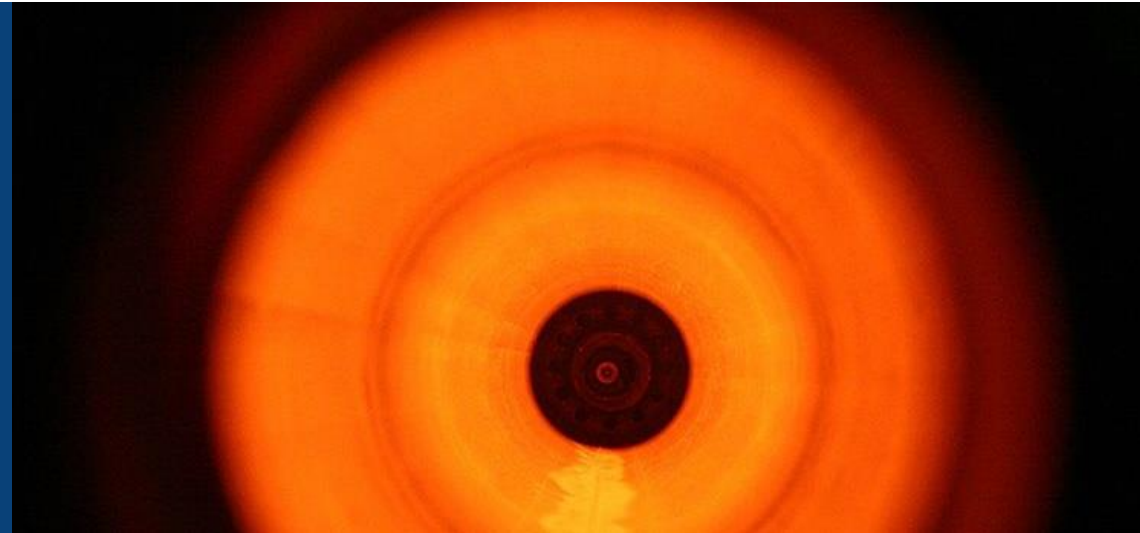


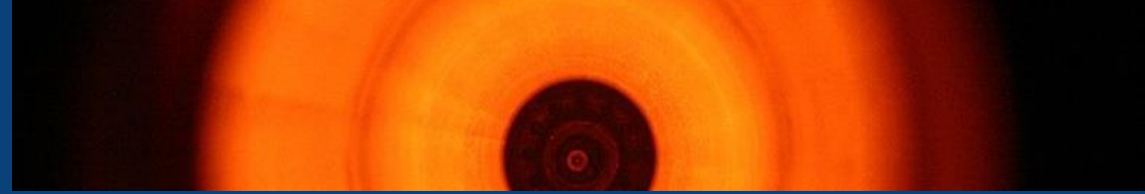
■ ■ ■ **Mikrowellentrocknung
in Hinblick auf Ressourceneffizienz
und CO₂ Neutralität**

Roland Waitz
Linn High Temp





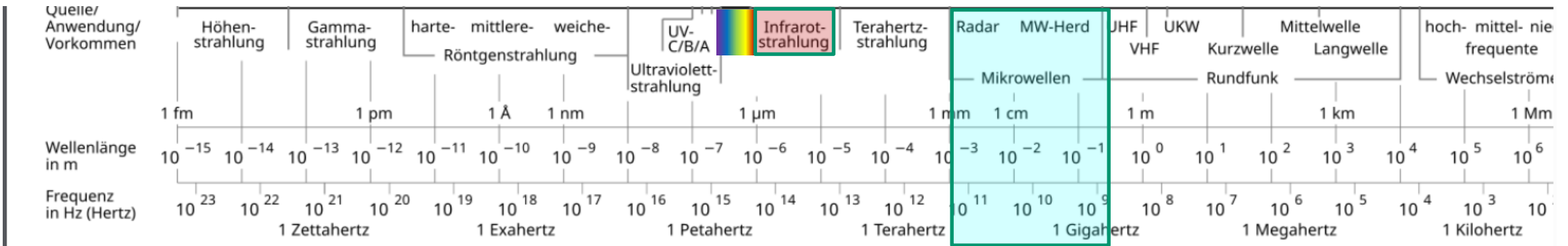
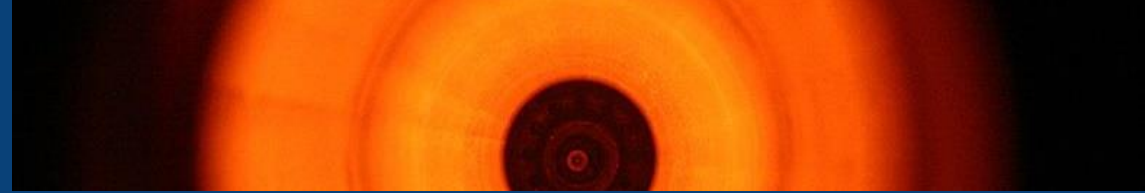
Mikrowellentrocknung in Hinblick auf Ressourceneffizienz und CO₂ Neutralität



