

MIKROWELLENGESTÜTZTES GLASSCHMELZEN IN KLEINAGGREGATEN

Ralph Behrend, Valerie Grimm, Khaled Al-Hamdan, Peter Schlicke, Wolfram Wintzer,
Sven Wiltzsch, Hartmut Krause



08.10.2021 – TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik

3. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium

- Ziele der Energiewende in Deutschland realisieren.
- Das Schmelzen von Glas ist nach wie vor ein sehr energieintensiv Prozess.
- Das Glasschmelzen mittels Mikrowellen ist möglich.
- Mikrowellenbeheizung stellt eine gute Alternative zu konventioneller Beheizung dar.



Mikrowellen

- Elektromagnetische Wellen
- Frequenzbereich: 0,3 GHz bis 300 GHz

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

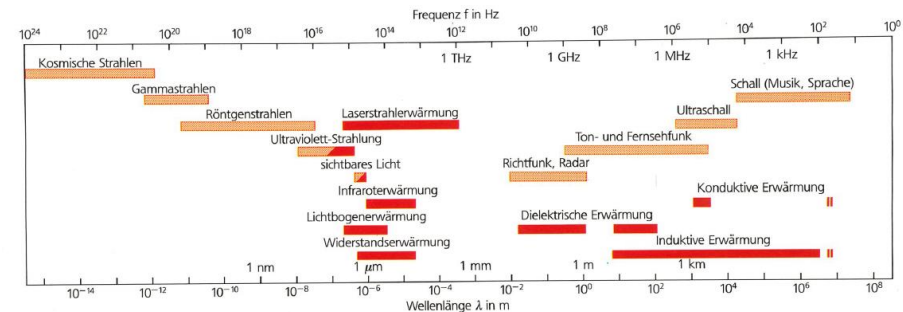
(mit $c = 299792458$ m/s im Vakuum)

- Wellenlänge: 1m bis 0,01m

- Kommerziell nutzbar:
 - 915 MHz* ~328 mm
 - 2,45 GHz ~122 mm
 - 5,8 GHz ~ 52 mm

* Genehmigung erforderlich

- Erwärmungsmechanismus: Polarisisation
- Stoffeigenschaften des zu erwärmenden Gutes:
 - Absorption
 - Transmission
 - Reflexion



Anwendung/Verfahren	Wellenlänge λ in μm	Anwendung/Verfahren	Wellenlänge λ in μm	Anwendung/Verfahren	Frequenz f
Ultraviolett	0,10...0,28	Infrarot	0,78...2	Konduktiv	50 Hz, 60 Hz (100...300 kHz)
UVB	0,28...0,32		mittelwellig	2...4	
UVA	0,32...0,38		langwellig	4...20	
sichtbares Licht	0,38...0,78	Lichtbogen (Strahlungsanteil)	0,2...3	Induktiv	Netzfrequenz
Laser	0,19...300	Widerstand	0,5...20		50 Hz, 60 Hz
					100 Hz...10 kHz
					10 kHz...60 MHz
					3 MHz...50 MHz
					300 MHz...25 GHz

Frequenzbereiche von der elektromagnetischen Strahlung (Herbert Pfeifer, Bernard Nacke und Franz Beneke. Praxishandbuch – Thermoprozesstechnik - Band 1: Grundlagen, Prozesse, Verfahren. Hrsg. von Vulkan-Verlag GmbH. Deutschland, 2018.)

