

# Kreislaufwirtschaft



# Vorhersage der Schlackenanalyse zur Optimierung der Schlackenverwertung

Birgit Palm, Vera Peiss, Bernd Kleimt

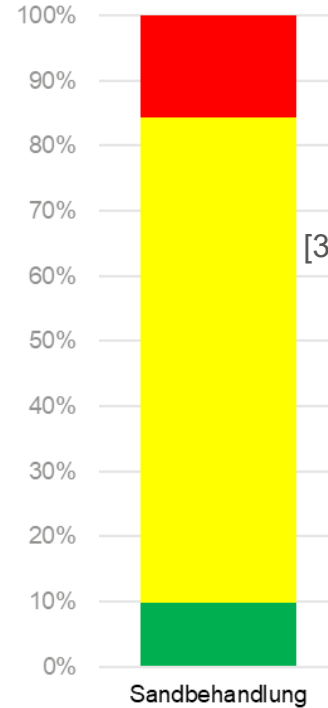
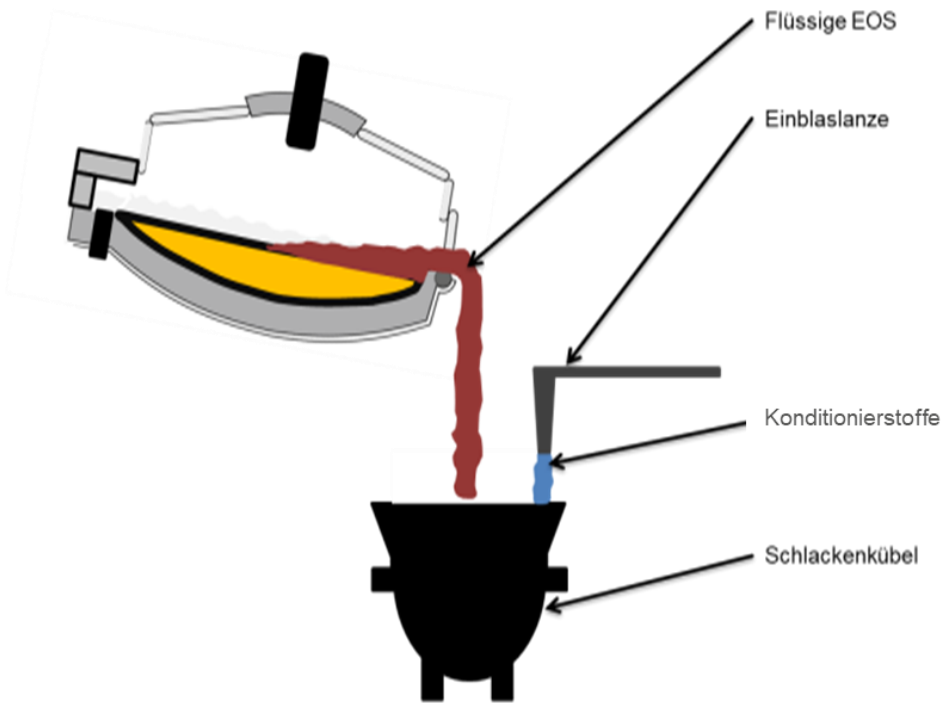
BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: Kreislaufwirtschaft

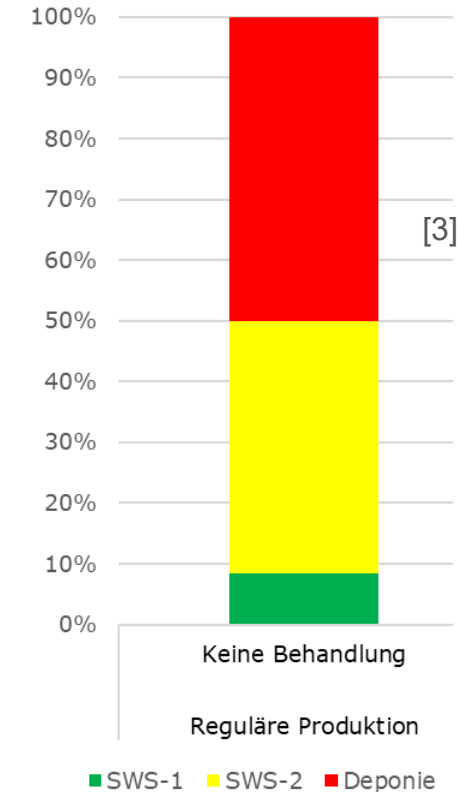


# Hintergrund und Ziel

- › 4,7 Mio. t Stahlwerksschlacken in D [1] + neue EBV in 2023 [2] =
- › Schlackenconditionierung mit SiO<sub>2</sub>-haltigen Materialien:



Schüttelverfahren 2:1,  
0/22 mm, 45 % <4 mm



Basierend auf der Schrottzusammensetzung, Vorhersage der...

- › Chemischen Zusammensetzung
- › Auslaugung (bei unveränderten Abkühlbedingungen)

Verringerung der notwendigen Sandeinblasmenge

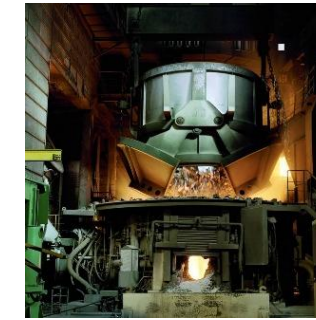
# Ausgangslage: BFI-Modell zur Schrottcharakterisierung und -optimierung

## Ausgangssituation

- › Eigenschaften der bei der Rohstahlerzeugung eingesetzten Schrottsorten stark schwankend, zum Teil nur sehr ungenau zu erfassen
- › Messtechnische Charakterisierung nur auf Stichprobenbasis möglich, volumemäßige Messverfahren zur Analyse größerer Schrottmengen nicht verfügbar

↪ Ermittlung und Verfolgung der Eigenschaften der eingesetzten Schrotte über statistische Verfahren anhand von Prozessdaten

↪ Entwicklung einer web-basierten Software zur Bestimmung der Schrottkennwerte (metallisches Ausbringen, Elementgehalt, Einschmelz-Energiebedarf)



**BFI Panel**

- Dashboard
- App configuration
  - Scrap & Elements
  - Scrap Properties
  - Qualities
  - Composition
- Scrap characterization**
- Scrap mix optimization
- Process model +
- AI Toolset
- Home

**Data filters**

**Single Characterization**

**Statistic Information for:** Cu

Total number of heats: 13706      From Heat: 210001

Lowest heat number: 210002      To Heat: 230788

Highest heat number: 230788

Mean absolute error: 0.027 %

Mean error: 0.00002 %

RMSE: 0.036 %

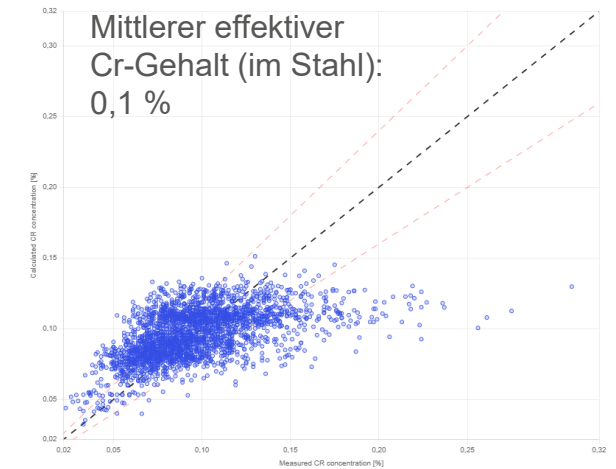
R<sup>2</sup>: 0.577

**Characterize**

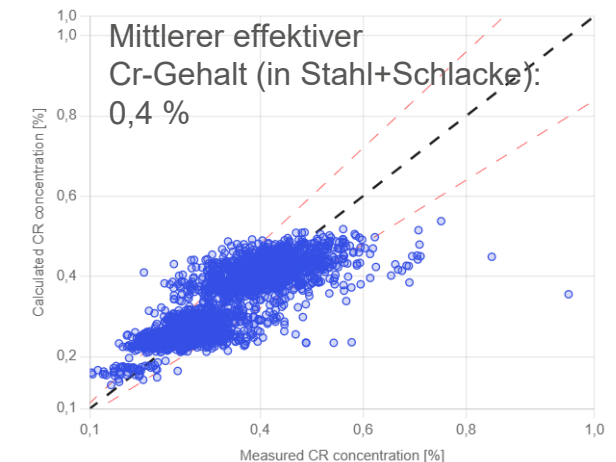
# Erweiterung auf Vorhersage der Analyse der E-Ofen-Schlacke (EOS)

Insgesamt 3000 Schmelzen von GMH  
Aufteilung in 2400 Trainingsdaten und 600 Testdaten

- › Schritt 1: Erweiterung und Optimierung mit historischen Daten
  - › Erweiterung der Eingangsdaten des vorhandenen Modells zur Schrottcharakterisierung um:
    - › die Schlackenanalyse
    - › Art und Menge der Zugaben (wie z.B. Schlackenbildner) sowie die eingeblasene Sauerstoffmenge
- Berücksichtigung der Elementgehalte (Si, Mn, P, Cr, V) aus der Schlacke (oxidierte Elemente) bei Berechnung der Elementgehalte in einzelnen Schrottsorten
- Gehalt von sauerstoff-affinen Elementen (Chrom, Mangan, ..) in den Schrottsorten lässt sich präziser bestimmen