Mikrowellentrocknung in Hinblick auf Ressourceneffizienz und CO₂ Neutralität

Ressourcen: Rohstoffe, Zeit, Fläche, Energie, Decarbonisation

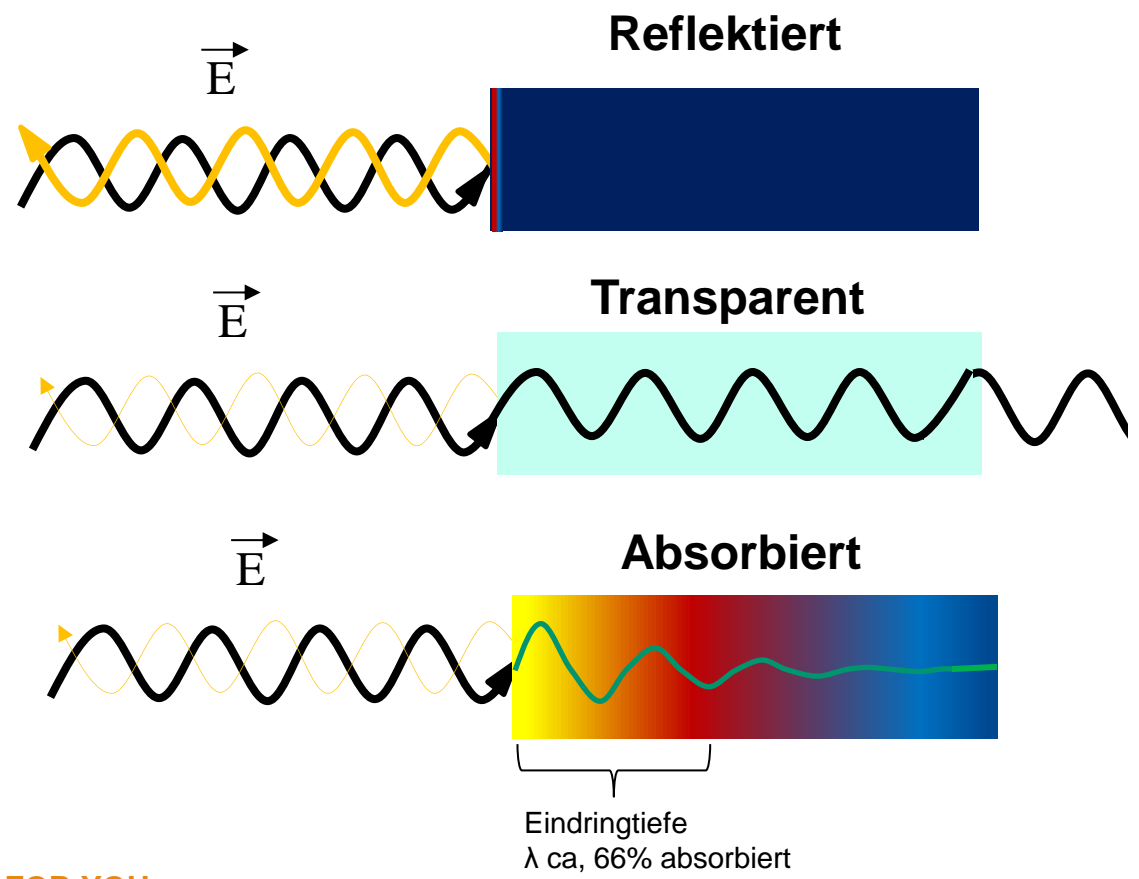
- **Physikalische Grundlagen**
- **Vorteile der Mikrowellenerwärmung – kritisch betrachtet**
- **Technik**
- **Energetische Betrachtung**
- **Trocknen**
- **Vorteilhafte Anwendungen**
- **Allgemein**
- **Keramische Industrie**
- **Fazit**

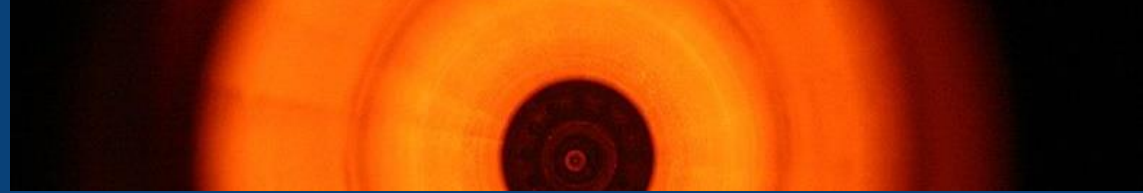


Frequenz ν	Wellenlänge λ	
0,915 GHz	31,5 cm	hohe Eindringtiefe
2,45 GHz	12,2 cm	„Standard“ Frequenz
5,80 GHz	5,17 cm	hoher Energietransfer bei dünnen Materialien

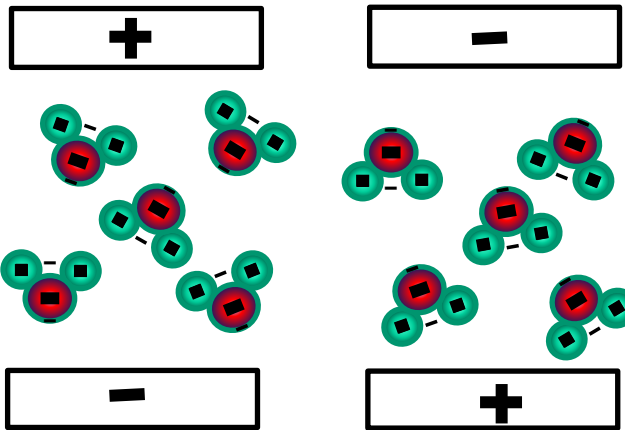
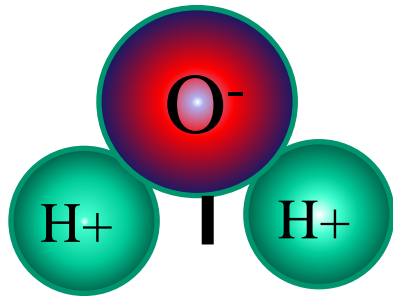


Verhalten von Materialien gegenüber Mikrowelle

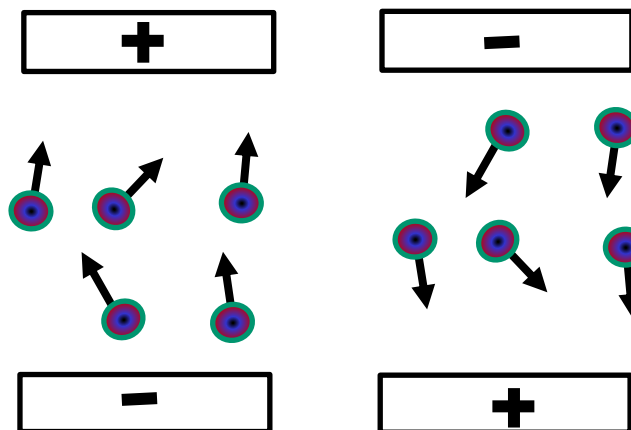
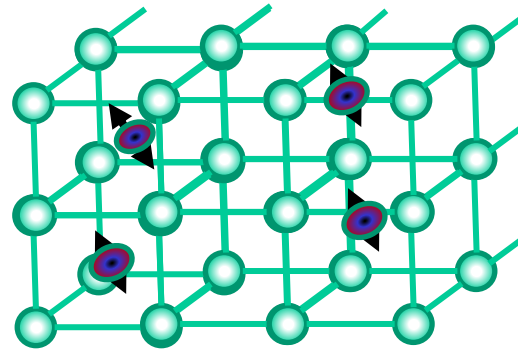




