

Inhalt der Vorlesung

Numerische Simulation elektrothermischer Prozesse



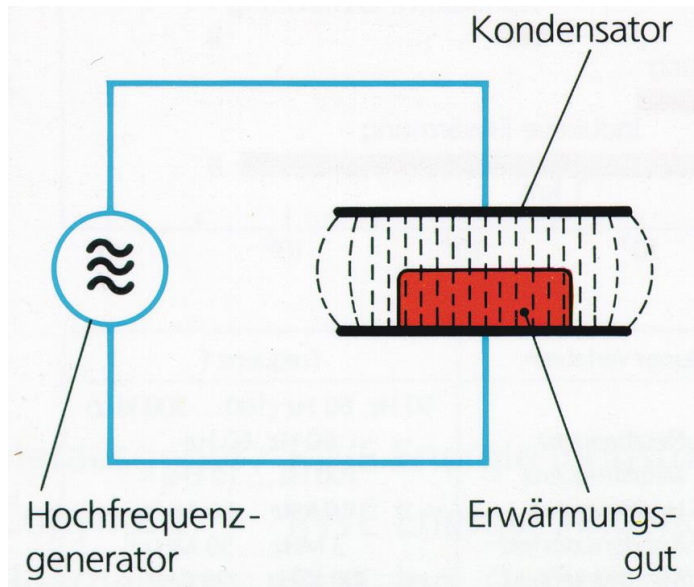
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

1. Einführung / Übersicht über Verfahren / Simulation zur Wirtschaftlichkeitsanalyse
2. Grundlagen der Wärmelehre, Simulation von Temperaturfeldern
3. Energieeffizienz / Konduktive Erwärmung (Praxis und Simulation)
4. Maxwell-Gleichungen / Leistungsumsetzung / Wirkungsgrad
5. Induktionserwärmung 1: Umrichter, Schmelzöfen, Schmieden
6. Induktionserwärmung 2: Querfeld, Härten, Schweißen
7. Induktionserwärmung 3: Simulation (Praxis und Übung)
8. Indirekte Erwärmung / Hybrid-Verfahren
9. **Dielektrische Erwärmung (Praxis und Simulation)**
Mechanismen, Frequenz, Stehende Wellen, Simulation
10. Organisatorisches, Übungen, Fragen & Antworten



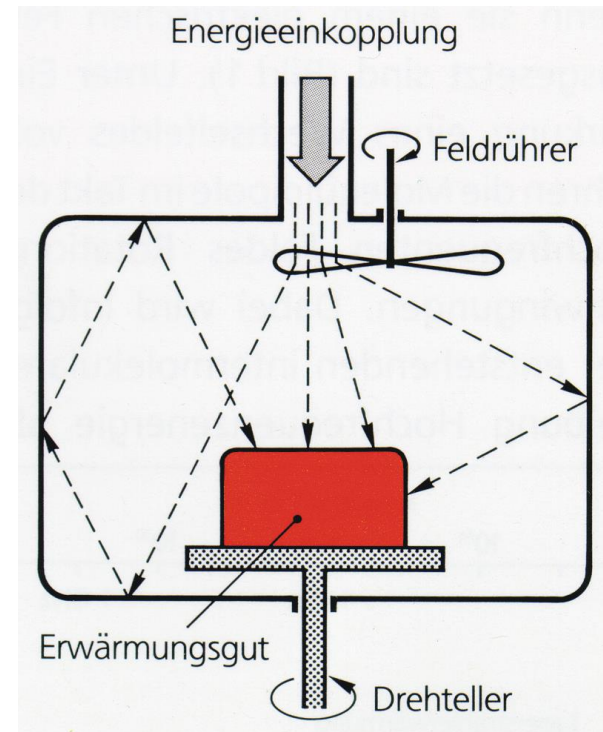
Dielektrische Erwärmung

Kondensatorfeld-Erwärmung



- Frequenzen: 13,56 MHz
27,12 MHz
40,68 MHz
- Energiezufuhr: über el. Leitung

Mikrowellen-Erwärmung



Quelle: RWE-
Information
Prozesstechnik

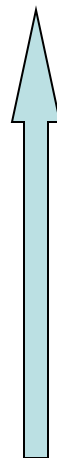
- Frequenz: 2,45 GHz
- Energiezufuhr: über Hohlleiter

1. Maxwell'sche Gleichung im Frequenzbereich

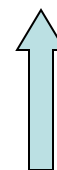


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

$$\text{rot}\vec{H} = \kappa\vec{E} + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E}$$



Leitungsstromanteil (ind.)



Verschiebungsstromanteil
(diel., frequenzabhängig)



Oberflächenleistungsdichte, Wärmequellendichte, Leistung



Die Kombination der elektrischen Verschiebungsdichte mit der elektrischen Feldstärke durch die Beziehung

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

(165)

weist darauf hin, dass beide elektrischen Größen in Phase sind.

Wenn sich ein Molekül nicht ohne Reibung in dem Verbund bewegen kann, ist es auch nicht fähig, dem elektrischen Wechselfeld direkt zu folgen

Das führt zu einer Phasendifferenz zwischen der elektrischen Anregung und der elektrischen Feldstärke. Wenn die oben genannte Gleichung in diesem Fall Gültigkeit behalten soll, muss eine komplexe dielektrische Konstante eingeführt werden:

$$\vec{D} = \underline{\varepsilon} \vec{E}$$

(166)

Diese ist willkürlich geteilt in einen reellen und einen imaginären Teil:

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

(167)



Oberflächenleistungsdichte, Wärmequellendichte, Leistung

Der reelle Teil beschreibt die reine (verlustfreie) Polarisation, der imaginäre Part beschreibt die Reibungsverluste.

Die Zusammensetzung des komplexen Vektors $\underline{\varepsilon}$ kann graphisch veranschaulicht werden (Bild 17), wo der Winkel zwischen $\underline{\varepsilon}$ und ε' der Verlustwinkel δ ist:

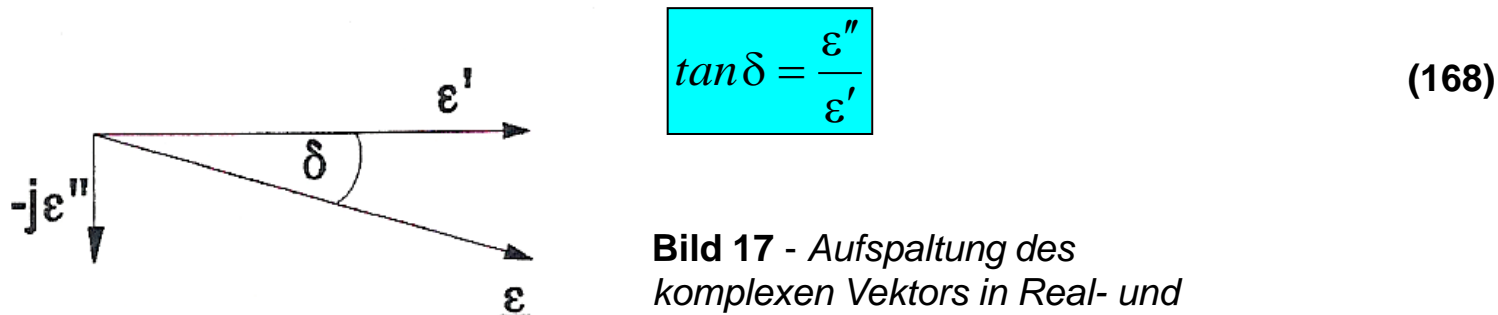


Bild 17 - Aufspaltung des komplexen Vektors in Real- und Imaginärteil

Betrachtet man ein dielektrisches aber nicht leitfähiges Medium, ergibt sich die erste Maxwellgleichung zu:

$$\text{rot } \underline{\vec{H}} = j\omega \underline{\vec{D}} = j\omega \underline{\varepsilon} \underline{\vec{E}} = j\omega(\varepsilon' - j\varepsilon'') \underline{\vec{E}} = \omega \varepsilon'' \underline{\vec{E}} + j\omega \varepsilon' \underline{\vec{E}} \quad (169)$$

Für ein leitfähiges Medium lautet die Gleichung:

$$\text{rot } \underline{\vec{H}} = \underline{\vec{S}} + j\omega \underline{\vec{D}} = \kappa \underline{\vec{E}} + j\omega \varepsilon \underline{\vec{E}} \quad (170)$$

Oberflächenleistungsdichte, Wärmequellendichte, Leistung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Der zweite Term auf der rechten Seite steht für den dielektrischen verlustfreien Prozess.

Der erste Term beschreibt die vektorielle Stromdichte für das dielektrische Material.

Es beschreibt den Verlustanteil des dielektrischen Prozesses. Das bedeutet, dass sich die Verluste eines dielektrischen Prozesses wie ein Stromfluss im Material verhalten und auch so gemessen werden können.

In einem leitfähigen Material ist die Leistungsdichte:

$$p = \underline{\vec{S}} \cdot \underline{\vec{E}}^* = \kappa |\underline{E}|^2 \quad (171)$$

Für die dielektrischen Verluste eines nicht leitfähigen Materials folgt mit der reellen Größe $\omega \varepsilon''$

$$p = \omega \varepsilon'' |\underline{\vec{E}}|^2 = \omega |\underline{\vec{E}}|^2 \cdot \varepsilon' \tan \delta \quad (172)$$

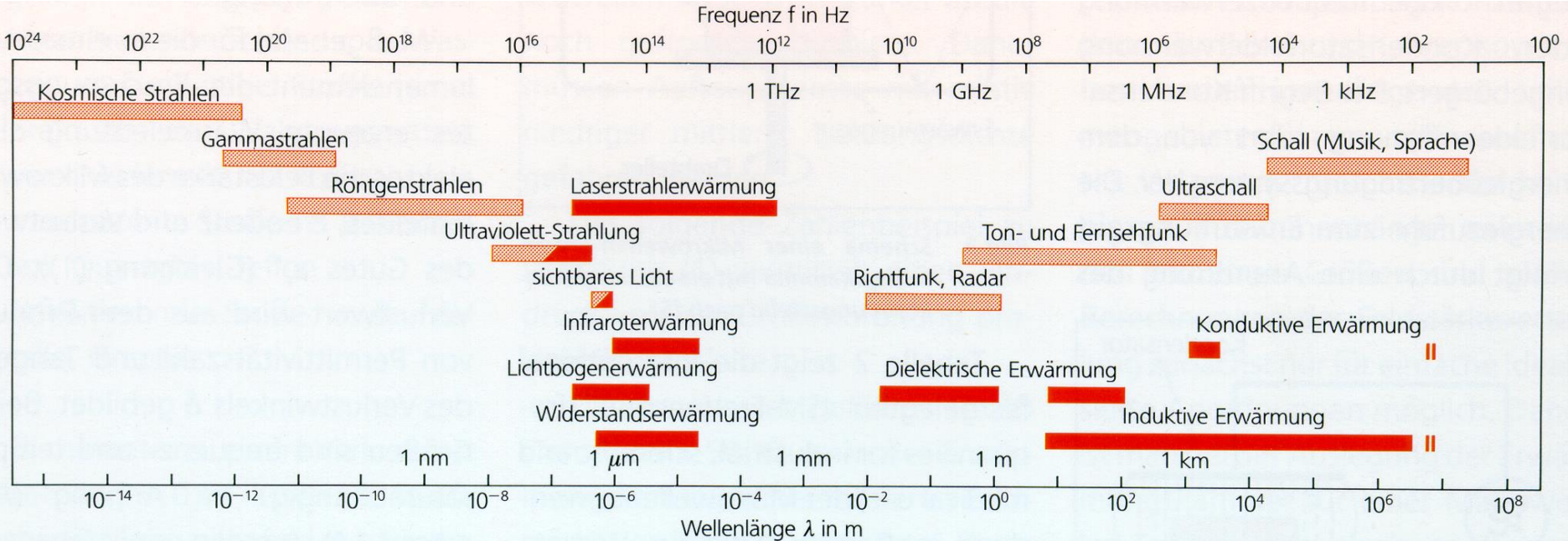
die Wärmequellendichte zu:

$$p = \frac{\omega \varepsilon''}{2} |\underline{\hat{E}}|^2 = \frac{\omega \varepsilon''}{2} |\underline{\hat{E}}_0|^2 \cdot J_0^2(k_0 r)$$

(Aus Bessel-
Funktion) (173)



Verfahren der Elektroprozessstechnik im Frequenzspektrum elektromagn. Schwingungen



Anwendung/Verfahren	Wellenlänge λ in μm
Ultraviolett UVC	0,10 ... 0,28
UVB	0,28 ... 0,32
UVA	0,32 ... 0,38
sichtbares Licht	0,38 ... 0,78
Laser	0,19 ... 300