Absorbierte spezifische Mikrowellenleistung

$$p = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2$$

- f ... Frequenz
- ε_0 ... Permittivität des Vakuums
- ε'' ... Imaginärteil der Permittivität
- E ... Elektromagnetische Feldstärke

Permittivität

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$$

$$\varepsilon = f(\text{Material}, T, \rho, \text{Korngröße}, \text{Reinheit}, \dots)$$

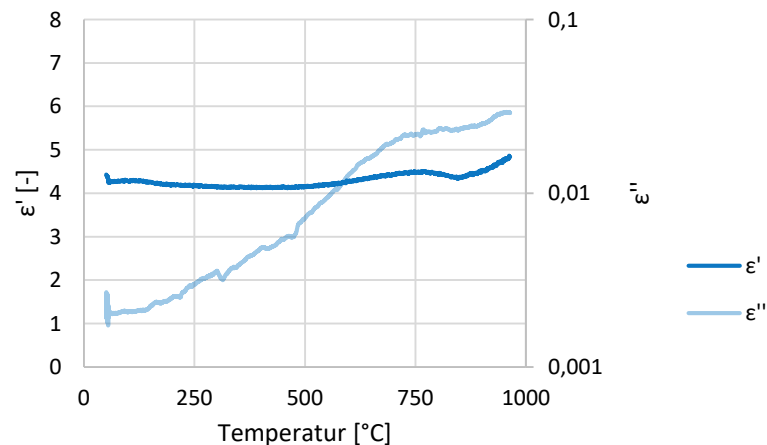


Abb.: Dielektrische Eigenschaften von Wollastonit (Calciumsilikat)

Materialeigenschaften

Absorption		Transmission		Reflexion
Wasser	$\varepsilon'' = 13$	Korund	$\varepsilon'' = 0,009$	Aluminium
Öl	$\varepsilon'' = 0,13$	Quarzglas	$\varepsilon'' < 0,001$	Stahl
Siliziumcarbid	$\varepsilon'' = 11$	PTFE	$\varepsilon'' = 0,003$	Silber

Quelle: R.Meredith „Engineers Handbook of industrial microwave heating“

Vorteile und Nachteile der Mikrowellenerwärmung

Vorteile	Nachteile
Höhere Temperaturen	Niedriger Wirkungsgrad (P_{el} zu P_{MW})
Schnellere Erwärmung	Hohe Investitionskosten
Selektive Erwärmung	Herausfordernde Steuerung
Bessere Produkteigenschaften	Temperaturgleichmäßigkeit begrenzt

Versuchsaufbau

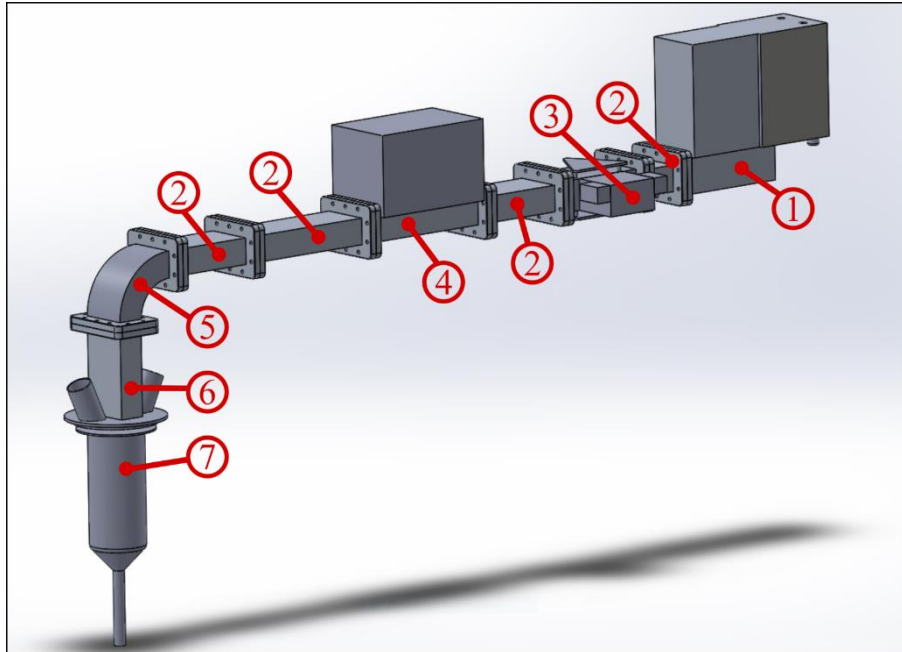


Abb.: Skizze des Induktionsschmelzofens mit (1) Magnetron (3kW), (2) Hohlleiter (gerade), (3) Isolator, (4) 6-Portreflektometer mit 3-Stifttuner, (5) Hohlleiter (gebogen), (6) Applikator, (7) Induktionsschmelzer (Platintiegel)