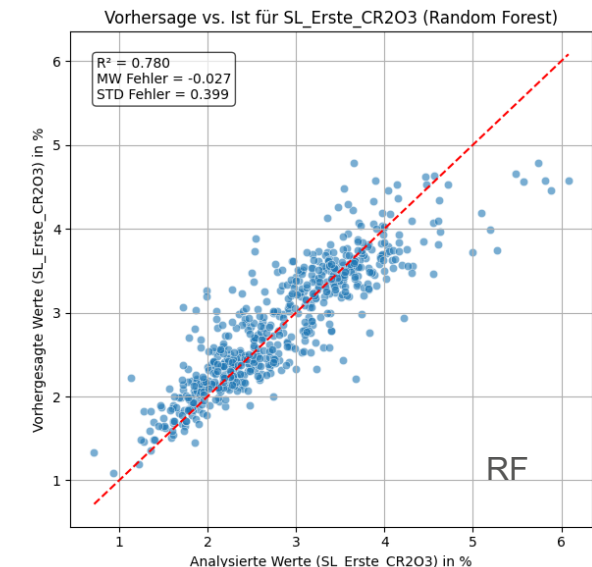
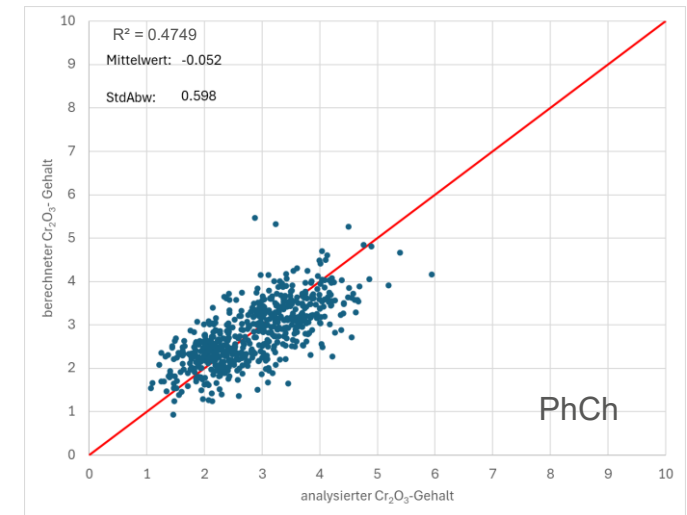
Berechneter über analysiertem Chromgehalt (im Stahl)



Berechneter über analysiertem Chromgehalt (in Stahl und Schlacke)

# Erweiterung auf Vorhersage der Analyse der E-Ofen-Schlacke (EOS)

- › Schritt 2: Erweiterung auf Vorhersage der EOS-Analytik – Vergleich verschiedener Ansätze
    - › Multi-lineare Regressionsrechnungen und ML-Modelle zur Vorhersage der Schlackenanalyse basierend auf den vorhandenen Prozessdaten
  - › Basierend auf optimiertem Modell (Schritt 1) Vorhersage der Schlackenchemie
  - › 4 Ansätze getestet: Physikalisch-chemischer Ansatz und Machine-Learning Ansätze
- Gute Genauigkeit für die einzelnen Schlackenkomponenten
- Bei einigen Komponenten physikalisch-chemischer Ansatz besser, bei einigen ML-Modelle



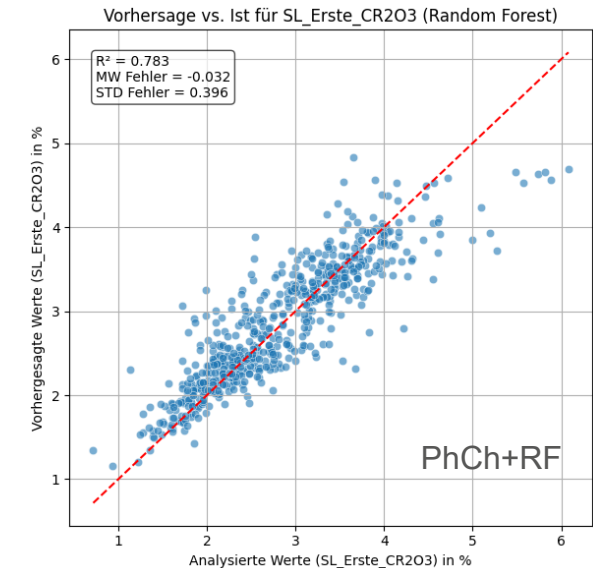
Berechneter über analysiertem Chromoxid-Gehalt (in Schlacke) 6

# Erweiterung auf Vorhersage der Analyse der E-Ofen-Schlacke (EOS)

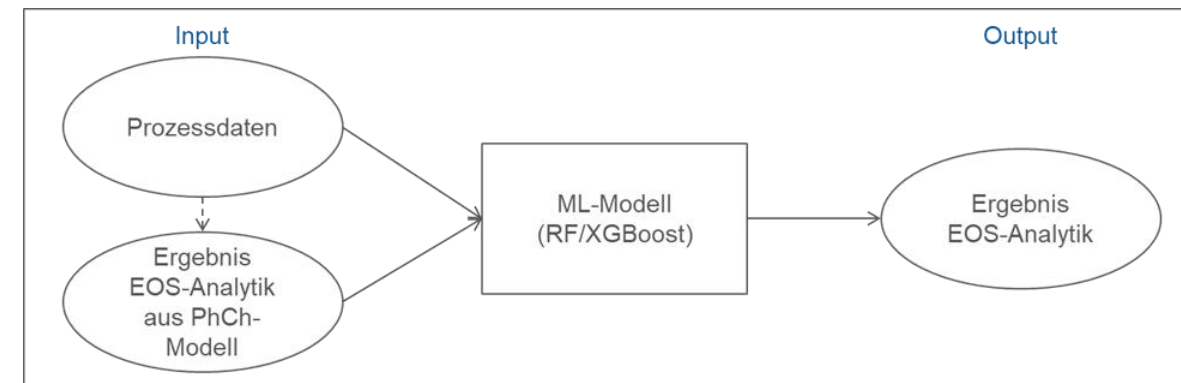
- › Schritt 3: Erweiterung auf Vorhersage der EOS-Analytik – kombinierter Ansatz
  - › Kombination des physikalisch-chemischen Ansatzes mit Machine-Learning-Modellen zur verbesserten Vorhersage der Schlackenanalyse basierend auf den vorhandenen Prozessdaten
- › 3 Varianten getestet
- › Variante „Feature enrichment“ ausgewählt
- › Für diese Variante 2 Ansätze getestet

→ Verbesserte Genauigkeit mit dem hybriden Modell bei den meisten Komponenten

Methodik „Feature enrichment“

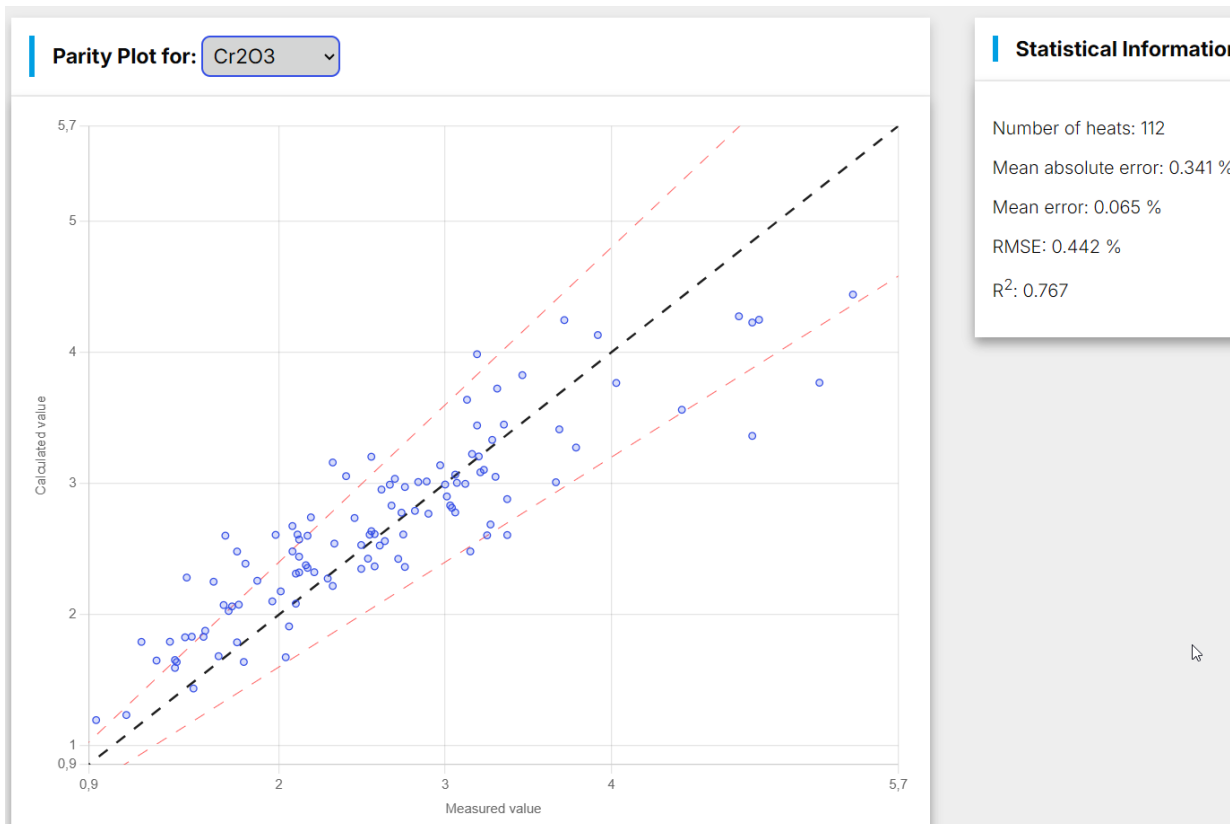


Berechnet über analysiertem Chromoxid-Gehalt (in Schlacke)