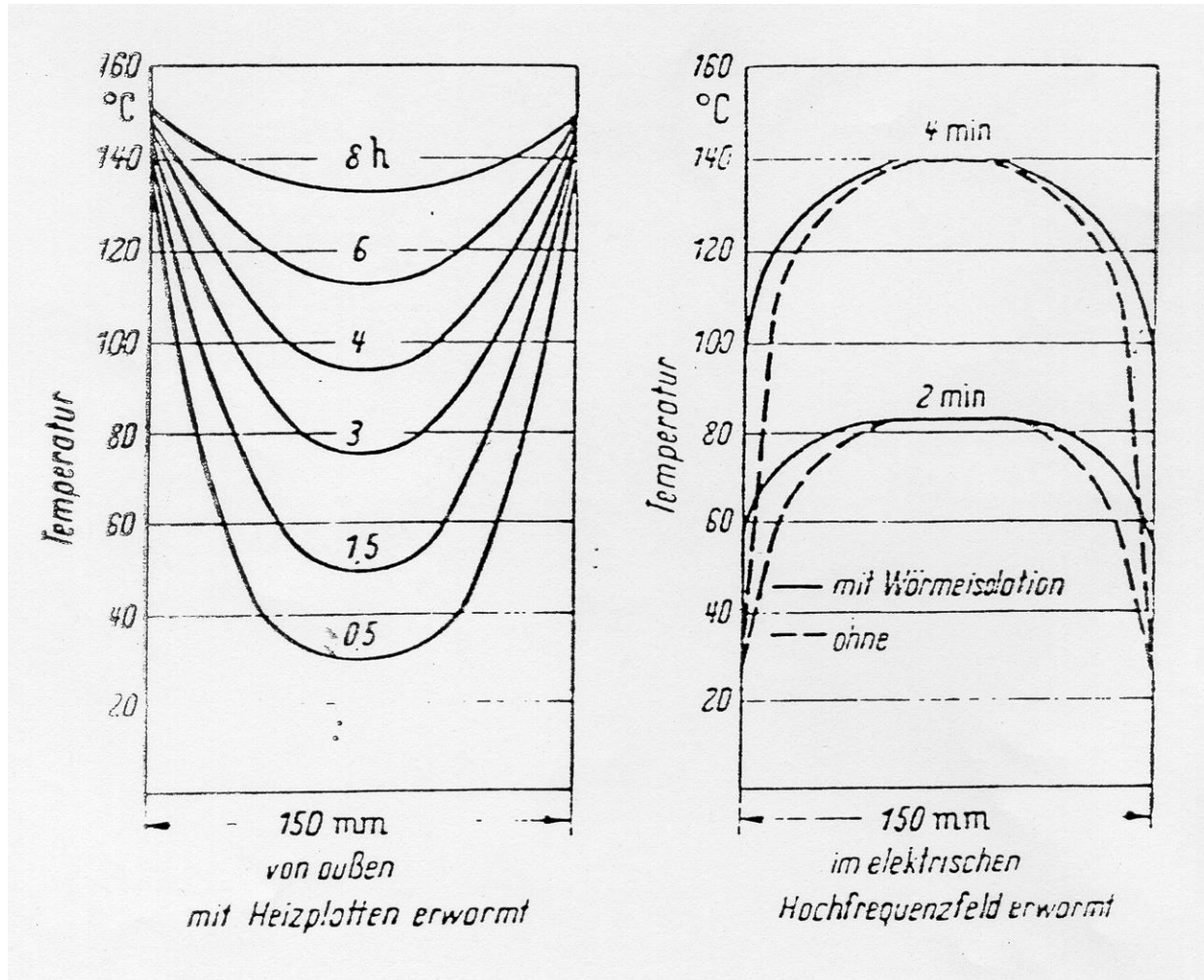
Anwendung/Verfahren	Wellenlänge λ in μm
Infrarot kurzwellig	0,78 ... 2
mittelwellig	2 ... 4
langwellig	4 ... 20
Lichtbogen (Strahlungsanteil)	0,2 ... 3
Widerstand (Strahlungsanteil)	0,5 ... 20

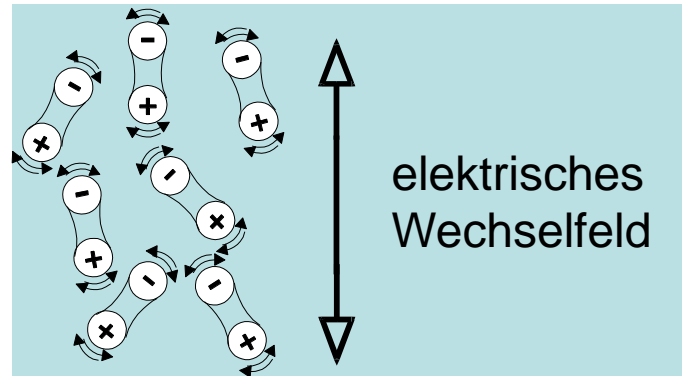
Anwendung/Verfahren	Frequenz f
Konduktiv	50 Hz, 60 Hz (100 ... 300 kHz)
Induktiv	Netzfrequenz 50 Hz, 60 Hz
Mittelfrequenz	100 Hz ... 10 kHz
Hochfrequenz	10 kHz ... 60 MHz
Dielektrisch	Kondensatorfeld 3 MHz ... 50 MHz
Mikrowellenfeld	300 MHz ... 25 GHz

Anwendungen in der Elektroprozessstechnik



Erwärmung im Gut

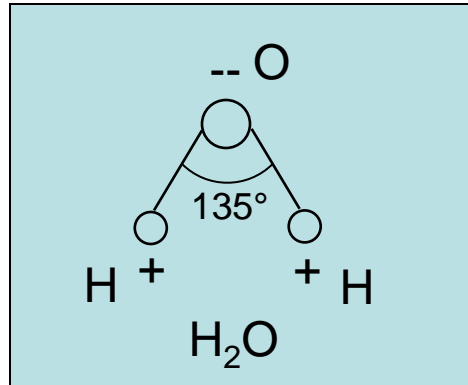




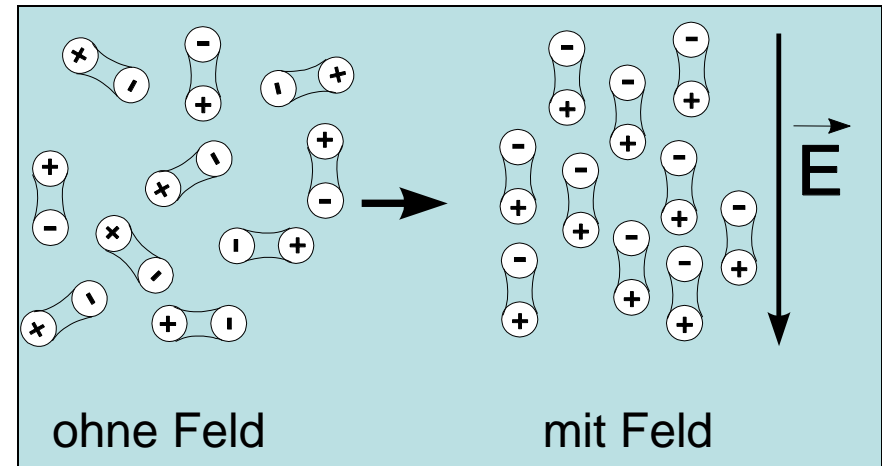
- beruhen auf dem Einfluss des elektrischen Feldes
- vorhandene oder entstehende Dipole werden ausgerichtet
- 3 Polarisationsmechanismen:
 - Orientierungspolarisation
 - Ionenpolarisation
 - Elektronenpolarisation