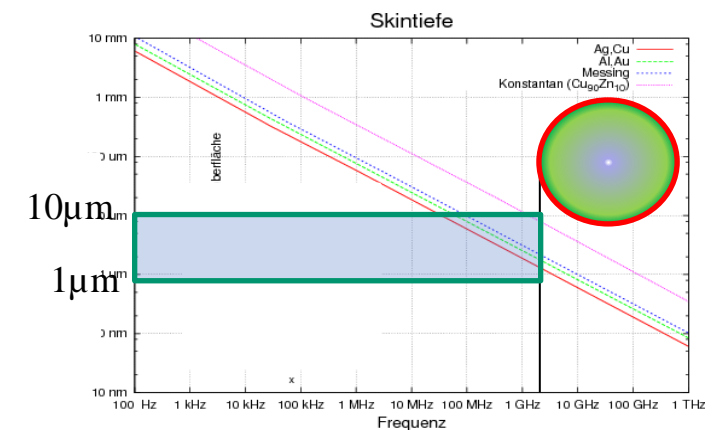
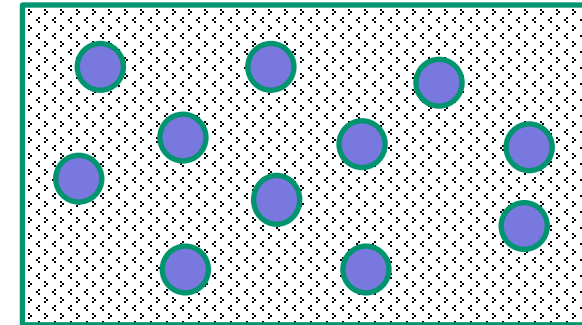
Moleküle mit Dipolcharakter Wasser, Alkohole



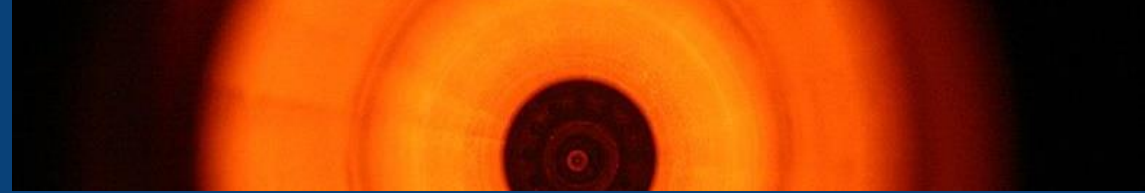
Frei bewegliche Ionen ZrO₂



Fein verteilte elektrisch leitende Partikel in transparenter Matrix Metallpulver, CFC,



©Ulm University 2012, Othmar Marti



Frequenz-Bänder für Mikrowellenerwärmung

ISM –Band (Industrial, Scientific and Medical Band)

- 0,915 GHz:** - Hohe Eindringtiefe,
geringere Energieübertragung
- 2,45 GHz:** - „Standard“ Frequenz
- 5,8 GHz:** - Hohe Energieübertragung
bei dünnen Materialien

Absorbierte Mikrowellenleistung

$$P = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' \cdot E^2 \cdot V$$

P = Leistung

f = Frequenz,

ϵ_0 = Elektrische Feldkonstante

ϵ'' = Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätskoeffizienten

E = Elektrische Feldstärke,

V = Materialvolumen

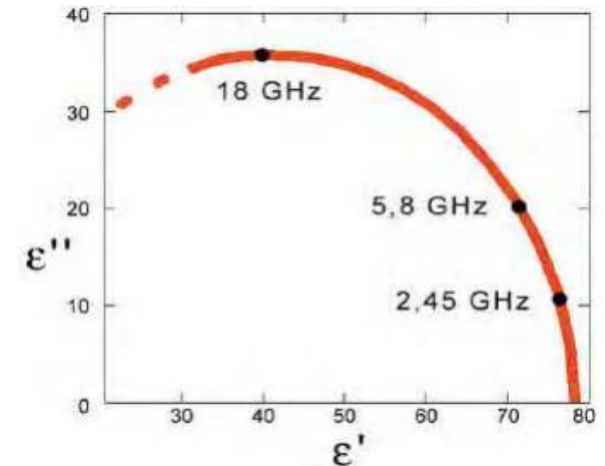
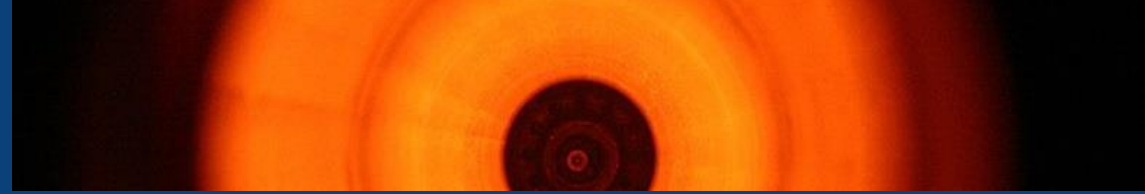


Figure 1: Cole-Cole curve for water at 25 °C

Table 1: comparison of microwave frequencies

	915 MHz		2.45 GHz		5.8 GHz	
	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
Water	78	4.3	76	10.9	71	22.9
Methanol	31.5	7	24	13.5	12	13
Brick, wet	21.7	1	22	3.5	20	4.8



$$P = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' \cdot E^2 \cdot V$$

P = Leistung
f = Frequenz,
 ϵ_0 = Elektrische Feldkonstante
 ϵ'' = Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätskoeffizienten
E = Elektrische Feldstärke,
V = Materialvolumen