# Validierung des Modells

› Mit Daten weiterer 112 Schmelzen von GMH

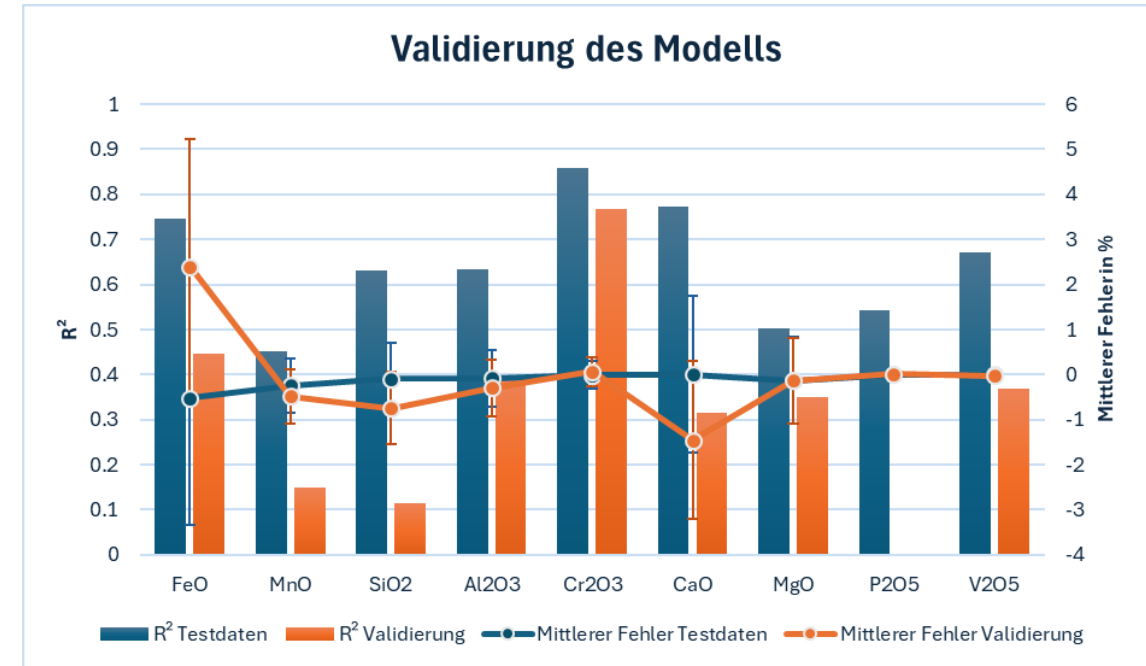


Berechneter über analysiertem Chromoxid-Gehalt (in Schlacke)

	Validierung (112 Chargen)
FeO	Mittelwert: 2.398 StdAbw.: 4.544 R <sup>2</sup> = 0.446
MnO	Mittelwert: -0.48 StdAbw.: 0.802 R <sup>2</sup> = 0.149
SiO <sub>2</sub>	Mittelwert: -0.746 % StdAbw.: 1.677 % R <sup>2</sup> = 0.114
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mittelwert: -0.291 % StdAbw.: 0.904 % R <sup>2</sup> = 0.396
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mittelwert: 0.065 % StdAbw.: 0.442 % R <sup>2</sup> = 0.767
CaO	Mittelwert: -1.451 % StdAbw.: 2.779 % R <sup>2</sup> = 0.314
MgO	Mittelwert: -0.138 % StdAbw.: 1.104 % R <sup>2</sup> = 0.35
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mittelwert: 0.022 % StdAbw.: 0.072 % R <sup>2</sup> = -0.206
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mittelwert: -0.0186% StdAbw.: 0.058 % R <sup>2</sup> = 0.369

# Validierung des Modells

- › Vergleich **Validierung** mit Ergebnissen der **Testdaten** aus Modellentwicklung



- Abweichungen im R<sup>2</sup> meist deutlich, aber beim mittleren Fehler (prozentuale Abweichung von berechnetem zu analysiertem Wert, über alle Chargen gemittelt) deutlich geringer
- Abweichungen haben größeren Einfluss bei Daten zur Validierung (112) im Vergleich zu Testdaten (600)
- Insbesondere für die kritischen Elemente (Cr, V) gute Übereinstimmung

## Zusammenfassung BFI-Modell zur Schlackencharakterisierung und weitere Schritte

- › Gute Genauigkeit für die einzelnen Schlackenkomponenten, insbesondere für die kritischen Elemente Cr und V bei allen Ansätzen
- › Verbesserte Genauigkeit mit dem hybriden Modell bei den meisten Komponenten
- › Kombination Physikalisch-chemisches Modell und Random Forest Modell in Charakterisierungssoftware (web-basiertem Tool) integriert
- › Validierung des Modells mit aktuellen Daten (112 Chargen)
  
- › Erweiterung des Modells zur Vorhersage der Schlackenzusammensetzung vor Start der Konditionierung basierend nur auf Zugabemengen beim Chargieren
  
- › Entwicklung eines zweiten Modells zur Vorhersage des Elutionsverhaltens aus der Schlackenzusammensetzung sowie zur Ermittlung der optimalen Sandmenge basierend auf der Schlackenzusammensetzung und gewünschtem Elutionsverhalten

## TRESOR - Tool zur Rechnerischen Ermittlung der Schlackenchemie und Optimierung der Reaktionsmittelmenge Förderkennzeichen 01IF23428N



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

[1] Merkel, Th.: Daten zur Produktion und Nutzung von Eisenhüttenschlacken im Jahr 2024, Report des FEhS - Instituts für Baustoff-Forschung e.V. (2025)

[2] Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz, 09.07.2021, BGBl. 2021 I Nr. 43 vom 16.07.2021 mit Änderungen von BGBl. 2023 I Nr. 186 vom 18.07.2023

[3] KONDEOS – Konditionierung von Elektroofenschlacke zur Erzeugung eines EBV-konformen Produkts, r+Impuls – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Impulse für industrielle Ressourceneffizienz (BMBF), Förderkennzeichen 033R216

**Kontakt: Dr.-Ing. Birgit Palm**

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf

Telefon +49 98492-293

E-Mail [birgit.palm@bfi.de](mailto:birgit.palm@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

E-Mail [birgit.palm@bfi.de](mailto:birgit.palm@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

Telefon +49 98492-293

Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Kontakt: Dr.-Ing. Birgit Palm

# Verfahrensentwicklung zur selektiven Fluoridabtrennung aus industriellen Prozesswässern

Matthias Werner, Martin Hubrich

BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: Kreislaufwirtschaft



## Allgemein

- › Anhaltende Fluoridaufnahme kann zu Geburts-, Reproduktions- und Immundefekten führen.
- › Fluorid-Grenzwert für Trinkwasser (WHO: 1,5 mg/L)
- › Weltweit steigende Fluoridkonzentrationen in Grund- und Oberflächengewässern.
- › Neben geogener Herkunft stellen Industriebetriebe die Hauptemissionsquellen dar.
- › Hoher Bedarf an leistungsfähiger Anlagentechnik zur selektiven Fluorid-Abtrennung aus Grund- und Abwasser

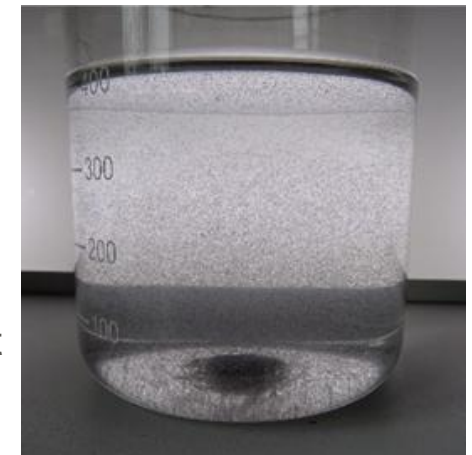
## Stahlindustrie

- › Prozesswässer der Roheisen- und Stahlerzeugung weisen Fluoridgehalte bis ca. 100 mg/L auf
- › Zur Ableitung oder ZLD-Kreislaufführung ist eine Fluorid-Abtrennung notwendig
- › Verfügbare Behandlungsverfahren trennen Fluorid in der Regel unselektiv ab → Mischkonzentrat
- › Verbleibt Fluorid im Rahmen der Prozesswasserentsalzung im Konzentrat, ist dieses vielfach nicht verwertbar und zu entsorgen – aktuelle Entsorgungskosten bis  $\approx 250$  €/t
- › Neben der Fluoridabtrennung ist der Umgang mit dem Konzentrat von gleichrangiger Bedeutung

