

# Institut für Technologien der Metalle

## Lehrstuhl für Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung



## Recycling of Oxidic and Metallic Waste Materials

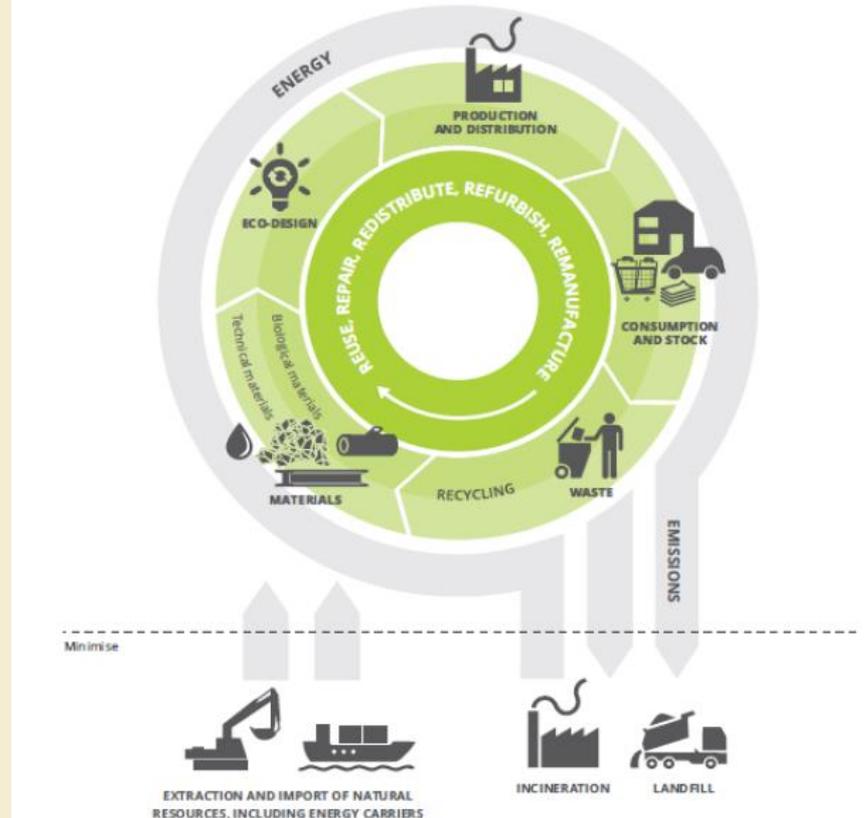
Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike

**This Lecture Material is Protected by Copyright and Designed for Personal Use Only. Any Unauthorized Redistribution as well as Reproduction for Commercial Use of Part or All of this Document are Strongly Prohibited.**

# When is Recycling Effective?



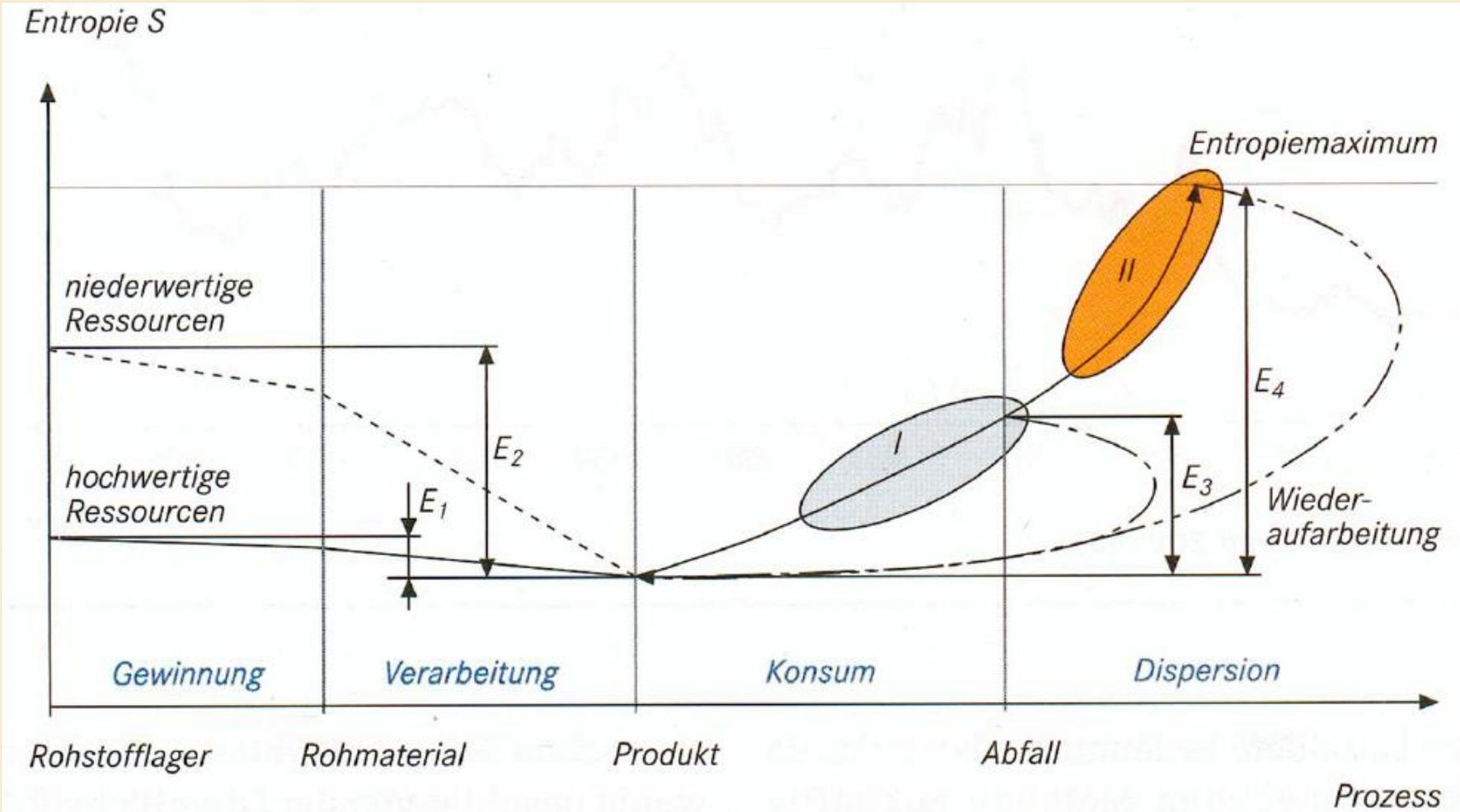
Figure 1.1 A simplified model of the circular economy for materials and energy



<https://www.eea.europa.eu/publications/circular-economy-in-europe>, European Environment Agency 2016

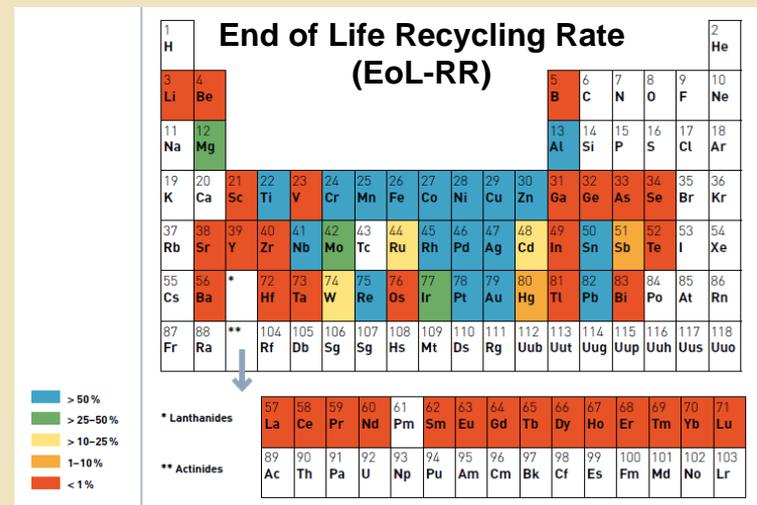
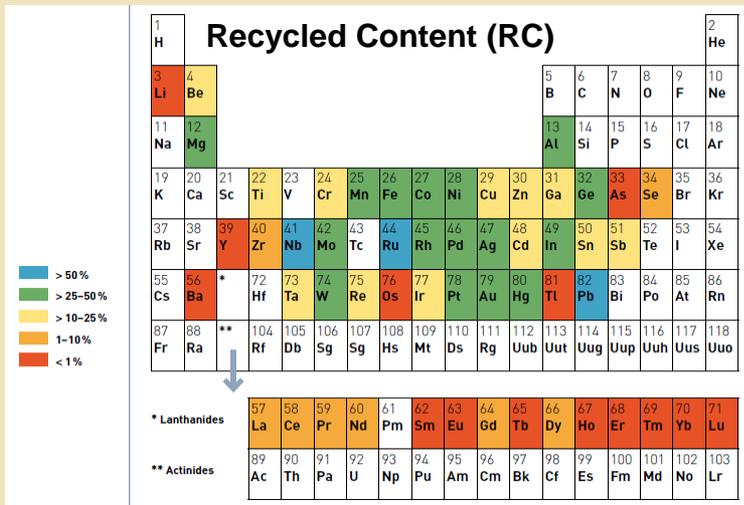
Deike, R.: Die besondere Bedeutung der Metalle unter dem Aspekt einer Circular Economy, WFZruhr Workshop: Qualitativ hochwertiges Recycling, Ein Beitrag zur Ressourcenschonung und zum Umweltschutz, Dortmund 10.05.17

# Entropy Development during the Production, Use, and Recycling of Products → Life Cycle



Deike, R, Dings, J.: Giesserei 94 (2007) Nr.6, S.198-2005

# Recycled content and EoL-recycling rate of different metals



In periods of economic growth, the primary metal share grows faster than the secondary share, so that the recycled content (RC) decreases and is substantially smaller than the EoL-recycling rate. In addition the recycled content is dependent on the availability of secondary raw material.

UNEP International Resource Panel: Recycling rates of metals, 2011, <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8702>

E.g. electronics = complex multi-material assemblies  
Responsible recycling to cope with hazards while recovering value



- a complex mix of ...
- Ag, Au, Pd... (precious metals)
  - Cu, Al, Ni, Sn, Fe, Bi, Sb, In... (base & special metals)
  - Hg, Be, Pb, Cd, As, ... (hazardous substances)
  - Halogens (Br, F, Cl...)
  - Plastics & other organic materials
  - Glass, ceramics, wood, ...
- ... in a tightly interconnected assembly



➔ High quality recycling = economically viable recovery of various relevant contained materials with high yields, in marketable quality, and meeting high environmental\* - & social standards.



\* incl. energy & CO<sub>2</sub>-balance

© Hagelüken, Ruhr Symposium, 17.10.2023

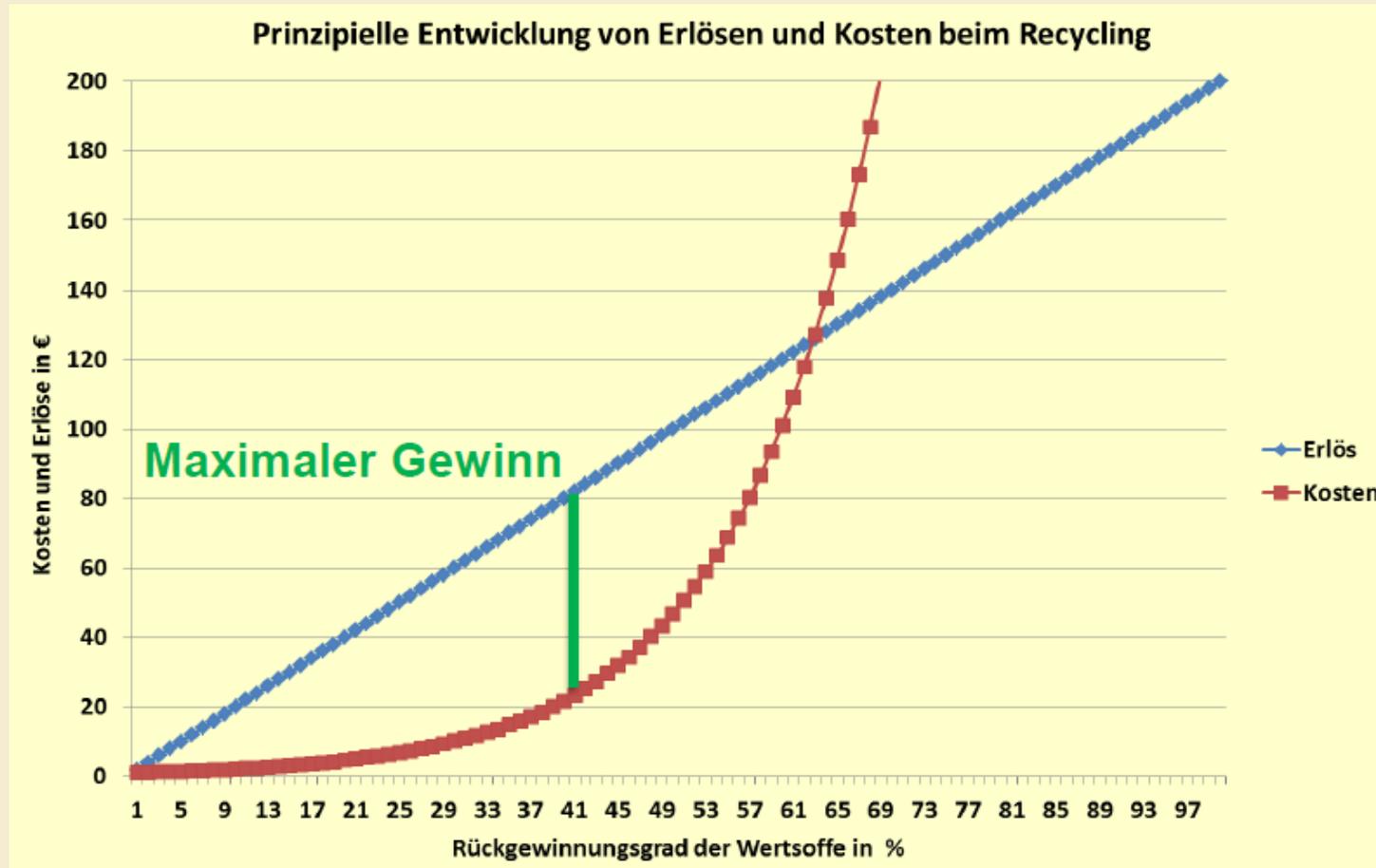
© Umicore

5

Tab. 2 Rückgewinnungsquoten und Rohstoffpreise ausgewählter Metalle im Mobiltelefon

