



TUBAF

Die Ressourcenuniversität.
Seit 1765.



GAS- UND
WÄRMETECHNISCHE
ANLAGEN

MICROWAVE HEATING AND BEYOND

Integration von Mikrowellentechnologie in der Thermoprozesstechnik

M.Sc. Ralph Behrend | TU Bergakademie Freiberg | Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik | Lehrstuhl für Gas und Wärmetechnische Anlagen

4. Aachner Ofenbaukolloquium

Grundlagen: Mikrowellen

- Elektromagnetische Wellen im Bereich 300 MHz und 300 GHz
 - Elektrisches Feld + Magnetisches Feld
- Typische Frequenzen für industriellen Einsatz („ISM-Frequenzen“)
 - 915 MHz
 - 2,45 GHz
 - 5,8 GHz
- Erzeugung typischerweise über Magnetrons oder Halbleitertechnik
- Viele Standardkomponenten
- Interaktion mit Materie:
 - Absorption
 - Reflektion
 - Transmission

Grundlagen: Mikrowellen – Materialinteraktion | Dielektrische Eigenschaften

Dielektrische Eigenschaften (komplexe Permittivität, Abhängig von Frequenz, Temperatur, Korngröße, Materialmischung ...)

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + i\varepsilon_r''$$

Absorbierte Leistung im Mikrowellenfeld für nicht elektrisch leitende Stoffe:

$$P = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r'' |E|^2$$

Eindringtiefe

$$D_p \approx \frac{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon_r'}}{2\pi \varepsilon_r''}$$

f	Frequenz
ε_0	elektrische Feldkonstante
ε_r	Permittivität
ε_r'	Realteil („Speicherfähigkeit“)
ε_r''	Imaginärteil („Umwandlung“)
E	elektrische Feldstärke

Einsatzgebiete für Mikrowellen in der Thermoprozesstechnik (Auswahl)

- Trocknung
- Pyrolyse
- Erzbehandlung
- Keramikbrand
- Zement-Klinkerbrand
- Glasschmelzen

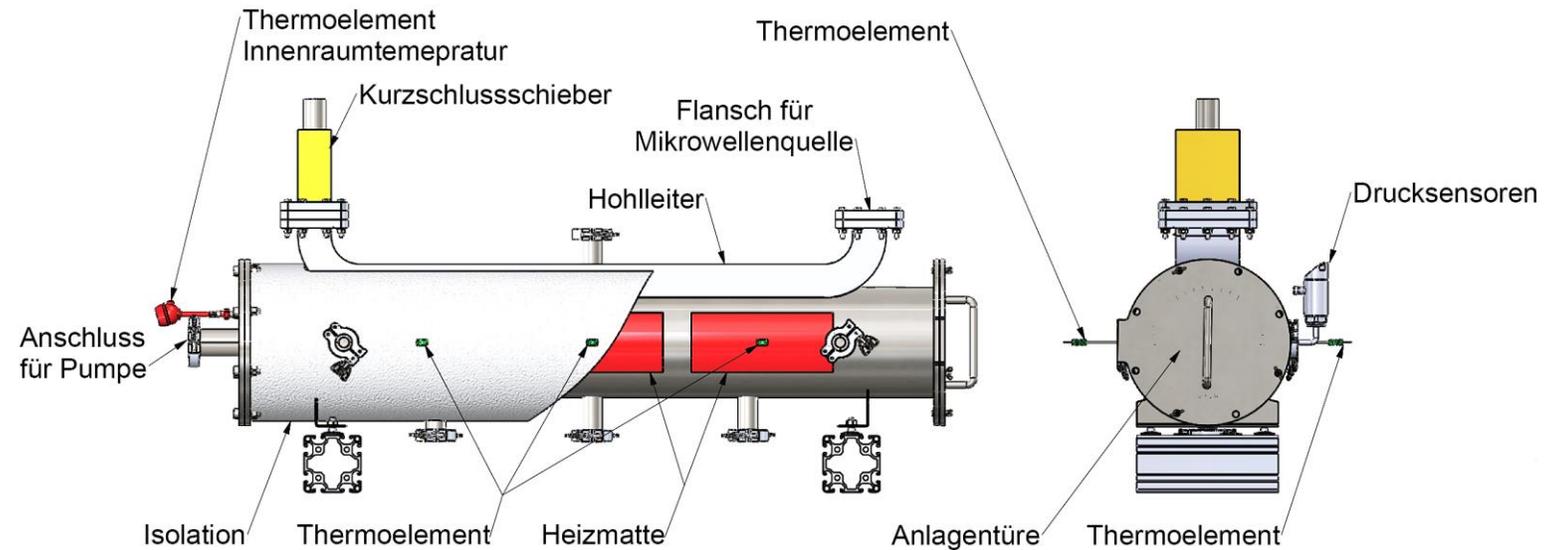
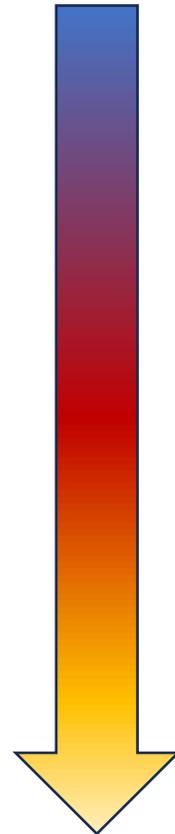


Abb 1: Vakuumtauglicher Mikrowellenapplikator mit Schlitzhohlleitern und externer Beheizung. Darstellung der wesentlichen Komponenten und Messsysteme.