Orientierungspolarisation

● Materialdipole, z. B. Wasser

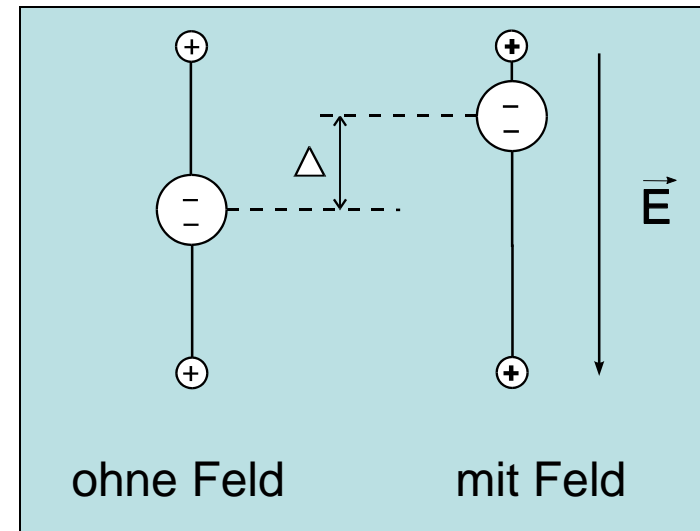


● Polarisationsmechanismus



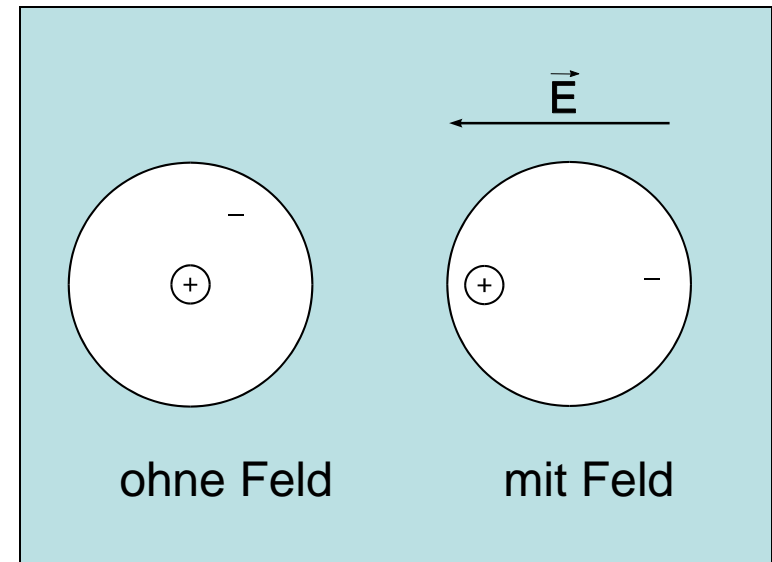
- Felddipole, polare Stoffe wie z. B. PVC und NaCl
- elastische Verschiebung
- große Masse der Ionen
→ kein volles Folgen der Ionen
- $f \uparrow \rightarrow$ Anteil Ionenpolarisation \downarrow
 $\rightarrow \chi_{\text{ion}} \downarrow$

● Polarisationsmechanismus



- für alle Stoffe
- Verschiebung bzw. Deformierung der Elektronenhülle der Atome
- kleine Masse der Elektronen
→ bis zu sehr hohen Frequenzen wirksam (10^{15} Hz)
- χ_{el} keine Funktion von f
- alleiniger Polarisationsanteil bei nicht polaren Stoffen, z. B. beim Diamanten

● Polarisationsmechanismus



- alle 3 Anteile ergeben die Gesamt-Suszeptibilität:

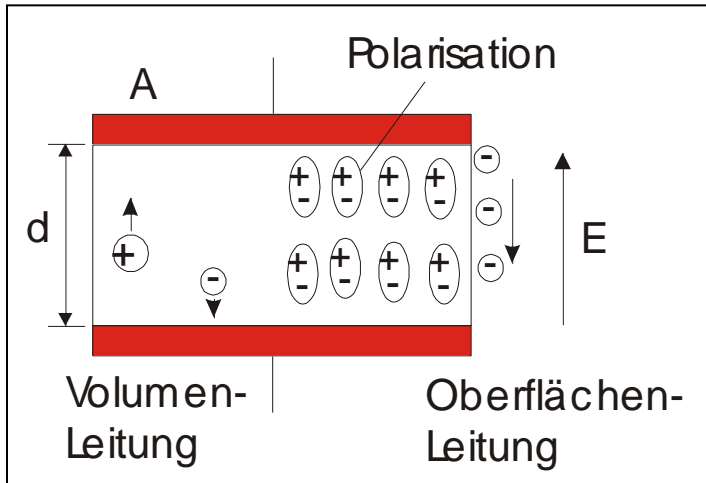
$$\chi = \chi_{or} + \chi_{ion} + \chi_{el}$$

- ferner gilt:

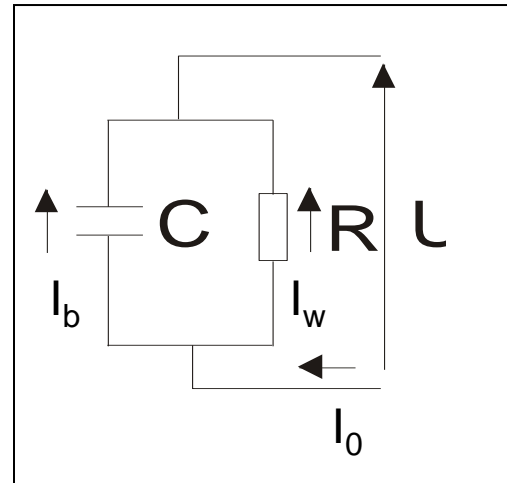
$$\chi = \varepsilon_r - 1$$

Dielektrische Verlustleistung

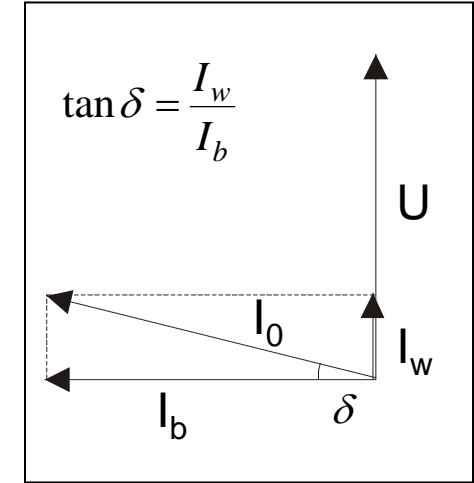
1) physikalische Anordnung



2) elektrisches ESB



3) Zeigerbild



● Wirkleistung aus Zeigerbild

$$P_w = UI_b \tan \delta = U^2 \omega C \tan \delta = U^2 \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \tan \delta$$

$$P_w = E^2 d^2 \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \tan \delta$$

● Leistungsdichte

$$p_w = E^2 \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \tan \delta$$

Dielektrische Stoffdaten und Eindringtiefen verschiedener Materialien

Material	ϑ (in °C)	ε_r	$\tan\delta$	$\varepsilon'_r \cdot \tan\delta$	ET (in cm)
Wasser	25	76,7	0,157	11,9	1,4
Wasser	85	56,6	0,0547	3,1	4,7
Eis	-12	3,2	0,0009	0,0029	121
Fleisch	25	41,8	0,3	12	1,0
Holz	25	1,9	0,025	0,047	60
Gummi	25	2,4	0,006	0,014	210
PVC	20	2,84	0,0055	0,0156	210
Al_2O_3	25	8,8	0,001	0,0088	660
Polystyrol	25	2,55	0,00033	0,000841	3700
Teflon	22	2,1	0,00015	0,000315	9000