Metall	Menge pro Mobiltelefon (kg)	Rückgewinnungsquote (%)	Preis (USD/kg) <sup>c)</sup>	Zurückgewonnene Menge (kg)	Wert der zurückgewonnenen Metalle (USD/Mobiltelefon)
Kupfer	0,015 <sup>a)</sup>	95 <sup>b)</sup>	7	0,01425	0,10
Silber	0,0005 <sup>a)</sup>	95 <sup>b)</sup>	430	0,000475	0,02
Gold	0,000027 <sup>b)</sup>	98 <sup>d)</sup>	22.280	0,00002646	0,59
Palladium	0,000015 <sup>a)</sup>	95 <sup>b)</sup>	11.413	0,00001425	0,16
				Summe	0,87

# Principal Development of Revenue and Cost in Recycling Process



In Anlehnung an Bunge, R.: Recycling ist gut, mehr recycling ist besser – oder nicht?, Berliner Recycling und Rohstoffkonferenz, Berlin 08.03.16

# Scrap Recycling in the steel industry

outokumpu 

## The role of materials for sustainable components on the example of stainless steel

October 17<sup>th</sup>, 2023

9<sup>th</sup> Ruhr Symposium

Session II. Recyclable High-Performance Materials

Stefan Lindner

Lindner, S.: Ruhrsymposium 2023, Universität Duisburg-Essen,

## Driving circular economy with stainless steel



Lindner, S.: Ruhrsymposium 2023, Universität Duisburg-Essen,

# The foundry industry is doing today what the EU wants for the future



Foto: Soschinski/BDG

Deike, R., 2020. Bedeutung der Gießerei-Industrie in einer Circular Economy. <https://doi.org/10.17185/duepublico/71307>

With end of life  
the process  
starts again in a  
closed loop



Responsible raw  
material consumption

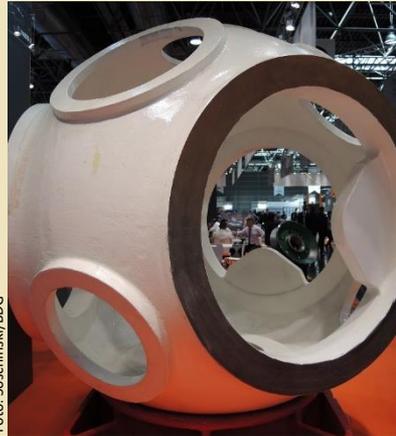


Foto: Soschinski/BDG



Foto: Soschinski/BDG

Deike, R., 2021. Die Bedeutung energieintensiver metallurgischer Betriebe: Unter dem Aspekt des Recyclings von Eisen, Stahl und NE-Metallen. <https://doi.org/10.17185/duepublico/74510>

For the production of  
products for future  
industries



# Der weltweite Schrotteinsatz in 2017 bei der Herstellung von Stahl nach der Herkunft



Daten nach: Bureau of International Recycling (BIR), <https://bir.org>

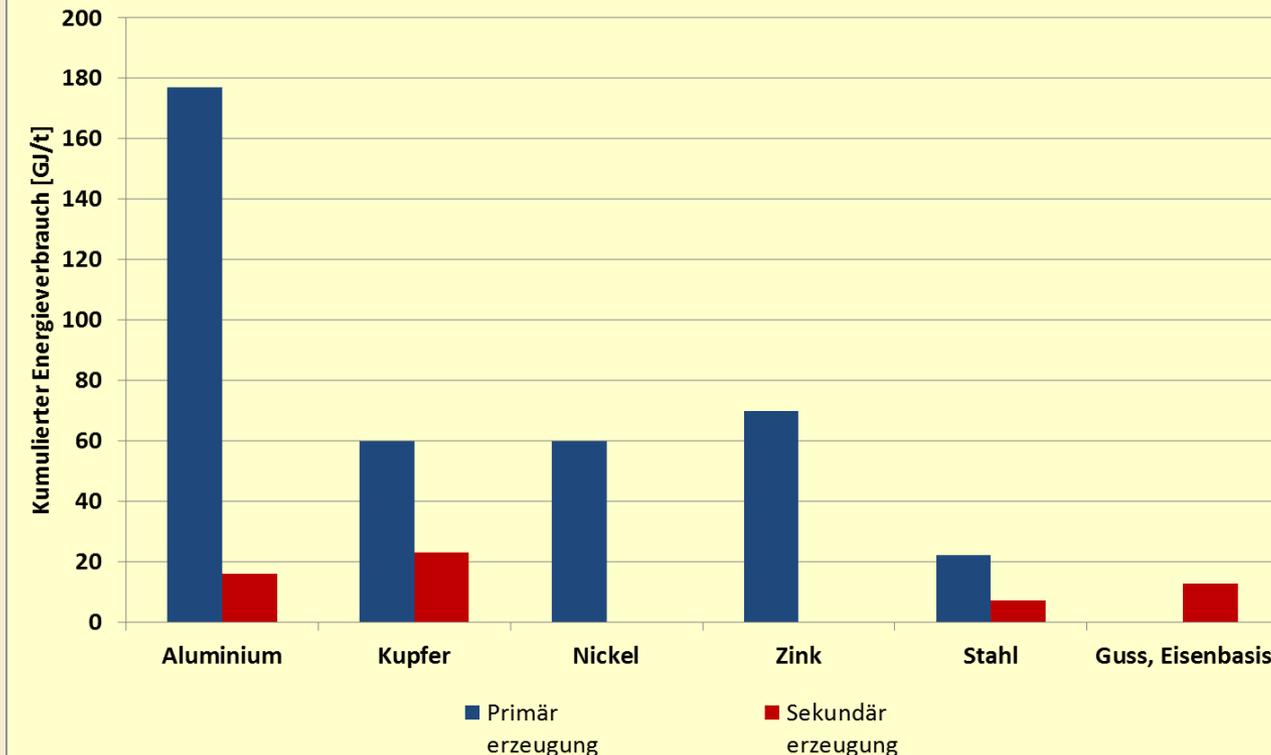
# Tolerable Alloying Elements for the Production of Various Steel Grades

## Zulässige Gehalte an Begleitelementen

Vormaterial Erzeugnis Analyse	Brammen		Knüppel			Edelstahl	
	Feinblech	Grobblech/Rohre	Betonstahl	Steelcord	Kaltstauchgüten	18/8	17/12/2
	%	%	%	%	%	%	%
C	0,02-0,08	0,08-0,10	0,190	0,640	0,040		
Si	0,02	0,20-0,30	0,230	0,170	0,040		
Mn	0,15-0,22	1,40-1,55	0,500	0,520	0,350	< 2,000	< 2,000
P	< 0,012	< 0,020	< 0,035	< 0,010	< 0,015	< 0,045	< 0,045
S	< 0,012	< 0,002	< 0,025	< 0,010	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Al	0,035	0,030	-	-	0,035		
Cu	< 0,040	< 0,100	< 0,400	< 0,050	< 0,100	< 0,400	< 0,400
Cr	< 0,040	< 0,030	< 0,200	< 0,050	< 0,100	16-19	16,5-18,5
Ni	< 0,040	< 0,030	< 0,200	< 0,050	< 0,080	6,0-8,5	10,0-13,0
Mo	< 0,010	< 0,080	< 0,050	< 0,010	< 0,010	< 0,800	2,00-2,50
Cu+Cr+Ni+Mo	< 0,130	< 0,350	< 0,800	< 0,100	< 0,200		
	Roheisenanalyse		Eisenschwammanalyse				
Cu	< 0,010	< 0,010		< 0,010	< 0,010		
Cr	0,030	0,030		< 0,010	< 0,010		
Ni	0	0		0	0		
Mo	0	0		0	0		
	Einsatz in %						
Roheisen	80	80	0	0	0	0	0
Eisenschwamm	0	0	0	65	65	0	0
Schrott	20	20	100	35	35	100	100
	Zulässige Gehalte an Begleitelementen im Schrott in %						
Cu	< 0,160	< 0,460	< 0,400	< 0,120	< 0,280	< 0,400	< 0,400
Cr	< 0,080	< 0,030	< 0,200	< 0,120	< 0,260	16-16,5	15-17
Ni	< 0,200	< 0,150	< 0,200	< 0,140	< 0,220	8-9,5	9-12
Mo	< 0,050	< 0,400	< 0,050	< 0,028	< 0,028	< 0,500	1,7-2,2
Cu+Cr+Ni+Mo	< 0,490	< 1,050	< 0,800	< 0,248	< 0,530		

# Cumulative energy consumption for the production of different elements

Vergleiche der Kumulierten Energieverbräuche (KEA) für die Primär- und Sekundärerzeugung verschiedener Industriemetalle

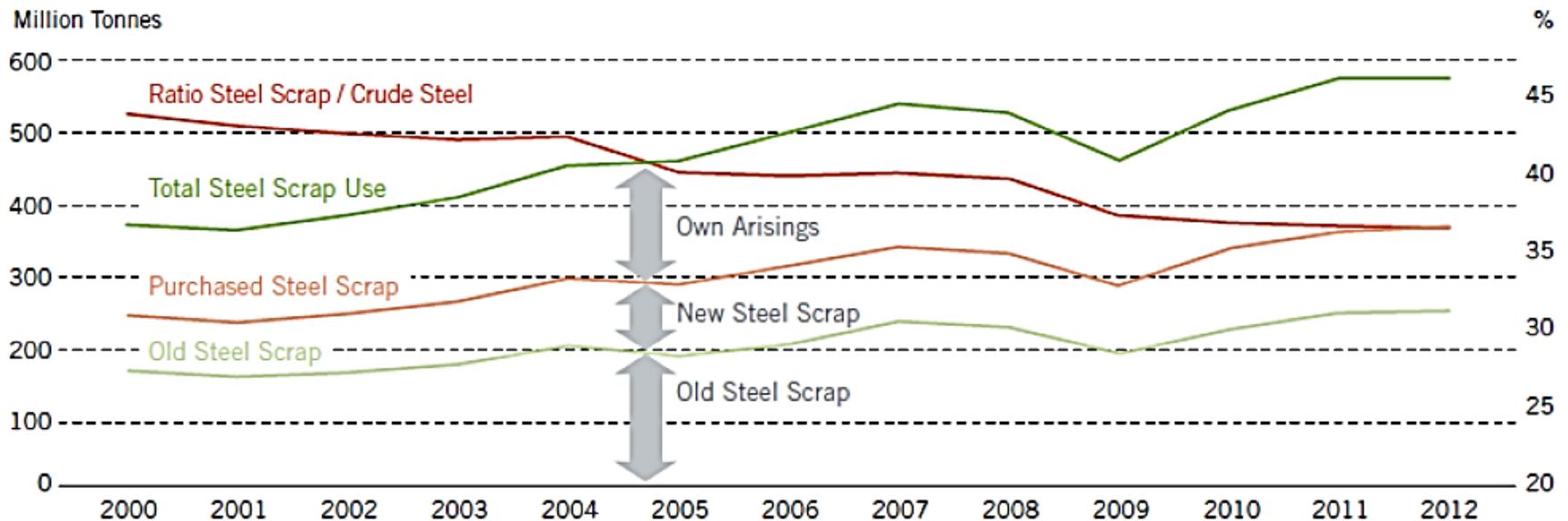


Nach Daten : <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>

The energy consumption for the production of secondary metals from waste materials are lower than those used for the production of primary metals