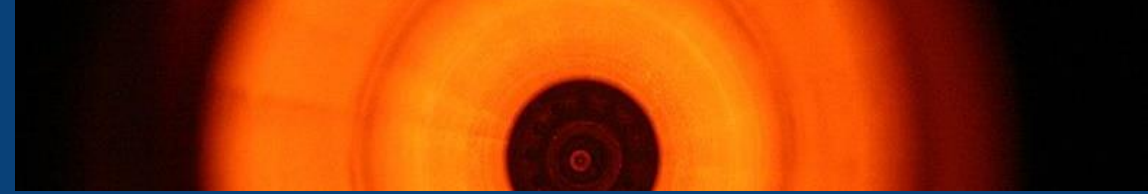
$$PD = \frac{c}{2\pi f} * \frac{\sqrt{\epsilon'}}{\epsilon''}$$

PD = Eindringtiefe
f = Frequenz,
c = Lichtgeschwindigkeit
 ϵ' = Realteil des komplexen Dielektrizitätskoeffizienten
 ϵ'' = Imaginärteil des komplexen Dielektrizitätskoeffizienten

Dielektrische Eigenschaften verschiedener Materialien

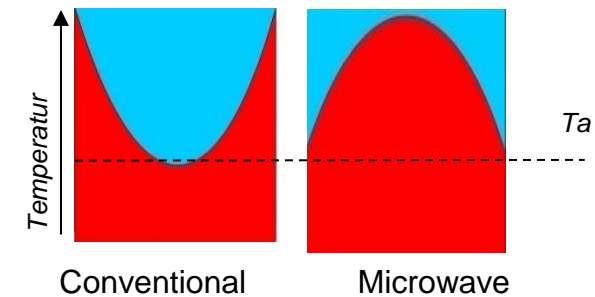
	ϵ'	ϵ''	T °C	PD
Al ₂ O ₃	9	0,004	25	1461
Al ₂ O ₃	9,46	0,01	296	599
Al ₂ O ₃	10,15	0,055	683	113
Al ₂ O ₃	11,18	0,241	1221	27
Quarzglas				
Quartz glass	3,78	0,0002	25	18937
SiC	10,4	0,9	25	7
Zirkonia	18	2,34	300	4
Zirkonia	18,8	3,38	500	3
Zirkonia	22,3	8,25	800	1
PA	2,9	0,033	25	100
PE	2,3	0,0026	25	1136
PVC	2,9	0,016	25	107
PTFE	2.1	0.0006	25	4700

	ϵ'	ϵ''	T °C	PD
Pflanzenöl				
Vegetable oil	2	0,2	20	14
Wasser / Water	77,4	9,2	25	1,87
Wasser / Water	69,4	4,9	50	3,3
Wasser / Water	62,3	2,6	75	5,9
Wasser (gefroren)				
Water (frozen)	3,2	0,003	-12	1162
Ethanol	8	7,5	25	0,8
Methanol	24	13,5	25	0,7
Propanol	5	3,5	25	1
Holz / Wood	4	0,88	25	4,4
Borosilikatglas				
Boronsilicateglass	4	0,0016	25	2794

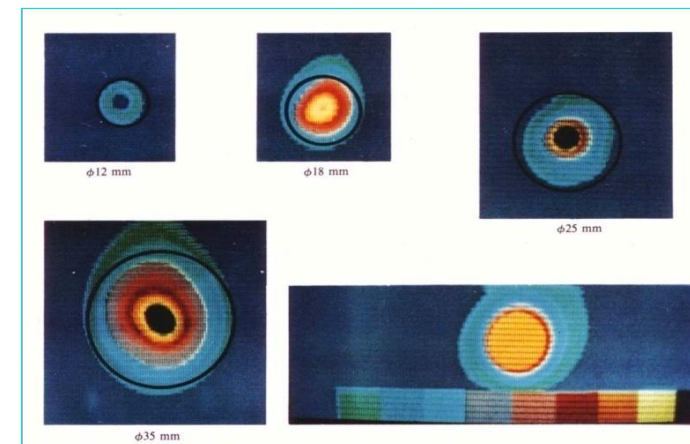


- **Schnelles heizen !**
- **Inverses Temperaturprofil !**
- **Gleichmäßiges Aufheizen ?**
- **Hohe Effektivität da nur das Produkt aufgeheizt wird !?**
- **Die Wärme breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus !**
- **Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit können gut aufgeheizt werden !!**
- **Kein Aufheizen der Anlage nötig !**
- **Leicht in kontinuierliche Prozesse integrierbar !**

Inverse Temperature Profile



Heating food from center to the corners

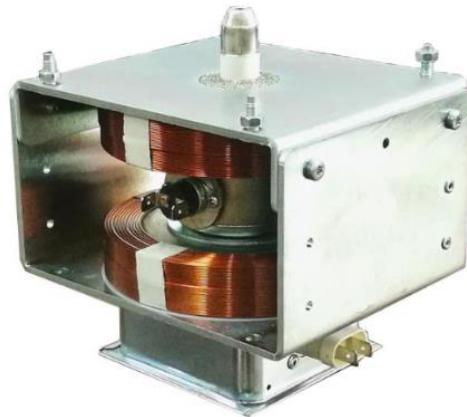




Vergleich von 2,45 GHz Magnetrons mit unterschiedlicher Leistung



20 kW Magnetron
0,915 GHz
ohne Elektromagnet



6 kW Magnetron
Wasserkühlung
Zirkulator nötig
Preis ca. 35 fache des
800W Magnetrons
je kW Leistung
ca. 5 facher Preis als bei 800W



800 W Magnetron
Luftkühlung
Kein Zirkulator nötig
Kleiner Preis da Massenprodukt



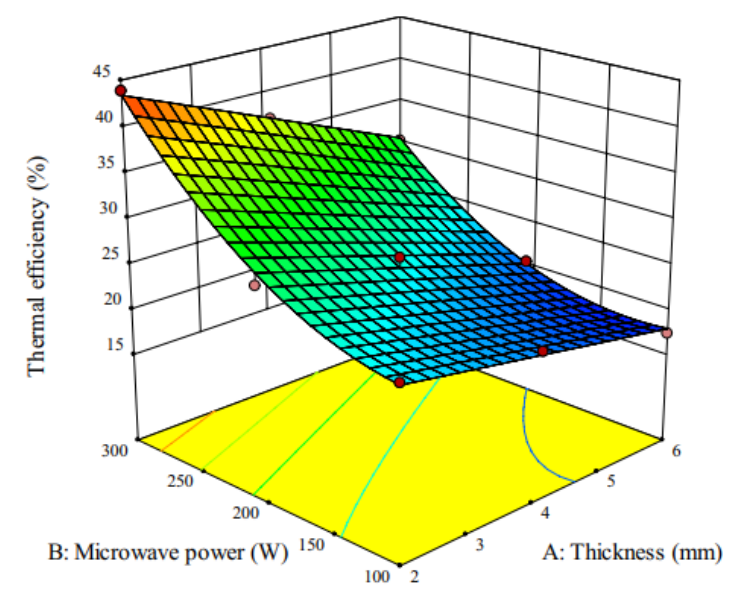
Die Energieeffizienz der Mikrowellenerwärmung im Vergleich

Effizienz des Magnetrons 60% - 65% *1

MF/HF Generator	85% - 95%* 2
E-Motor synchron	90% - 94%,
asynchron	75% - 80%
E-Auto	64%
Dieselmotor	45%
Benziner	30%-35%
Gasbrennwertheizung/ Rekuperatorbrenner	95%

*1 ohne Energie für Kühlung

*2 nur Generator ohne Kühlung, Spulenverluste



scientific reports
OPEN Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices
2023

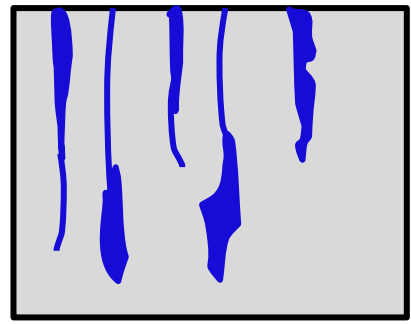
Faustregel: 1 Liter Wasser verbraucht 1kWh =3600 KWs
 $1\text{kg} \cdot (4,2 \text{ kWs/kgK} \cdot 80\text{K} + 2200\text{kWs}) = 2536 \text{ kJs}$
 $3600/\text{kWs} \cdot 65\% = 2340\text{kJs}$

Preisvergleich

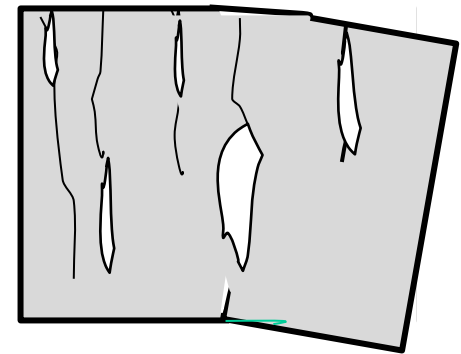
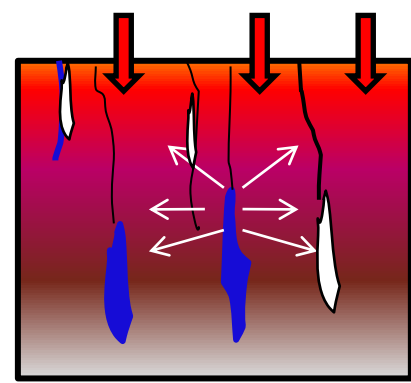
Gaspreis	9,00 ct/kWh Priv.
CO2 Steuer 2023	0,54 ct/kWh
Strompreis 2022	20,3 ct/kWh



Zu Beginn des
Trocknens

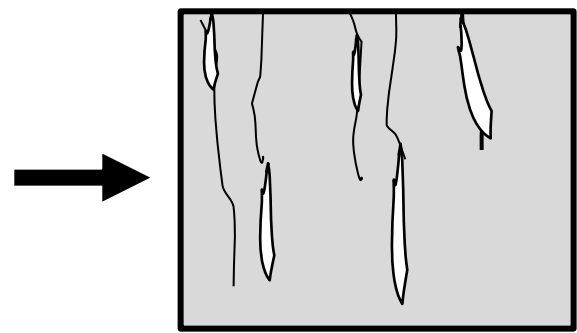
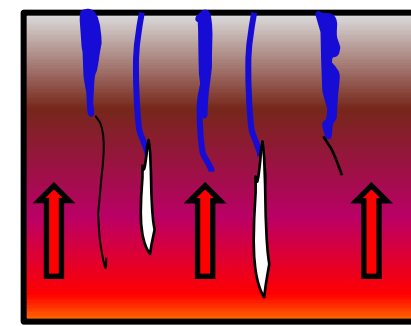


conventional
drying



Nach dem Trocknen

Microwave
drying



Der Temperaturgradient ist von innen nach außen gerichtet. Der Partialdruck des zu verdampfenden Fluids ist innen höher als an der Oberfläche dadurch wird der Transport zur Oberfläche beschleunigt. Dadurch bleibt die Oberfläche bis zum Ende des Trockenprozesses feucht und durchlässig



Energieübertragung/ Trocknungsleistung bei höheren Mikrowellenleistungen durch Dampfbildung

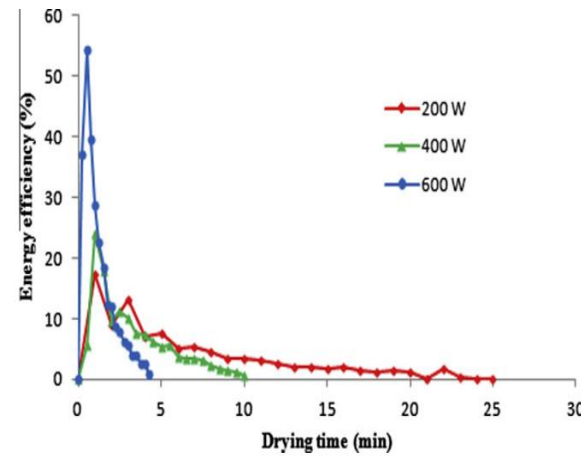
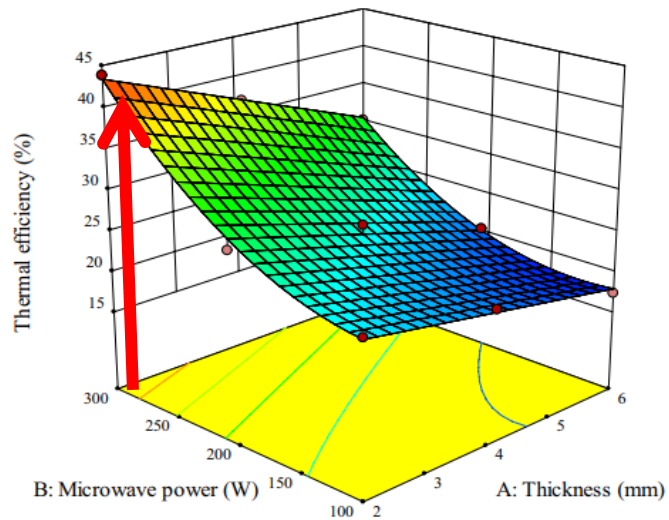
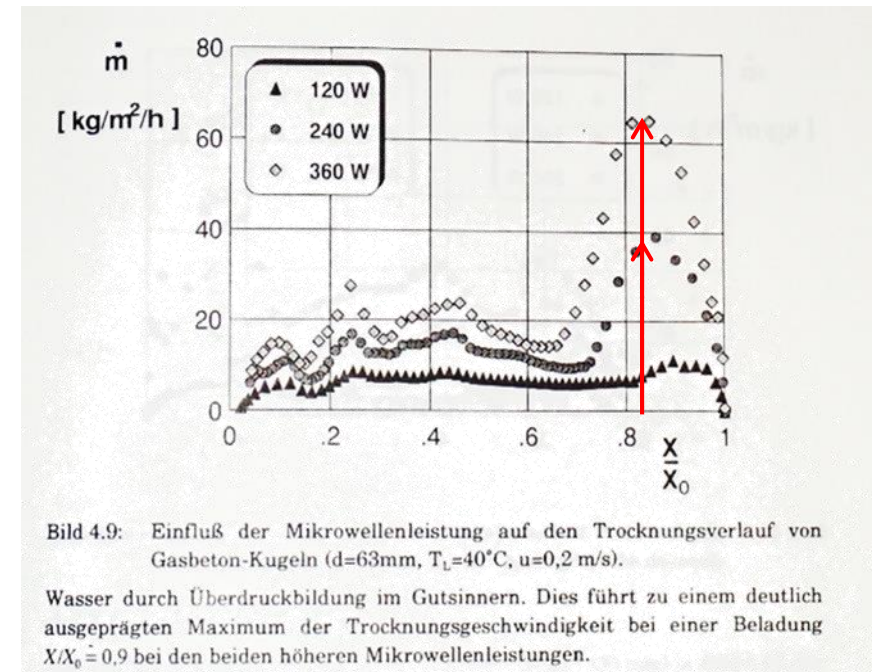


Figure 6 Energy efficiency versus drying time for microwave

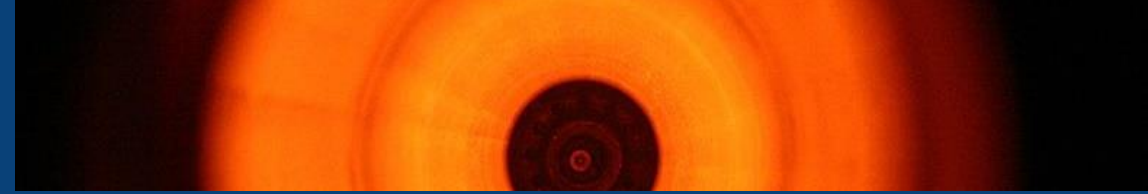


Über das Trocknungsverhalten von Einzelkörpern bei der Mikrowellentrocknung
Dipl. Ing. Achim Stammer VDI Forschungsbericht Reihe 3: Verfahrenstechnik Nr.272

scientific reports

OPEN Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices
2023

Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices Mohammad Zarein a, , Iran b Department of Agricultural Machinery Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, April 2013



MDBT 18,9+46,2 Mikrowellenbandtrockner

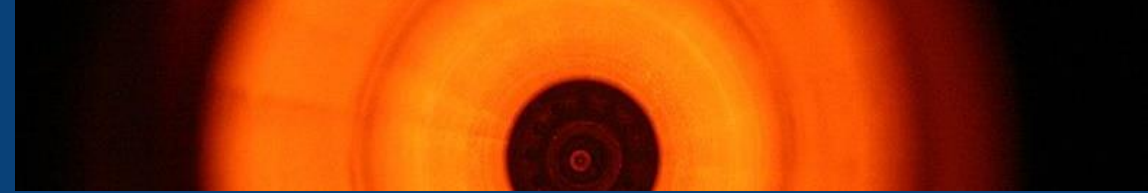


Trocknen von Aerogelen

Hohe Trocknungsgeschwindigkeit,
platzsparend, Dampfdruck spielt
für Produkt keine Rolle



- Mikrowellenleistung: 18,9 kW
- Magnetronen: 21
- Beheizte Länge: 7 m
- Bandbreite 400 mm
- Heißluft Zirkulation 46,2 kW



MDBT 70+24 Mikrowellenbandtrockner für Faserisolation

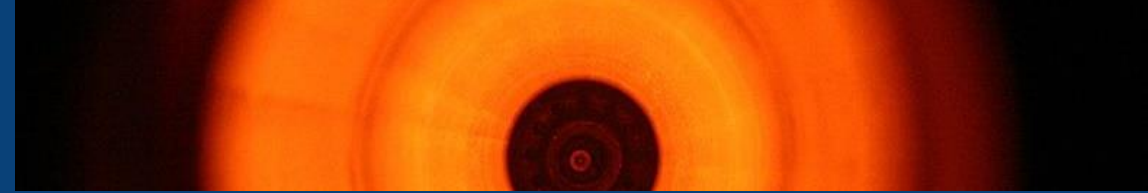


Technische Daten

- Mikrowellenleistung: 70.0 kW
- Magnetrons: 88
- Leistung Warmluft: 24 kW
- Beheizte Länge: ca. 10 m
- Transportbandbreite: 500 mm



Schnelle Trocknung von Wärmeisolation



Anwendung von Mikrowellentrocknung und positive Nebeneffekte In der Lebensmittel Verpackungsindustrie und bei Restaurierungen

**Früchte Farbe bleibt erhalten
Schnellkochreis**



**Oberfläche platzt durch Dampfdruck
auf. Reduzierung der Kochzeit auf
<5 min → Energieeinsparung!!**

**Hochwertige sterile
Flaschenkorken**



**Korken werden schnell
auf 80°C erhitzt sterilisiert**

**Trocknen von Büchern
nach Hochwasser
Trocknen von Holzteilen antiker Schiffe**



**Buchseiten verkleben beim
Trocknen nicht.
Schnelle schonende Trocknung bei**

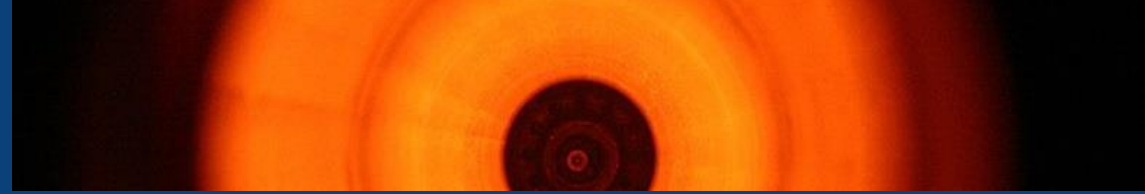


MKT 6,4-Mikrowellen-Kammertrockner

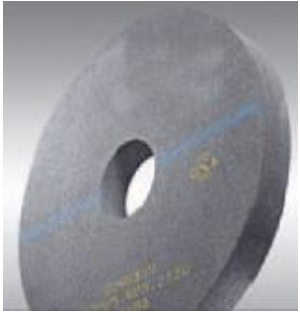
Microwave power: 6.4 kW
Number of magnetrons: 8
Chamber volume: appr. 3.5 m³
Door size: 1600 x 1300 mm

**Stark erhöhte Produktivität
durch extrem verkürzte
Trocknungszeiten,
Materialeinsparung (Formen)**





Keramisch gebundene
Schleifscheiben



MKT Mikrowellen-Kammertrockner für Keramik



Technische Daten

- Mikrowellenleistung: 30.0 kW
- Magnetrons: 38
- Nutzraumvolumen 21 m³
- Türe 1400mm x 2300mm

Sanitärware



Technische Daten

- Mikrowellenleistung: 25.0 kW
- Magnetrons: 32
- Nutzraumvolumen 14 m³
- Türe 1400mm x 1200mm



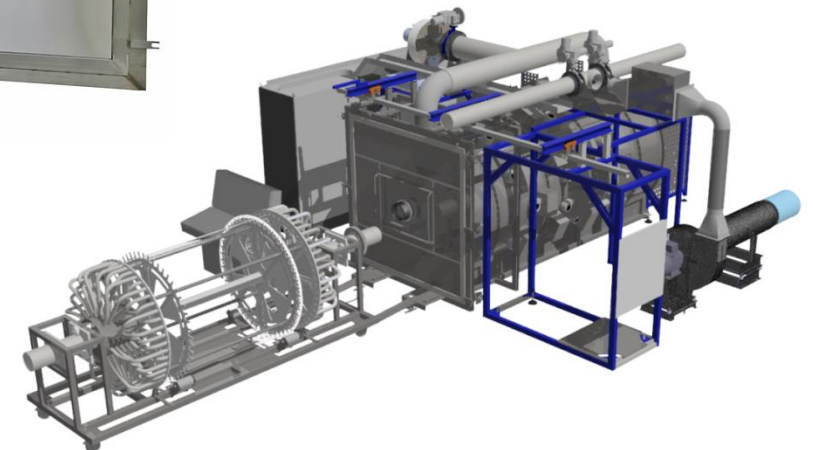
MKRT-32,4-2000/4000/70 Mikrowellen- Revolver-Trockner

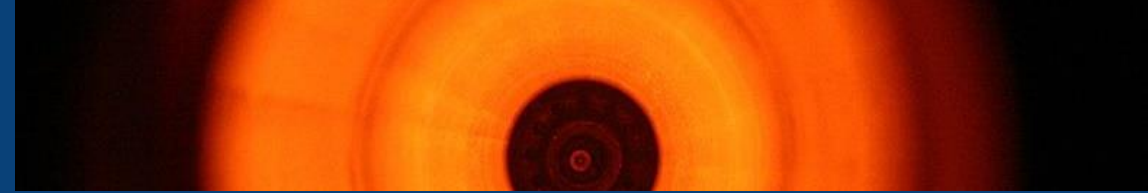
Trocknen von
keramischen Filterpatronen



Technische Daten

- Mikrowellenleistung: 32,4 kW
- Heißluft 40 kW
- Magnetrons: 38
- Nutzraumvolumen 14,4 m³





MDBT 48+25 Mikrowellenbandtrockner für Dieselruß-Partikelfilter



Technische Daten

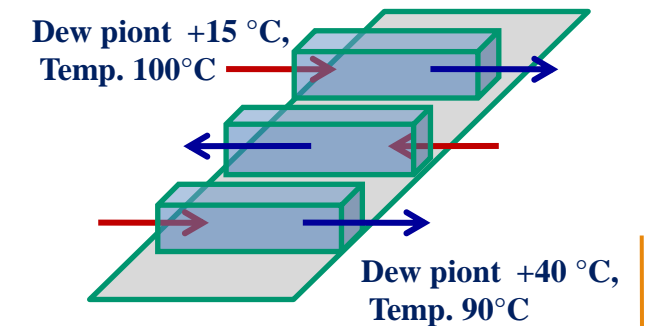
- Mikrowellenleistung: 48.0 kW
- Magnetrons: 60
- Leistung Warmluft: 25 kW
- Beheizte Länge: ca. 10 m
- Transportbandbreite: 500 mm

- Verzug < 1mm kein Ausschuss
- Energie Einsparung 50%
- Zeitersparnis 65 %

Luftführung

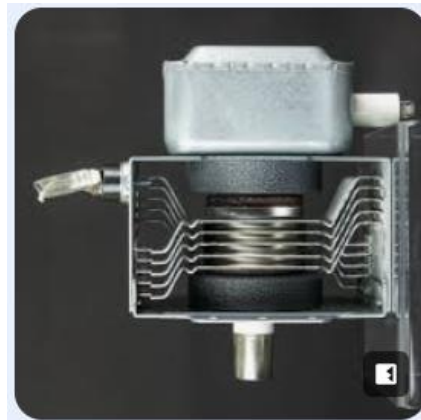
zur Abführung der Feuchte

- Trocknung: 40kg/h
- Heißluft Heizung: 25 kW
(800m³/h mit 100°C)
- Taupunkt Gas ein +15 °C
- Taupunkt Gas aus +41°C





Energieübertragung/ Trocknungsleistung bei höheren Mikrowellenleistungen durch Dampfbildung



**800 W Magnetron
Luftkühlung**

Luftkühlung kann bedingt zur Abführung der Feuchte verwendet werden. 1m³/min oder 60m³/h mit 300W Verlust im 900W Magnetron wir die Kühlluft um ca. 15 °C Temperaturerhöhung Ca. 17g Wasser können bei Erwärmung von 15°C auf 30°(Feuchte 100%) aufgenommen werden. 800W Mikrowellenleistung über eine Stunde entspricht ca. 800 g verdampftes Wasser. Um es abzuführen wären 800g/h /17g/m³ = 47m³ nötig.

scientific reports

OPEN Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices 2023

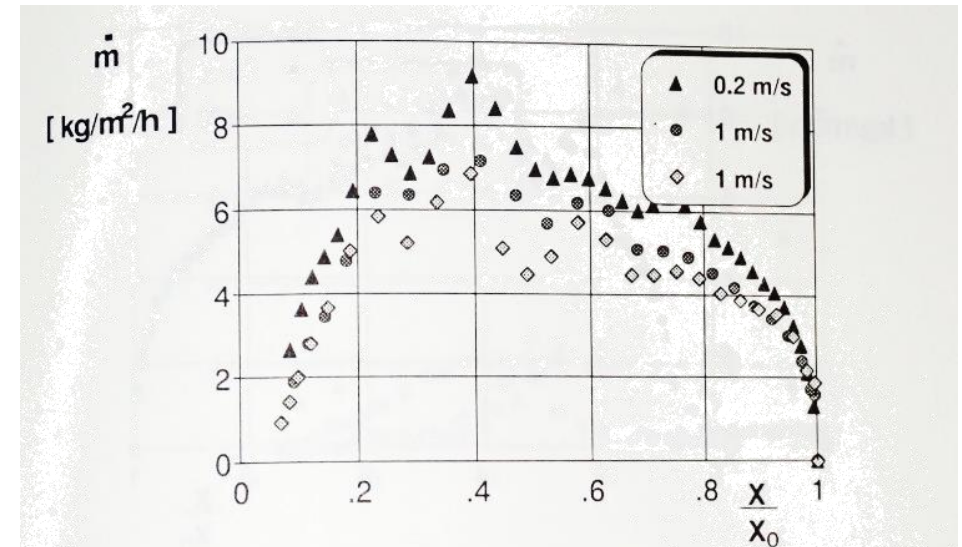
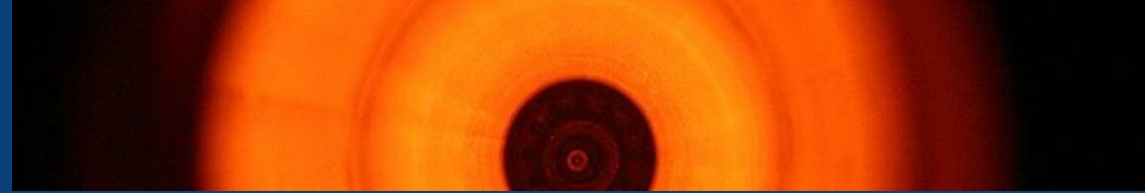


Bild 4.5: Einfluß der Anströmgeschwindigkeit auf den Trocknungsverlauf von Aerolith 5 - Zylindern (d=40 mm, P=120W, T_L=40°C).

Da die Energiezufuhr durch Mikrowellen ein bis zwei Größenordnungen größer ist als die durch Konvektion, sind Temperatur und Anströmgeschwindigkeit der Luft von untergeordneter Bedeutung (solange genug trockene Luft zum Abtransport des Dampfes zur Verfügung steht). Dies gilt in gleichem Maße für Kugeln, weshalb in Kap. 4.2 keine weiteren Beispiele für den Einfluß der Trocknungsluft gezeigt

Über das Trocknungsverhalten von Einzelkörpern bei der Mikrowellentrocknung
Dipl. Ing. Achim Stammer VDI Forschungsbericht Reihe 3: Verfahrenstechnik Nr.272



- **Mikrowellen lassen sich bei der Trocknung in vielen Fällen einsetzen**
 - **schnelle Trocknung hochporöse Materialien → Isolationsplatten, Filterkerzen**
 - **Verminderung von Ausschuss → Dieselruß - Partikelfilter, Katalysatorträger**
 - **(extrem)verkürzte Trocknungszeiten → keramisch gebundene Schleifscheiben
Sanitärkeramik**
- **Zur Abführung der Feuchte ist eine Kombination mit Heißluft (Warmluft) sinnvoll**
- **Der Energiebedarf bei Mikrowellentrocknung beträgt ca. kWh je Kilogramm Wasser**
- **Kosten hängen von der Verfügbarkeit von preisgünstigen Strom ab (Photovoltaik,..)**
- **Die Einsparung an Energie hängt von bisher verwendeter Trocknertechnologie ab**