- › Für die **effektive selektive Fluoridabtrennung** sind die **selektive Adsorption und selektive Fällung** geeignet – Einsatz richtet sich aus wirtschaftlichen Gründen nach dem Konzentrationsbereich
  - › Fluoridkonzentration  $< 10 \text{ mg/L}$  → Fluoridabtrennung auf Basis der **Adsorption oder Aufkonzentrierung + Fällung**
  - › Fluoridkonzentration  $> 10 \text{ mg/L}$  → Fluoridabtrennung auf Basis der **Fällung**
- › **Herausforderungen selektive Adsorption**
  - › Einsetzbarkeit, Preis und Recycling/Verwertbarkeit des Adsorber-Materials
- › **Herausforderungen Fällung**
  - › Sehr geringe Feststoffkonzentrationen kleiner  $200 \text{ mg/L}$ , die effizient abzutrennen sind
  - › Erzeugung eines verwertbaren Fluoridkonzentrats



Fluorid-Adsorbens



Gefälltes  $\text{CaF}_2$  mit magnetisierbaren Partikeln

## Randbedingungen für die selektive Fluoridabtrennung – Prozess- und Abwasser-Charakterisierung für die Stahlindustrie

- › **Stranggussanlagen:** Fluorid > ca. 15 – 100 mg/L → **selektive Fällung**
- › **Oberflächenbehandlung:** Fluorid < ca. 12 mg/L, sehr hohe Fracht sonstiger Ionen, hohe Leitfähigkeit → **Adsorption**
- › **Schlackendeponierung:** Fluorid < ca. 10 mg/L, hoher pH-Wert → **Adsorption** (pH < 9) oder **Aufkonzentrierung** (z.B. mittels MCDI-Verfahren) + **selektive Fällung**

### Analysedaten relevanter Prozesswässer

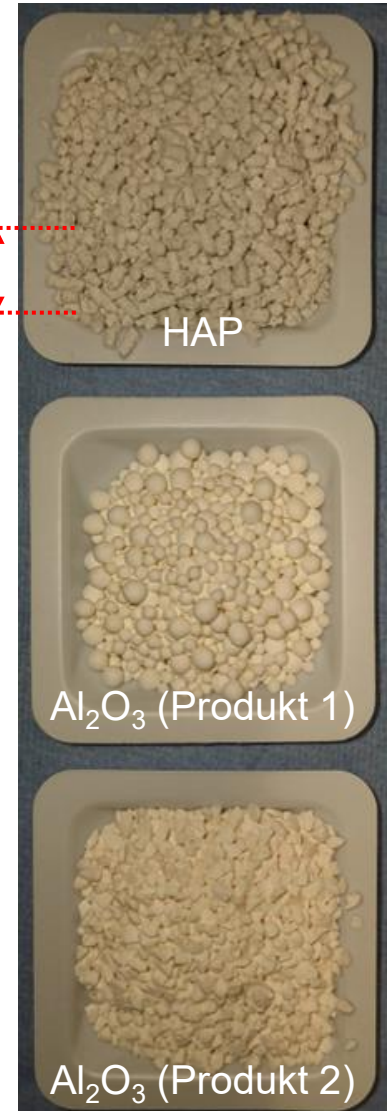
	Leitfähigkeit [µS/cm]	pH-Wert	Fluorid [mg/L]	Chlorid [mg/L]	Sulfat [mg/L]	Calcium [mg/L]	Phosphat [mg/L]	Nitrat [mg/L]	Eisen gelöst [mg/L]	Feststoff- gehalt [mg/L]
Min.-Wert	173	7,0	0,1	9	6	8	0,2	0,1	0,0	0,1
Mittelwert	2415	9,2	18,5	254	633	332	2,5	11,5	0,4	17,1
Max.- Wert	16000	12,0	94,1	1837	7080	1100	10,0	334,8	20,8	211,2

## Entwicklung eines selektiven Fluoridabtrennungsverfahrens für Konzentrationen bis ca. 10 mg/L – **selektive Adsorption**

- › **Untersuchung verfügbarer Fluorid-Adsorbentien:**
  - › Hydroxiapatit (HAP), aktiviertes  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Produkt 1 und 2)
- › Herstellung eines weiteren Adsorbens **mit hoher selektiver Fluoridabtrennung**
- › **Ermittlung der Grundlagen zu Fluorid-Sorptionsmechanismen und Adsorptionskapazitäten** über Batch-Versuche und Säulen-Adsorptionstests
- › Variation der Fluoridbeladung, T, pH-Wert sowie Konzentrationen an Adsorbens und konkurrierenden Ionen

Fluoridselektive  
Adsorbentien

1 cm

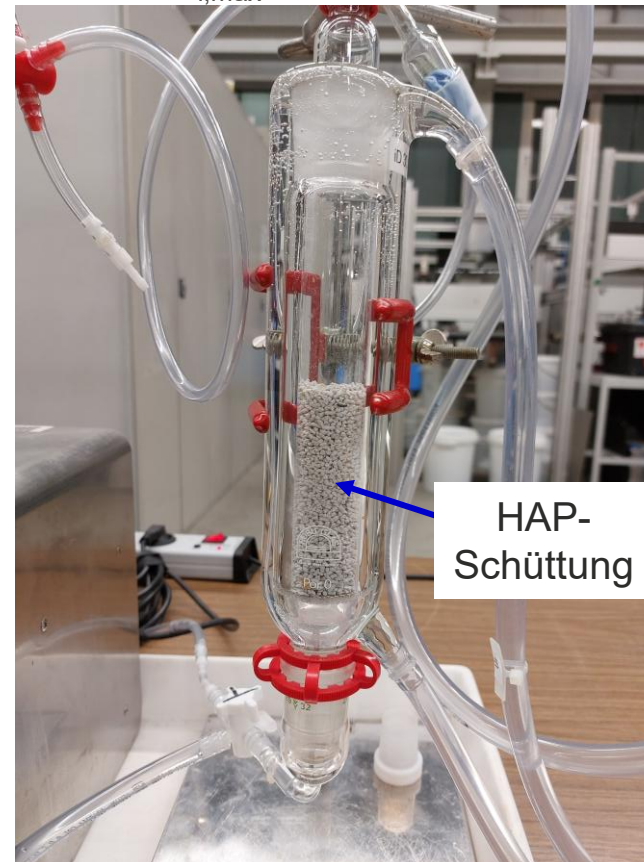


Batchversuche im  
BFI-Labor

# Entwicklung eines selektiven Fluoridabtrennungsverfahrens für Konzentrationen bis ca. 10 mg/L – **selektive Adsorption** – Säulen-Adsorptions-Versuche



Temperierbare Glassäule  
( $d_i = 30,2 \text{ mm}$ ,  $h_i = 17 \text{ cm}$ ,  
 $V_{i,\text{max}} = 121,7 \text{ cm}^3$ )



- › Untersuchungen der Adsorptions-Leistung mit synthetischen und betrieblichen Probelösungen unter Variation von Volumenstrom, Füllhöhe und Temperatur
- › Erprobung einer Messtechnik zur kontinuierlichen Überwachung der Fluoridkonzentration in synthetischen/betrieblichen Probelösungen

## Technologischer Ansatz > 10 bis 100 mg Fluorid/L - **Selektive Fällung**

**Motivation:** Adsorption nicht wirtschaftlich, sehr geringe Feststoffkonzentration kleiner 200 mg/L abzutrennen

**Ziel:** Entwicklung eines selektiven Fluoridabtrennungsverfahrens mittels Fällung und magnetischer Separation der fluoridangereicherten Partikel

### **Selektive Fällung** mit kombinierter Abtrennung

- › Nutzung eines **Calcium-basierten Nebenprodukts** der Stahlindustrie zur Fällung, z.B.  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  o.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- › **Bindung** des gefällten Calciumfluorids **an magnetisierbare Partikel**, z.B. Fe,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$
- › Einsatz von **Flockungshilfsmitteln**, z.B. SACHTOKLAR®
- › **Effiziente Abtrennung** z.B. über einen Magnetabscheider



Gefälltes Calciumfluorid mit magnetisierbaren Partikeln



Abgetrennte magnetisierbare Partikel

## Zusammenfassung / Ausblick

- › Es besteht die zwingende Notwendigkeit Fluorid aus Prozesswässern abzutrennen
- › Zur Vermeidung von Mischkonzentraten muss die Abtrennung selektiv stattfinden
- › Für Prozesswässer der Oberflächenbehandlung + Schlackenplätze ist die selektive Adsorption und für Prozesswässer aus Stranggussanlagen die selektive Fällung geeignet
- › HAP zeigt im Vergleich zu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -basierten Adsorbentien die höchste selektive Fluorid-Adsorption
- › Bei der selektiven Fällung stellt die resultierende niedrige Feststoffkonzentration eine Herausforderung dar

### **Ausblick:**

- › Fortsetzung der Adsorptionsversuche
- › Verfahrensentwicklung für Partikelabtrennung bei selektiver Fluorid-Fällung
- › Erprobung und Optimierung der entwickelten Fluorid-Abtrennungsverfahren unter betrieblichen Randbedingungen
- › Erzeugung eines verwertbaren Fluoridkonzentrats

## Förderhinweis:

Die Arbeiten und Ergebnisse sind mit dem IGF-Vorhaben 01IF23436N FluoridSelektiv verbunden, das über den Projektträger DLR im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wird.

**Kontakt: Dr.-Ing. Matthias Werner**

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Sohnstrasse 69 · 40237 Düsseldorf

Telephone: +49 211 98492 539

E-Mail: [matthias.werner@bfi.de](mailto:matthias.werner@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

E-Mail: [matthias.werner@bfi.de](mailto:matthias.werner@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

Telephone: +49 211 98492 539

Sohnstrasse 69 · 40237 Düsseldorf

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

# Wärmeübertragung und -nutzung aus Gaswaschwässern

[Pavel Ivashechkin](#), Susanna Wan

BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: Kreislaufwirtschaft



- › Wärmepotenzial in Gaswaschwässern der Stahlindustrie
- › Mögliche Wege der Wärmenutzung aus Gaswaschwässern
- › Technologien zur Wärmenutzung
- › Herausforderungen der Wärmeübertragung aus dem Hochofen-Gaswaschwasser:  
Ergebnisse aus dem EU-Projekt CORNERSTONE
- › Zusammenfassung und Ausblick

Wärmequellen	Durchfluss [t/t <sub>PR</sub> ] <sup>[1]</sup>	Vor-/Rücklauf-temperatur [°C] <sup>[1]</sup>	Wärmepotenzial [kWh/t <sub>PR</sub> ]
Hochofen - Gaswaschwasser	3,4 (RE)	35/46	43,4 (RE)
Konverter - Gaswaschwasser	4,6 (RE)	35/50	80,1 (RE)
Direktreduktion - Gaswaschwasser	5 - 15 (DRI)	65/82	100 - 300 (DRI)

[1] Sprecher, M., Bodo Längen, H., Stranzinger, B., Rosemann, H., & Adler, W.: Abwärmenutzungspotenziale in Anlagen integrierter Hüttenwerke der Stahlindustrie. Umweltbundesamt (07/2019)

- › Hochofen-Gaswaschwasser ist die meist verfügbare Wärmequelle auf moderatem Temperaturniveau
- › Konverter-Gaswaschwasser hat kein stabiles Temperaturniveau
- › Direktreduktion-Gaswaschwasser hat die höchste Temperatur und das höchste Wärmepotenzial



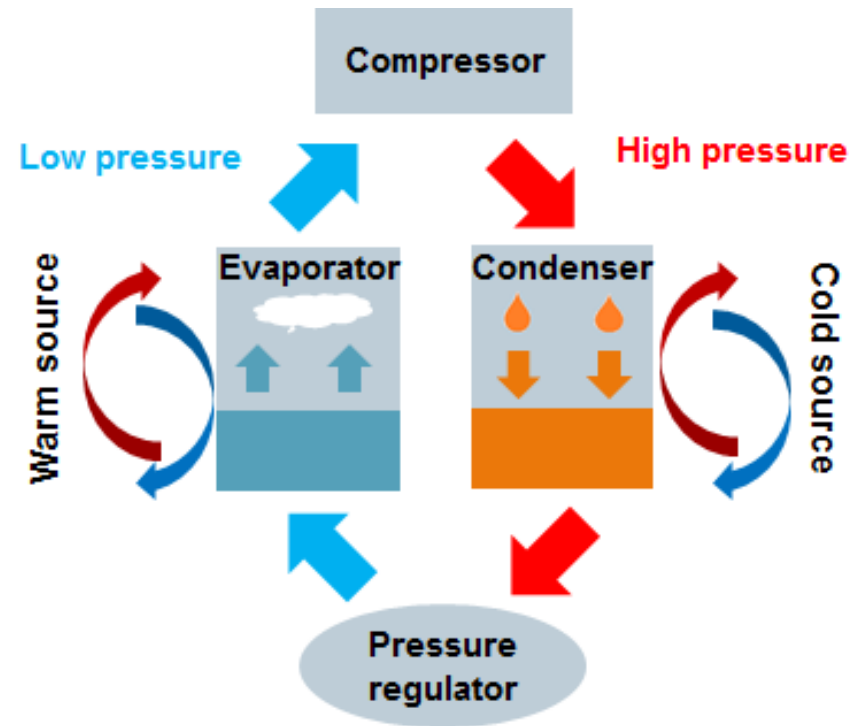
**Bild 1:** Wärme des Gaswaschwassers wird durch Verdunstung an die Umgebung abgegeben

# Mögliche Wege der Wärmenutzung aus Gaswaschwässern

Anwendungsmöglichkeit	Temperaturbereich	Technologie zum Erreichen der Zieltemperatur	Bemerkung
Fernwärme, Badvorwärmung,	60 – 110°C	Wärmeübertrager, Wärmepumpe	Wirtschaftlichkeit hängt von der Entfernung und Strompreis ab
Dampferzeugung	160°C	Hochtemperatur- Wärmepumpe	Wirtschaftlichkeit hängt vom Strompreis ab
Prozesswasser- behandlung	60 – 85°C	Wärmeübertrager, <b>Membrandestillation</b>	Wirtschaftlichkeit hängt vom Frischwasserverfügbarkeit ab
Schlamm-trocknung	> 80°C	Wärmepumpe	Wirtschaftlichkeit hängt von Transportkosten ab

- › Nur Direktreduktion-Gaswaschwasser liefert Wärme auf dem ausreichenden Niveau (bis 82°C)
- › Für das Hochofen-Gaswaschwasser (46°C) ist eine Wärmepumpe notwendig

# Technologien zur Wärmenutzung: Wärmepumpe



**Bild 2:** Funktion einer Wärmepumpe

Quelle: Siemens Digital Industries Software Community, n.d.

- › Niedertemperaturwärme auf nutzbares Niveau transferierbar
- › Erzeugung von Dampf zur Einspeisung in Dampfnetze
- › HTHP erreicht bis 160 °C [2]

Effizienz der Wärmepumpe:

- › Kältemittel
- › Temperaturdifferenz  $\Delta T$

$T_{\text{Quelle}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{Senke}} [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [K]$	Effizienz - COP [-]
50	160	110	Ca. 2,5 - 3,0
70	160	90	Ca. 3,5 - 4,0

[2] PUSH2HEAT - Fraunhofer IEG. (n.d.). Fraunhofer-Einrichtung Für Energieinfrastrukturen Und Geotechnologien IEG.

# Technologien zur Wärmenutzung: Modellrechnung HO-Gaswaschwasser

## Parameter

Stahlproduktion	1,8 Mio. t/a	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor	0,2 kg CO <sub>2</sub> /kWh [4]
Abwärmepotenzial	43,4 kWh/t Stahl	Preis Erdgas netto	4,58 ct/kWh [3]
Durchfluss	3,4 t/t Stahl	Preis Strom netto	11,04 ct/kWh [4]
Quelltemperatur	46 °C	<b>Jahresabwärme</b>	<b>78.000 MWh/a</b>

Technologie	Temperatur [°C]	Wärmeleistung [MW]	Stromleistung [MW]	Energieeinsparung [MWh/a]	CO <sub>2</sub> -Einsparung [t/a]	Kosteneinsparung [€/a]
Wärmetauscher Q = 500 m <sup>3</sup> /h	Heiße Seite: 46 → 28 Kalte Seite: 20 → 32 LMTD = 11,5 K	10,4	-	Ca. 63.800 Mit η = 80 %	Ca. 12.700	<b>2,9 Mio</b>
Wärmepumpe Q = 300 m <sup>3</sup> /h	Quelle: 46 Senke: 120 COP = 2,65 (50% Carnot)	4	1,6	30.700 (th) - 12.300 (el)	6.150 (th) - 2.400 (el) = 3.750	1,41 Mio (th) - 1,36 Mio (el) = <b>0,05 Mio</b>

› Direkte Wärmenutzung aus dem Gaswaschwasser kann wirtschaftlich sein

[3] <https://www.eon.de/de/gk/erdgas/industriegas.html>  
 [4] <https://www.eon.de/de/gk/strom/industriestrom.html>

## Herausforderungen der Wärmeübertragung aus dem Hochofen-Gaswaschwasser

- › **Feststoffe und Salze**
- › **Korrosion und Ablagerungen**
- › Betriebsversuche in einer Hochofen-Gaswaschwasserrinne im Rahmen des EU-Projektes CORNERSTONE