Versuchsdurchführung

- I) 125 g Gemenge,
1 kW Mikrowellennennleistung
- II) 333 g Gemenge,
1 kW Mikrowellennennleistung
- III) 250 g Gemenge,
0,5 kW Mikrowellennennleistung
- IV) 250 g Gemenge,
ohne Mikrowellenbestrahlung

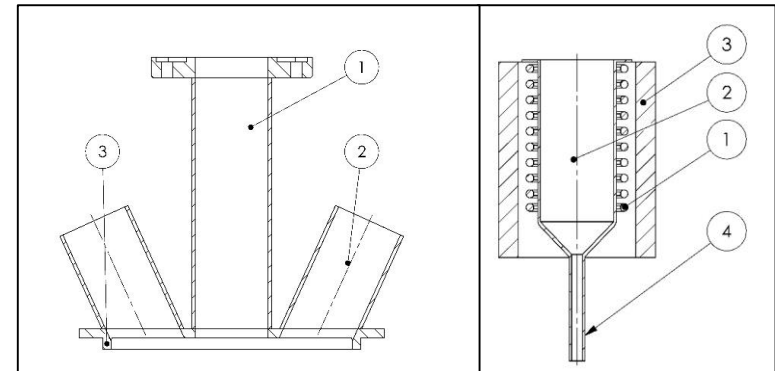


Abb.: Links: Skizze des Mikrowellenapplikators für den Induktionsschmelzofen mit (1) Hohlleiteranschluss (2) Schaulöcher (3) Übergang zum Tiegel; Rechts: Skizze des Induktionsschmelzofens (1) Induktor (2) Platin-Tiegel (3) Feuerfestmaterial und Wärmedämmung (4) Beheizter Auslass

Betrieb

- Höhere Leckstrahlung bei geringerer Gemengedecke
→ Schmelze absorbiert Mikrowellen schlecht als erwärmtes Gemenge
→ Lichtbogenbildung am Übergang zwischen Applikator und Platintiegel
- Hohe Wärmeverluste durch fehlende Dämmung im Mikrowellenteil



Abb.: Blick in den laufenden Induktionsschmelzer mit fortschreitender Zeit. Von links nach rechts: Gerade eingelegtes Gemenge auf der Schmelze, teilweise abgeschmolzenes Gemenge, Rauhschmelze mit Restquarz

Ergebnisse

- Mit MW wird der Abschmelzprozess beschleunigt
→ Keine Proportionalität zwischen Leistung und Schmelzzeit
- Absorption lag bei über 90 %

