a three-dimensional cavity system. J. Microwave Power and Electromagn. Energy 31 (1996) [4] 199–214
- [21] Daneke, N.: Zur Anlagentechnik von multimoden Mikrowellen-Sinteranlagen – von der Wellenausbreitung in Hohlleiter bis zum erwärmten Gut. Diss. TU Bergakademie Freiberg, Freiberg 2001
- [22] Nimtz, G.: Mikrowellen: Einführung in Theorie und Anwendungen. München, Bad Kissingen u. a. 2001
- [23] Pohl, V.: Messung von temperaturabhängigen Permittivitäten im Mikrowellenbereich. Fortschr.-Ber., VDI-Reihe 8, Nr. 585. Düsseldorf 1996