Messung dielektrischer Eigenschaften bei hohen Temperaturen

- Dielektrische Eigenschaften verändern stark nicht linear mit der Temperatur
- Unreinheiten/ Inhomogenitäten verursachen mitunter starke Veränderungen

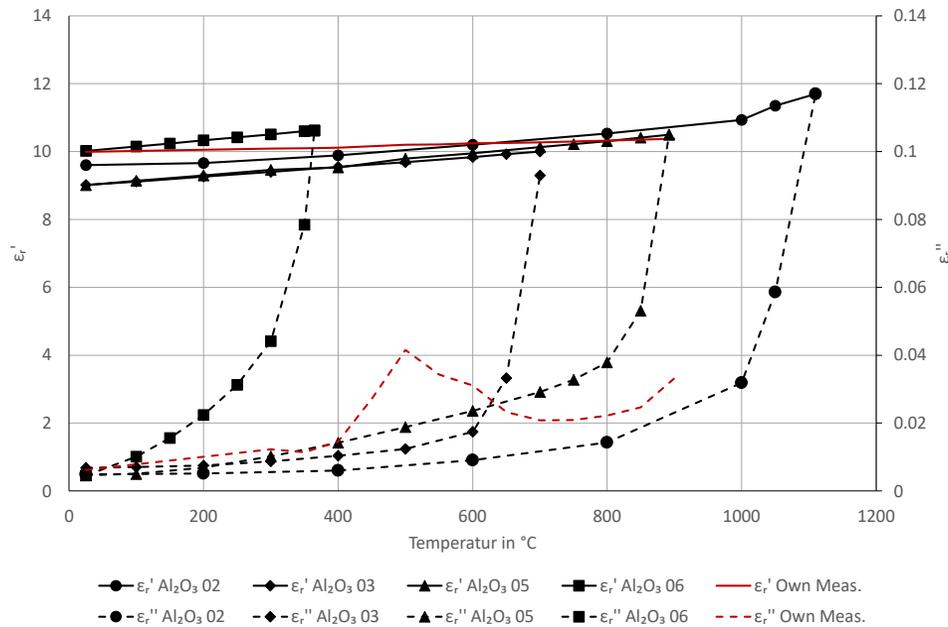
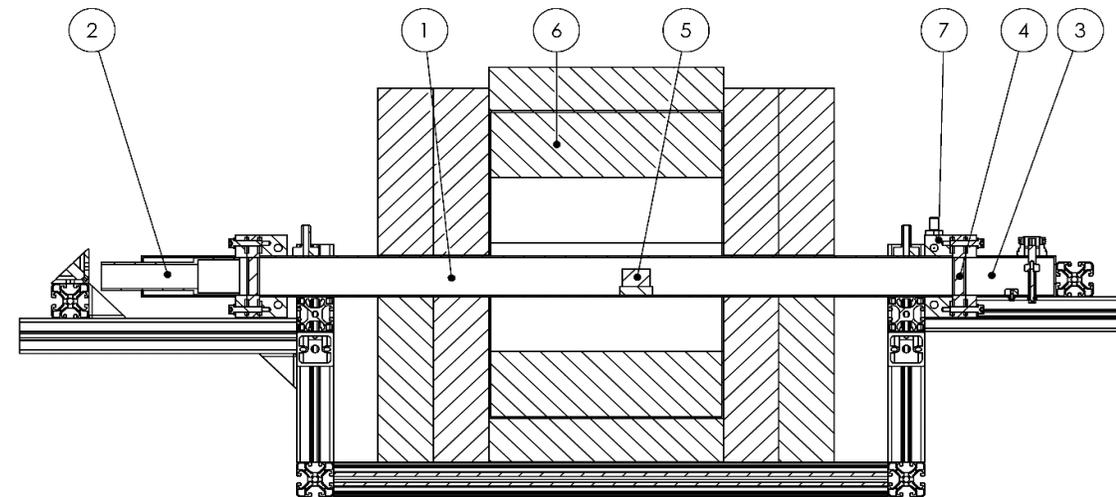


Abb 2: Messwerte für komplexe Permittivität für Al₂O₃ mit Reinheitsgraden zwischen 94% und 99,9%.