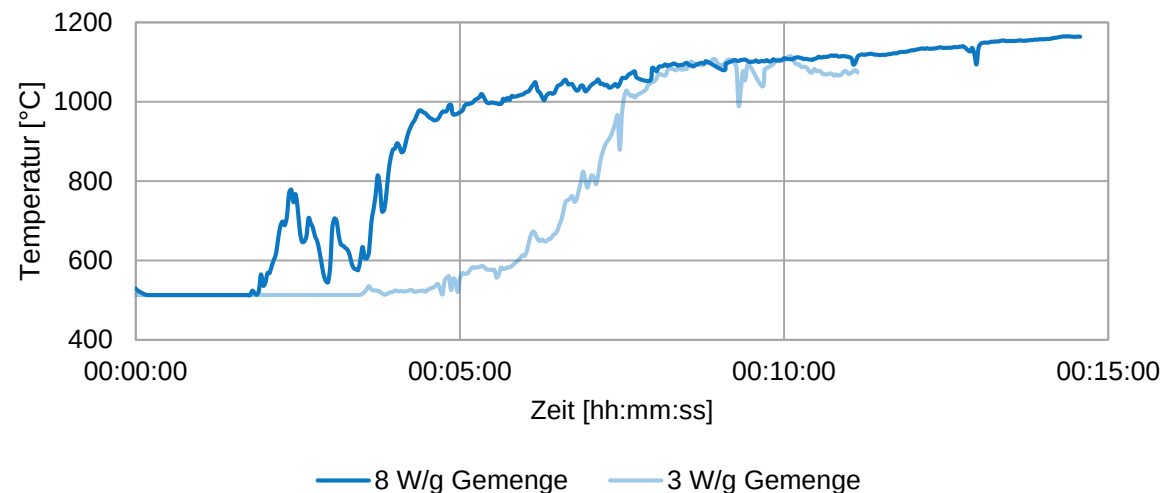


Abb.: Gemessene Oberflächentemperatur mit einem Pyrometer (500°C bis 1400°C) bei verschiedenen Verhältnissen von Gemengemasse zu Mikrowellenleistung über der Zeit

Versuchsaufbau

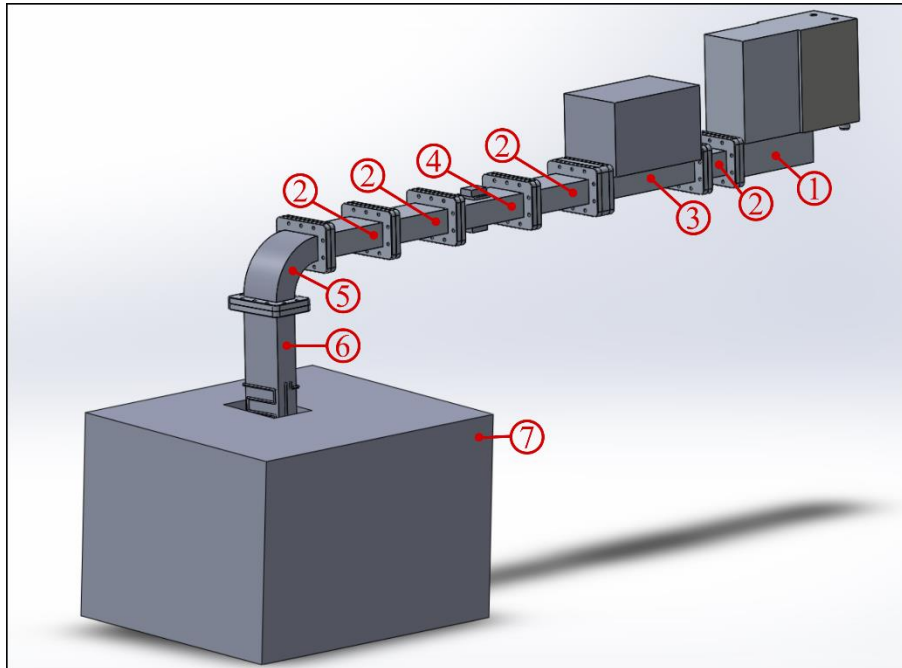


Abb.: Skizze des Dünnschichtschmelzers (1) Magnetron (3kW), (2) Hohlleiter (gerade), (3) 6-Port-Reflektometer mit 3-Stifttuner, (4) Richtdetektor, (5) Hohlleiter (gebogen), (6) Hohlleiter (wassergekühlt), (7) Dünnschichtschmelzer