Funded by  
the European Union



**Bild 3:** Geschraubter Platten-Wärmeübertrager mit 5 mm Plattenabstand

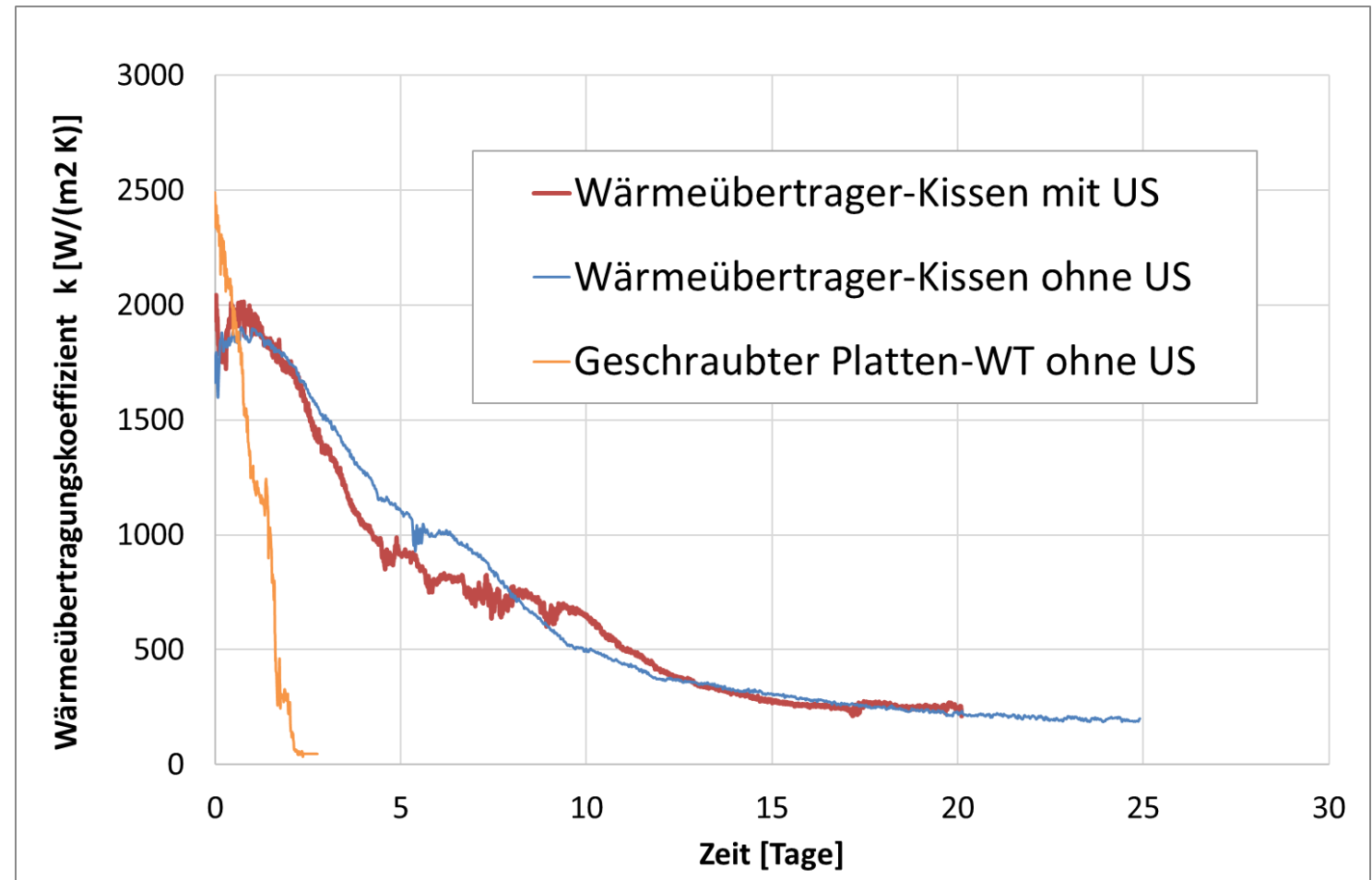


**Bild 4:** 2 Wärmeübertrager-Kissen mit 60 mm Abstand

- › Zwei Wärmeübertrager wurden eingesetzt, mit und ohne Ultraschall

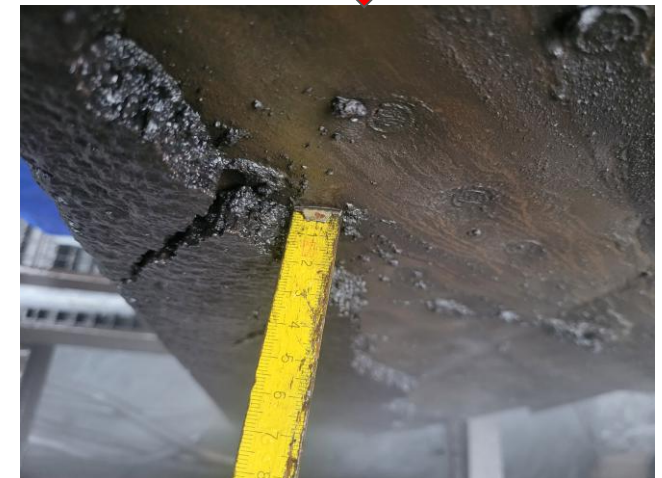
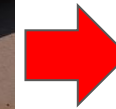
## Herausforderungen der Wärmeübertragung aus dem Hochofen-Gaswaschwasser

- › Geschraubter Platten-WT war innerhalb von 2 Tagen verstopft
- › Verminderung der Wärmeübertragung um 50% innerhalb einer Woche, und um 90% innerhalb von 2 Wochen beim Kissen-Wärmeübertrager
- › Ultraschalleinkopplung hatte keinen nennenswerten Effekt
- › Aktuell wird ein alternatives Ultraschallsystem getestet



## Herausforderungen der Wärmeübertragung aus dem Hochofen-Gaswaschwasser

- › Nach 20 Tagen in der HO-Rinne gab es eine 1 cm Ablagerungsschicht
- › Die Ablagerungen konnten mit einem Wasserstrahl entfernt werden
- › Abstand von 60 mm ist ausreichend
- › Wärmeübertrager-Kissen benötigen eine regelmäßige mechanische Reinigung, um leistungsfähig zu bleiben



**Bild 5:** 2 Wärmeübertrager-Kissen mit 60 mm Abstand  
a) Am Tag 0  
b) Am Tag 20  
c) Nach Anspülung mit Wasser

## Zusammenfassung

- › Hochofen-Gaswaschwasser ist die meist verfügbare Wärmequelle auf moderatem Temperaturniveau (46°C): Wärmepumpe ist nötig für Fernwärme & Badvorwärmung
- › Direktreduktion-Gaswaschwasser hat die höchste Temperatur (bis 82°C) und kann **direkt** zur Fernwärme und Prozesswasserbehandlung mit Membrandestillation eingesetzt werden
- › Wärmenutzung aus dem Gaswaschwasser kann wirtschaftlich sein
- › Zur Wärmeauskopplung eignen sich Wärmeübertrager-Kissen mit 60 mm Abstand
- › Diese benötigen eine regelmäßige mechanische Reinigung, um leistungsfähig zu bleiben

## Ausblick

- › Weitere Tests mit Wärmeübertrager-Kissen und einem alternativen Ultraschallsystem in CORNERSTONE in 2026
- › EU-Projekt EnWaRec gestartet am 01.07.2025
  - › Tests mit Düsenabreinigung von Wärmeübertrager-Kissen
  - › Modifikation von Wärmeübertrager-Oberflächen mit hydrophober Schicht

## Danksagung & Kontakt

**CORNERSTONE:** Combined technologies for water, energy and, solute recovery from industrial process streams (CORNERSTONE, Project ID 101138504, Horizon Europe (HORIZON))

**EnWaRec:** Recovery of energy and water from cooling circuits for a sustainable transition to hydrogen-based direct reduction (EnWaRec, Project ID 101216643, Research Fund for Coal and Steel (RFCS))



Funded by  
the European Union

**Kontakt: Dr.-Ing. Pavel Ivashechkin**  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
Telefon +49 98492-321  
E-Mail [pavel.ivashechkin@bfi.de](mailto:pavel.ivashechkin@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

E-Mail [pavel.ivashechkin@bfi.de](mailto:pavel.ivashechkin@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)  
Telefon +49 98492-321  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Kontakt: Dr.-Ing. Pavel Ivashechkin



VDEh-Betriebsforschungsinstitut  
GmbH



# Entölung von Zunder und Feinschlämmen zur Kreislaufführung

[Martin Hubrich](#), Susanna Wan

BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: Kreislaufwirtschaft



- › **Produktionsbedingter Eintrag von Öl und Fett beim Strangguss und Warmwalzen in das Kühlwasser**
- › Abtrennung freies Öl und grober Zunder in Absetzbecken
- › Parallele Entfernung von Öl und feinen Partikeln  $< 100 \mu\text{m}$  in Sandfiltern und Anfall eines ölhaltigen Feinschlamm (EU: 6 Millionen t/a)
- › **Öl-Gehalte bis zu 10 Gew.-% verhindern direkte metallurgische Verwertung**
- › Effekt: Emissionen, erhöhter Bindemittelbedarf für Brikettierung bzw. unzureichende Lager- und Transportstabilität, Verlust an Eisenträger
- › **Aktuelle und zukünftige Grenzwerte für Öl**
  - › Sinteranlage/Hochofen/Lichtbogenofen:  $< 0,1/0,2 \text{ Gew.-%}$
  - › Konverter:  $< 0,1 \text{ Gew.-%}$
  - › EAF/Direktreduktion:  $< 0,1/0,2 \text{ Gew.-%}$
- › **Unveränderter Anfall ölhaltiger Zunder und Feinschlamm auch nach Abschluss der Transformation**



Warmwalzwerk



Absetzbecken

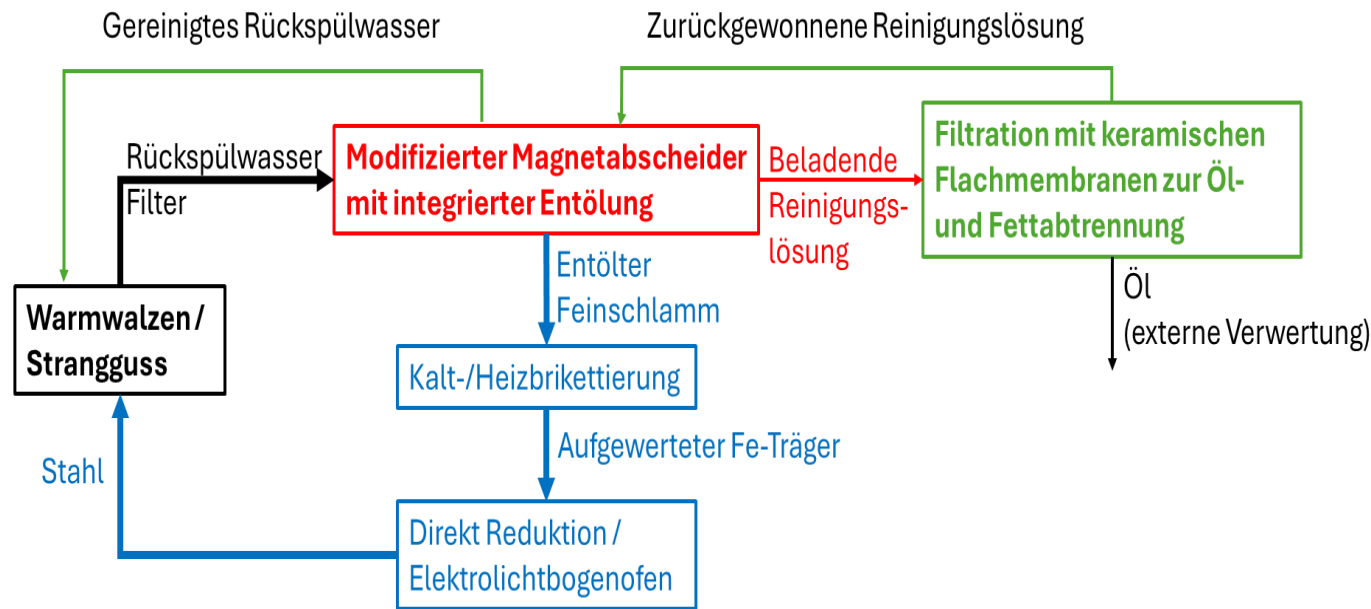


Ölhaltiger Feinzunder

# Übersicht Entölungsverfahren

Verfahren	Restöl-Gehalt [Gew.-%]	Bemerkung	Bewertung
Brikettierung (ohne Vorbehandlung des ölhaltigen Schlammes)	<< 3	Einfache Verfahrenstechnik, Mischung mit anderen Fe-Trägern/Bindemitteln erforderlich	Anforderungen für Verwertung werden nicht erfüllt
Direkte/Indirekte Beheizung (Drehrohrofen)	< 0.1	Trockener Schlamm erforderlich Temperatur: 450 – 550°C	Hohe CO <sub>2</sub> Emissionen
Konduktive Beheizung	< 0.1	Trockener Schlamm erforderlich	
Vakuum Behandlung	< 0.1	Trockener Schlamm erforderlich Behandlungsdauer: 12 - 14 h	
Mehrstufige Waschung mit Isohexan	< 0.1	Explosionsschutz erforderlich, Regeneration Isohexan mittels Strippung mit N <sub>2</sub>	Hohe Investitions- und Betriebskosten sowie Anforderungen Sicherheit
Tensid Waschung	< 0.2	Rückgewinnung von Tensiden und Abwasserbehandlung erforderlich	TransZeroWaste Projektansatz
Mikrowellenbehandlung	< 0.1	Kombinierte Entölung und Entzinkung	In Entwicklung

# Ansatz zur Zunderabscheidung, Entölung und Rückgewinnung der Entölungslösung

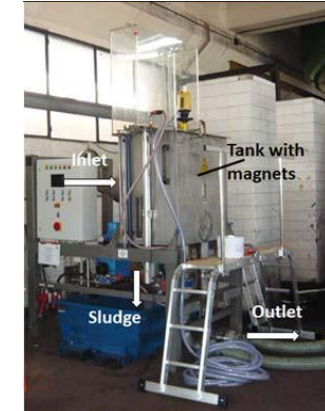


## Laboranlagen



Magnetabscheider

## Pilotanlagen



Filtration mit keramischen Flachmembranen



# Übersicht verfügbarer Entölungsmittel

Entölungsmittel	Gruppe	Hauptbestandteil	pH-Wert	Eigenschaften
1	<b>Tensid</b>	Alkoxylat	5,5 – 8,5	Dispergierbar
2		Polyethylenglycol, propoxylat	7	Unlöslich
3		EDTA + Etidronsäure	8,7	Wassermischbar
4		Oleylamin	5 – 7	Wässrige Emulsion
5	<b>Lösungsmittel</b>	Monoterpen	4,1	Wassermischbar
6		Butoxyethoxyethanol, Oleylamin, Alkohol ethoxylate	k.A.	Unlöslich
7	<b>Anorganisch, alkalisch</b>	Kombination Kalium, Tensid	k.A.	Wassermischbar, pot. korrosiv
8		Kombination Natrium, Tensid, Lauge	12,7	Wassermischbar



Beladenes Entölungsmittel, emulgierend

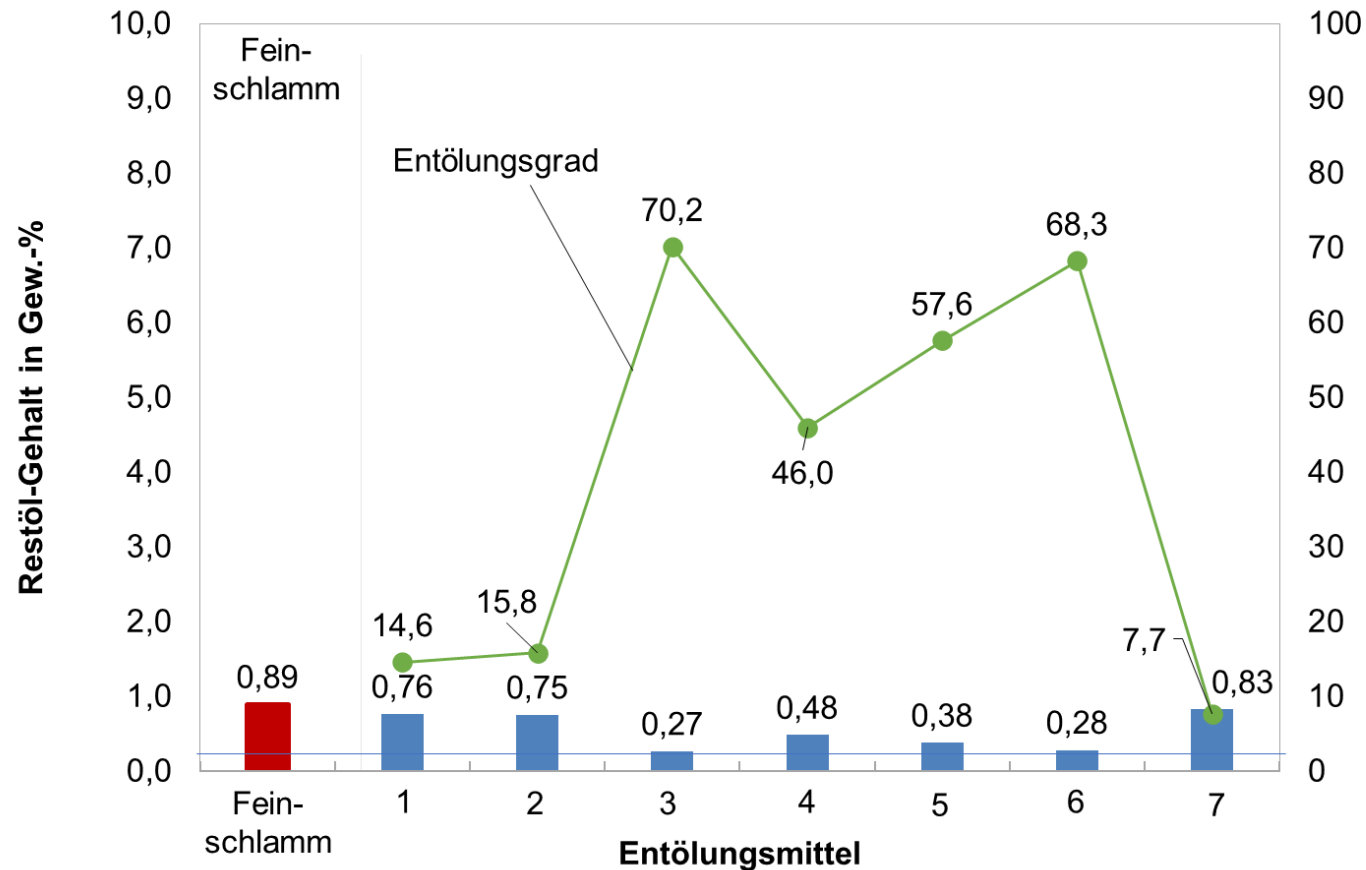


Beladenes Entölungsmittel, wasserunlöslich

**Auswahlkriterien:** Restölgehalt Zunder/Feinschlamm, Regenerationsfähigkeit, Einsatzmengen/Betriebskosten, ggf. besondere Anforderungen

# Ergebnisse zur Entölung von ölhaltigem Feinschlamm (Warmwalzwerk I)

– Öl-Gehalt: 0,89 Gew.-%



## Bedingung

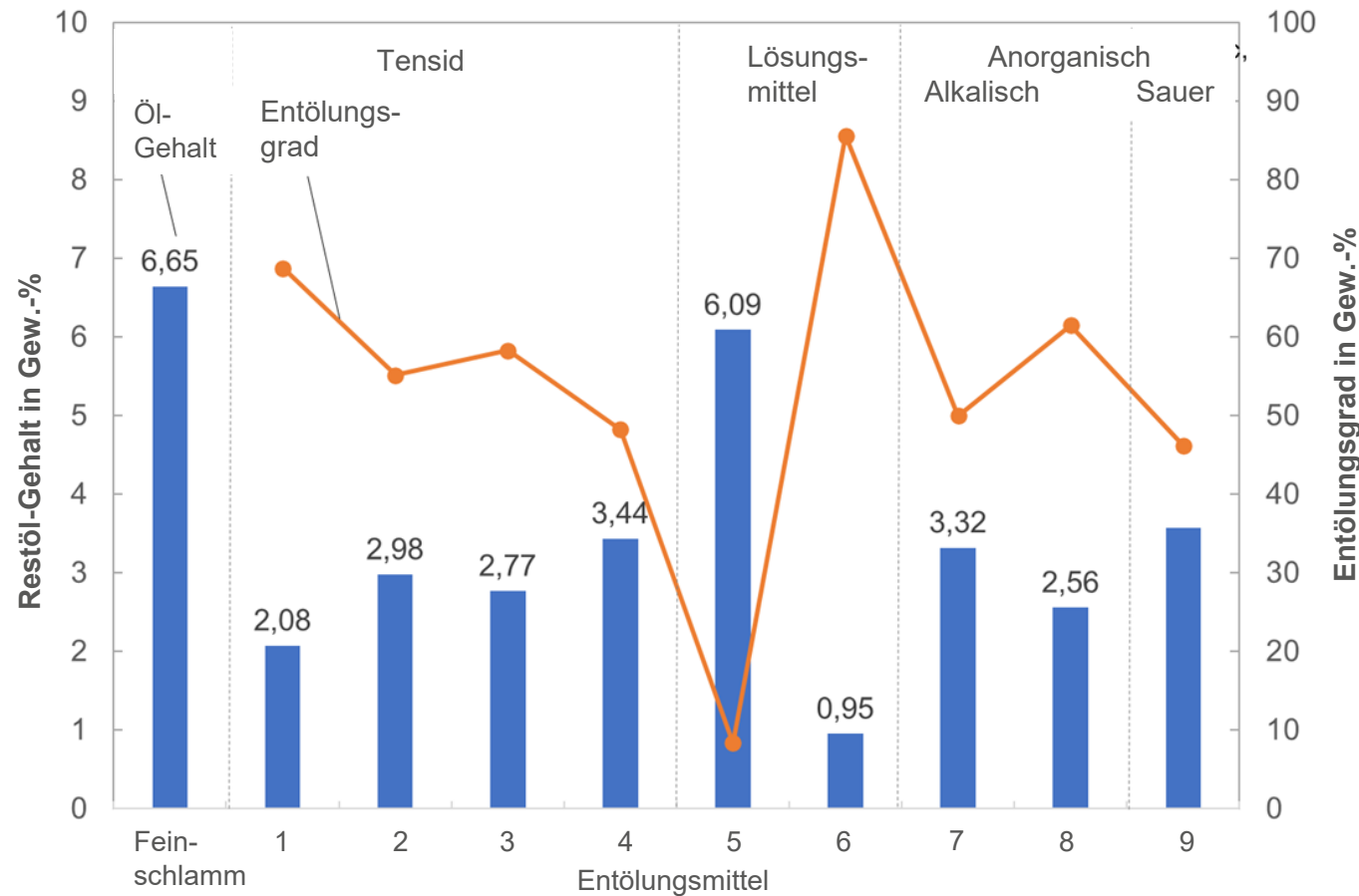
- › Behandlungsziel: < 0,2 Gew.-%
- › Erforderliche Abscheidung: > 77%
- › 1-stufige Waschung bei Raumtemperatur

## Ergebnisse

- › Maximale Entölung von 68 % und 70 % durch Verwendung von Entölungsmittel 6 (Lösungsmittel: Alkohol-Mischung) bzw. Entölungsmittel 3 (Tensid: EDTA, Etidronsäure)

# Ergebnisse zur Entölung von ölhaltigem Feinschlamm (Strangguss)

– Öl-Gehalt: 6,65 Gew.-%



## Bedingungen

- › Behandlungsziel: < 0,2 Gew.-%
- › Erforderliche Entölung: 97%
- › 1-stufige Waschung

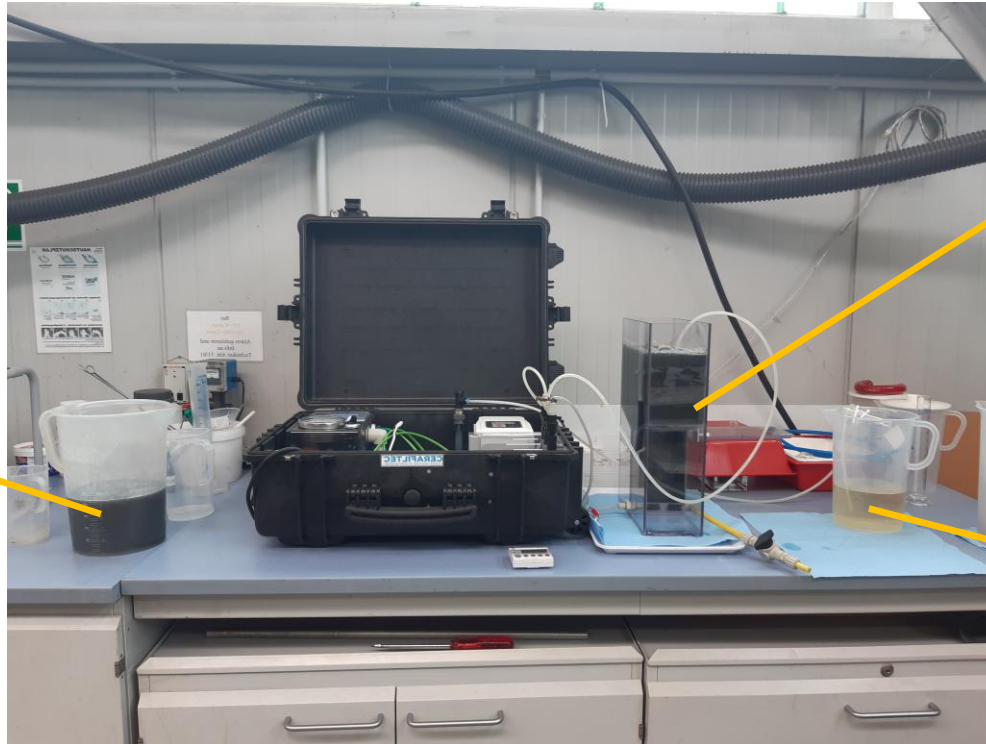
## Ergebnisse

- › Max. Entölung von 85% durch Reinigungsmittel 6 (Lösungsmittel, Alkoholmischung) - erreichter Restölgehalt: 0,96 Gew.-%
- > **Verbesserung erforderlich**
- › Mindestens 3-Schritte-Waschbewegung erforderlich
- › Ultraschall Einsatz ohne Effekt
- › Limitierter Effekt bei Temperaturerhöhung bis auf 60°C
- > **hoher apparativem Aufwand/ Chemikalienbedarf erforderlich**

# Rückgewinnung Entölungsmittel durch Einsatz keramischer Flachmembranen



Beladene  
Entölungslösung



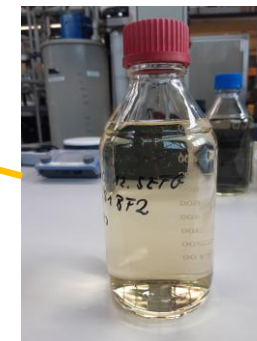
Laboranlage mit keramischen Flachmembranen



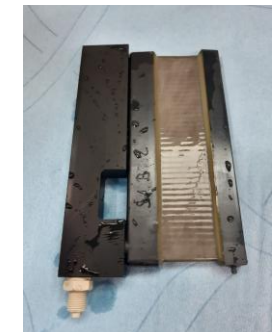
Vorlagebehälter mit  
keramischer Flachmembran



Membran vor  
Rückspülung



Permeat



Membran nach  
Rückspülung

- Vollständige Abtrennung freier Öle, Fette und Feststoffe sowie emulgierter Öle (Tropfengröße > 0,1 µm)

### Zusammenfassung

- › Entölung von Zunder und Feinschlamm für metallurgische Verwertung und vorherige Konditionierung (Brikettierung, Pelletierung) erforderlich
- › Handlungsbedarf unabhängig von Transformation, da Strangguss und Warmwalzen unverändert bestehen bleiben
- › Entölung mit geeigneten Entölungsmitteln und deren Rückgewinnung möglich
- › Technisch-Wirtschaftliche Grenzen bei ölhaltigem Feinzunder von Stranggussanlagen (mehrstufige Waschung, hoher apparativer Aufwand und Chemikalieneinsatz erforderlich)

### Ausblick

- › Betriebliche Erprobung der Entölung mittels Entölungsmitteln zur Erzeugung von 20 t entöltes Material mit anschließender Brikettierung Direktreduktion und Einsatz im betrieblichen Elektrolichtbogenofen
- › Aktuelle Untersuchungen zum Einsatz von Mikrowellen zur simultanen Entzinkung und Entölung

**Kontakt: Dipl.-Ing. Martin Hubrich**  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
Telefon +49 98492-343  
E-Mail [martin.hubrich@bfi.de](mailto:martin.hubrich@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

E-Mail [martin.hubrich@bfi.de](mailto:martin.hubrich@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)  
Telefon +49 98492-343  
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Kontakt: Dipl.-Ing. Martin Hubrich