- 1: Measurement Waveguide
- 2: Moving short
- 3: Coax-Waveguide-transition
- 4: Levelling piece with PTFE window
- 5: Sample and sample holder
- 6: Electric heaters and insulation
- 7: Water-cooled flanges

Abb 3: Messapparatur für dielektrische Eigenschaften bis 900°C

Voraussetzungen für Glasschmelzen mit Mikrowellen

1. Einkopplung von Mikrowellen in Gemenge und Scherben
 - Messungen zeigen gute Einkopplung ab 400 ... 450°C
2. Geringe Einkopplung in Feuerfestmaterial
3. Sicherer Einschluss der Mikrowellen
4. Ausreichende Mikrowellenleistung
 - Schmelzenthalpie von Glas sehr hoch
 - Wandverlust in Kleinanlagen sehr hoch

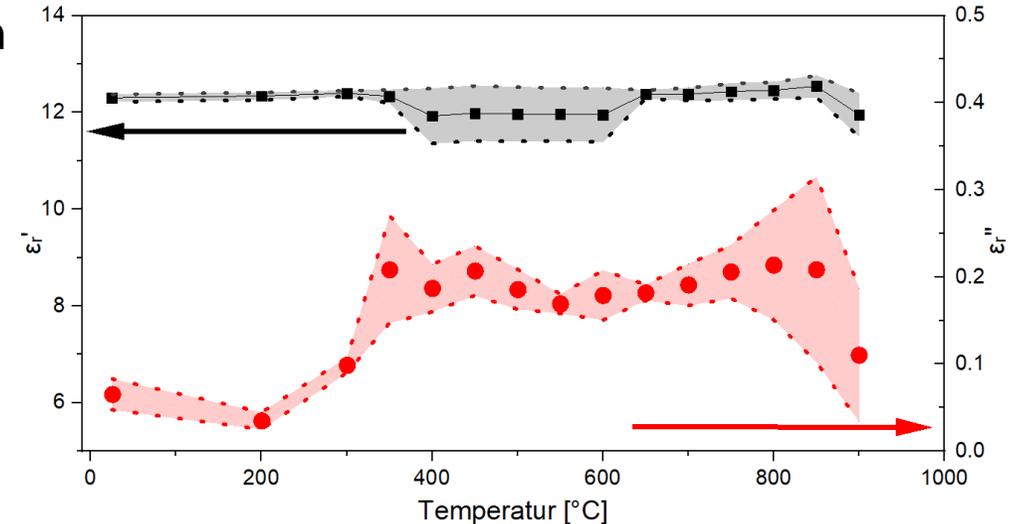


Abb 3: Dielektrische Eigenschaften eines typischen Glasgemenges

→ Literatur zeigt prinzipielle Anwendbarkeit anhand von Kleinstproben, Umsetzungen mit Suszeptoren wurden bereits in den frühen 90igern patentiert.

Glassmelzen im Labormaßstab

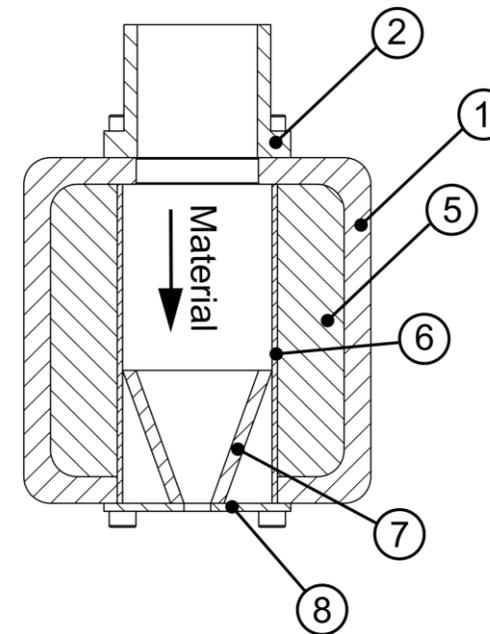
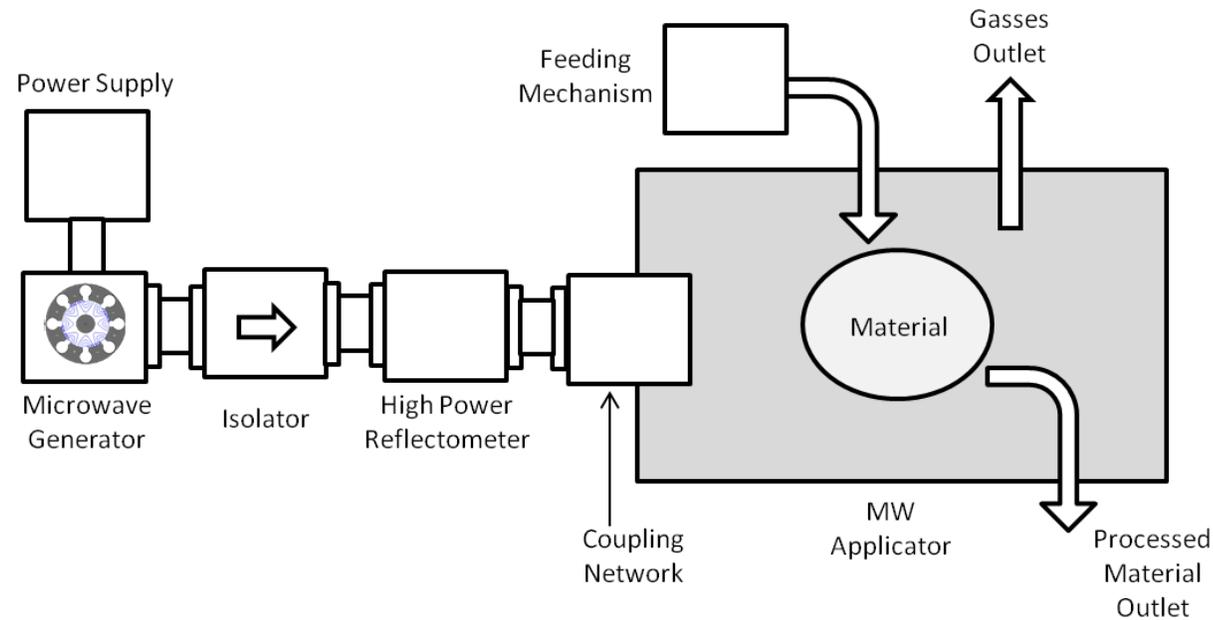


Abb 4:
 Links: Schematischer Aufbau des Monomodeschmelzers mit Mikrowellenquelle und Materialzufuhr, Rechts: Skizze der Mikrowellenkammer für den Monomode-Schmelzer.
 1: Cavity,
 2: Filter,
 3: Bornitrid-Rohr,
 4: Quarzglasrohr,
 5: HT-Dämmwolle

1. Hohe Feldstärke durch Mono-Mode-Design → Erwärmung des Gemenges bei niedrigen Temperaturen
 2. HT-Dämmwolle und Bornitrid absorbieren im Vergleich weniger Mikrowellen als Gemenge.
 3. Durchgängig geschlossenes Design aus Alu mit speziellen Filtern an Ein- und Auslass.
 4. 3 kW Mikrowellenleistung bei einem Durchsatz von typisch 500 g/h oder 30 kW für 10 kg/h
- Keine Läuterung im Prozess möglich, Skalierung jenseits von 20 kg/h schwierig.

Glasschmelzen im Labormaßstab

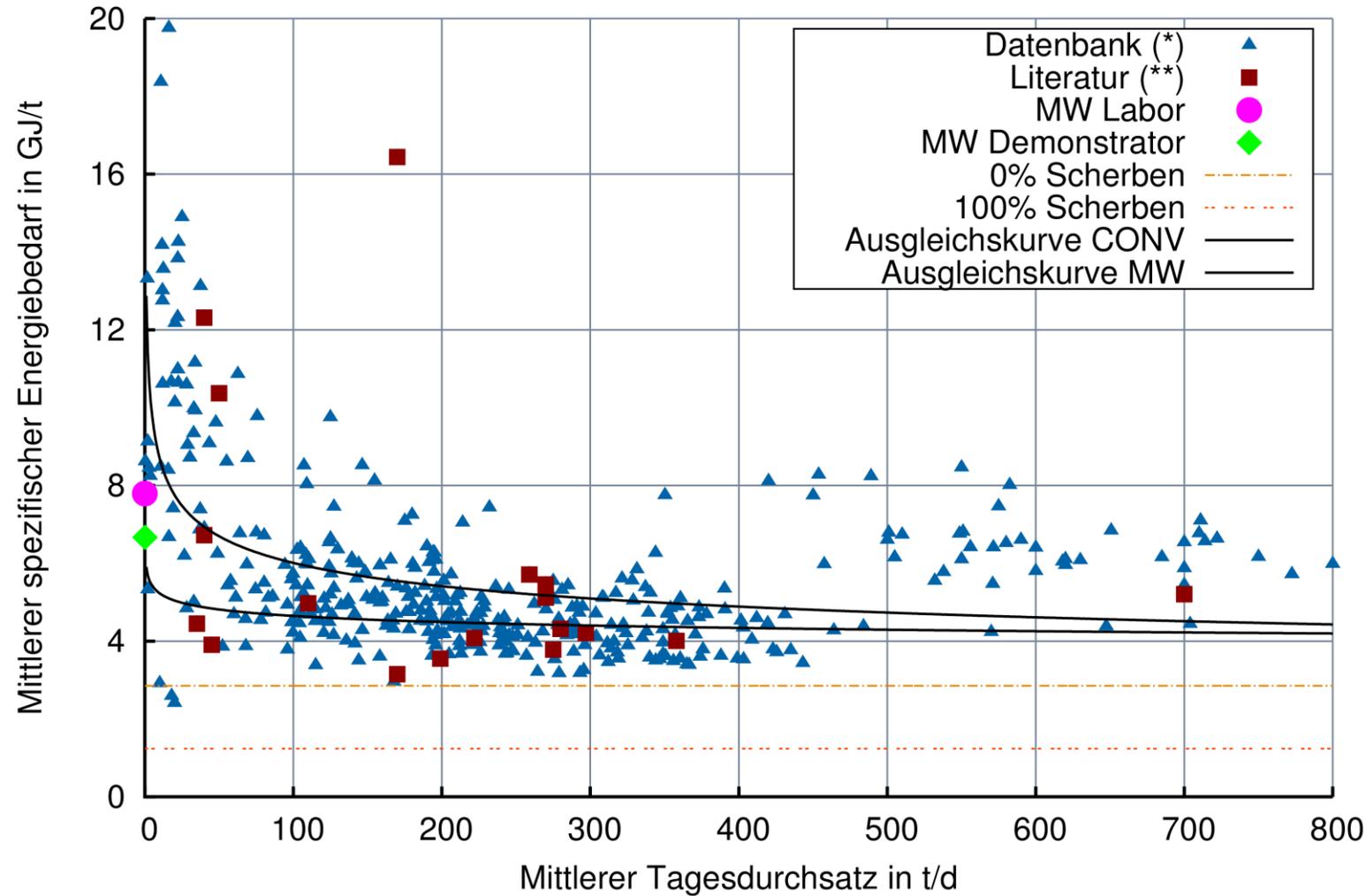


Abb 5:
Vergleich des spezifischen Energiebedarfs verschiedener Glasschmelzanlagen [1]

- Effizienzgewinne bei Mikrowellen durch Skalierung erkennbar
- Spezifischer Energiebedarf bei Mikrowellen vergleichbar oder besser als konventionelle Prozesse.

Glasschmelzen im Technikumsmaßstab

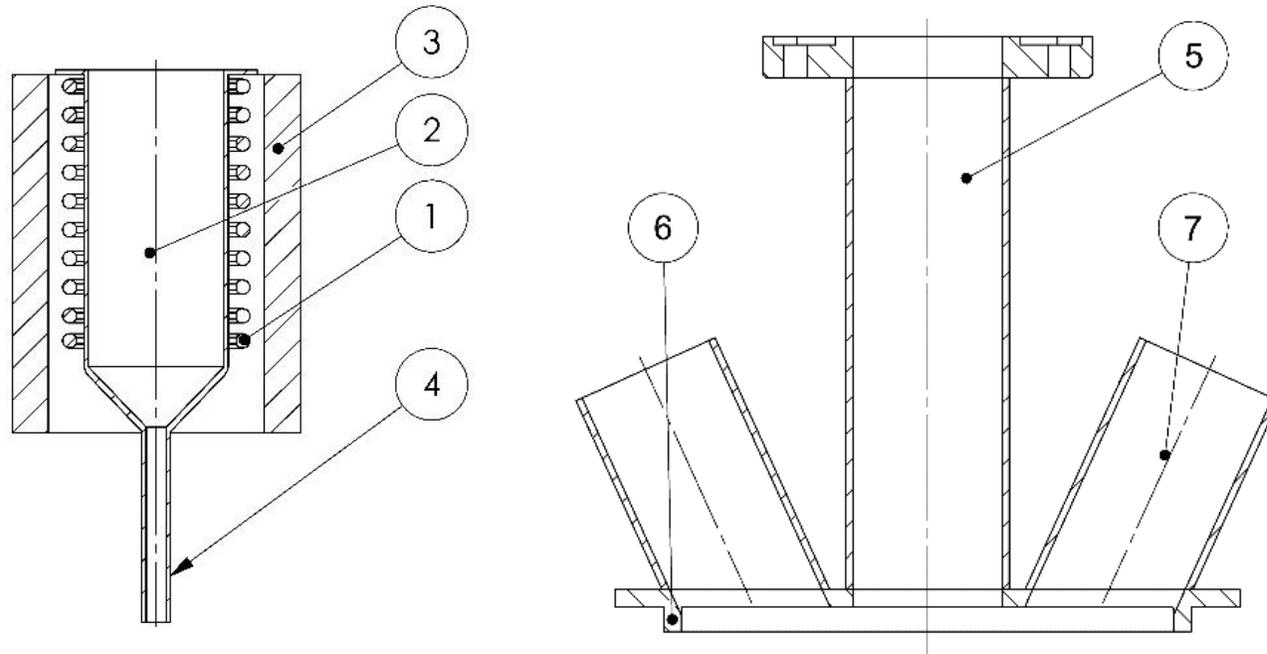


Abb 6:
Links: Konventioneller Aufbau eines Platinschmelztiegels für Glas.
Rechts: Mikrowellenapplikatoraufsatz für einen Platintiegel.
1: Platinschmelztiegel mit Induktionsspule
2: Glasschmelze und Gemenge
3: Wärmedämmung
4: beheizter Auslass
5: Rechteckhohlleiter und Luftspülung
6: Abdichtung zum Platintiegel
7: optischer und mechanischer Zugang

1. Glas und Gemenge im Platintiegel vorgewärmt → Gemenge wird kalt nachgelegt, Kontaktschicht erwärmt sich schnell
 2. Kein Feuerfestmaterial erforderlich
 3. Durchgängig geschlossenes Design aus Edelstahl und Platin mit speziellen Filtern an Ein- und Auslass.
 4. Mikrowellenleistung nahezu beliebig skalierbar
- Einsatz als Booster, erreichbare Schmelzleistung durch Läuterung begrenzt

Glasschmelzen im Technikumsmaßstab

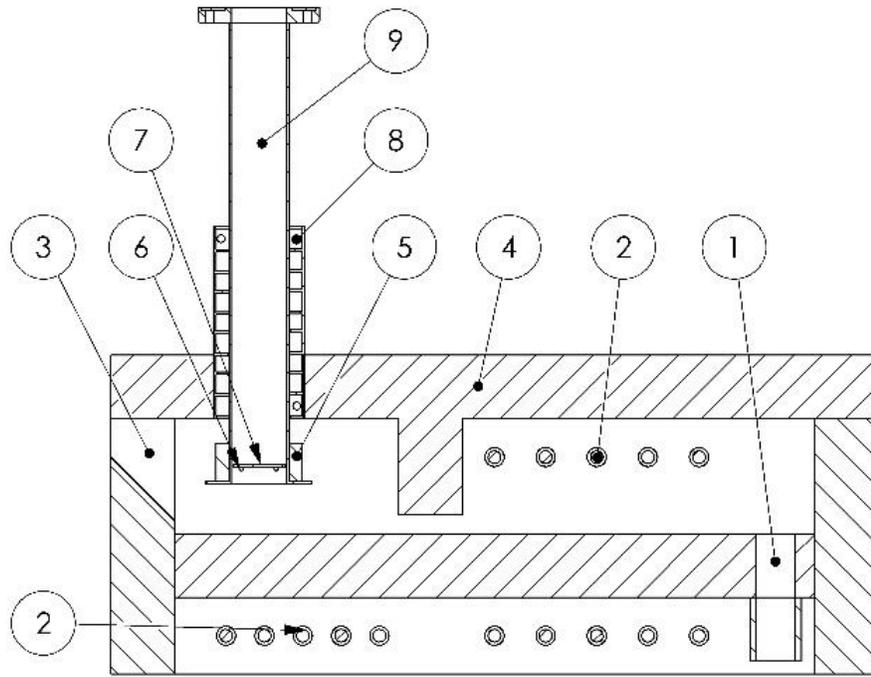


Abb 7:
Schematische Darstellung eines
mikrowellenbeheizten Schrägbettschmelzers.

- 1: Materialauslass,
- 2: Heizstäbe,
- 3: Materialeinlass,
- 4: Feuerfestzustellung,
- 5: Faserdämmung am Hohlleiter,
- 6: Al₂O₃-Stifte,
- 7: Bornitrid-Platte,
- 8: Wasserkühlung,
- 9: Hohlleiter für die Mikrowelleneinkopplung

1. Vorwärmung durch elektrische Heizung, kaltes Gemenge wird an Kontaktschicht schnell erwärmt
 2. Feuerfestmaterial dient als Sekundärheizfläche
 3. Einhausung durch Stahlbleche, Durchführungen möglich.
 4. Mikrowellenleistung beliebig skalierbar
- Einsatz als Booster oder für Rauhschmelze, erreichbare Schmelzleistung nur durch Länge der Läuterstrecke begrenzt