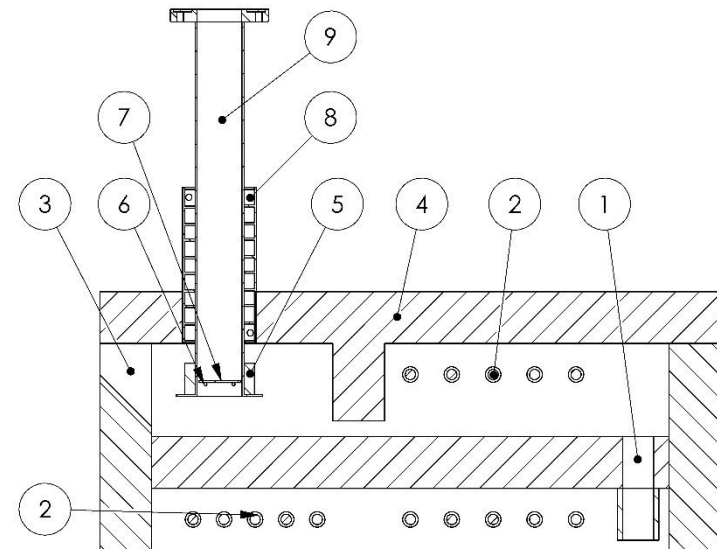


Abb.: Skizze des Dünnschichtschmelzers (1) Auslass für flüssiges Glas (2) Heizelemente, drei Gruppen (3) verschließbare Materialzufuhr (4) Feuerfeste Zustellung und Wärmedämmung (5) Faserdämmstoff (6) Korundstäbe (7) Si₃N₄-Plättchen (8) Wasserkühlung für den Hohlleiter (9) Hohlleiter

Betrieb

- Plasmabildung sobald das Gemenge aufgeschmolzen war.
- Zusatzbeheizung im vorderen Bereich konnte während des Betriebs abgeschaltet werden.
- Thermoelement im Bereich der Heizelement wurde beschädigt.
- Mikrowellen koppelten in warmes Gemenge oberhalb der Schmelze ein.
 - Dadurch ist eine kalte Gemengedecke realisierbar.
 - Reduktion der Wärmeverluste im Deckenbereich der Anlage

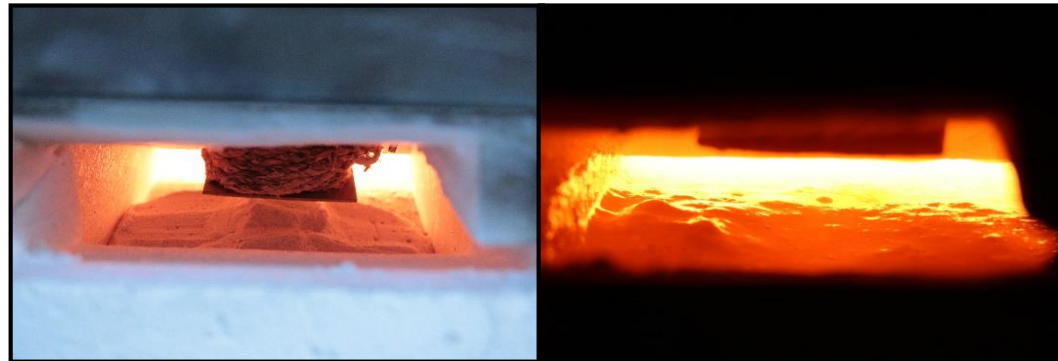


Abb.: Einlagebereich des Dünnschichtschmelzers. Links: Anlage in Betrieb mit kaltem Gemenge; Rechts: Anlage in Betrieb mit abgeschmolzenem Gemenge

Ergebnisse

- Steigerung der Schmelzleistung mit Mikrowelle
 - 8 g/min ohne Mikrowelle
 - 18 g/min mit Mikrowelle (2 kW)
 - 24 g/min mit Mikrowelle (2,7 kW)
- 1,3 kWh/kg Schmelzleistung
 - Vergleich: 1,1 kWh/kg bei konventionellen Anlagen
- Wirkungsgrad: 55% (optimiert bis zu 75%)