Eindringtiefe:
$$ET = \frac{c}{2\pi f \cdot \sqrt{\varepsilon_r} \tan\delta}$$

Wellenlängen und stehende Wellen

- im freien Raum gilt:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f}$$

c = Lichtgeschwindigkeit = $3 \cdot 10^8$ m/s

- allgemein gilt:

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

v = Wellengeschwindigkeit im Material

- für beliebiges Medium gilt:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

- und damit allgemein:
(für $\mu_r = 1$)

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

- Beispiel Holz (Birke):

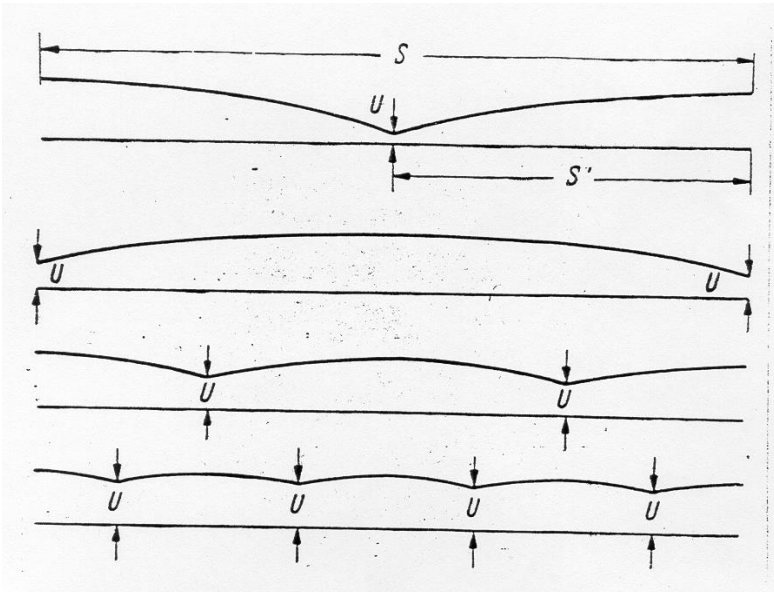
$$\epsilon_r = 2,6, \quad f = 27,12 \text{ MHz: } \lambda_{\text{Holz}} = 6,86 \text{ m} \quad (\lambda_0 = 11 \text{ m})$$

Stehende Wellen

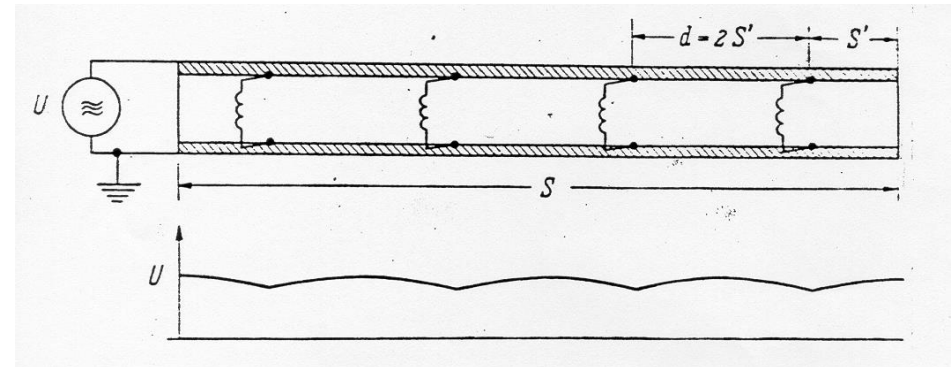
● Blindleistung \gg Wirkleistung: $P_w/P_b = \tan\delta \ll 1$

● Die Dämpfung ist vernachlässigbar klein \rightarrow stehende Wellen

Mehrfacheinspeisung



Vielfachabstimmung



Praktische Dimensionierung

$$I_{\text{Elektr.}} < 0,15 \lambda$$

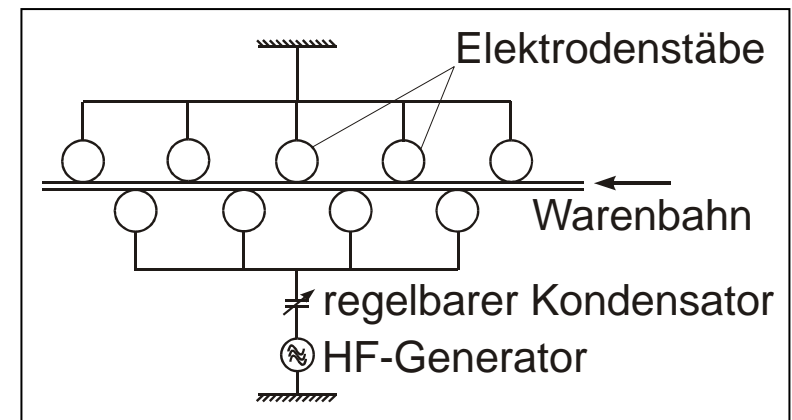
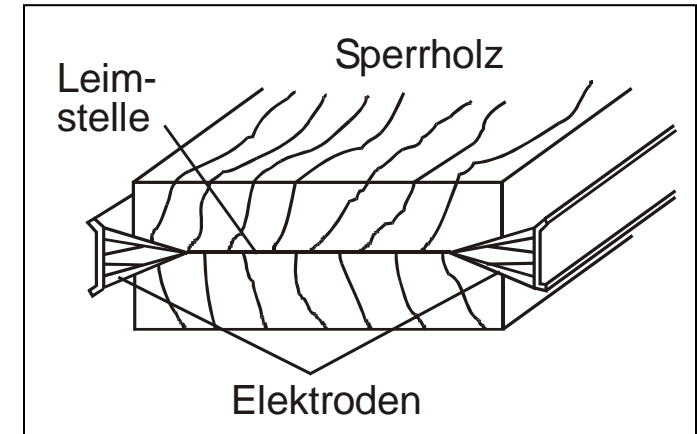
Erwärmung im Kondensatorfeld

Anwendung

- Trocknen von Textilien, Papier, u. a.
- Verleimen von Holz, Spanplattenherstellung
- Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen
- Vorwärmen von Kunststoffen und Harzen



