



# Mechanismen und Arten der Korrosion in Schmelz- und Halteöfen der Aluminiumindustrie

W.Reichert  
Dr.-Ing. T.Tonnesen; Prof. R. Telle

Feuerfestsymposium, Freiberg den 24. April 2018

---

Wanja Reichert | Feuerfestsymposium | Freiberg | 2018 |



**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY



- Einführung Korrosionsmechanismen
- Sekundäraluminiumprozess
- (Industrie-) Beispiele
- Ausblick

Einführung

Al-Prozess

Beispiele

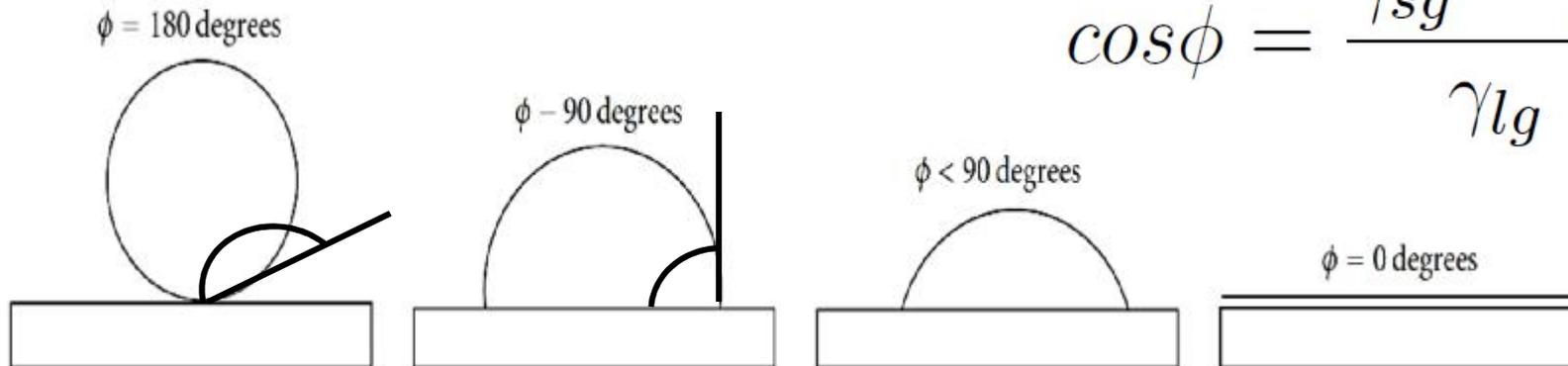
Ausblick



# Einführung Korrosion Benetzung / Thermodynamik

Benetzung:

Gleichung nach Young:



$$\cos\phi = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}}$$

							$G$ (kJ/mol)
Al	+	$\frac{1}{4}\text{SiO}_2$	$\longrightarrow$	$\frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3$	+	$\frac{1}{4}\text{Si}$	-138.3
Al	+	$\frac{1}{2}\text{FeO}$	$\longrightarrow$	$\frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3$	+	$\frac{1}{2}\text{Fe}$	-374.2
Al	+	$\frac{1}{2}\text{Na}_2\text{O}$	$\longrightarrow$	$\frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3$	+	Na	-289.9
Al	+	$\frac{1}{4}\text{TiO}_2$	$\longrightarrow$	$\frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3$	+	$\frac{1}{4}\text{Ti}$	-110.2

Einführung

Al-Prozess

Beispiele

Ausblick



# Einführung Korrosion

## Nernst'sche Grenzschicht

### Lösungsprozess des Feuerfesten Werkstoffes

- chemische Reaktion (**Phasengrenzreaktion**)
- **Transport/ Diffusion**

#### Formeln:

Schichtdicke:

$$d = c_i^0 / (dc_i^s / dx)_{x=0}$$

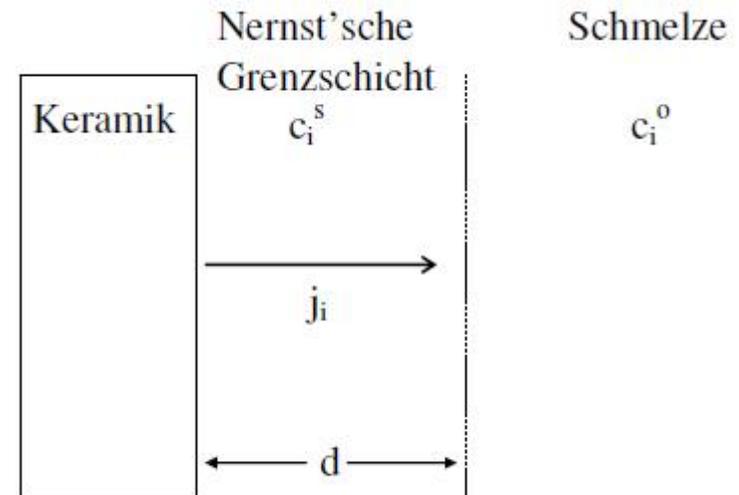
Kinetik:

$$j_i \gg K (c_i^0 - c_i^s)$$

[chemische Reaktion]

$$j_i = K (c_i^0 - c_i^s) / 1 + (Kd/D_i)$$

[chemische Reaktion + diffusionskontrolliertem Transport]



$c_i^s$  = Sättigungskonzentration von i  
 $c_i^0$  = Konzentration von i in der Schmelze  
 $x$  = Ortskoordinate  
 $D$  = Diffusionskoeffizient  
 $K$  = Geschwindigkeitskonstante der Reaktion  
 $j_i$  = Stoffstromdichte

Einführung

Al-Prozess

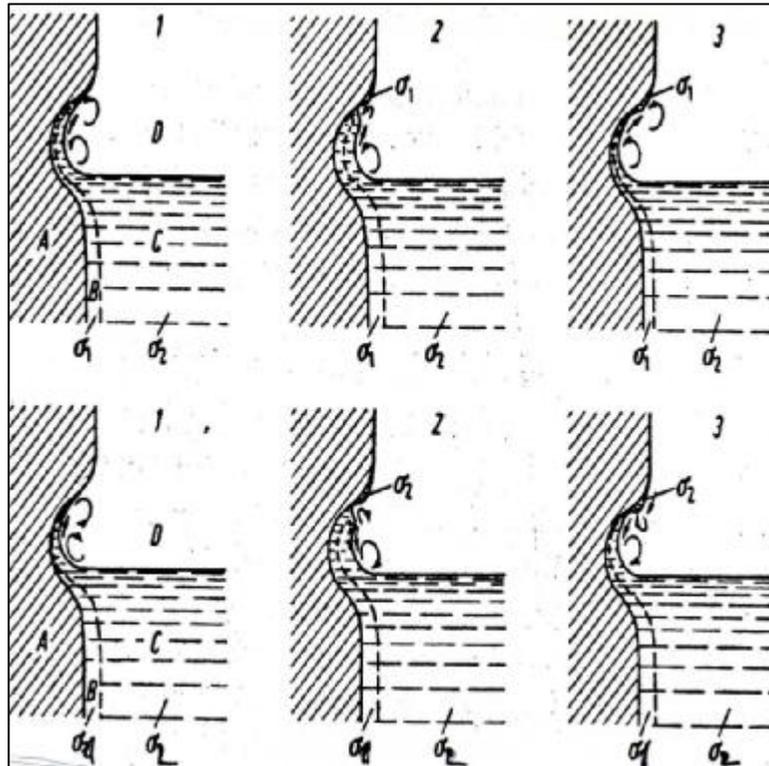
Beispiele

Ausblick



# Einführung Korrosion

## Freie Grenzflächenkonvektionen / Marangoni – Effekt



Paper:  
„Tears of Wine“,  
M.Gugliotti; Journal of  
Chemical Education Vol. 81;  
2004



Bereich der niedrigeren benetzt den Bereich  
der höheren Grenzflächenenergie

Einführung

Al-Prozess

Beispiele

Ausblick

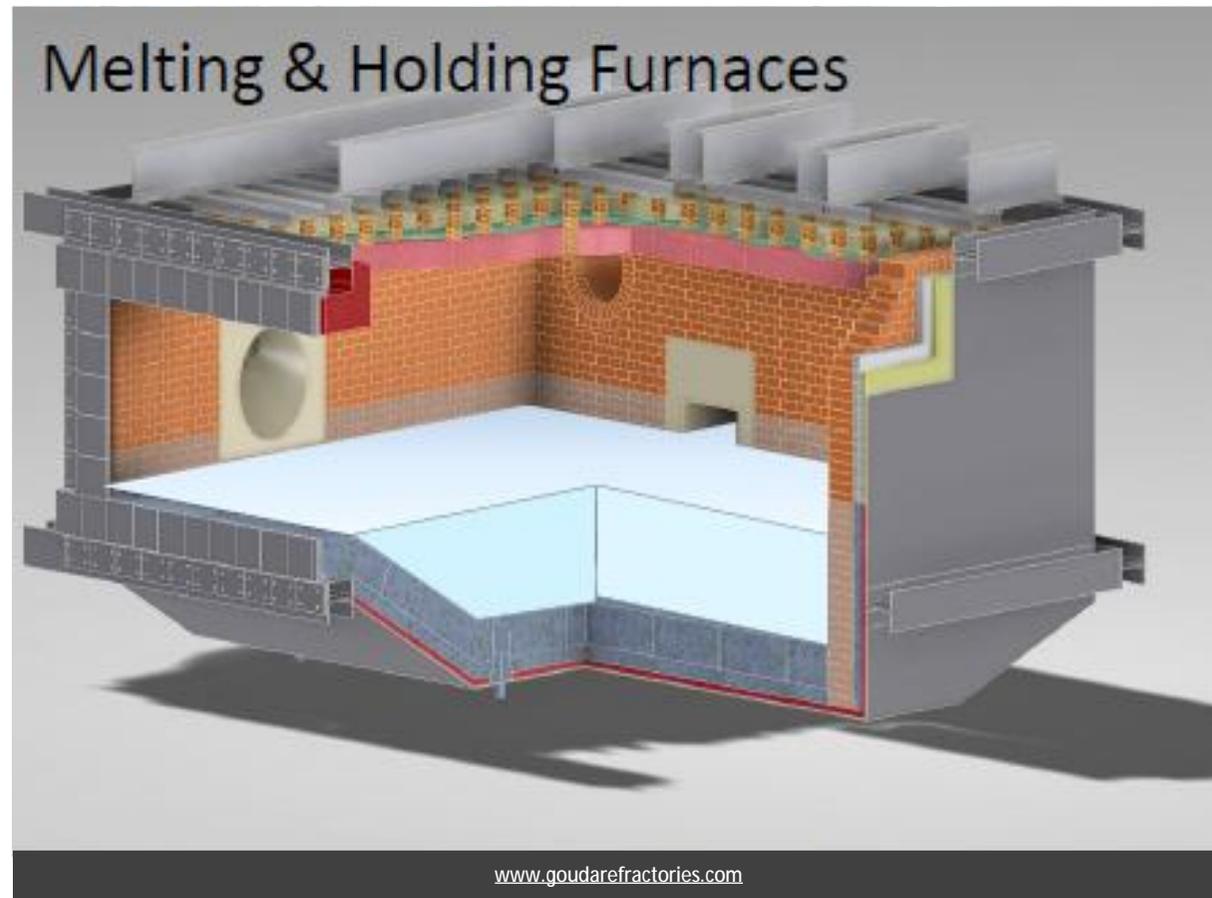
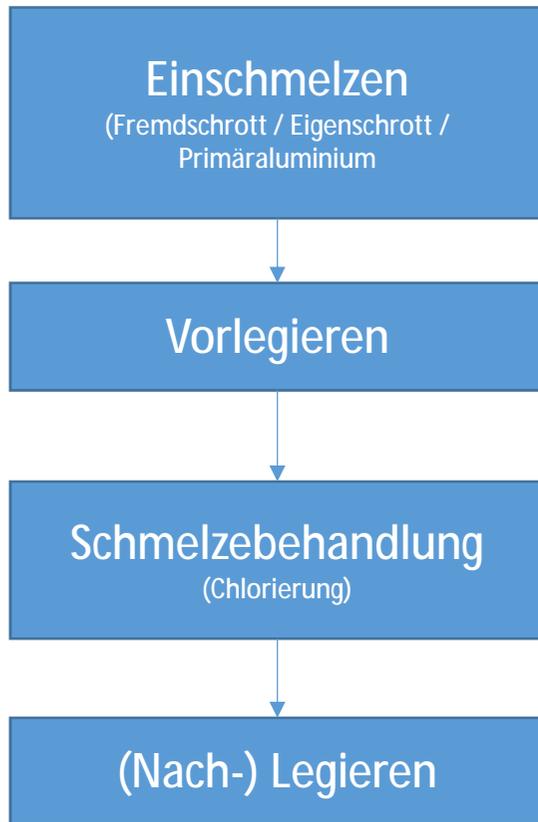
5 / 20

Mechanismen und Arten von Korrosion in Schmelz- und Halteöfen  
in der Aluminiumindustrie | W.Reichert | Feuerfestsymposium |  
Freiberg | 2018 |

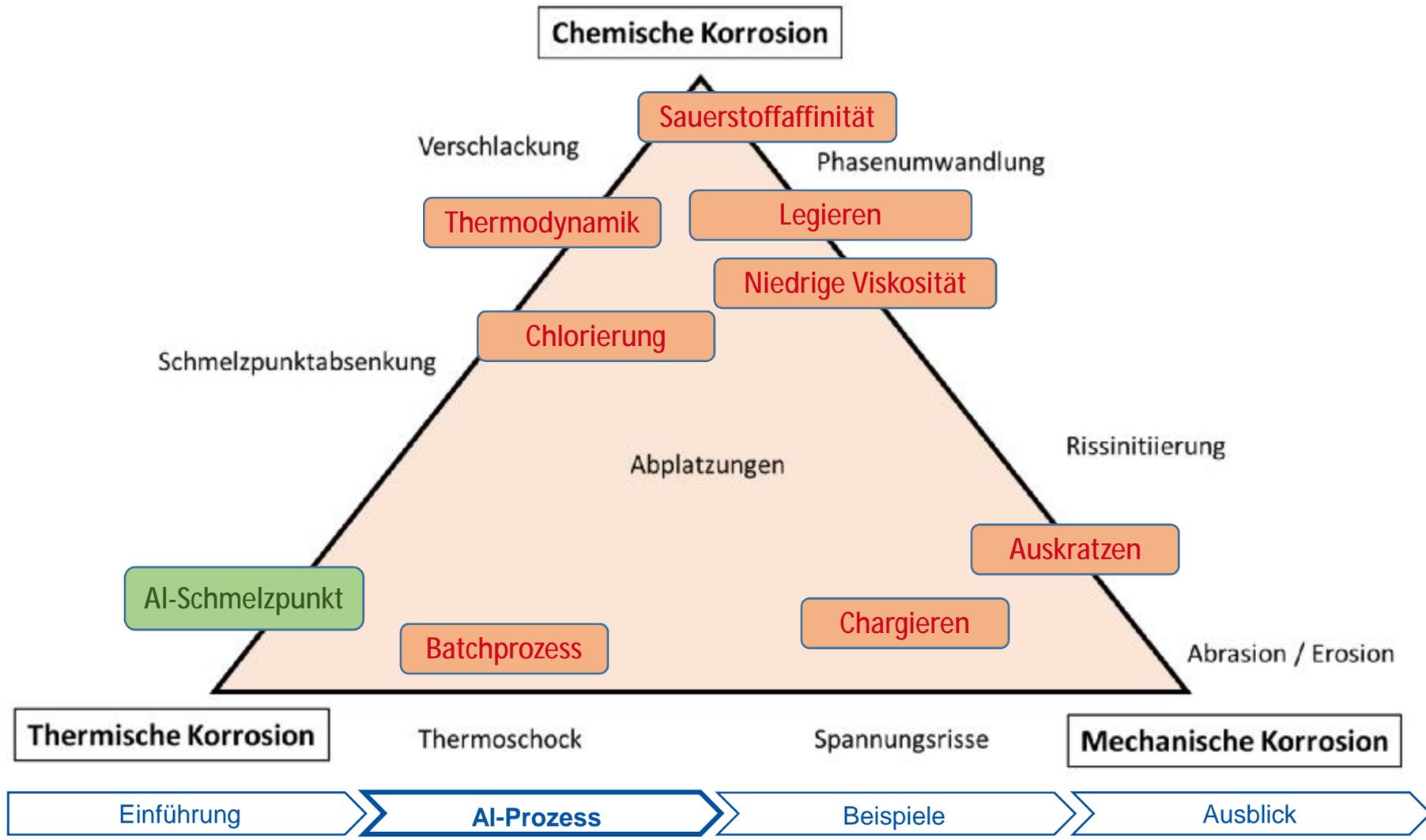


**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY

# (Sekundär-)Aluminiumprozess



# Korrosion



## Aufschmelzen: Decke

### Schrotteinsatz

- Überhitzung, Verunreinigungen, Legierungselemente



Oxid [%]	Ablagerungen		
	Schmelzofen	Halteofen	Schmelzofen
	Decke	Decke	Abluft
SiO <sub>2</sub>	9,8	3,8	28,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	78,8	93,3	48,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9	0,3	1,6
TiO <sub>2</sub>	0,5	1,9	1,7
CaO	0,6	0	1,4
MgO	3,7	0	10
K <sub>2</sub> O	0,5	0,1	0,8
Na <sub>2</sub> O	1,1	0,5	2,3
MnO	0,5	0	0,2
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,6	0	0
ZrO <sub>2</sub>	0	0	0
SO <sub>3</sub>	0	0	0,1
BaO	0,1	0,1	0,2
ZnO	2,9	0	4,1
CuO	0	0	0,2
SnO <sub>2</sub>	0	0	0,2
GV (1050°C)	-0,25	0	-0,24

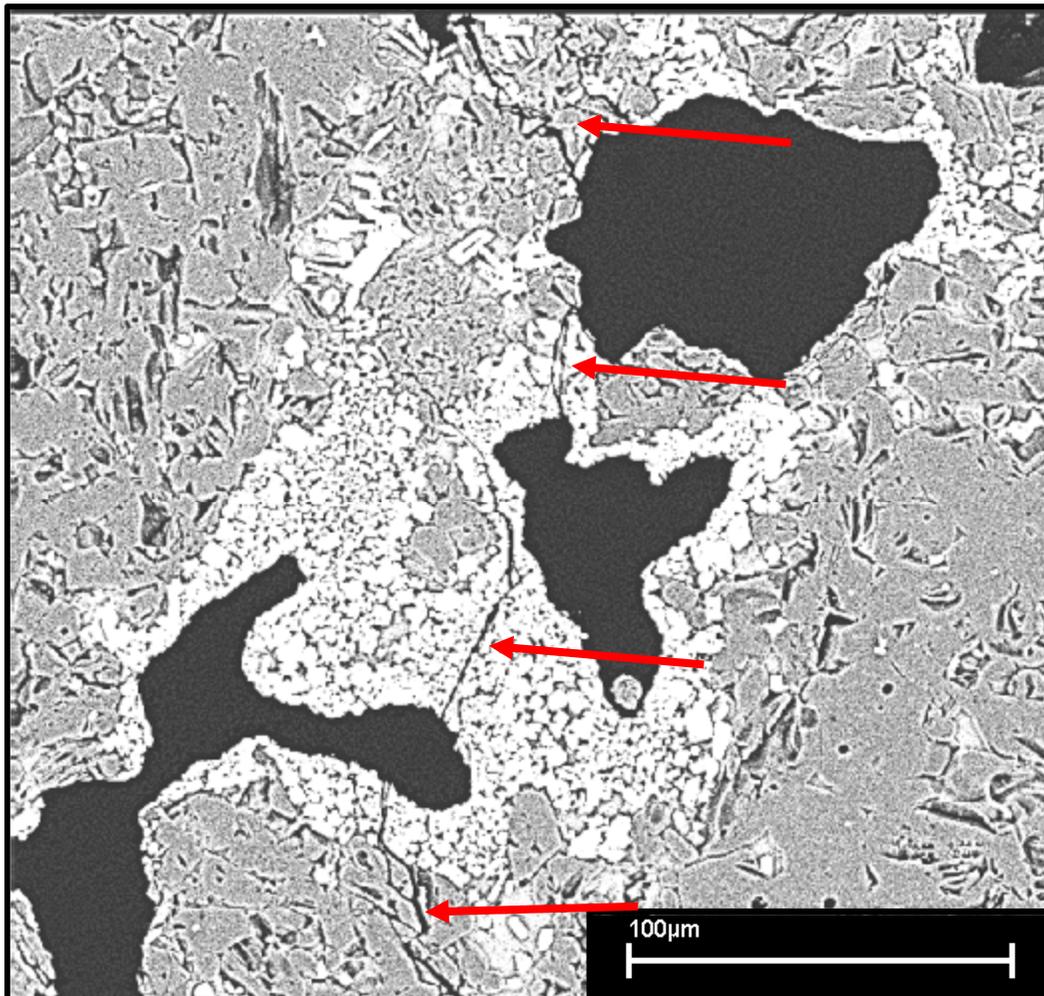
Einführung

Al-Prozess

Beispiele

Ausblick

## Aufschmelzen: Decke



- Legierungselemente und Verunreinigungen in Gasphase
- Ablagerungen in den Poren
- Reaktionen mit Matrix und Grobkorn
- Phasentransformation
- Rissinitiierung

Einführung

Al-Prozess

Beispiele

Ausblick

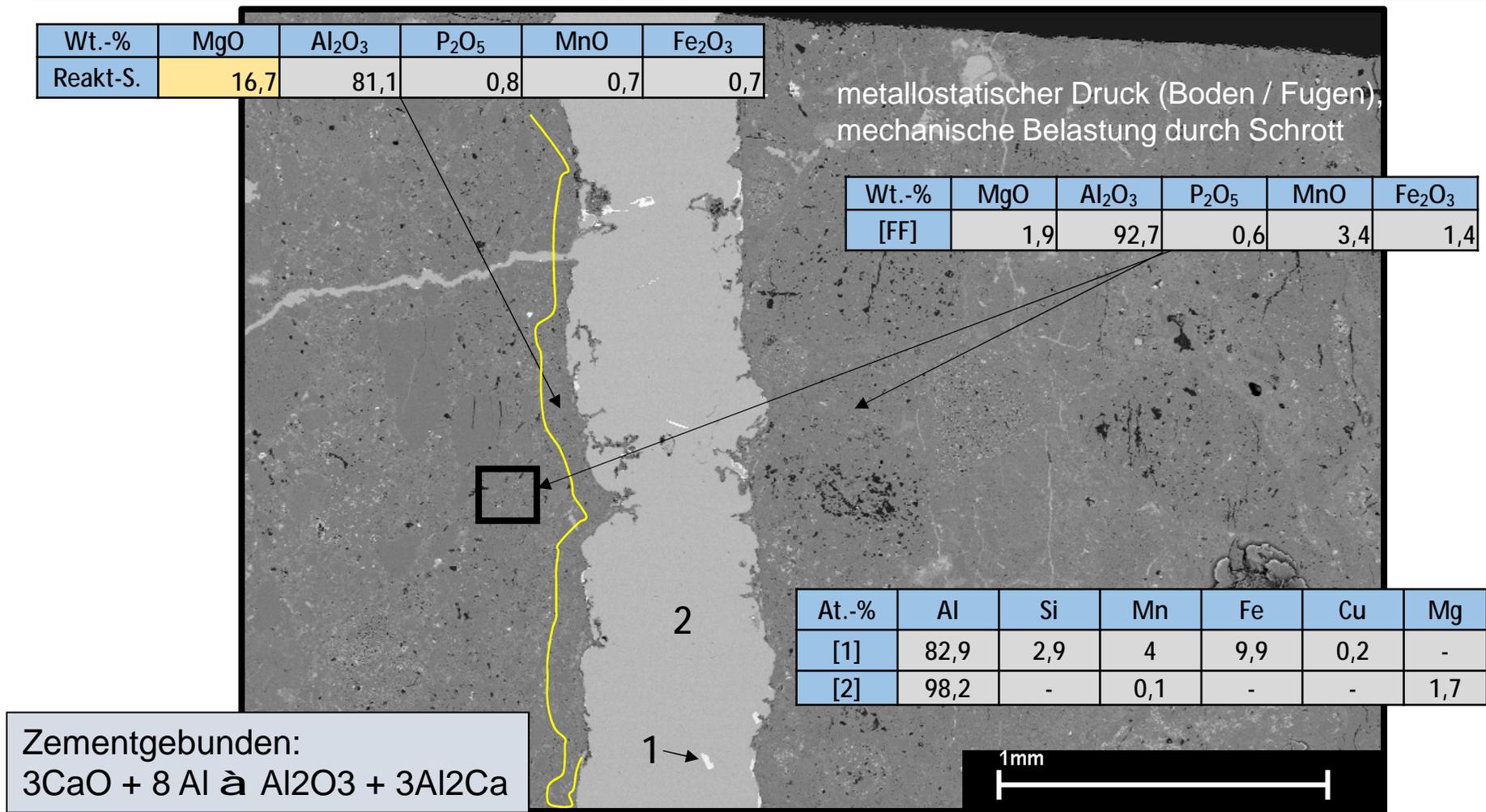
9 / 20

Mechanismen und Arten von Korrosion in Schmelz- und Halteöfen  
in der Aluminiumindustrie | W.Reichert | Feuerfestsymposium |  
Freiberg | 2018 |

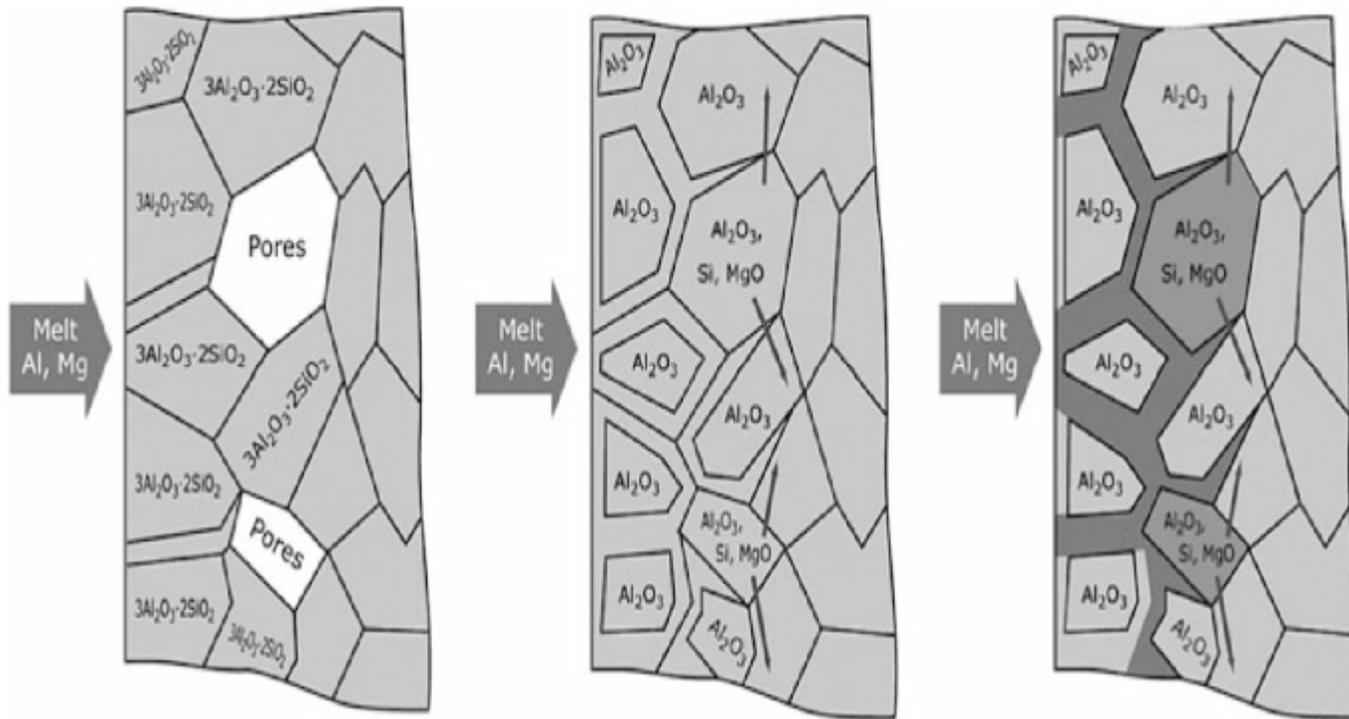


RWTH AACHEN  
UNIVERSITY

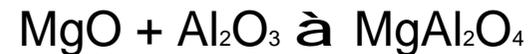
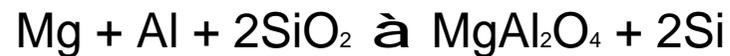
# Metallostatischer Druck / Fugen



# Wand (Metallbad - Lösungsprozesse)



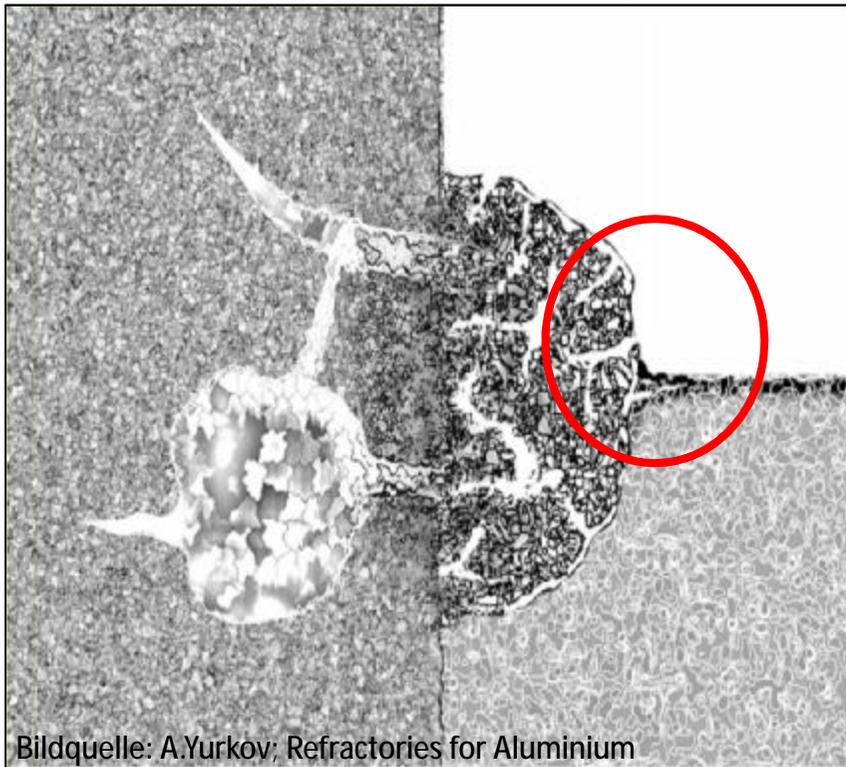
- Kontaktreaktion
- Infiltration
- Reaktion im Gefüge
- Korundwachstum
- Abplatzungen



Bildquelle: A.Yurkov; Refractories for Aluminium



# Infiltration / Korundwachstum



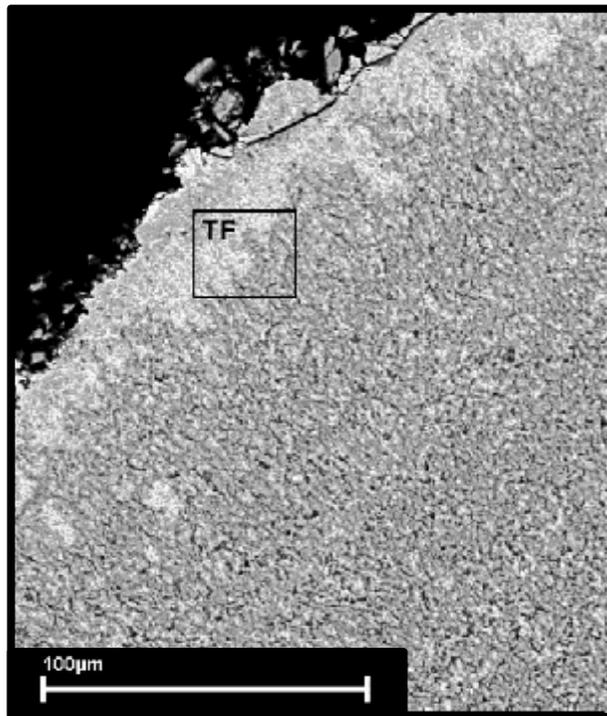
- Benetzung
- Kapillareffekt

$$P_k = \frac{-2\sigma_{Al} \cdot \cos \theta}{r_k}$$

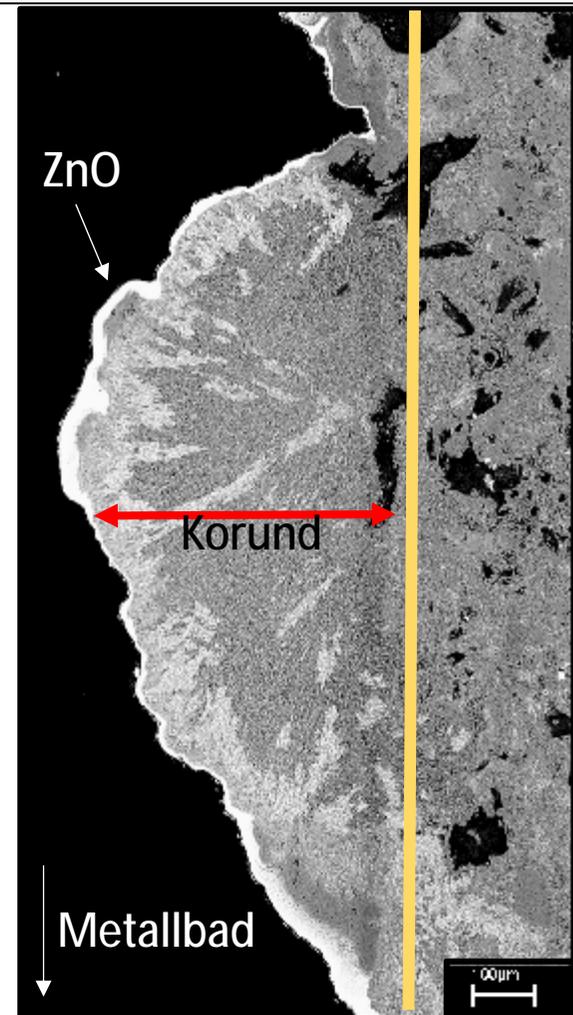


## Korundwachstum

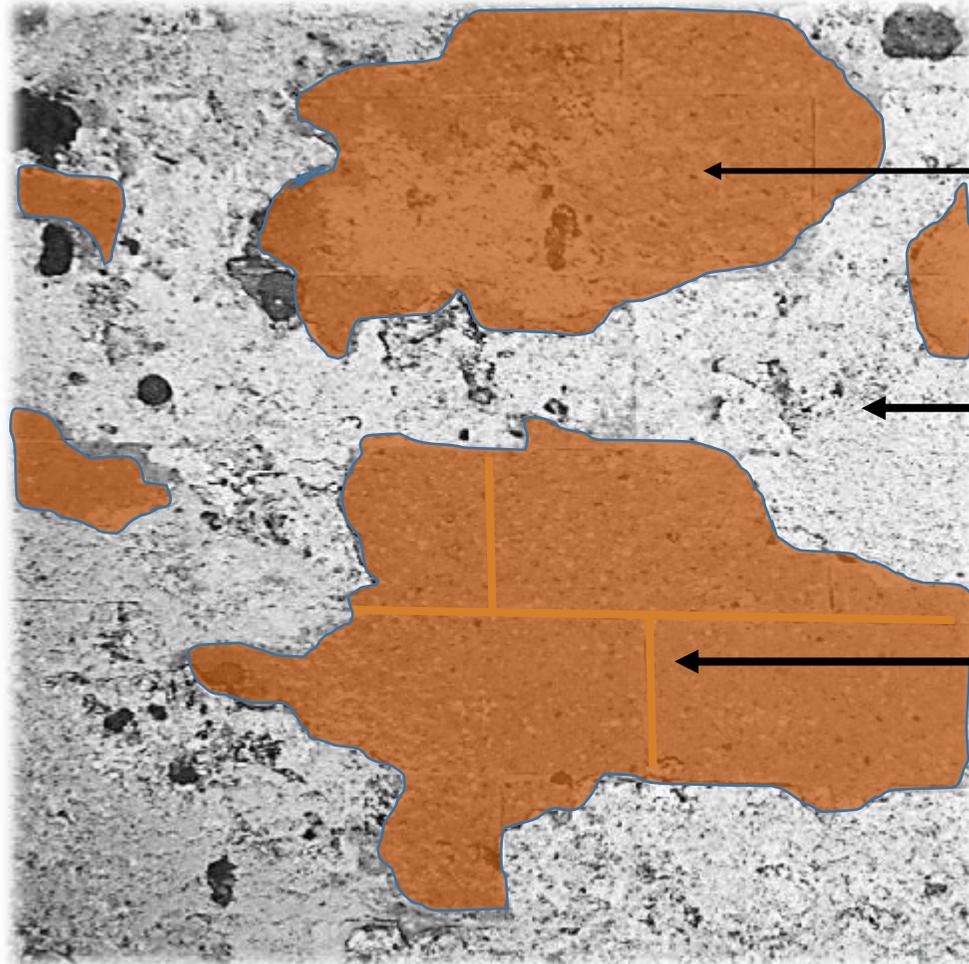
- Feste Verbindung mit FF Material
- Verringerung des Ofenvolumens
- Erleichtertes Eindringen von Legierungselementen



Element	At-%
O	58,4
Al	36,7
P	0,3
Ti	0,2
Fe	1,2
Cu	2,3
Zn	0,9



## Beispiel: Abplatzungen



Halteofen [Chlorierung]

Abplatzungen

Anhaftungen

Keine Infiltrierung in Fugen

Einführung

Al-Prozess

Beispiele

Ausblick

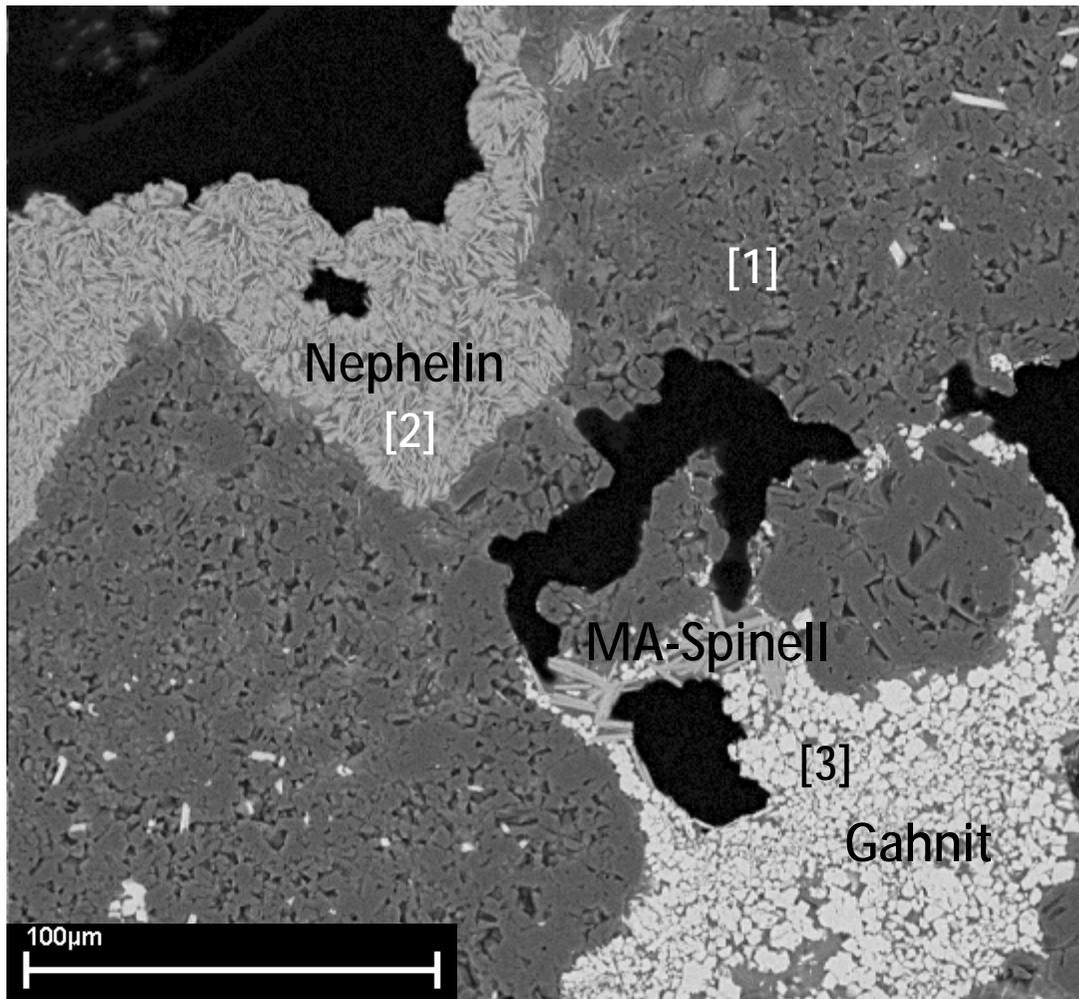
15 / 20

Mechanismen und Arten von Korrosion in Schmelz- und Halteöfen  
in der Aluminiumindustrie | W.Reichert | Feuerfestsymposium |  
Freiberg | 2018 |



**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY

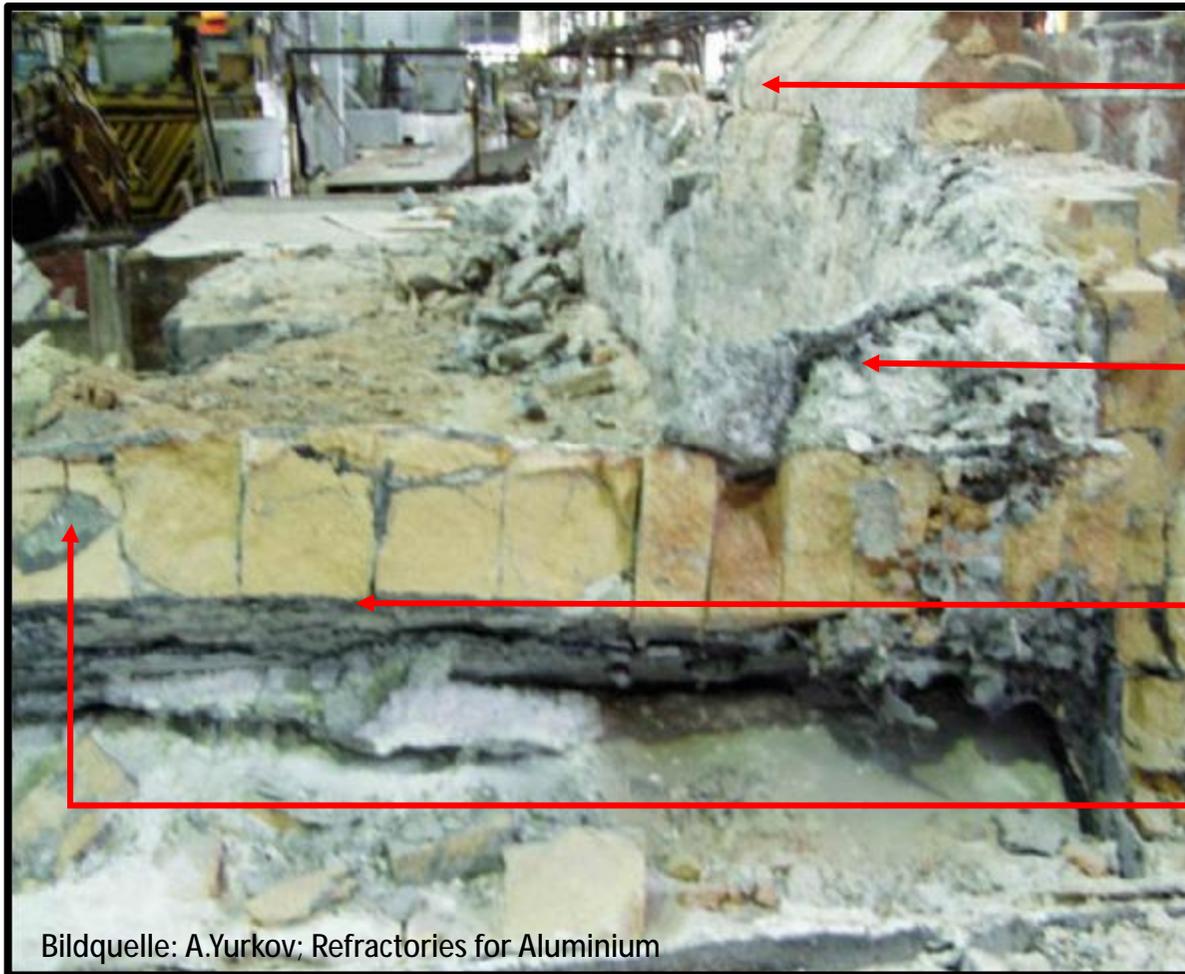
# Bursting



Wt.-%	[1]	[2]	[TF3]
Na <sub>2</sub> O	-	8,2	5,4
MgO	-	1,0	2,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,4	52,6	45,0
SiO <sub>2</sub>	-	13,3	6,7
K <sub>2</sub> O	-	1,8	0,9
CaO	-	3,4	-
TiO <sub>2</sub>	-	11,1	1,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6	3,0	2,6
ZrO <sub>2</sub>	-	0,2	1,9
ZnO	-	6,1	31,3



# Zusammenfassung



Ablagerungen  
Gasphase

Korund-Wachstum

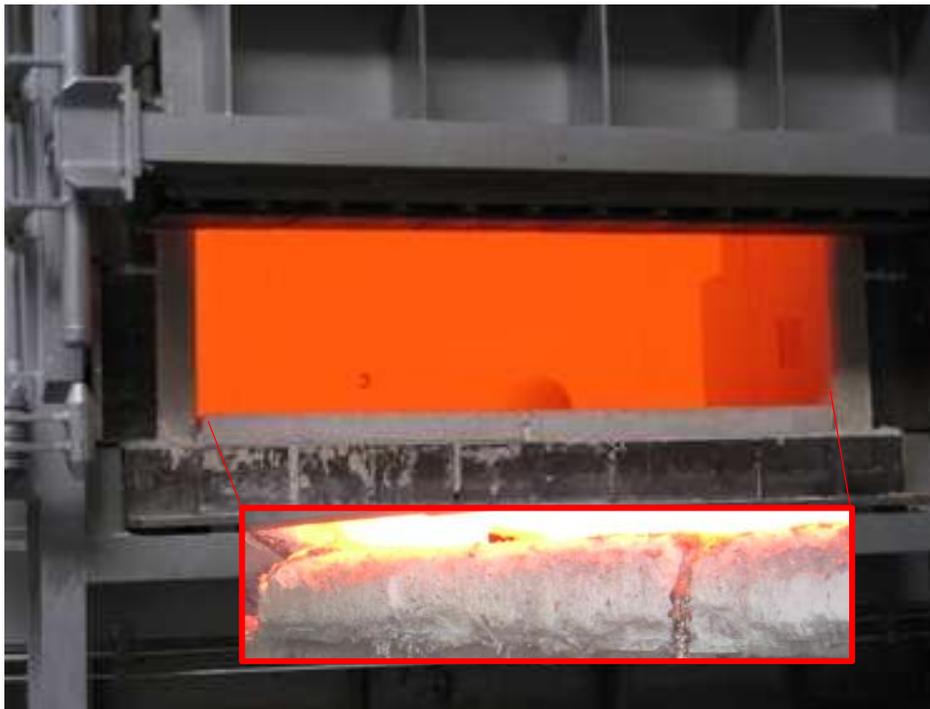
Infiltration (Fugen)

Infiltration /  
Spinelbursting

Bildquelle: A.Yurkov; Refractories for Aluminium



## Problemfall: Rampe



- Keine Infiltration
- Chemische Zusammensetzung unauffällig
- Keine Zersetzung oder mineralogische Phasentransformation
- Optimale Materialauswahl
- Wahrscheinlich: Bei Zustellung zu viel Anmachwasser verwendet, falsch verdichtet oder falsches Temperaturprofil → Festigkeit (KDF, HBF) wird verringert

- Mechanische Belastung beim Auskratzen und durch Thermoschock führt zum Bruch

Problemfaktoren:

Prozessführung, Materialauswahl und Verarbeitung, Anlagenplanung, Reparaturen im laufendem Betrieb

Einführung

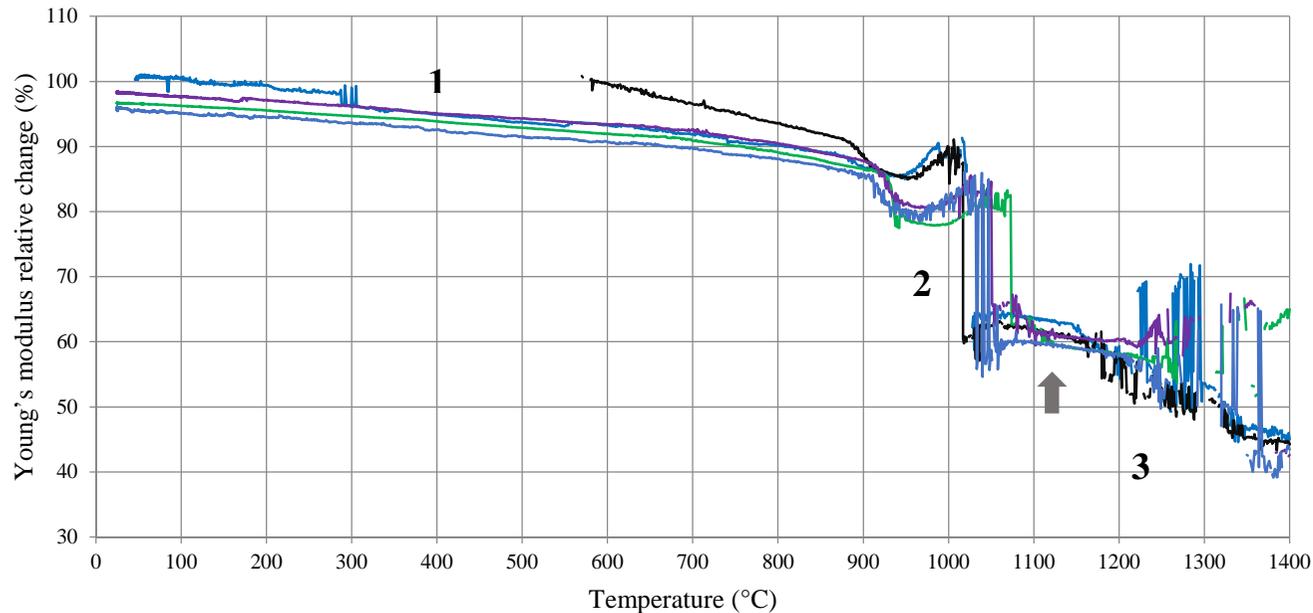
Al-Prozess

Beispiele

Ausblick

## Lösungsansatz / Ausblick

In Situ Messungen der mechanischen Eigenschaftsänderungen während des Korrosionsprozesses



Quelle:  
**Changes of thermoelastic properties of refractory materials during corrosion processes;** P.Leto, W.Reichert, T.Tonnesen, R.Telle

(Weiter-) Entwicklung von Laborversuchen, die Prozesseigenschaften besser abbilden





**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!**

Bildquelle: Bildarchiv Hamburg