# Steel Production and Scrap Consumption 2000 – 2012

## STEEL SCRAP FOR STEELMAKING IN THE WORLD



Source: WV Stahl/BIR

Bureau of International Recycling, www.bir.org

## Kurzfassung der europäischen Schrottsortenliste

Sorte	Kurzbeschreibung	Max. Maße in m	Min. Gew. in t/m <sup>3</sup>	Max. Schutt in %	Angestrebte Analysenwerte in %		
					Cu	Sn	Cr, Ni, Mo
E 1	Leichter Stahlaltschrott, meist < 6 mm Stärke	<1,5x0,5x0,5	> 0,5	< 1,0	< 0,400	< 0,020	Σ < 0,300
E 3	Schwerer Stahlaltschrott, meist > 6 mm Stärke	<1,5x0,5x0,5	>0,6	< 1,5	< 0,250	< 0,010	Σ < 0,250
E 2	Schwerer Stahlneuschrott, meist > 3 mm Stärke	<1,5x0,5x0,5	>0,6	< 0,3	Σ < 0,300		
E 8	Leichter Stahlneuschrott, meist < 3 mm Stärke	<1,5x0,5x0,5	>0,4	< 0,3	Σ < 0,300		
E 6	Leichter Stahlneuschrott, meist < 3 mm Stärke, verdichtet oder in festen Paketen		>1,0	< 0,3	Σ < 0,300		
E 40	Shredderschrott, zerkleinerter Stahlaltschrott		>0,9	< 0,4	< 0,250	< 0,020	
E 46	Shredderschrott aus der Müllverbrennung		>0,8	Fe > 92 %	< 0,500	< 0,070	
E 5 H	Kohlenstoffstahlspäne, homogen				Eine chemische Analyse kann gefordert werden		
E 5 M	Kohlenstoffstahlspäne, gemischt				< 0,400	< 0,030	Σ < 1,0
EHRB	Alter und neuer Stahlschrott, Betonstahl	<1,5x0,5x0,5	>0,5	< 1,5	< 0,450	< 0,030	Σ < 0,350
EHRM	Alte und neue Maschinenteile	<1,5x0,5x0,5	>0,6	< 0,7	< 0,400	< 0,030	Σ < 1,0

Stahl-Zentrum, Düsseldorf 2001

A European list of scrap grades has been agreed between the European Steel Industry Association (EUROFER) and the European Recycling Association for Iron and Steel (EFR), which is published in 6 languages and entered into force on 01.07.1995. Defined steel scrap grades refer only to carbon steel scrap and the varieties must:

1. To be capable of charging
2. Dischargeable with magnet
3. Absolutely clean
4. Free of any constituents and attachments which are harmful to the treatment and smelting and cause unacceptable emissions
5. Explosives, explosive objects and closed hollow bodies are excluded
6. Deliveries containing the following components are excluded from acceptance:
  - Old car bodies
  - Engines
  - Oiled gear
  - Shavings
  - sinter and slag
7. Steel scrap from waste incineration and from waste separation (separate recycling of cans) have to be recorded separately due to different Cu and Sn contents.

In practice, the delivery of the supplier is a process that involves risks and costs.

One of the contracting parties must decide to make preliminary payments if the implementation of the contract is to be initiated.

- Payment net cash, or payment on delivery
- Cash on delivery
- Cash against documents
- Cash against letter of credit

Wörten, R.; Metzler-Müller, K.: Handelsklauseln im nationalen und internationalen Warenverkehr, Richard Boorberg Verlag 1996

In practice, the delivery of the supplier is a process that involves risks and costs.

One of the contracting parties must decide to make preliminary payments if the implementation of the contract is to be initiated.

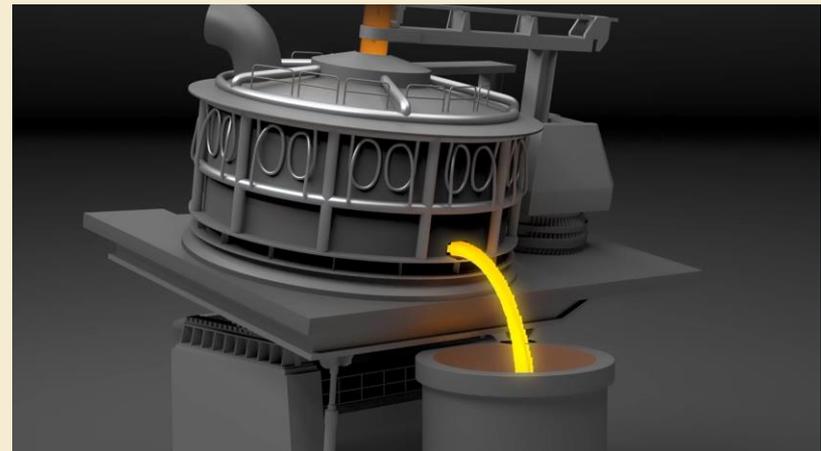
- Payment net cash, or payment on delivery
- Cash on delivery
- Cash against documents
- Cash against letter of credit

Wörten, R.; Metzler-Müller, K.: Handelsklauseln im nationalen und internationalen Warenverkehr, Richard Boorberg Verlag 1996

# Zinc recycling from EAF dust with a rotary kiln



# Steel Making Process Route by Electric Arc Furnace

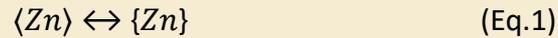


<https://www.gmh-gruppe.de/de-de/gmh-gruppe/wer-wir-sind/produktionsstandorte/georgsmarienhuetten-gmbh.html>

# What happens with zinc during the incineration process?

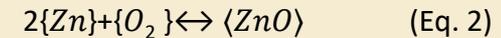
Zinc behaves as follows when zinc-coated sheet metal is melted down:

1. Zinc evaporates at 907°C :

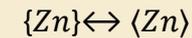


2. In the presence of oxygen

- under oxidizing conditions zinc oxide (melting point: 1975°C) :

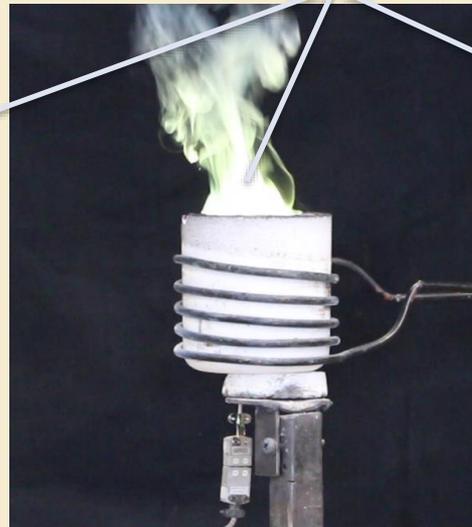


- under reducing conditions zinc liquid (melting point: 420°C) :



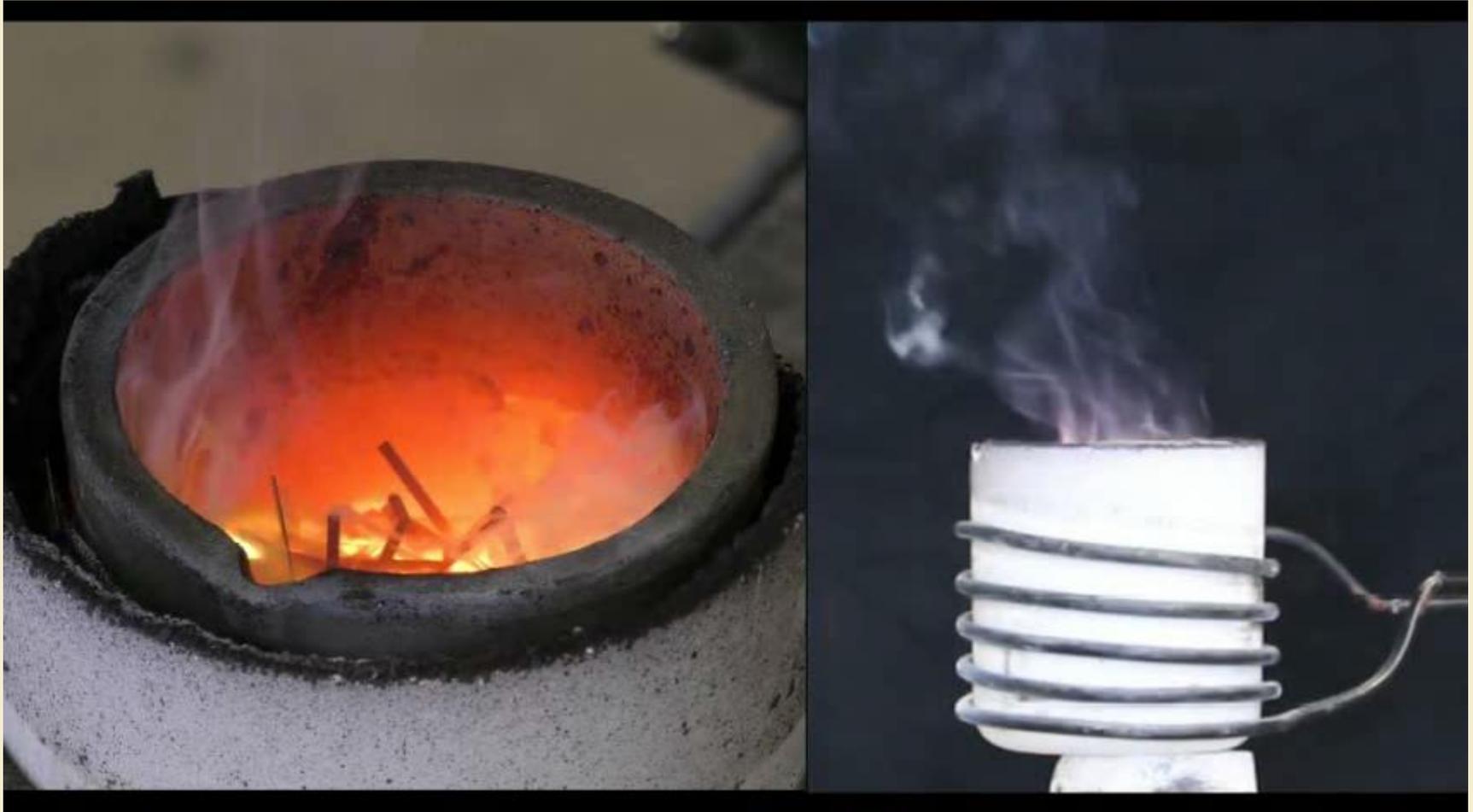
(Eq. 3)

Zinc oxide (melting point : 1975°C)

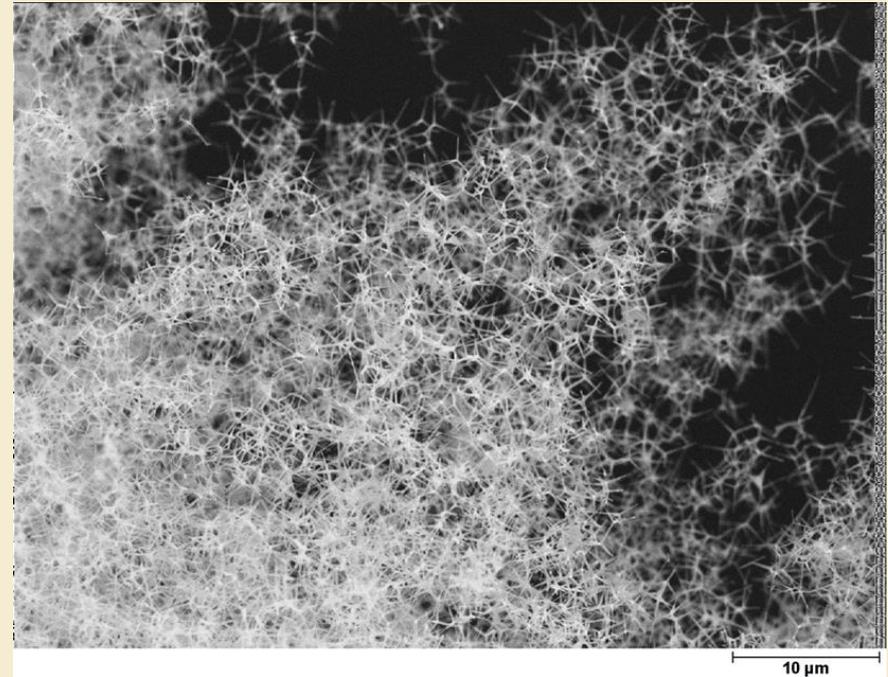
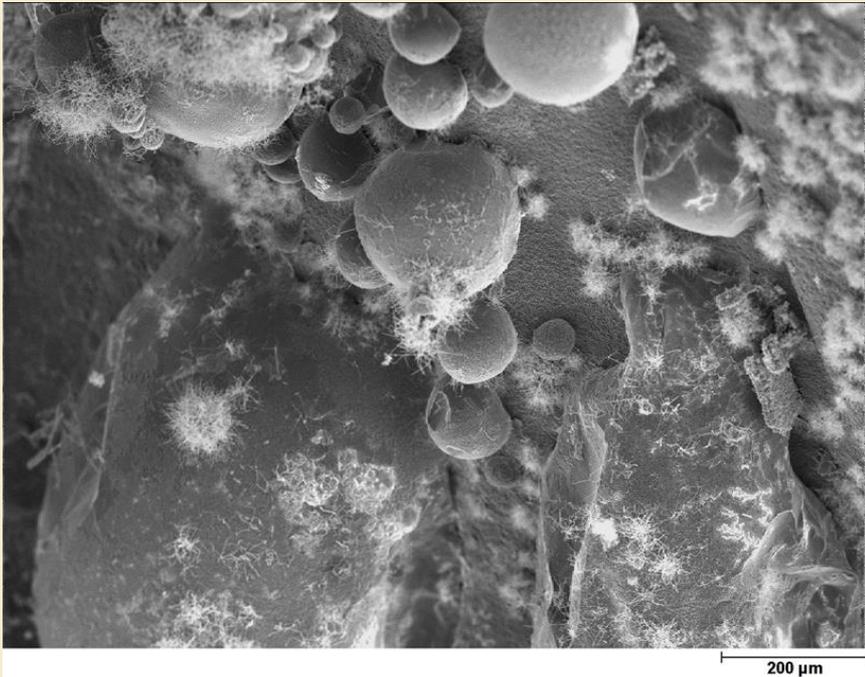