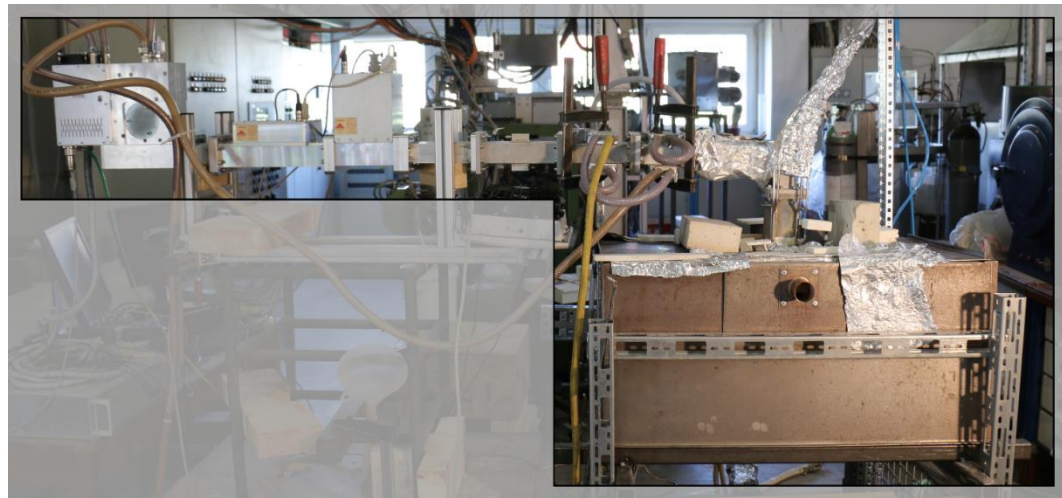


Abb.: Skizze des Dünnschichtschmelzers

Skalierbarkeit

- Es wurde mit verhältnismäßig geringen Leistungen gearbeitet.
 - Mikrowellenunterstützter Induktionsofen: 1 kW
 - Mikrowellenunterstützter Widerstandsofen: 2,7 kW
- Probleme: - Hohe lokale Feldstärken mit Plasmazündung
- Optimierung: - Mehrere Mikrowellenports
- Angepasster Applikator entsprechend dem zu erwartendem Feld

Arbeitssicherheit

- Vollständige Einhausung, um Leckstrahlung zu vermeiden.
- Temperaturüberwachung nur mit berührungsloser Messung (Pyrometer).
- Abschirmung von Kabeldurchführungen ist möglich.

- Glasschmelz mit Hybridanlagen ist möglich.
 - Mikrowellenunterstützter Induktionsofen
 - Mikrowellenunterstützter Widerstandsofen
- Bei Hybridanlagen liegt Schmelzleistung in gleicher Größenordnung wie bei Industrieanlagen.
- Trotz potenzieller Energieeinsparungen sind die Investitionskosten sehr hoch.
- Bestandsanlagen können nachgerüstet werden.
 - Bei der Messtechnik sollte auf berührungslose Messgeräte geachtet werden.
- Wichtig: Maßnahmen zur Verhinderung von Leckstrahlung.
 - Gut realisierbar

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Krause
Inhaber der Professur
Tel.: +49 3731 39 3941
email: hartmut.krause@iwtt.tu-freiberg.de

M.Sc. Ralph Behrend
Tel.: +49 3731 39 4341
email: ralph.behrend@iwtt.tu-freiberg.de

Dipl.-Ing. Valerie Grimm
Tel.: +49 3731 39 4387
email: valerie.grimm@iwtt.tu-freiberg.de



Professur Gas- und Wärmetechnische Anlagen
im Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik
web: www.gwa.tu-freiberg.de
Adresse: Lampadiusbau, Gustav-Zeuner-Straße 7

Danksagung

Wir danken dem Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie für die Förderung im Forschungsprojekt MIDGARd (FKZ ZF4522202GM8) im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand.