

Caroline Röhr, Anorganische Chemie, Universität Freiburg

Zur Chemie klassischer  
Silicatkeramik

Vom Ton

zur Tasse



Einleitung, Übersicht

Rohstoffe

Aufbereitung der Rohstoffe, Massen-Herstellung

Formgebung

Trocknen, Brennen

Eigenschaften, Keramikarten

Zusammenfassung

Literatur

## Einleitung, Übersicht

Rohstoffe

Aufbereitung der Rohstoffe, Massen-Herstellung

Formgebung

Trocknen, Brennen

Eigenschaften, Keramikarten

Zusammenfassung

Literatur

# Was ist Keramik?

## Definition:

- ▶ kristalline, thermisch und chemisch stabile, nichtmetallische anorganische Festkörper
- ▶ durch Hochtemperatur-Prozesse gebrauchsfertig gemacht
- ▶ Eigenschaften durch Mikrostruktur (Gefüge) bestimmt

# Was ist Keramik?

## Definition:

- ▶ kristalline, thermisch und chemisch stabile, nichtmetallische anorganische Festkörper
- ▶ durch Hochtemperatur-Prozesse gebrauchsfertig gemacht
- ▶ Eigenschaften durch Mikrostruktur (Gefüge) bestimmt

## Einteilung nach Chemismus:

- ▶ **Tonkeramik**
  - ▶ wirtschaftlich wichtigste Gruppe
  - ▶ Hauptbestandteil  $> 20\%$  Tonerde
  - ▶ Rohstoff: feinteilige, meist feucht geformte Tone
  - ▶ umfangreiche Formgebungsmöglichkeiten
  - ▶ durch Glühen (Brennen) bei  $1000-1500^{\circ}\text{C}$  hergestellt

# Was ist Keramik?

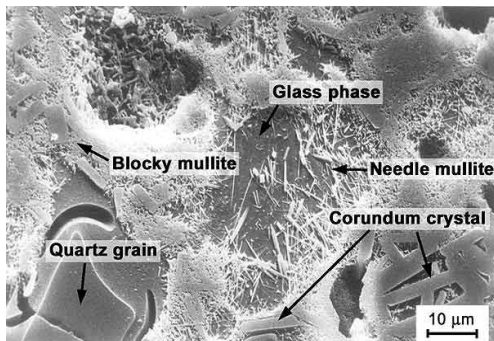
## Definition:

- ▶ kristalline, thermisch und chemisch stabile, nichtmetallische anorganische Festkörper
- ▶ durch Hochtemperatur-Prozesse gebrauchsfertig gemacht
- ▶ Eigenschaften durch Mikrostruktur (Gefüge) bestimmt

## Einteilung nach Chemismus:

- ▶ **Tonkeramik**
  - ▶ wirtschaftlich wichtigste Gruppe
  - ▶ Hauptbestandteil > 20 % Tonerde
  - ▶ Rohstoff: feinteilige, meist feucht geformte Tone
  - ▶ umfangreiche Formgebungsmöglichkeiten
  - ▶ durch Glühen (Brennen) bei 1000-1500°C hergestellt
- ▶ **Sonderkeramiken**
  - ▶ Oxidkeramik: BeO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>
  - ▶ Elektro- und Magnetkeramiken: BaTiO<sub>3</sub>, M<sup>II</sup>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (Ferrite)
  - ▶ Nichtoxidkeramiken: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, BN

## Gefüge von Tonkeramik



Bestandteile:

- ▶ Quarz-Körner ( $\text{SiO}_2$ )
- ▶ Korund-Kristalle ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- ▶ Mullit-Nadeln und -Blöcke ( $3 \text{Al}_2\text{O}_3 + 2 \text{SiO}_2$ )
- ▶ Glas ( $x \text{K}_2\text{O} + y \text{SiO}_2 + z \text{Al}_2\text{O}_3$ )

Einleitung, Übersicht

**Rohstoffe**

Aufbereitung der Rohstoffe, Massen-Herstellung

Formgebung

Trocknen, Brennen

Eigenschaften, Keramikarten

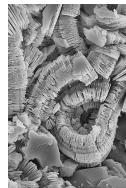
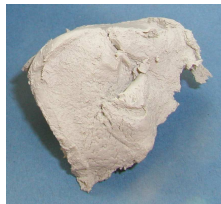
Zusammenfassung

Literatur



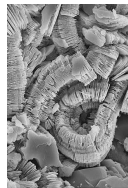
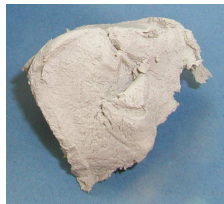
## Rohstoffe allgemein

1. Ton (Kaolinit,  $\text{Al}_2(\text{OH})_4[\text{Si}_2\text{O}_5]$ ; Illit)



## Rohstoffe allgemein

1. Ton (Kaolinit,  $\text{Al}_2(\text{OH})_4[\text{Si}_2\text{O}_5]$ ; Illit)

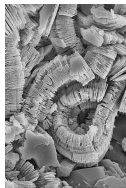
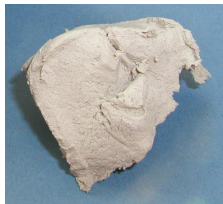


2. Flußmittel (Feldspäte, z.B.  $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ )



## Rohstoffe allgemein

1. Ton (Kaolinit,  $\text{Al}_2(\text{OH})_4[\text{Si}_2\text{O}_5]$ ; Illit)



2. Flußmittel (Feldspäte, z.B.  $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ )



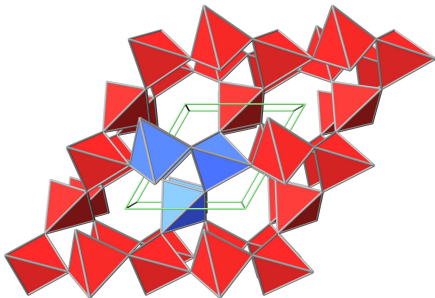
3. Magerungsmittel (Quarz,  $\text{SiO}_2$ )



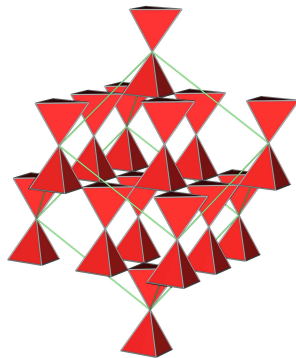
4. (ggf. Brennhilfsmittel)

### ③ Magerungsmittel: Quarz ( $\text{SiO}_2$ )

- ▶ verhindern starken Schwund beim Brennen
- ▶ Struktur:  $\text{SiO}_{4/2}$ -Tetraedergerüste



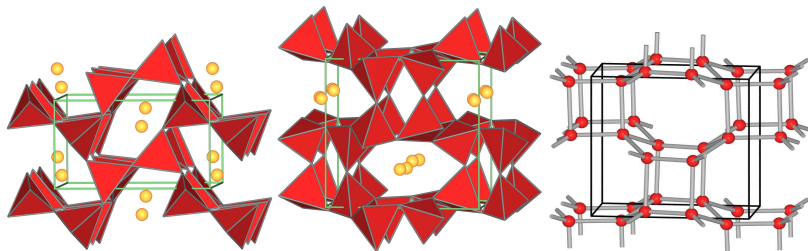
Quarz (Normaltemperaturform)



Cristobalit (> 1470°C)

## ② Flußmittel: Feldspäte

- ▶ zur Erniedrigung der Sintertemperatur
- ▶ Stoffe: **Feldspäte**, z.B. Orthoklas  $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$
- ▶ **Struktur:** Gerüstalumosilicate:  $\text{K}^+ + \underbrace{[\text{AlSi}_3\text{O}_8]^-}_{4}$

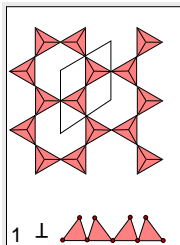


## ① Keramische Tone

keramische **Tone**  $\mapsto$  Mischung aus

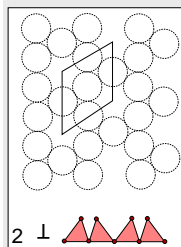
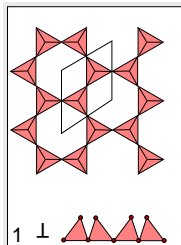
1. **Kaolinit**:  $\text{Al}_2(\text{OH})_4[\text{Si}_2\text{O}_5]$ 
  - ▶ weiss
  - ▶ sehr rein, z.B. für Porzellan: Kaolin
  - ▶ sehr dünne Blättchen (ca. 10 nm dick, einige  $\mu\text{m}$  breit)
  - ▶ dioktaedrisches T-O-Zweischichtsilicat
  - ▶ Intercalation: Quellung, Schrumpfung, Bindevormögen
  - ▶ quellfähig und bildsam
  - ▶ in der Natur häufig
  - ▶ auch synthetisch herstellbar (Kieselsäure ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) +  $\text{Al}(\text{OH})_3$ )
2. **Illit**:  $\text{K}_y(\text{H}_2\text{O})_n[\text{Al}_2(\text{OH})_2\text{Si}_{4-y}\text{Al}_y\text{O}_{10}]$ 
  - ▶  $y = 0.7$  bis  $0.9$
  - ▶ gelb, rot oder braun, durch Fe auf Al-Plätzen
  - ▶ T-O-T-Dreischichtsilicat, dioktaedrisch

## Strukturen von Schichtsilicaten



- ▶ Schicht  $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$

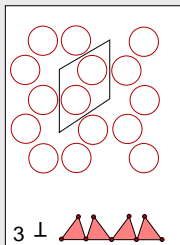
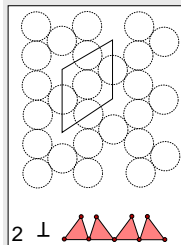
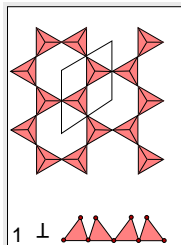
## Strukturen von Schichtsilicaten



- ▶ Schicht  $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$
- ▶  $[\text{SiO}_3\text{O}_2]^{2-}$

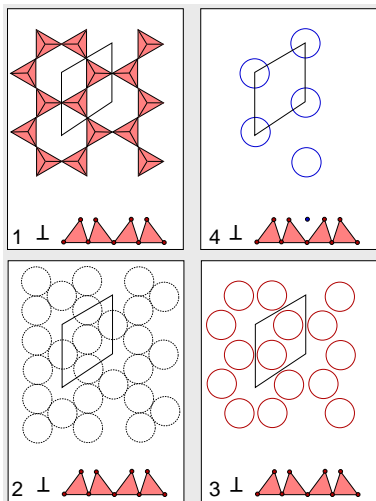


## Strukturen von Schichtsilicaten



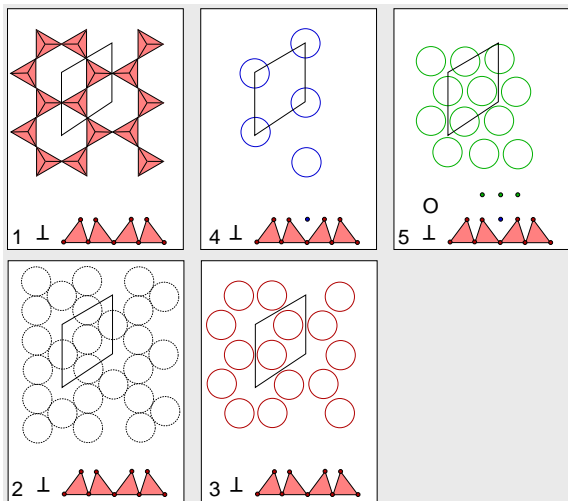
- ▶ Schicht  $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$
- ▶  $[\text{SiO}_3\text{O}_2]^{2-}$

## Strukturen von Schichtsilicaten



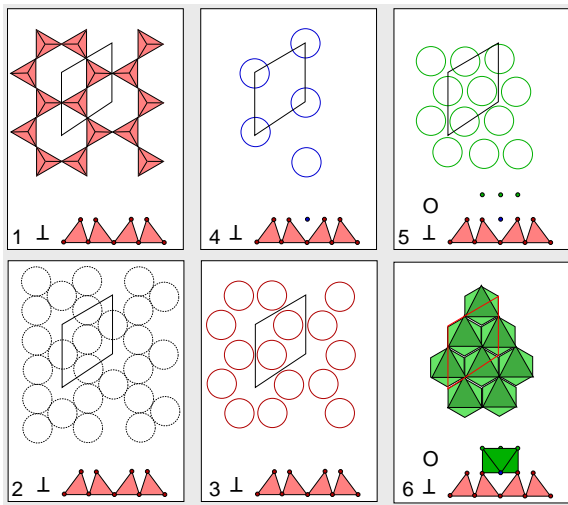
- ▶ Schicht  $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$
- ▶  $[\text{SiO}_3\text{O}_2]^{2-}$
- ▶  $\text{OH}^-$  in Lücken

## Strukturen von Schichtsilicaten



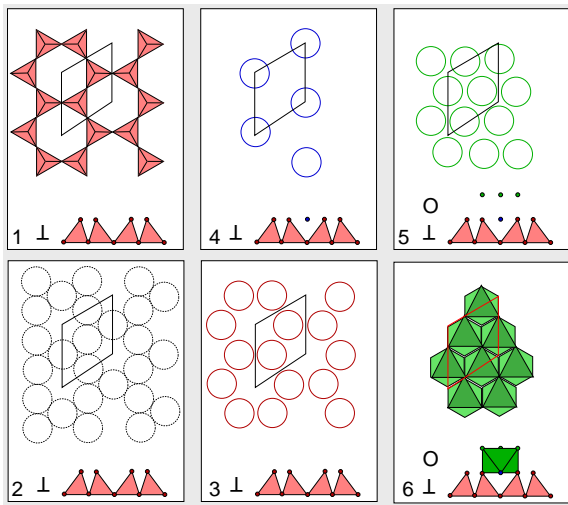
- ▶ Schicht  $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$
- ▶  $[\text{SiO}_3\text{O}_2]^{2-}$
- ▶  $\text{OH}^-$  in Lücken
- ▶ zweite  $\text{OH}^-$ -Schicht

## Strukturen von Schichtsilicaten



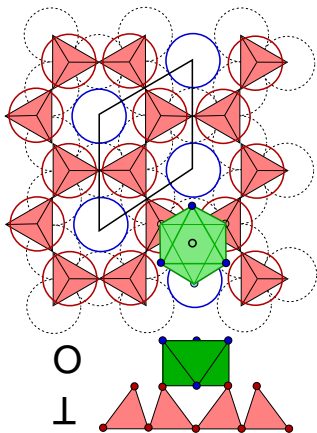
- ▶ Schicht  $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$
- ▶  $[\text{SiO}_3\text{O}_2]^{2-}$
- ▶  $\text{OH}^-$  in Lücken
- ▶ zweite  $\text{OH}^-$ -Schicht
- ▶ 3 Oktaeder pro Formeleinheit

## Strukturen von Schichtsilicaten

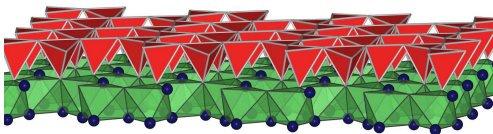


- ▶ Schicht  $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$
- ▶  $[\text{SiO}_3\text{O}_2]^{2-}$
- ▶  $\text{OH}^-$  in Lücken
- ▶ zweite  $\text{OH}^-$ -Schicht
- ▶ 3 Oktaeder pro Formeleinheit
- ▶ davon 2 mit  $\text{Al}^{3+}$  besetzt
- ▶  $\text{Al}_2(\text{OH})_4[\text{Si}_2\text{O}_5]$
- ▶ Gesamtstruktur

















## Strukturen von Schichtsilicaten



- ▶ Tetraederschicht:  $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$
- ▶  $1 \times \text{OH}^-$  in den Lücken zwischen den Tetraederspitzen
- ▶ dichte Kugelschicht A
- ▶  $3 \times \text{OH}^-$  (Schicht B)
- ▶ 2 Al in Oktaederlücken
- ▶ Summe:  $\text{Al}_2(\text{OH})_4[\text{Si}_2\text{O}_5]$



## Übersicht Schichtsilicate

				
				
				
				
tri- oktaedrisch	Serpentin	Talk	Phlogopit	Chlorit
di-	Kaolinit	Pyrophyllit	Muskovit	Sudoit
	Tonminerale		Glimmer	
	kationenreich	kationenarm		
	2-Schicht-S.	3-Schicht-S.	4-Schicht-S.	

## Übersicht Schichtsilicate

	nicht hydratisiert		hydratisiert	
T	dioktaedrisch	trioktaedrisch	dioktaedrisch	trioktaedrisch
Si	Kaolinit $Al_2[Si_2O_5(OH)_4]$	Serpentin $Mg_3[Si_2O_5(OH)_4]$	Hydrohalloysit $Al_2[Si_2O_5(OH)_4] \cdot (H_2O)_2$	-
Si	Pyrophyllit $Al_2[Si_4O_{10}(OH)_2]$	Talk $Mg_3[Si_4O_{10}(OH)_2]$	Montmorillonit $Mg_{0.33}Al_{1.67}[Si_4O_{10}(OH)_2] \cdot (Ca, Na)_x(H_2O)_n$	Saponit $(Mg, Fe)_3[Si_4O_{10}(OH)_2] \cdot (Ca, Na)_x(H_2O)_n$
Si/Al	Glimmer		Vermiculit-Reihe	
	Muskovit $KAl_2[AlSi_3O_{10}(OH)_2]$	Biotit $K(Mg, Fe)_3[AlSi_3O_{10}(OH)_2]$	Muskovit (Illit) $(Mg, Al, Fe)_2[AlSi_3O_{10}(OH)_2] \cdot (Mg, Ca, K)_x(H_2O)_n$	$(Mg, Fe)_3[AlSi_3O_{10}(OH)_2] \cdot (Mg, Ca)_x(H_2O)_n$
Si	-	-	-	-
Si/Al	Sudoit $Al_2[AlSi_3O_{10}(OH)_2] \cdot Al_{2.33}(OH)_6$	Chlorit $(Mg, Fe, Al)_3[(Al/Si)_4O_{10}(OH)_2] \cdot (Mg, Fe)_3(OH)_6$	-	-



Einleitung, Übersicht

Rohstoffe

**Aufbereitung der Rohstoffe, Massen-Herstellung**

Formgebung

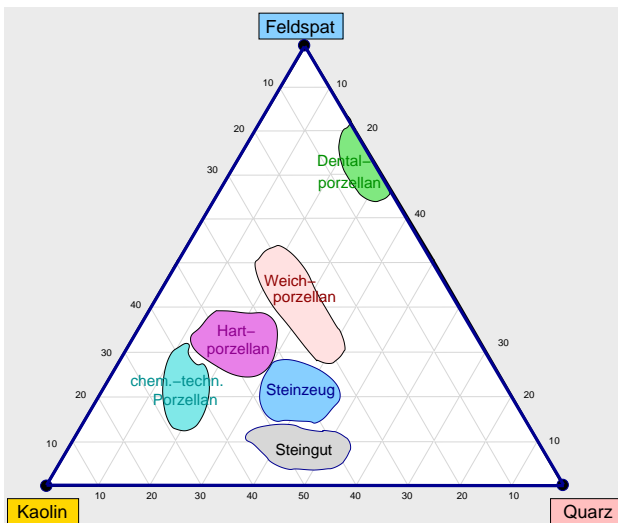
Trocknen, Brennen

Eigenschaften, Keramikarten

Zusammenfassung

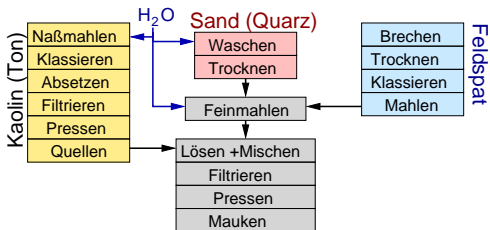
Literatur

## Zusammensetzung der 'Massen'

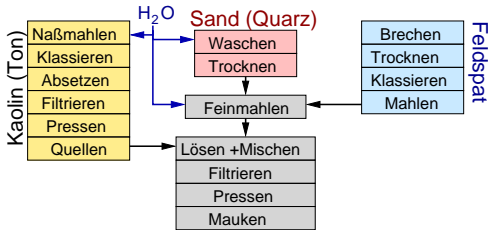


Lagediagramm Kaolin - Quarz - Feldspat

## Aufbereitung der Rohstoffe

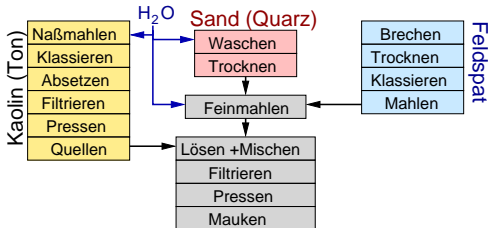


## Aufbereitung der Rohstoffe



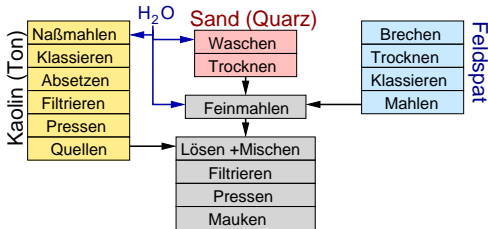
- Kaolin-Abbau im Tagebau

## Aufbereitung der Rohstoffe

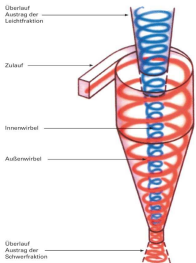


- ▶ Kaolin-Abbau im Tagebau
- ▶ Zerkleinern: Brecher, Mühlen

# Aufbereitung der Rohstoffe

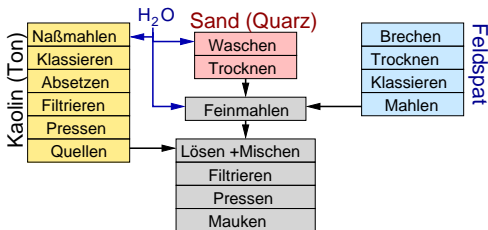


Prinzip der Wirkungsweise des Hydrozyklons



- ▶ Kaolin-Abbau im Tagebau
- ▶ Zerkleinern: Brecher, Mühlen
- ▶ Klassieren (Korngrößen:  $< 40\mu\text{m}$ )
  - ▶ Schlämmverfahren
  - ▶ Hydrozyklone

## Aufbereitung der Rohstoffe



- ▶ Kaolin-Abbau im Tagebau
- ▶ Zerkleinern: Brecher, Mühlen
- ▶ Klassieren (Korngrößen:  $< 40\mu\text{m}$ )
  - ▶ Schlämmverfahren
  - ▶ Hydrozyklone
- ▶ Trocknen
  - ▶ Kläreindicker
  - ▶ Filterpressen
- ▶ Mischen: in Mühlen, Knetter usw....

Einleitung, Übersicht

Rohstoffe

Aufbereitung der Rohstoffe, Massen-Herstellung

**Formgebung**

Trocknen, Brennen

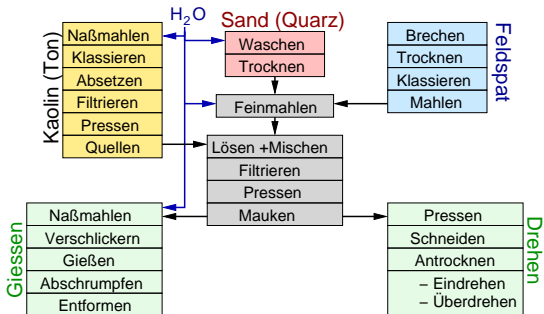
Eigenschaften, Keramikarten

Zusammenfassung

Literatur

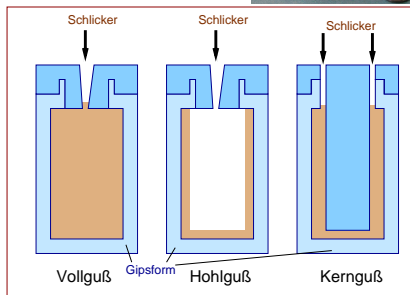


# Formgebungsverfahren



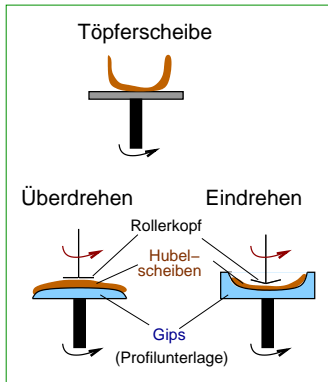
- ▶ Schlickergiessen
- ▶ Plastische Formgebung (Drehen und Rollen)
- ▶ Extrudieren
- ▶ Isostatisches Pressen
- ▶ ...

## Formgebungsverfahren I: Giessen



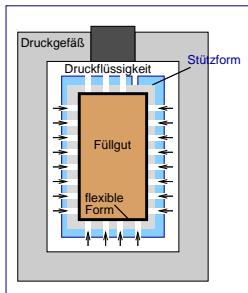
- ▶ flüssigere Gießmassen: ca. 33-36%  $H_2O$
- ▶ Vollguß, Hohlguß, Kernguß (je nach Produkt)
- ▶ Gipsformen, entziehen dem Schlicker Wasser
- ▶ Trocknungsschrumpfung (Grünling leicht aus Form ablösbar, 'Abschrumpfen')

## Formgebungsverfahren II: Plastische Formgebung (Drehen und Rollen)



- ▶ festere Massen: 22-24% H<sub>2</sub>O
- ▶ Ausnutzung der 'Bildsamkeit' (Form bleibt bestehen)
- ▶ nur für rotationssymmetrische Teile
- ▶ von Hand: Töpferscheibe
- ▶ großtechnisch:
  - ▶ Strangpressen
  - ▶ Abschnitte (Hubel) passender Größe
  - ▶ Drehverfahren (Rollerkopf schneller als Form)
    - ▶ 'Überdrehen' von Flachteilen (z.B. Teller)
    - ▶ 'Eindrehen' von Hohlteilen (Tassen, Schüsseln)

## Formgebungsverfahren III: Weitere Verfahren



Isostatisches Pressen

- ▶ Strangpressen/Extrudieren
- ▶ Pulververdichtung
  - ▶ Massen mit 1-4 % H<sub>2</sub>O
  - ▶ billig, da Trockenverarbeitung
  - ▶ Pressen
  - ▶ isostatisches Pressen:
- ▶ Spritzguss
  - ▶ für kompliziertere Teile (Elektrokeramik)
- ▶ Foliengiessen
- ▶ ...

Einleitung, Übersicht

Rohstoffe

Aufbereitung der Rohstoffe, Massen-Herstellung

Formgebung

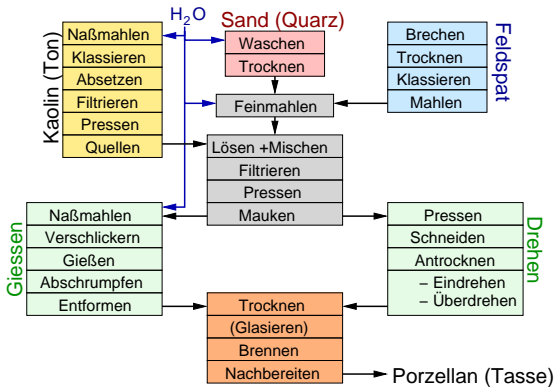
**Trocknen, Brennen**

Eigenschaften, Keramikarten

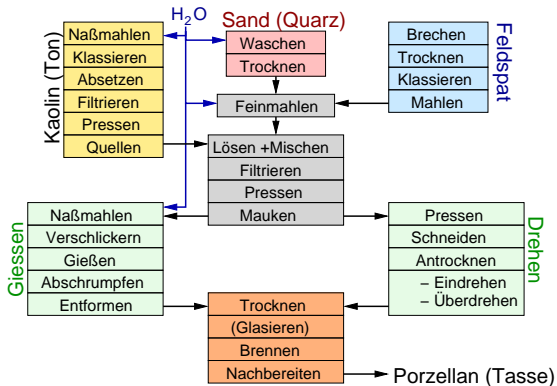
Zusammenfassung

Literatur

# Trocknung



# Trocknung



- ▶ Entfernung von H<sub>2</sub>O oder organischer Bindemittel
- ▶ sehr langsam (bis zu 24 h, je nach Scherbendicke)
- ▶ Gefahr: Rißbildung
- ▶ Trockenschwund !

## Praxis des Brennens, Öfen

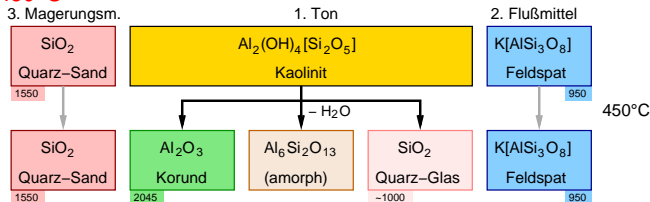


- ▶ Maximaltemperaturen: 1200 bis 1400°C
- ▶ typische Schrumpfung ca. 20%
- ▶ früher: einfache Rundöfen/Muffeln
- ▶ heute kontinuierliche Tunnelöfen
  - ▶ bis 150 m lang
  - ▶ 'Durchfahrt' des Brennguts auf Wagen (Verweilzeit: bis zu 100 h)
- ▶ auch kontinuierliche Ringöfen
  - ▶ bewegliches Feuer



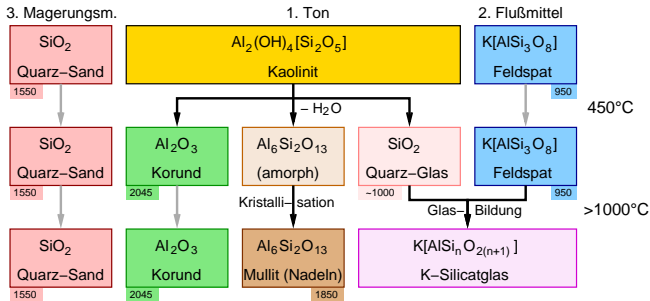
## Chemische Prozesse beim Brennen

bis ca. 450°C



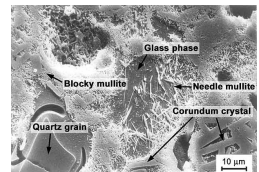
- ▶ ca. 20% Volumenverlust (Schrumpfung)
- ▶  $\text{Al}_2(\text{OH})_4[\text{Si}_2\text{O}_5] \xrightarrow[ -\text{H}_2\text{O}]{450^\circ\text{C}} \underbrace{\text{Al}_2\text{O}_3}_{\text{Korund, kris.}} + \underbrace{3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2}_{\text{Mullit, amorph}} + \underbrace{\text{SiO}_2}_{\text{Glas, amorph}}$
- ▶ Mullit ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 3 \text{Al}_2\text{O}_3 + 2 \text{SiO}_2$ ) als amorphe Phase

# Chemische Prozesse beim Brennen

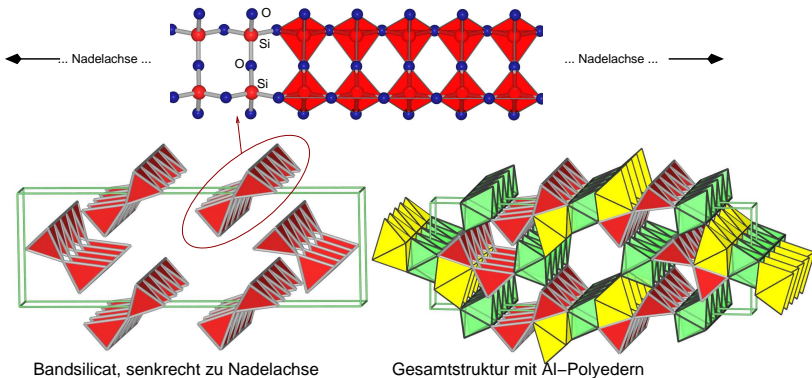


ab ca. 1000°C

- ▶ Feldspatverflüssigung: Feldspat (Flußmittel) löst alle amorphen Anteile ( $\text{SiO}_2$ -Glas + 'Mullit')
- ▶ Mullit kristallisiert Nadel-förmig (verfilzte Nadeln)
- ▶ K-Alumosilicat-Gläser 'verkitten' die Kristallite



# Mullit $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$



- ▶ Bandsilicat:  $\text{Al}_6\text{O}_8[\text{Si}_2\text{O}_5]$
- ▶  $\text{Al}^{3+}$ :
  - ▶ Oktaeder (grün, CN=6)
  - ▶ trigonalen Prismen (gelb, CN=5)
- ▶ nur Silicat und Gesamtstruktur



Einleitung, Übersicht

Rohstoffe

Aufbereitung der Rohstoffe, Massen-Herstellung

Formgebung

Trocknen, Brennen

**Eigenschaften, Keramikarten**

Zusammenfassung

Literatur

## Allgemeine Eigenschaften von Silicatkeramik

- ▶ **mechanisch:**
  - ▶ hohe Druckbelastbarkeit
  - ▶ niedrige Zugbelastbarkeit
  - ▶ sprödes Verhalten

## Allgemeine Eigenschaften von Silicatkeramik

- ▶ **mechanisch:**
  - ▶ hohe Druckbelastbarkeit
  - ▶ niedrige Zugbelastbarkeit
  - ▶ sprödes Verhalten
- ▶ **thermisch:**
  - ▶ hohe Temperatur-Beständigkeit
  - ▶ niedrige Temperatur-Wechselbeständigkeit
  - ▶ schlechte thermische Leitfähigkeit

## Allgemeine Eigenschaften von Silicatkeramik

- ▶ **mechanisch:**
  - ▶ hohe Druckbelastbarkeit
  - ▶ niedrige Zugbelastbarkeit
  - ▶ sprödes Verhalten
- ▶ **thermisch:**
  - ▶ hohe Temperatur-Beständigkeit
  - ▶ niedrige Temperatur-Wechselbeständigkeit
  - ▶ schlechte thermische Leitfähigkeit
- ▶ **elektrisch:**
  - ▶ schlechte elektrische Leitfähigkeit

## Allgemeine Eigenschaften von Silicatkeramik

- ▶ **mechanisch:**
  - ▶ hohe Druckbelastbarkeit
  - ▶ niedrige Zugbelastbarkeit
  - ▶ sprödes Verhalten
- ▶ **thermisch:**
  - ▶ hohe Temperatur-Beständigkeit
  - ▶ niedrige Temperatur-Wechselbeständigkeit
  - ▶ schlechte thermische Leitfähigkeit
- ▶ **elektrisch:**
  - ▶ schlechte elektrische Leitfähigkeit
- ▶ **chemisch:**
  - ▶ unlöslich in Wasser
  - ▶ schwerlöslich in Säuren, Basen und Salzlösungen
  - ▶ toxikologisch absolut unbedenklich



## Einteilung klassischer Silicatkeramik

... nach Korngrößen:

- ▶ grobkeramisch (Gefügebestandteile  $> 0.2$  mm)
- ▶ feinkeramisch (Gefügebestandteile  $< 0.2$  mm)

... nach Wasserdichtigkeit (WAF=Wasseraufnahme)

- ▶ porös (wasserdurchlässig) (WAF  $> 6\%$ )  $\mapsto$  Tongut
- ▶ dicht (wasserundurchlässig) (WAF  $< 6\%$ )  $\mapsto$  Tonzeug
  - ▶ Steinzeug (Scherben nicht durchscheinend)
  - ▶ Porzellan (Scherben durchscheinend)

## Tongut (porös)

### Baustoffe (dick)

- ▶ **Ziegelei-Erzeugnisse** (nicht weiß brennend)
  - ▶ z.B. (Dach)-Ziegel
  - ▶ Rohmaterial Lehm (Sand + Kaolin)
  - ▶ Verarbeitung meist in Strangpressen
  - ▶ geringe Dichte
  - ▶ gute Wärmedämmung
- ▶ **Feuerfest-Erzeugnisse**
  - ▶ z.B. Schamottsteine, Futter für Zement-Drehrohröfen
  - ▶ hoher Erweichungspunkt (1700 - 1900 °C)

### Geschirr (dünn)

- ▶ **Töpferei-Erzeugnisse** (nicht weiß brennend)
  - ▶ irdenes Haushaltsgeschirr, Blumentöpfe, Majolika, Fayencen,
  - ▶ Ofenkacheln
- ▶ **Steingut** (weiß brennend)
  - ▶ z.B. Sanitärkeramik (Kloschüsseln, Waschbecken)
  - ▶ häufig zwei Brände:
    1. 'Biskuit'-Brand
    2. Glasur- oder Glattbrand → danach dicht!

## Tonzeug (dicht)

### Baustoffe (dick)

- ▶ **Steinzeug**
  - ▶ z.B. Klinker, Fliesen, Kanalrohre

### Geschirr (dünn)

- ▶ **Steinzeug:**
  - ▶ gröbere Haushaltsgegenstände, Kaffeebecher usw.
- ▶ **Porzellan:**
  - ▶ Hartporzellan  
(hohe Brenn-Temperatur, geringe Verzierbarkeit)
  - ▶ Weichporzellan/China-Porzellan  
(niedrigere Brenn-Temperatur, bessere Verzierbarkeit)



## Zusammenfassung

- ▶ Tone (Kaolinit, ein Schichtsilicat) + Magerungsmittel (Quarz  $\text{SiO}_2$ ) + Flußmittel (Feldspat) (!alle natürlich!)
- ▶ Mahlen, Quellen  $\mapsto$  bildbare Massen
- ▶ vielfältige Formgebung (Giessen, Drehen, ...)
- ▶ Brennen
  - ▶ bis  $450^\circ\text{C}$ : Korund und Mullit/Quarz als Gläser (amorph)
  - ▶  $> 1000^\circ\text{C}$ : faserförmiger Mullit (verfilzte Nadelchen), mit Glas verkittet
- ▶ Eigenschaften
- ▶ verschiedene Silicatkeramiken und ihre Verwendung

## Literatur und Links

- ▶ **Lehrbücher Chemie**
  - ▶ Holleman/Wiberg: Anorganische Chemie, de Gruyter (2007).
  - ▶ H.-H. Emons et al.: Technische anorganische Chemie, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig (1990).
  - ▶ M. Okrusch, S. Matthes, Mineralogie, Springer (2004).
  - ▶ F. Liebau: Structural Chemistry of Silicates, Springer (1985).
- ▶ **Technologie**
  - ▶ G. W. Phelps, J. B. Wachtman: Ceramics, General Survey, 2005 (in Ullmann: Encyclopedia of Chemical Technology, Wiley VCH).
  - ▶ Winnacker/Küchler: Chemische Technologie, Bd. II, Hanser Verlag, München (2004).
- ▶ **Links**
  - ▶ [http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Seminare/ton\\_tasse\\_metall\\_VL.pdf](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Seminare/ton_tasse_metall_VL.pdf) (diese Präsentation)
  - ▶ [http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/silicate\\_0.html](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/silicate_0.html) (Vorlesung Silicat-Chemie, CR)
  - ▶ <http://www.keramverband.de> (techn. Keramik, schöne Videos)
  - ▶ <http://www.seltmann.de> (Fa. Seltmann in Weiden)