Deike, R.: *Metals in fine Fraction of Bottom Ash*, 3<sup>rd</sup> International VDI Conference Metals and Minerals Recovery from IBA Düsseldorf, 8th Nov. 2018,

# What happens with zinc during the incineration process?



# Different Zinc Reaction Products in dependence of gas atmosphere



Deike, R.: Das wirtschaftliche Recycling von Metallen und Metalloxiden unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussgrößen, Urban Mining Kongress 2014, Essen, 11-12-06.2014

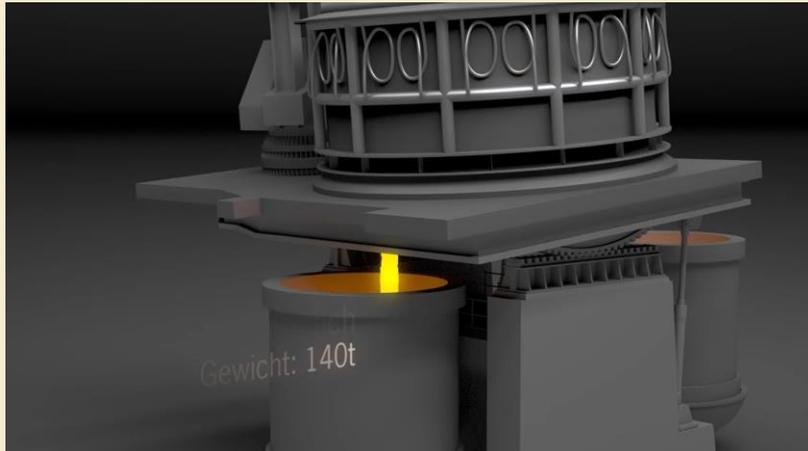
# SEM Picture of Zinc Reaction Products



Spektrum	In Statistik	O	Zn	Total
Spektrum 1	Ja	4.78	95.22	100.00
Spektrum 2	Ja	26.76	73.24	100.00

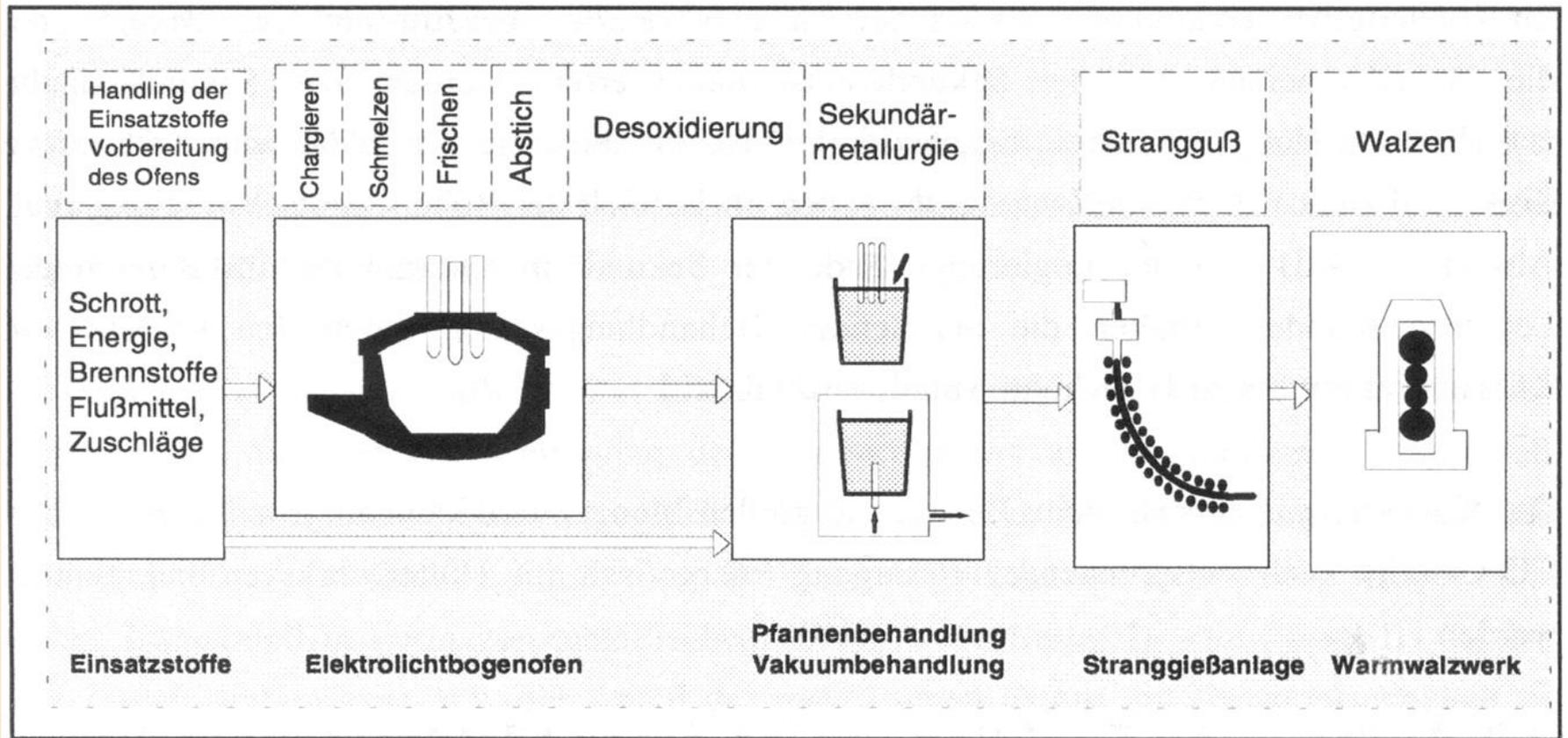
All Results in Mass%

# Steel Making Process Route by Electric Arc Furnace



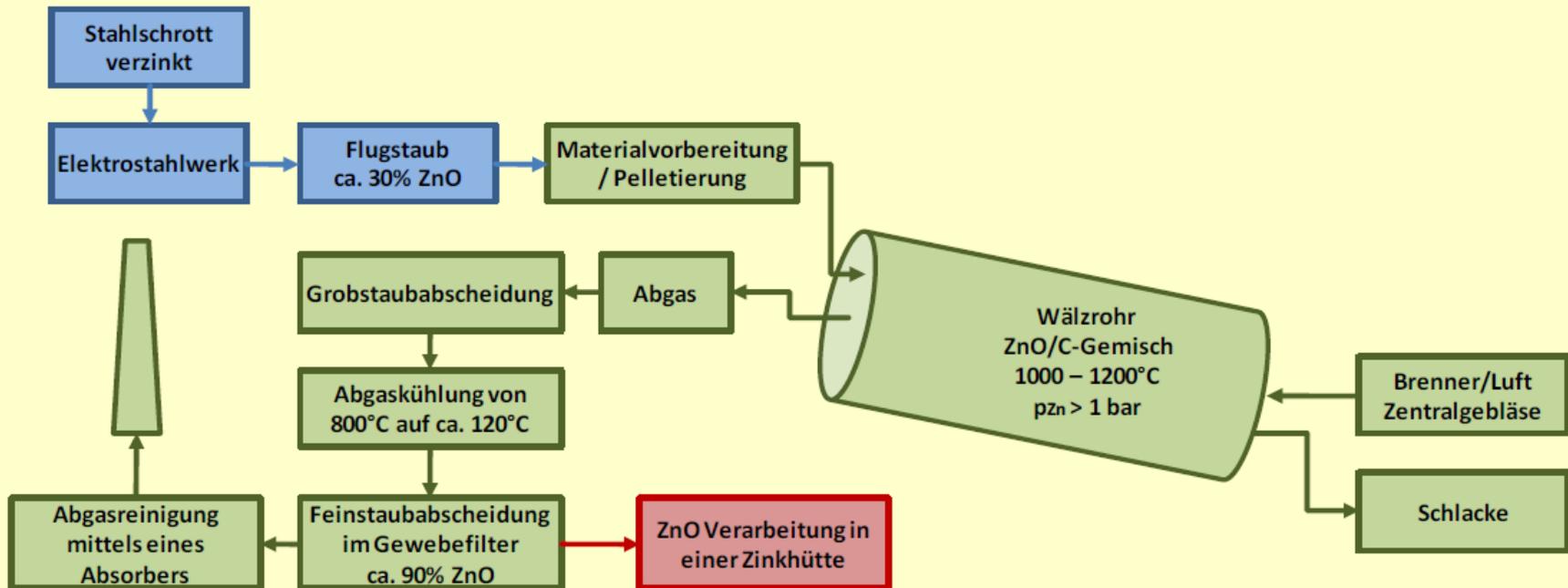
<https://www.gmh-gruppe.de/de-de/gmh-gruppe/wer-wir-sind/produktionsstandorte/georgsmarienhuetten-gmbh.html>

# Steel Making Process Route by Electric Arc Furnace



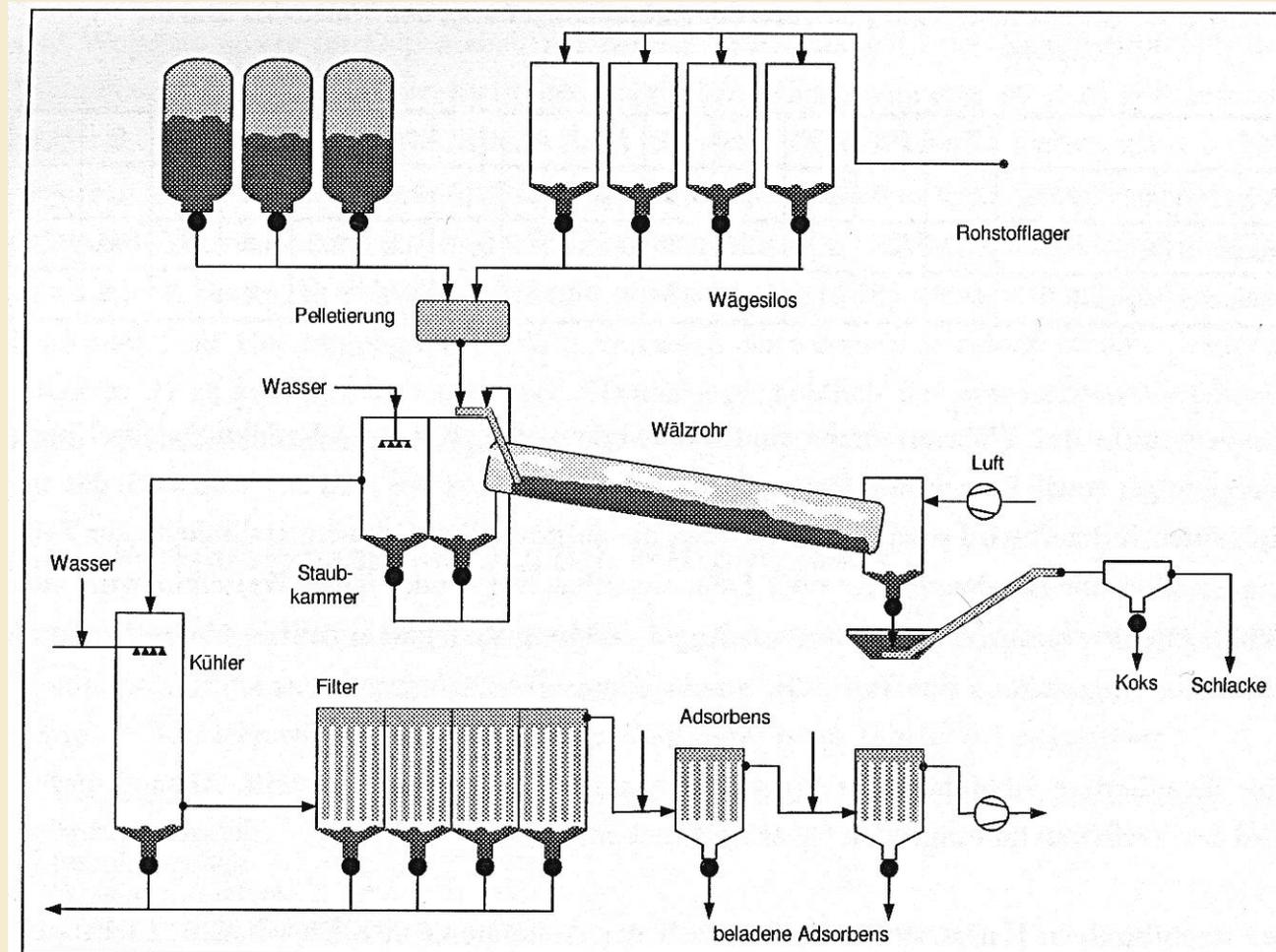
Rentz, O: Prozessintegrierte Umweltschutzmaßnahmen in der Eisen- und Stahlindustrie, BMBF Abschlussbericht 01RV9701, 1999

# Recycling Process of Zinc from EAF Dust Filter using Rotary Kiln in BEFESA Zinc Duisburg GmbH



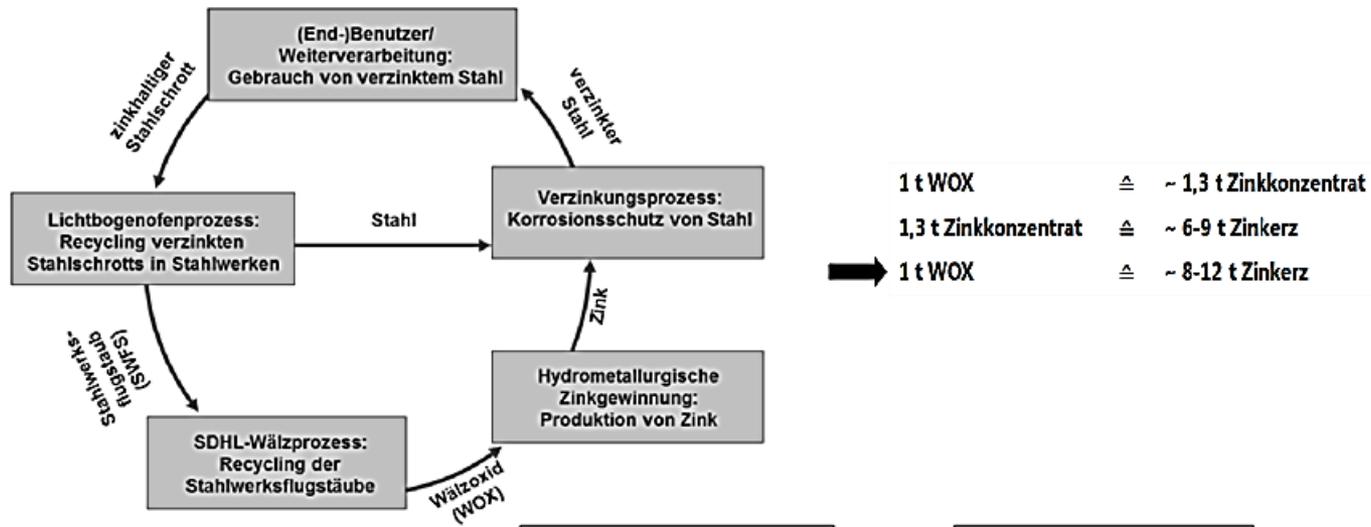
Deike, R.: Die zukünftige Bedeutung des Recyclings metallischer und oxidischer Reststoffe unter dem Aspekt veränderter globaler Rohstoffmärkte, in Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen (Hrsg. U.Teipel u. R.Schmidt), Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2011

# Process Flow Diagram of Rotary Kiln Process

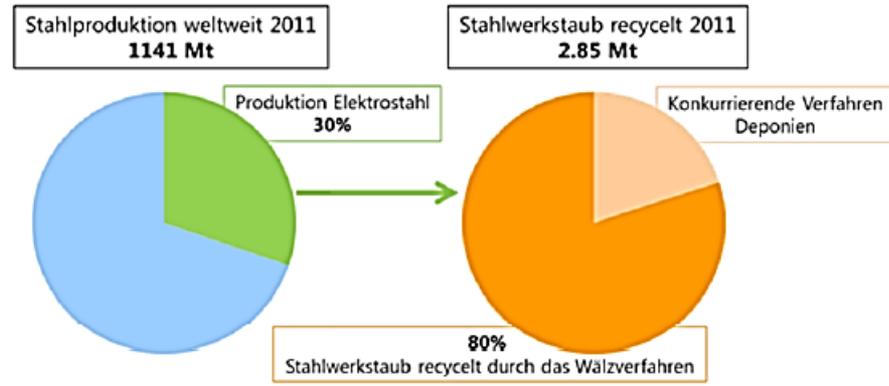


Rentz, O.; Fröhling, M.: Integrierter Umweltschutz in der Metallerzeugung, BMBF Abschlussbericht 01RWO169, 2006

# The Iron – Zinc Cycle



1 t WOX	≙	~ 1,3 t Zinkkonzentrat
1,3 t Zinkkonzentrat	≙	~ 6-9 t Zinkerz
➔ 1 t WOX	≙	~ 8-12 t Zinkerz



Von Billerbeck, E.. Verarbeitung von Filterstäuben aus der Elektrostahlerzeugung im Wälzprozess, Aschen-Schlacken-Stäube und Baurestmassen, Berlin, 01.07.2014

# Filter dust recycling with the DK-process



# Steel Production in Duisburg in the Past



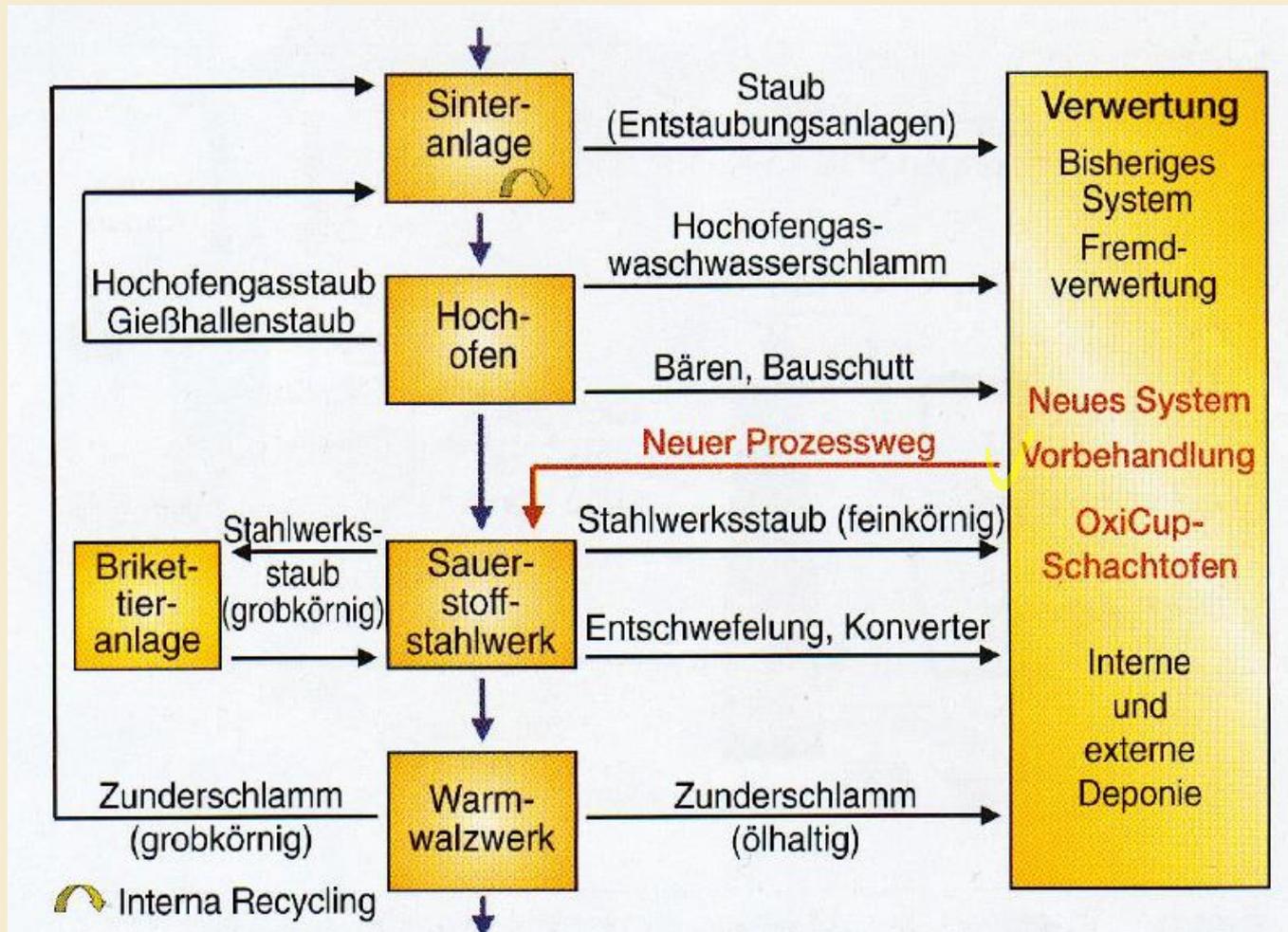
Köhler, E.: Der Weg vom Thomas zum LD-Verfahren- Bericht eines Zeitzeugen, Duisburg 2004

# Dust and Sludge in the German Steel Industry in 2004

• Fine Dust from Sinter Plant	:	30,974 ton/a
• Course Dust form Sinter Plant	:	315,206 ton/a
• Dust from Blast Furnace Gas	:	327,960 ton/a
• Sludge from Blast Furnace Gas	:	216,818 ton/a
• Dust Collector of Blast Furnace	:	105,676 ton/a
• Fine Dust/Sludge from Converter	:	426,350 ton/a
• Course Dust/Sludge from Converter	:	191,310 ton/a
• Dust from Electric Arc Furnace	:	154,870 ton/a
• Other Dust	:	52,838 ton/a
<b>Total of Dust and Sludge</b>	:	<b>1,822,002 ton/a</b>

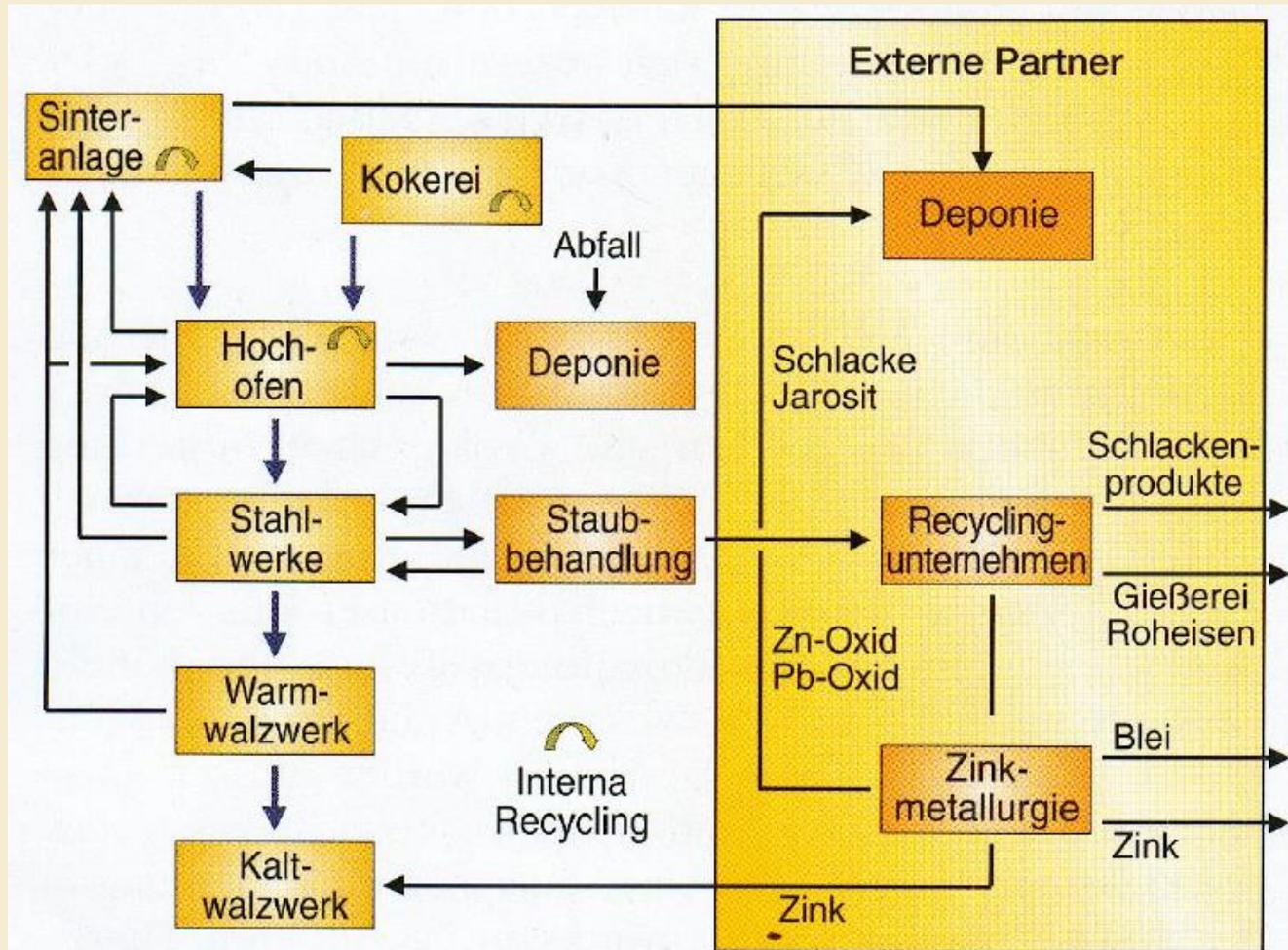
<b>TOTAL Crude Steel Production in Germany</b>	<b>46,408,000 ton/a</b>
• LD Converter Production Route (70%)	32,485,600 ton/a
• Electric Arc Furnace Production Route (30%)	13,922,400 ton/a
 <b>Dust and Sludge in Germany</b>	
• LD Converter Production Route (51 kg/Steel)	1,656,765 ton/a
• EAF Production Route (11 kg/Steel)	153,146 ton/a

# Substance Flow Management System of ThyssenKrupp Stahl AG



Stahl und Eisen 123 (2003) Nr. 2, S.73-78

# Substance Flow Management System of Voestalpine Stahl AG



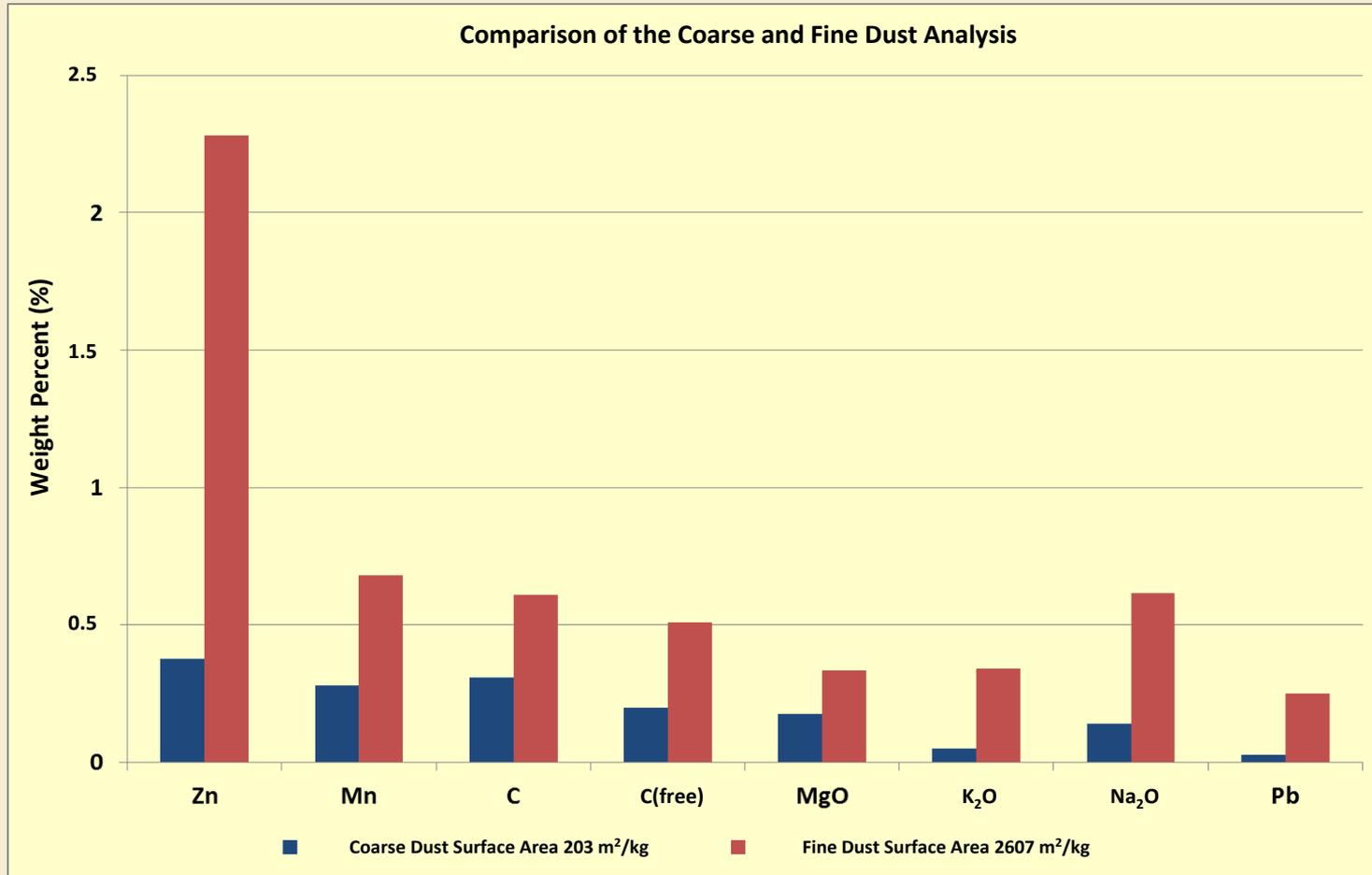
Stahl und eisen 123 (2003) Nr. 2, S.73-78

# Average Amount of Waste in Steel Production

Reststoffe	Spezifische Mengen [kg / t flüssiger Stahl]
<b>Sinteranlage</b>	
• Staub	0,9 – 15
<b>Hochofen</b>	
• Gießhallenstaub	0,5 – 1,5*
• Gichtgasreinigungsstäube und –schlämme	14
• Schlacke	280
<b>Roheisenentschwefelung</b>	9 – 18
<b>Oxygenstahlwerk</b>	
• Stäube aus der Konvertergasreinigung, grob	3 – 12
• Stäube aus der Konvertergasreinigung, fein	9 – 15
• Konverterschlacke	99
• Schlacken von Roheisenpfanne, Mischer, Stahlpfanne und Gießwanne	34
• Schlacken aus der Sekundärmetallurgie	11
• Feuerfestausbruch	6
<b>Elektrolichtbogenofen</b>	
• Schlacken	
• unlegierte Stähle	129
• niedrig legierte Stähle	109
• hochlegierte und rostfreie Stähle	161
• Staub der Ofen- und Raumentstaubung	15
<b>Stranggießen</b>	4 – 6
<b>Walzwerke und Oberflächenveredelung</b>	
• Eigenschrott	80 – 100*
• Walzzunder	15 – 50*
• ölhaltiger Walzzunder	2,5 – 10*
• Beizen, Eisensulfat	1 – 5*
• Entfettungsrückstände	<< 1*

Rentz, O: Prozessintegrierte  
Umweltschutzmaßnahmen in der Eisen- und  
Stahlindustrie, BMBF Abschlussbericht  
01RV9701, 1999

# Comparison of Specific Chemical Analyzes of Fine Dust and Coarse Dusts



Ploch, A.: Entstehungsmechanismen und Beschaffenheit von Stäuben aus einem Sauerstoffaufblaskonverter mit Bodenrührern, Dissertation TU Clausthal, 1993

# Chemical Composition of a Filter Dust from a Steel Plant

## XRF Analysis according to DIN51001

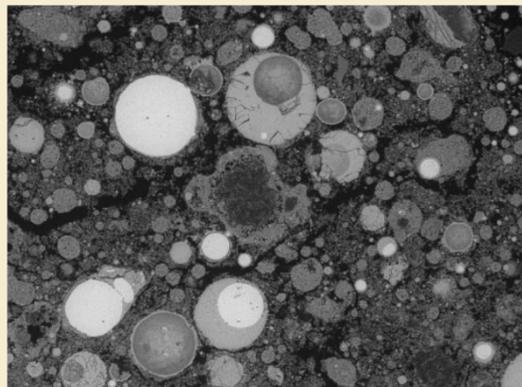
Oxide Composition						Element Composition					
Oxide	Wet (%)	Dry (%)	Oxide	Wet (%)	Dry (%)	Element	Wet (%)	Dry (%)	Element	Wet (%)	Dry (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60.00	71.80	K <sub>2</sub> O	0.09	0.11	Fe	41.97	50.22	K	0.07	0.09
CaO	10.20	12.21	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.08	Ca	7.29	8.72	V	0.04	0.05
ZnO	4.09	4.89	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.06	Zn	3.29	3.93	Cr	0.03	0.04
MgO	1.82	2.18	CuO	0.03	0.04	Mg	1.10	1.31	Cu	0.02	0.03
SiO <sub>2</sub>	1.07	1.28	CdO	0.03	0.04	Si	0.50	0.60	Cd	0.03	0.03
Na <sub>2</sub> O	0.99	1.18	TiO <sub>2</sub>	0.03	0.04	Na	0.73	0.88	Ti	0.02	0.02
MnO	0.53	0.63	NiO <sub>2</sub>	0.03	0.04	Mn	0.41	0.49	Ni	0.02	0.03
SO <sub>3</sub>	0.29	0.35	Rest	3.93	4.70	S	0.25	0.29	Rest	2.16	2.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	0.26	Water	16.43	-	Al	0.12	0.14	Water	16.43	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.12				P	0.04	0.05	O	23.84	28.53
						H	0.48	0.57	C	1.16	1.39

Carbon, Hydrogen, and Water based on DIN 51721, DIN 51721, and DIN 51718 respectively

Kupka, T.; Scholz, R.: in Recycling und Rohstoffe, Bd.6 (Hrsg. K.J. Thomé-Kozmiensky, D.Goldmann), TK Verlag, Neuruppin, 2013

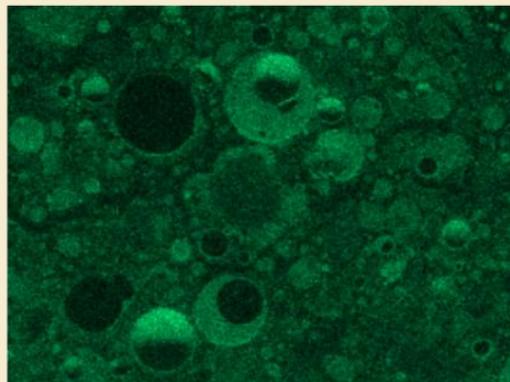
# BOF- Dust Elementmapping

Elektronenbild



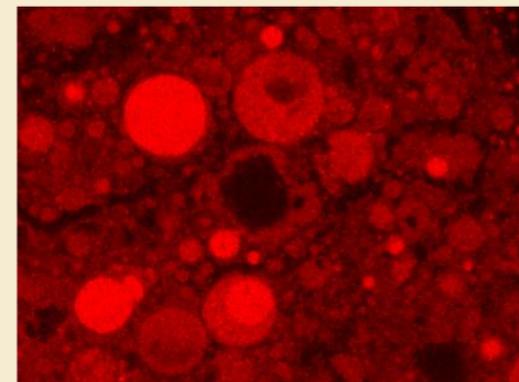
100µm

O Kα1



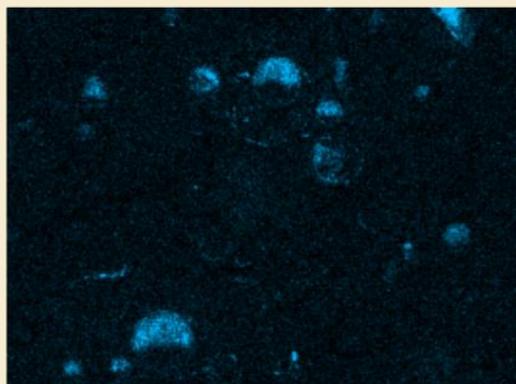
100µm

Fe Kα1



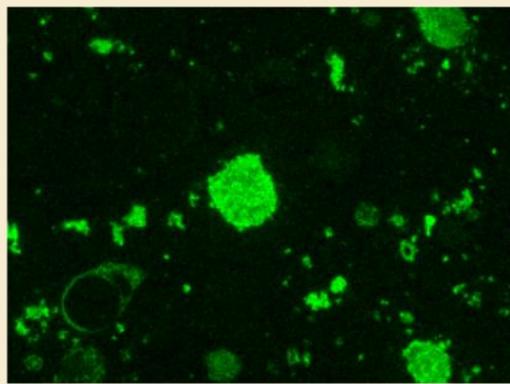
100µm

Al Kα1



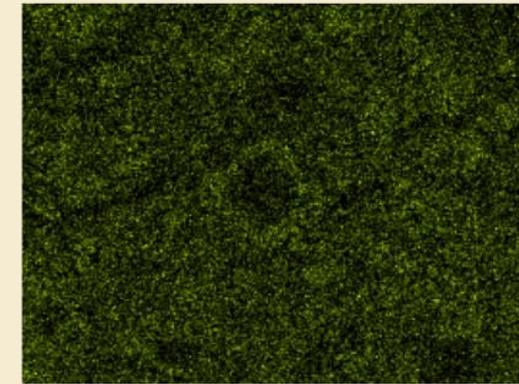
100µm

Ca Kα1



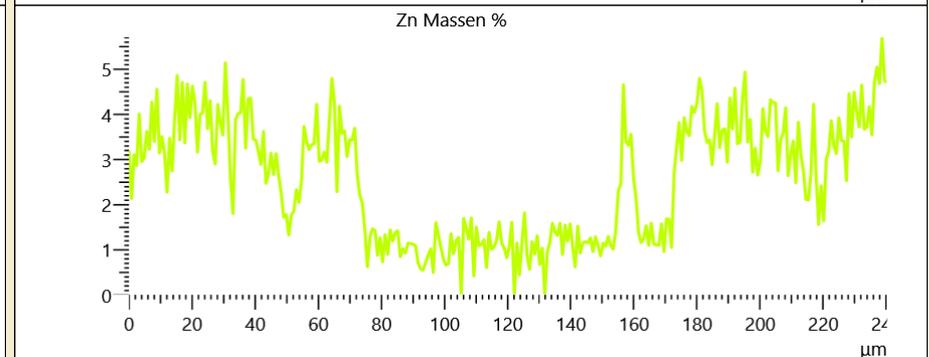
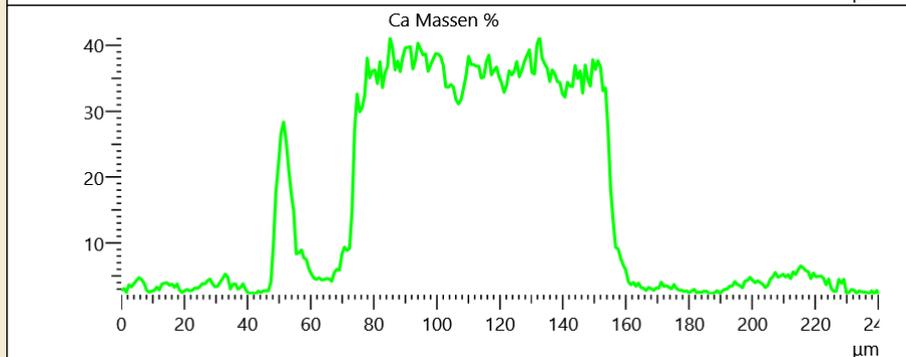
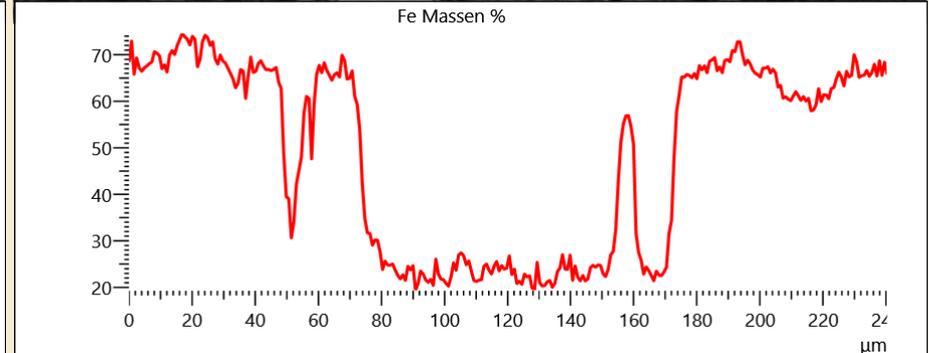
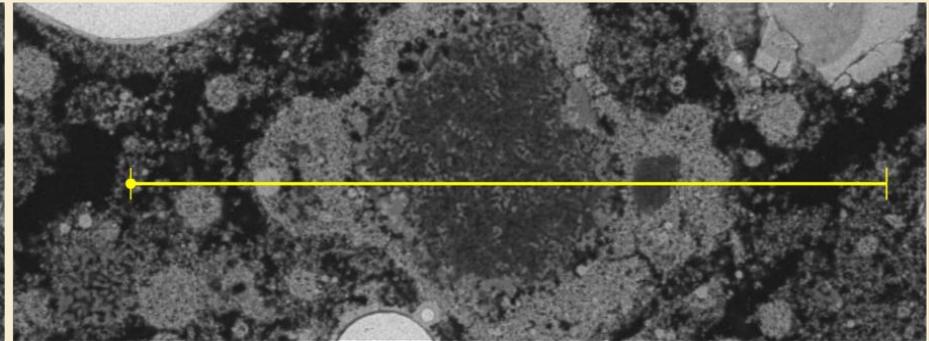
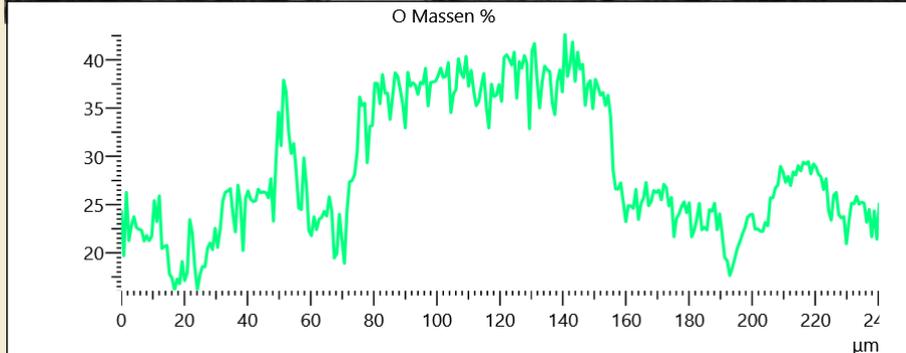
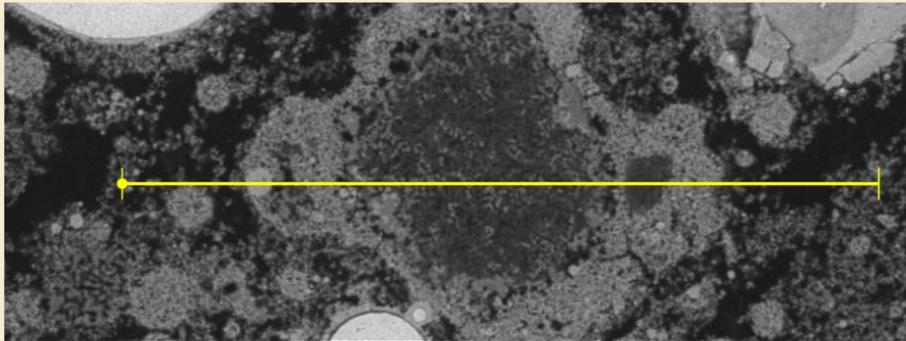
100µm

Zn Kα1



100µm

# BOF-Dust line scan

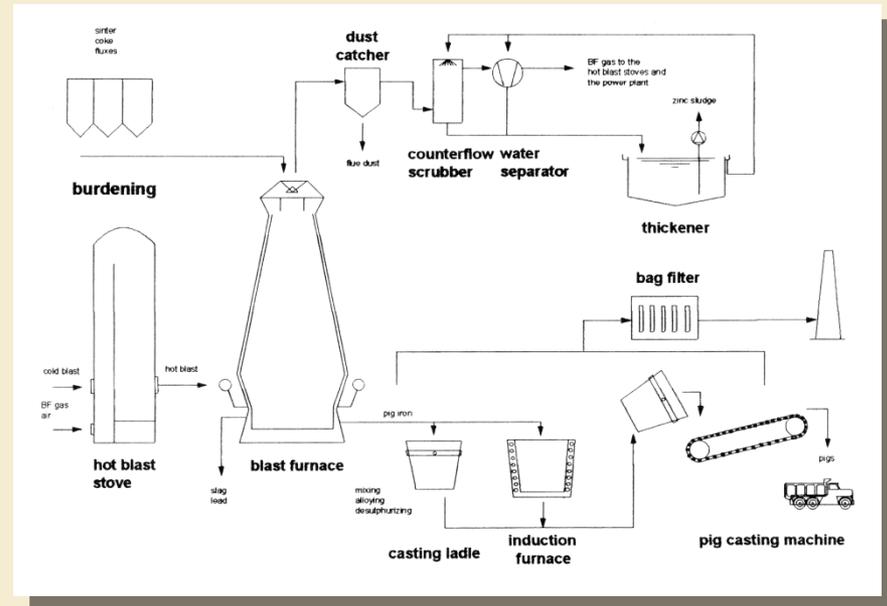
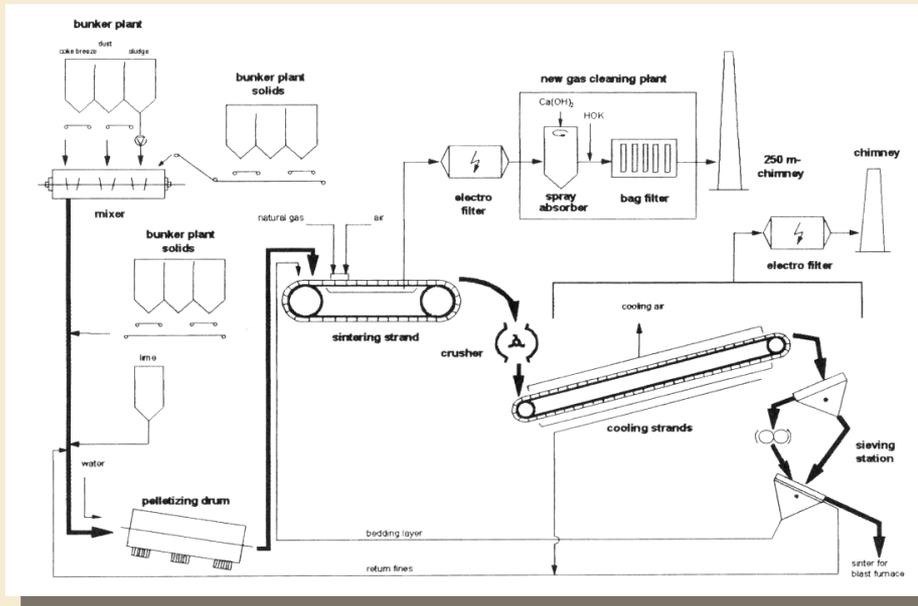


# Chemical Composition of Waste Material from Production Process of Iron, Steel and Non-ferrous Industry

Type	H <sub>2</sub> O %	Fe %	Mn %	Cr %	Zn %	Cu %	P %	C %	Cl %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %
<b>BF sludge</b>	30-40	19	0,2	0,02	7,1	0,02	0,10	36,0	0,14	1,44	0,28
<b>BOF dust</b>	10-20	59	0,8	0,06	3,2	0,03	0,05	0,6	0,25	0,29	0,39
<b>Sand blasting dust</b>	<1	74	0,7	0,21	0,8	0,11	0,05	1,6	0,03	0,09	0,16
<b>Cupola dust</b>	0-2	14	2,6	0,07	4,8	0,09	0,09	21	0,41	2,11	0,74
<b>Cu-sludge</b>	20-30	11	0,1	2,00	0,7	22,8	0,85	13,8	0,26	0,11	0,80
<b>P-sludge</b>	40-50	22	1,7	0,06	9,7	0,03	14,6	2,0	0,15	0,14	2,20
<b>Iron ore</b>	6-8	61	0,08	0,009	0,03	<0,001	0,03	0,4	<0,01	0,05	0,10

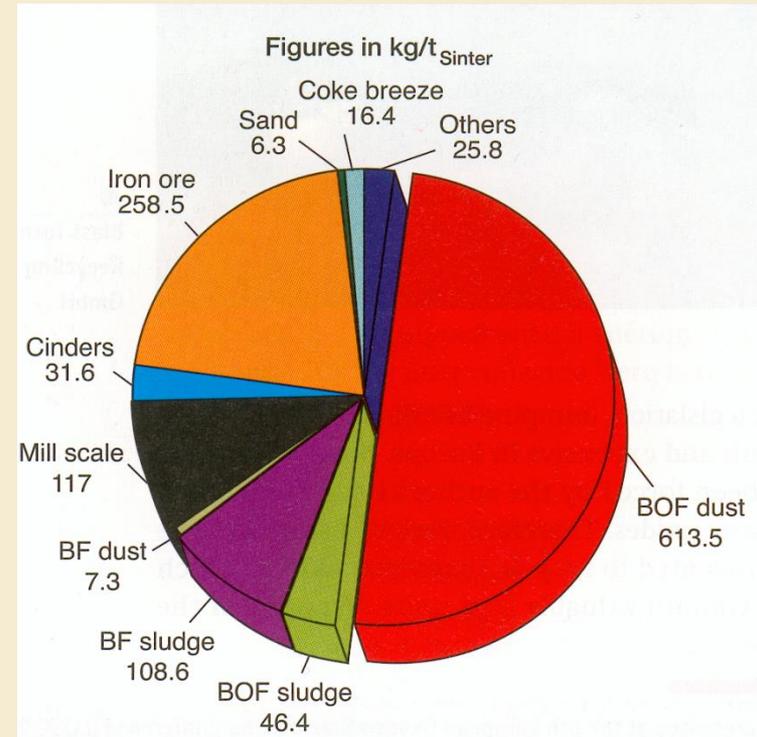
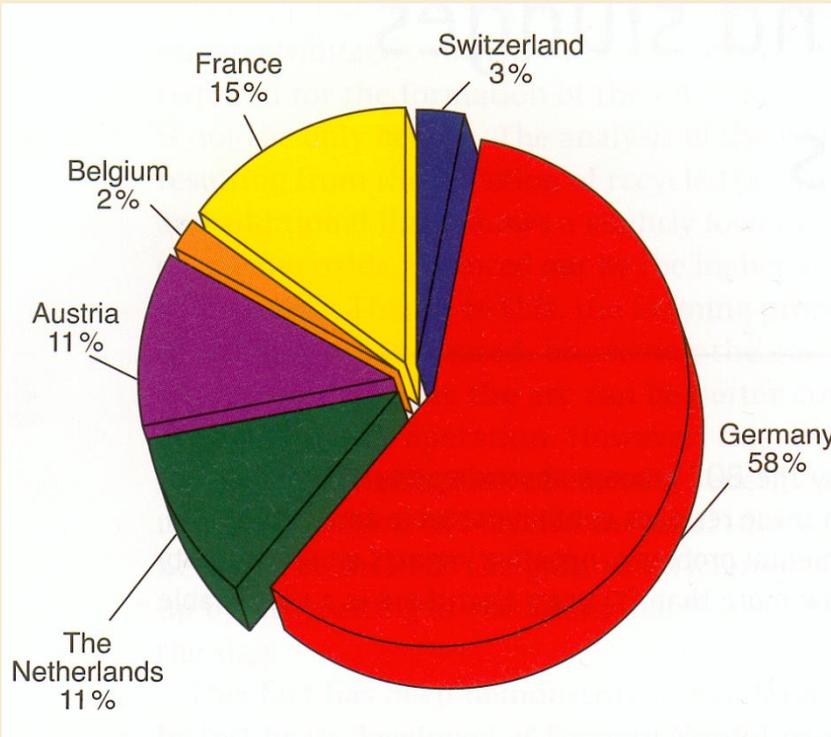
Moore, C.M.; Deike, R.; Hillmann, C.: 4th European Coke and Ironmaking Congress, Paris, France, 19-22 June 2000