Elektrodentypen

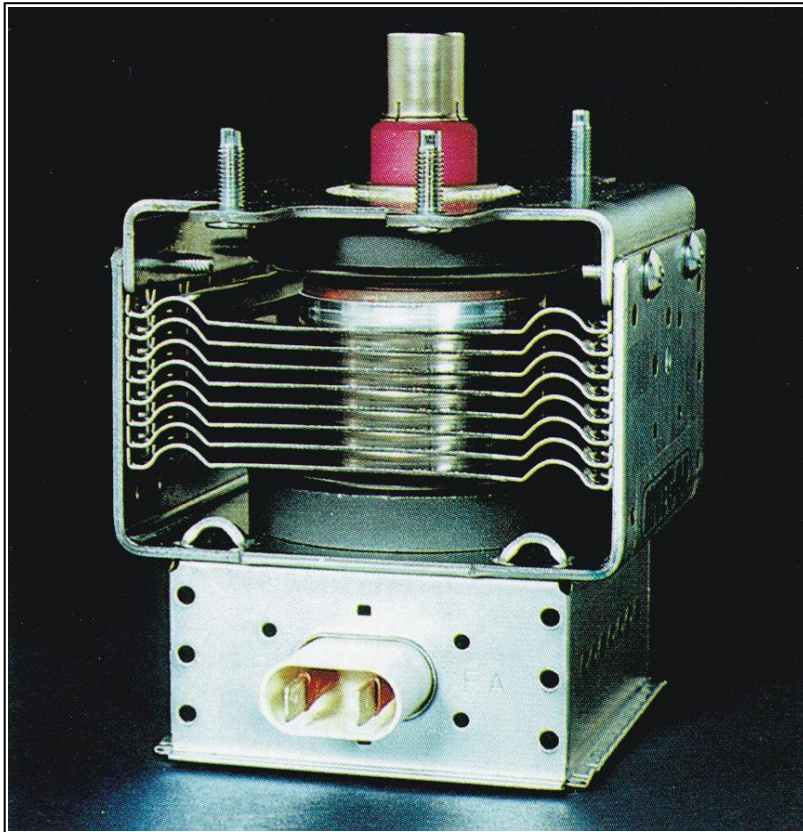


Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

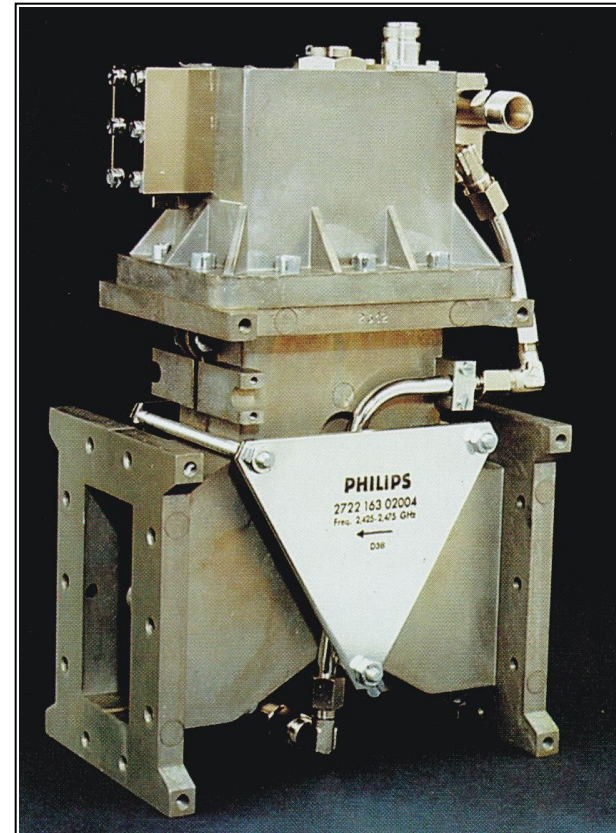
Mikrowellen-Erzeugung und Übertragung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Luftgekühltes Magnetron,
1,2 kW Ausgangsleistung



Zirkulator mit Wasserlast
für 6,5 kW Mikrowellenleistung

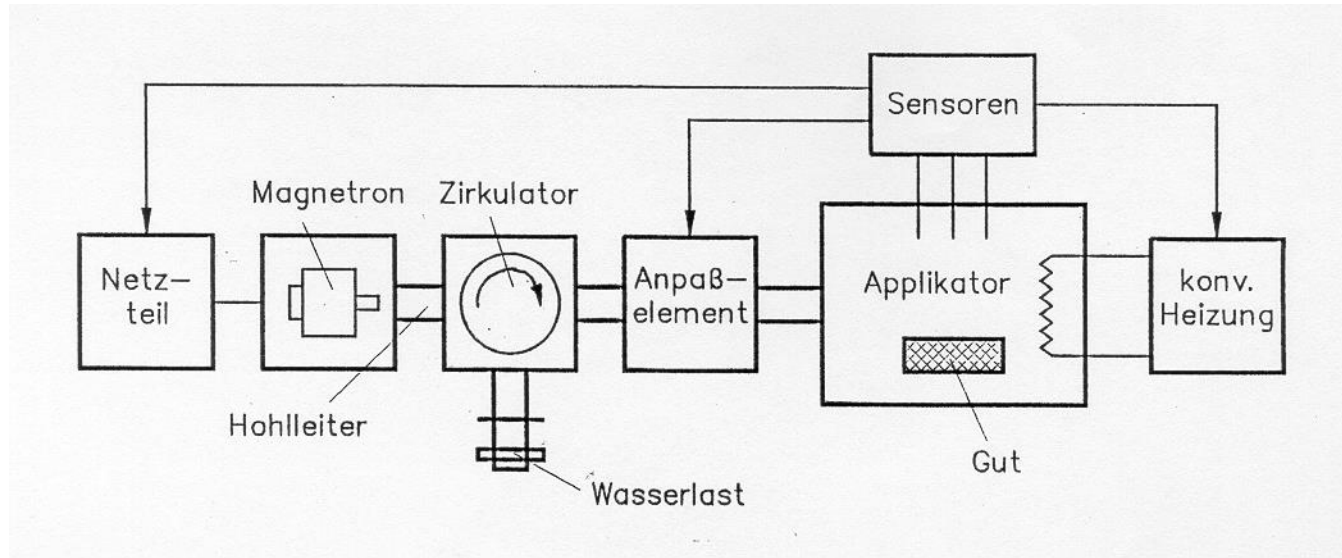
Quelle: RWE-Information Prozesstechnik



Aufbau einer Mikrowellenerwärmungsanlage

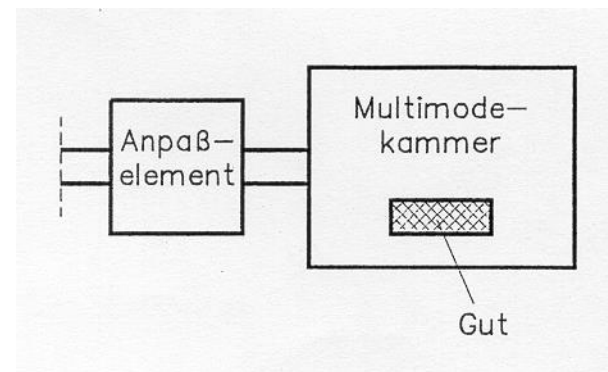


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



● Multimode-Applikator

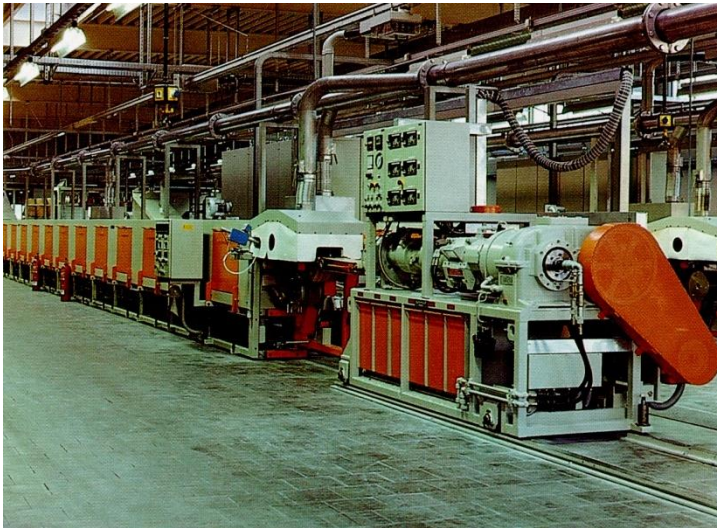
- viele Feldformen (multimode, ca. 12 in Haushaltsmikrowelle)
- Überlagerung vieler stehender Wellen



Erwärmung im Mikrowellenfeld

Anwendung

- Lebensmittelindustrie: Sterilisieren, Pasteurisieren, Auftauen
- Textilindustrie: Trocknen
- Gummi-, Kunststoffindustrie: Vulkanisieren, Härten

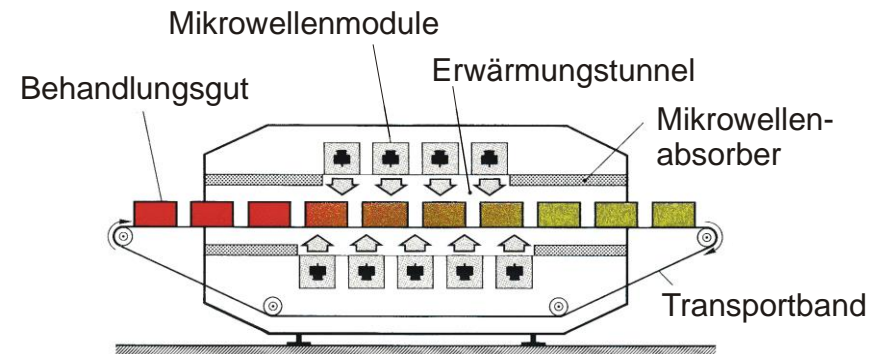


Mikrowellen-Durchlauferwärmungsanlage für die Vulkanisation von Gummiprofilen

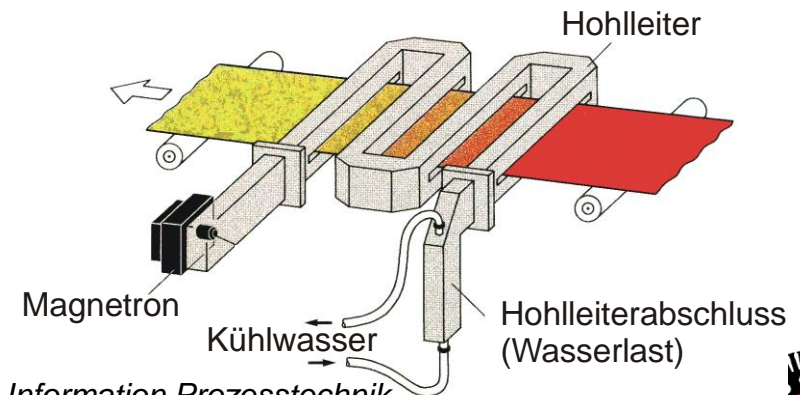
Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

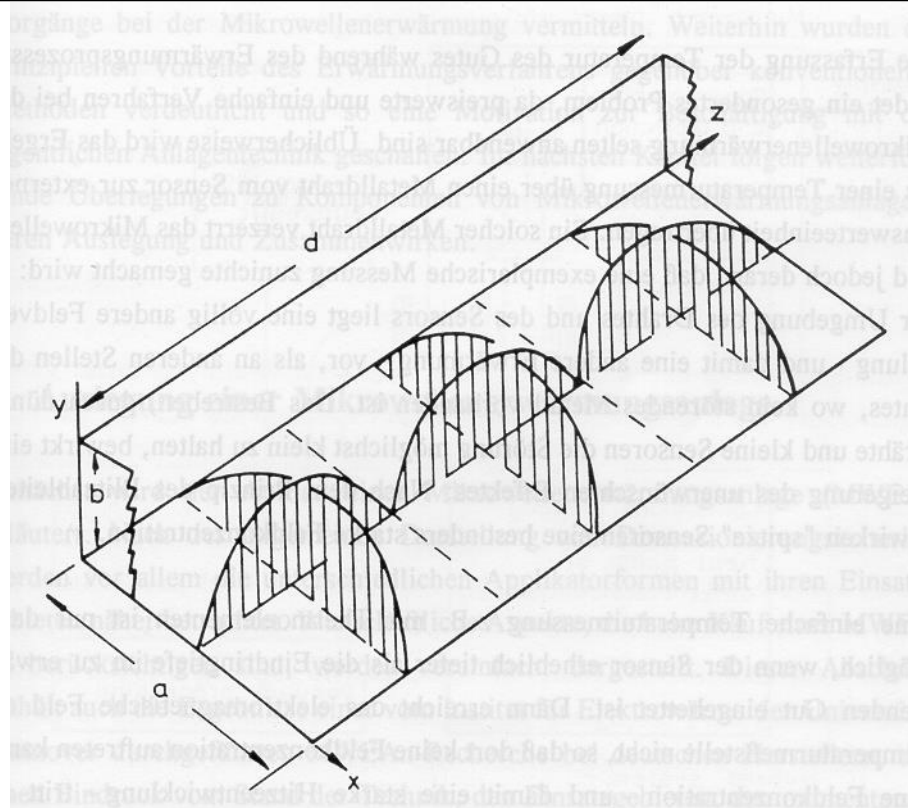
Anlagentypen

● Multimode-Durchlaufanlage



● Wanderwellen-Durchlaufanlage





Feldbild im einmodigem Rechteckresonator

Quelle: Industrielle Elektrowärmetechnik, Vulkan-Verlag

Anwendungsbeispiel



Kammerofen zur Trocknung von Isolatoren:

- Kombination Mikrowelle/Heißluft
- Leistung: $32 \times 1,45$ kW, 2,45 GHz
- Verkürzung der Trockenzeit um 90 %
- Verringerung des Platzbedarfs um 70 %

Quelle: Firma Fricke & Mallah

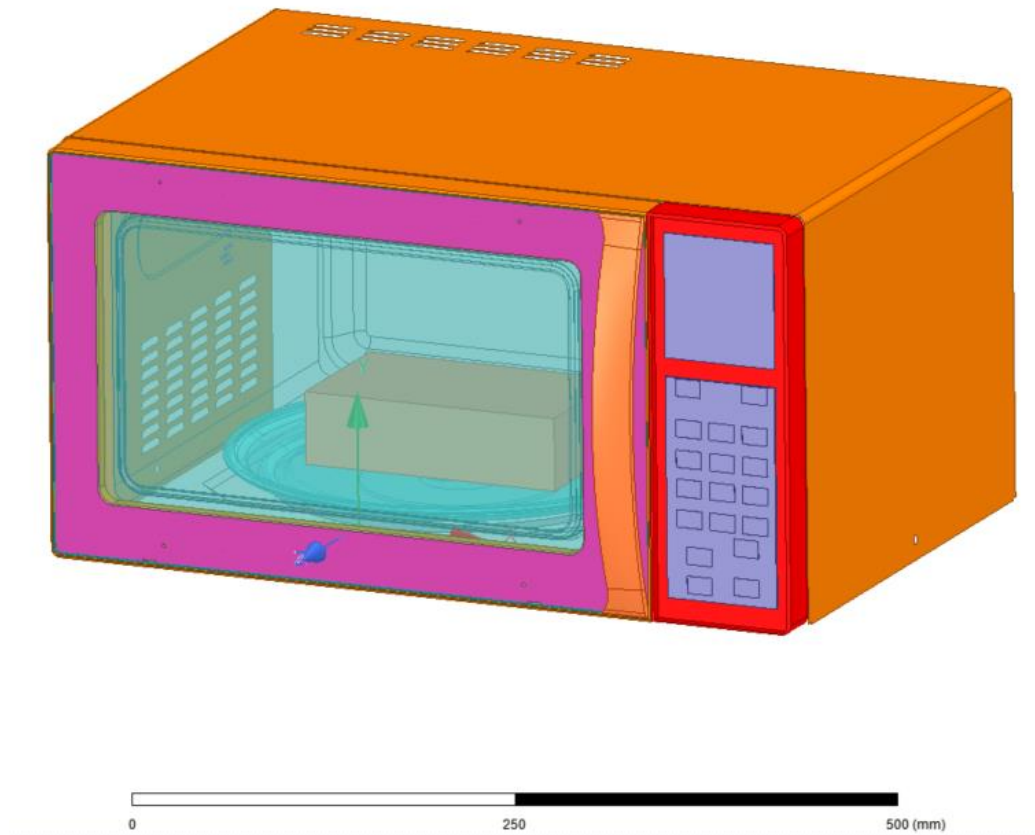
Nachteile der Mikrowellenerwärmung:

- höhere Investitionskosten
- Gefahr der inhomogenen Erwärmung
- Anpassung des Generators erforderlich
- erhöhte Sicherheitsauflagen

Vorteile der Mikrowellenerwärmung:

- direkte und schnelle Erwärmung
- z. T. höhere Produktqualität
- kein Aufheizen der Erwärmungskammer
- höherer Wirkungsgrad
- gute Automatisierbarkeit
- Durchlaufanlagen möglich
- bessere Arbeitsbedingungen
- viele zukunftsweisende Anwendungen

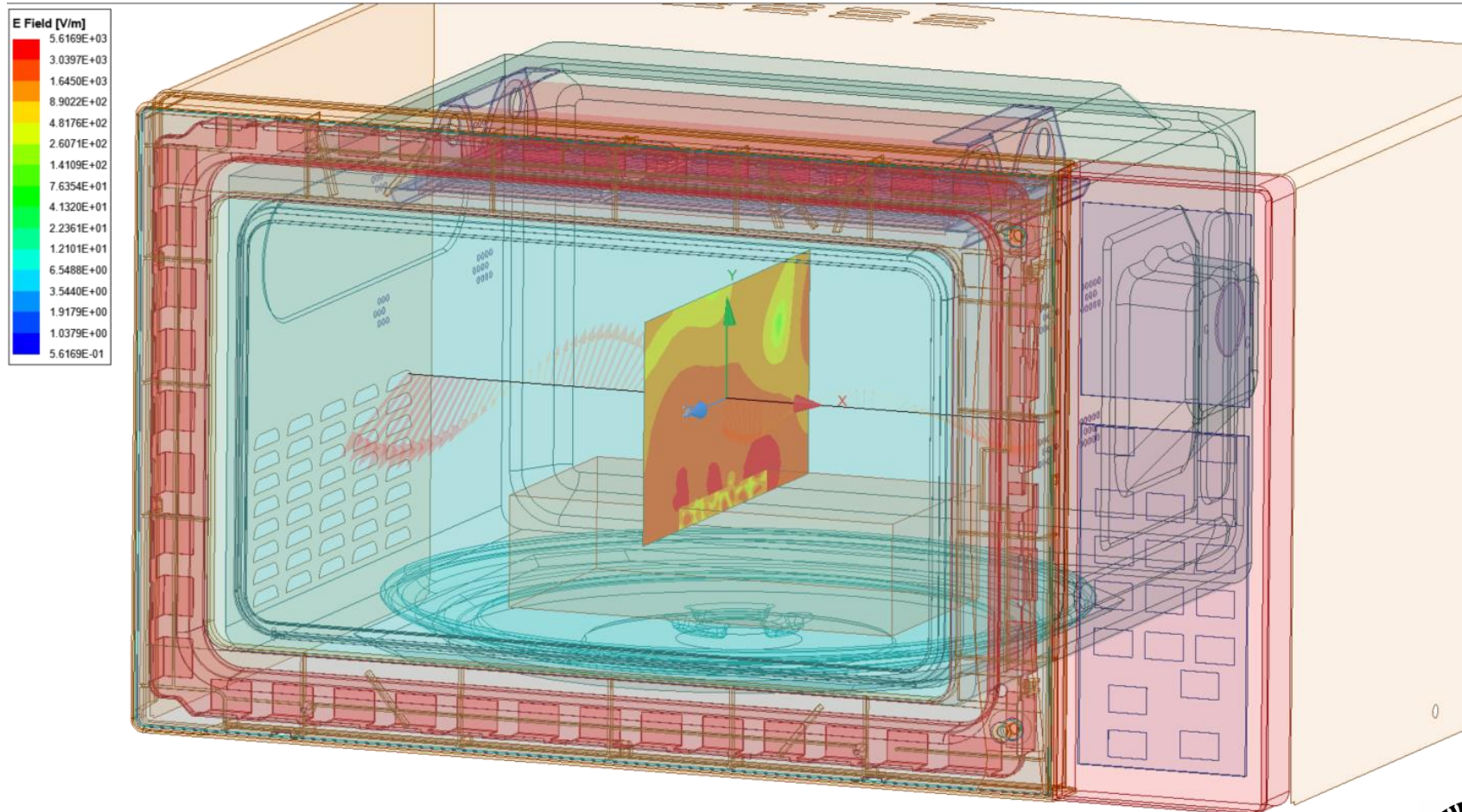
Simulation einer Mikrowellenerwärmung



Mikrowelle (Elektromagnetisch Hochfrequenz)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Mikrowelle (Thermisch transient)