Glassmelzen im Technikumsmaßstab

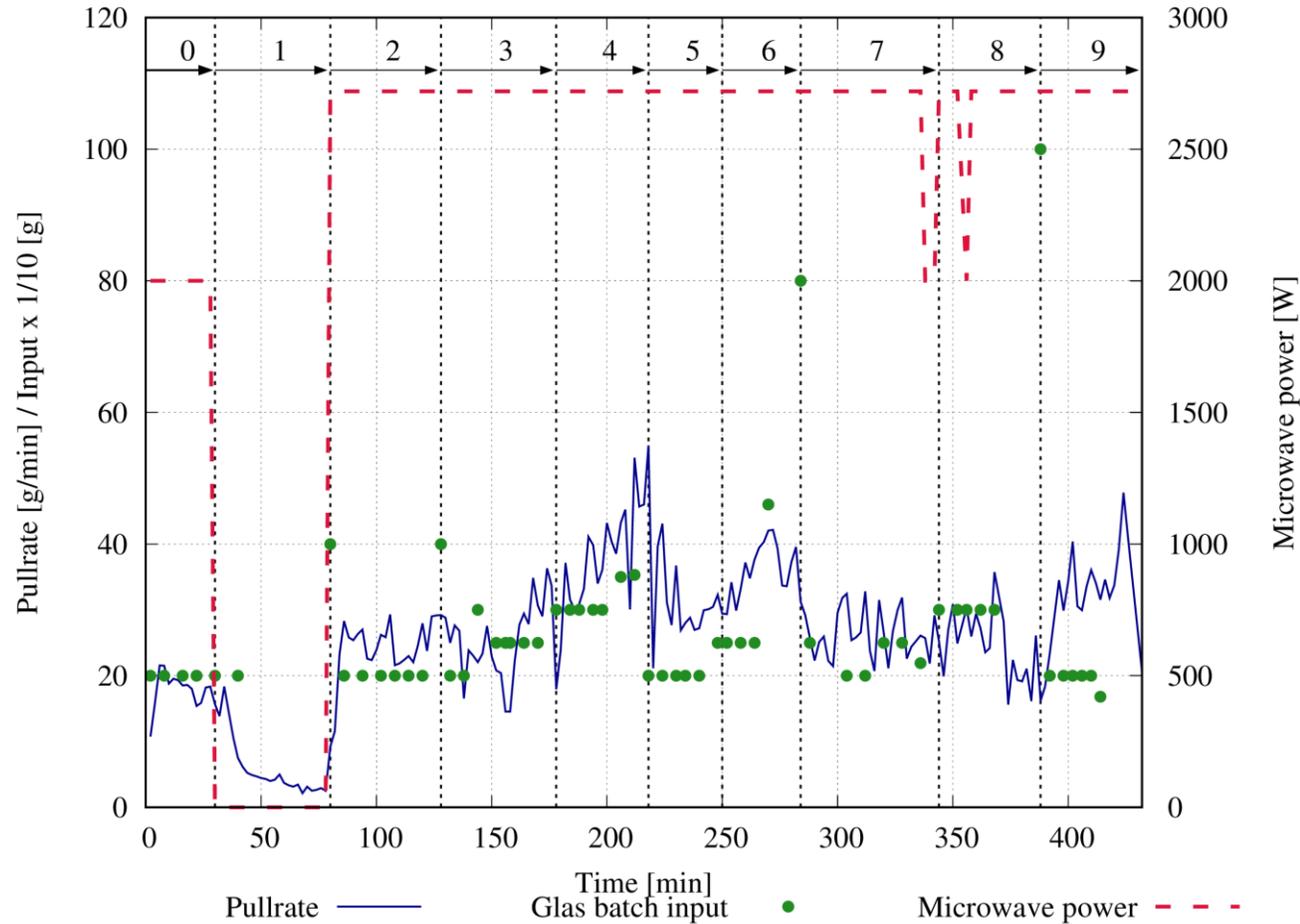


Abb 8:
 Durchsatz und Glasgemengeeinlage über der Zeit für einen Schrägbettschmelzer mit zusätzlicher Mikrowellenbeheizung. Gemenge jeweils gehäuft eingelegt. Spez. Energiebedarf ca. 4,7 GJ/t.

No.	Glass batch	No.	Glass batch
0	generic container glass batch	5	pelletized pure white glass batch
1	removal of remaining glass	6	pelletized white glass batch with cullet
2	generic container glass batch	7	pure brown glass batch
3	pure white glass batch	8	brown glass batch with cullet
4	white glass batch with cullet	9	pure C-glass batch

Der Schritt zur Großanlage

- Sicherheitsbedenken
 - Mikrowelleneinsatz ist stark reglementiert → konstante Überwachung auf Leckage
 - Mikrowellenapplikatoren müssen u.U. gekühlt werden → Wasser an Glasschmelzanlagen gefährlich
 - Scaling
 - Mikrowellengeneratoren für 2,45 GHz max. 12 kW
 - Mikrowellengeneratoren für 915 MHz max. 150 kW
 - Preis
 - Mikrowellenequipment teuer im Vergleich zu Gasbrenner
 - Effizienzgewinne zu gering im Vergleich zu Stromkosten
- Aber: Alle diese Probleme können gelöst werden
- Sicherheitssysteme sind verfügbar
 - Größere Generatoren sind technisch möglich
 - Preise sind eine Frage der Fertigung
 - Stromkosten sind ein politisches Problem

Lessons learned: Keep it simple

- Möglichst viele Standardkomponenten → Preis sinkt
- Keine komplexen Geometrien für Applikatoren → Komplexität und Fehleranfälligkeit steigen
- Robuste Prozesse → weniger Fehler

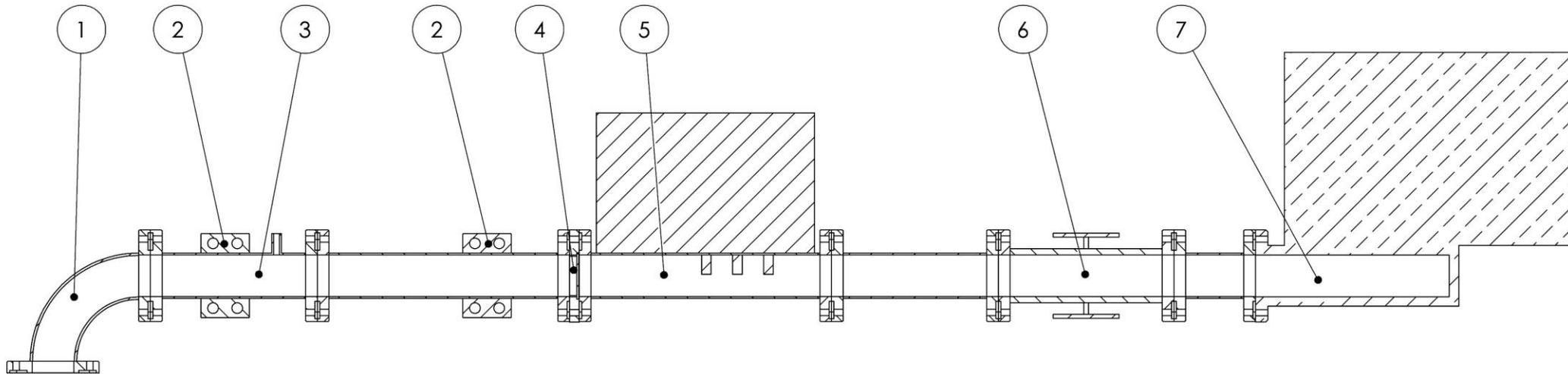


Abb 9: Aufbau des Mikrowellensystems für den Platintiegel und den Schrägbettschmelzer. 1: Hohlleiter zum Applikator, 2: Wasserkühlung, 3: Hohlleiter mit Spülgasanschluss 4: Mikrowellenfenster aus Quarzglas, 5: 6-Port-Reflektometer und Autotuner 7: Magnetron

Lessons learned: Nebenwirkungen nutzbar machen

- Feuerfestmaterial
 - Starke Absorption: Hilfsheizfläche
 - Starke Reflektion: Feldverstärkende Effekte
- Glasgemenge
 - kann als Wärmedämmung wirken → kaltes Gemenge ist mikrowellentransparent
 - Schmelzflüssiges Material reflektiert stark → Gefahr der Überhitzung reduziert



Abb 11: Abschmelzen von Glasgemenge im Platintiegelofen mit Mikrowellenunterstützung

Ausblick

- Ausweitung der Hybridisierung auf Flammenbeheizung → Direkte Integration von MW in den Brenner

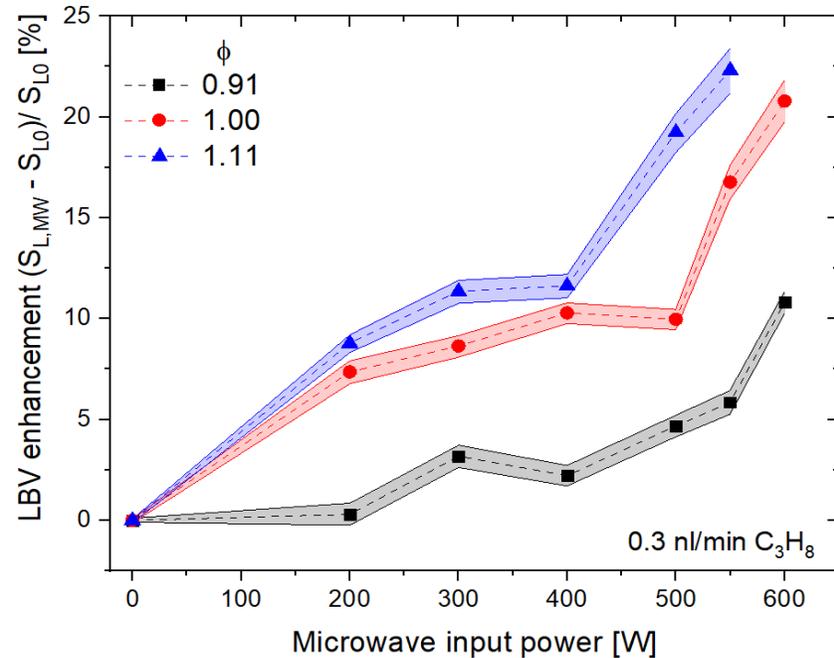


Abb 12:
Erhöhung der laminaren Brenngeschwindigkeit in Prozent bezogen auf den Wert ohne Mikrowelleneingangsleistung. Die farbigen Flächen stellen den Bereich der Messunsicherheit dar

- Plasmabrenner als technologisch gleichwertiger Ersatz für konventionelle Brenner