# Process Flow Diagram of Sintering Line and Blast Furnace



Deike, R.; Hillmann, C.: Scandinavian Journal of Metallurgy 1999, 28, S.86-91

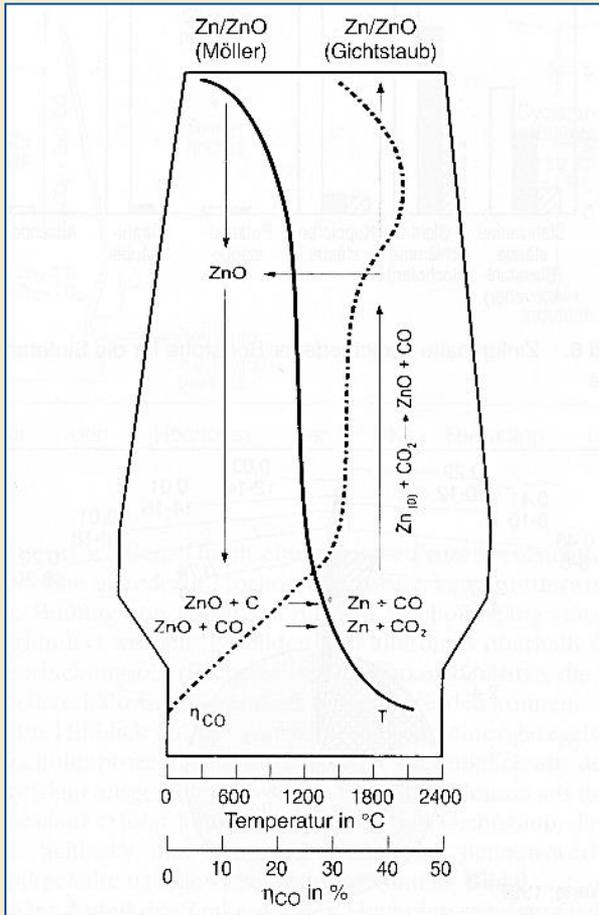
# Origin of the Residue and their Percentage in Sinter Mixture



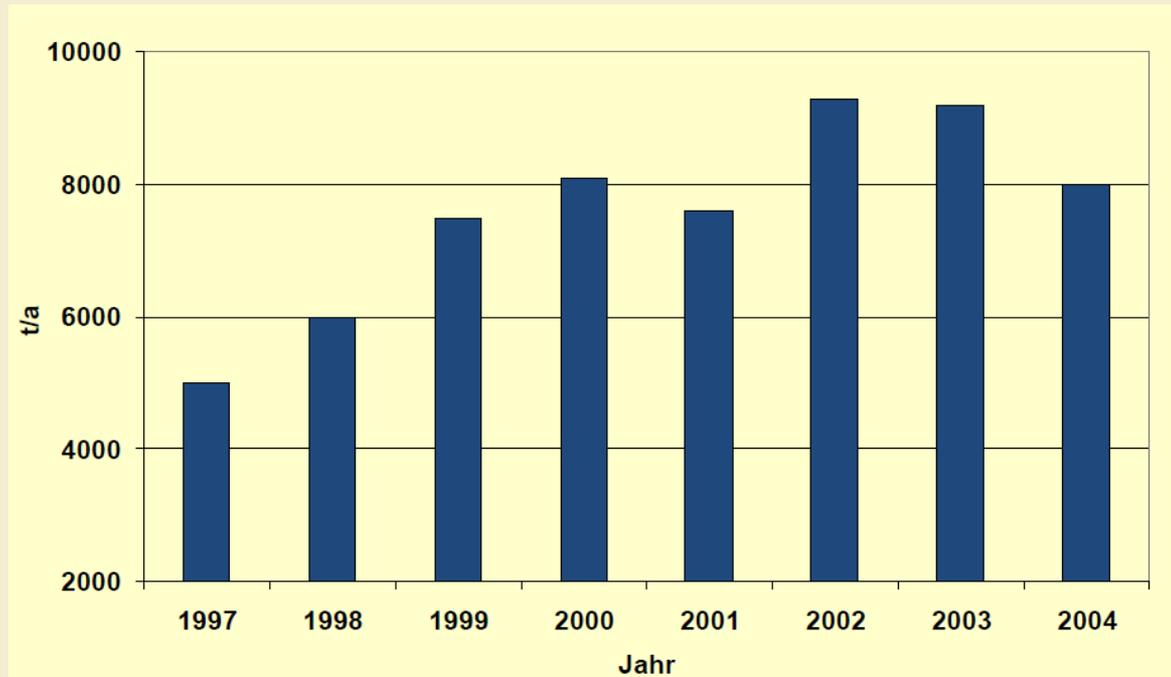
	% H <sub>2</sub> O	% Fe	% Zn	% Na <sub>2</sub> O	% K <sub>2</sub> O
BOF dust 1	10.0	65.0	0.9	0.43	0.24
BOF dust 2	1.5	51.1	2.2	0.84	0.39
BOF dust 3	0.0	44.2	11.9	0.31	0.27
BOF sludge 1	21.1	44.8	1.3	0.14	0.10
BOF sludge 2	20.0	48.0	1.1	0.12	0.14

Hillmann, C.; Sassen, K.-J.: stahl und eisen 126 (2006) Nr.11, S.149-156

# Zn Cycle in Blast Furnace ( $\text{ZnO} + \text{CO} \leftrightarrow \text{Zn} + \text{CO}_2$ )

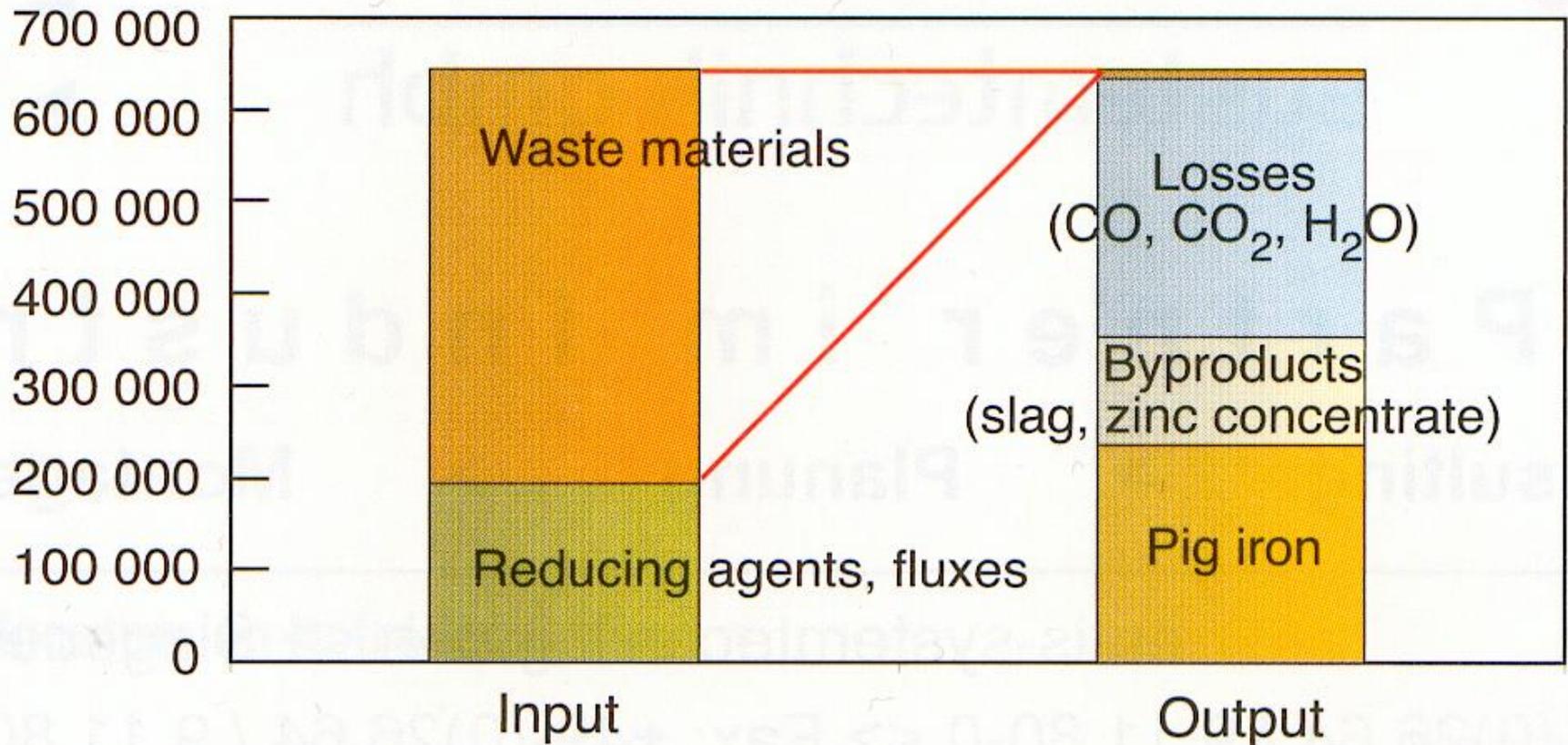


Deike, R.; Hillmann, C.: stahl und eisen 119 (1999) Nr.2, S.53-58



Hillmann, C.; Sassen, K.-J.: Solutions for dusts and sludges from the BOF-process; stahl und eisen, vol 126, Nr.11, pp.S149-S156, 2006.

# Input – Output Balance of DK Process



Hillmann, C.; Sassen, K.-J.: stahl und eisen 126 (2006) Nr.11, S.149-156

# Institut für Technologien der Metalle

## Lehrstuhl für Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung



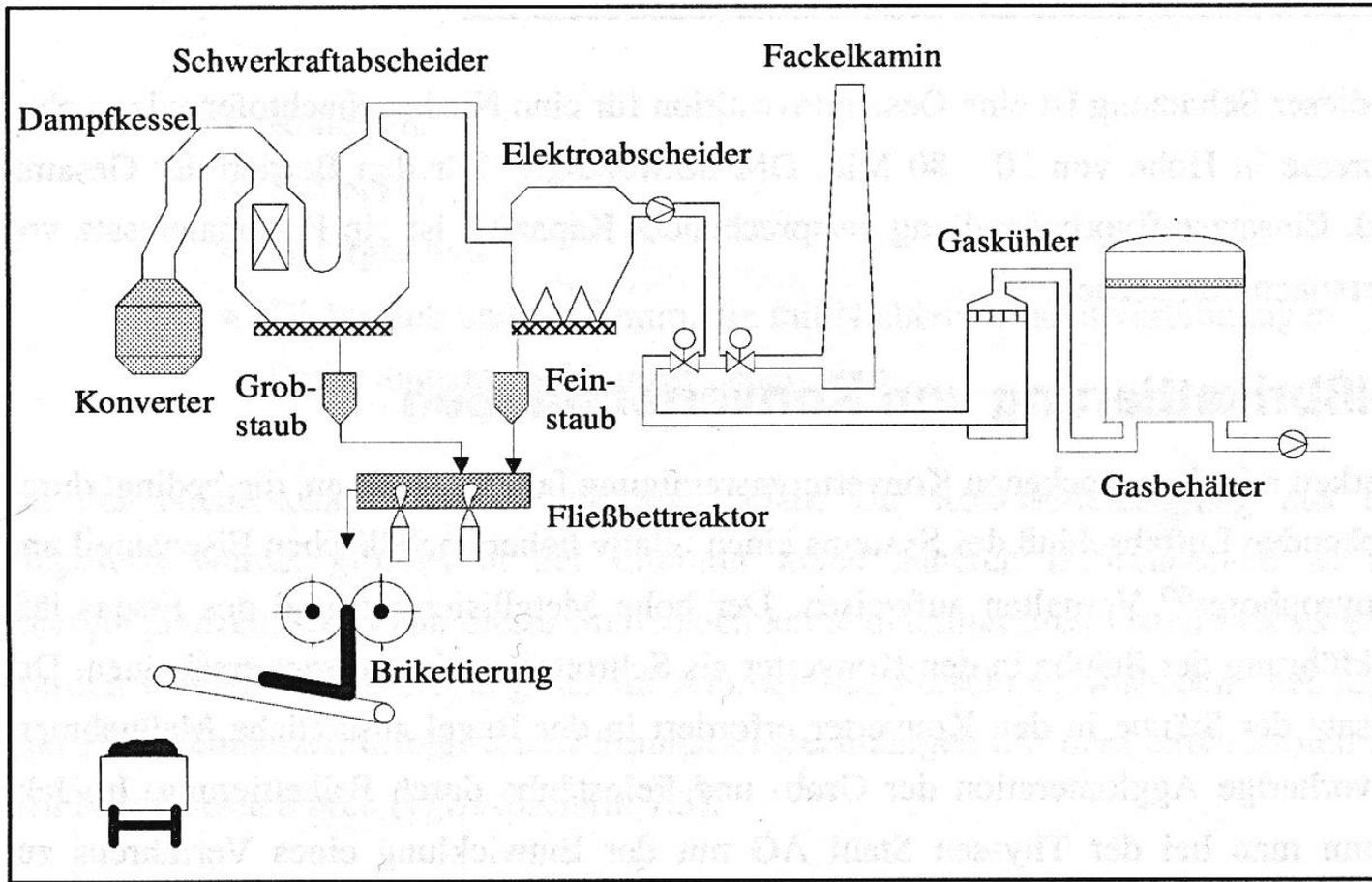
## Recycling of Oxidic and Metallic Waste Materials

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike

**This Lecture Material is Protected by Copyright and Designed for Personal Use Only. Any Unauthorized Redistribution as well as Reproduction for Commercial Use of Part or All of this Document are Strongly Prohibited.**

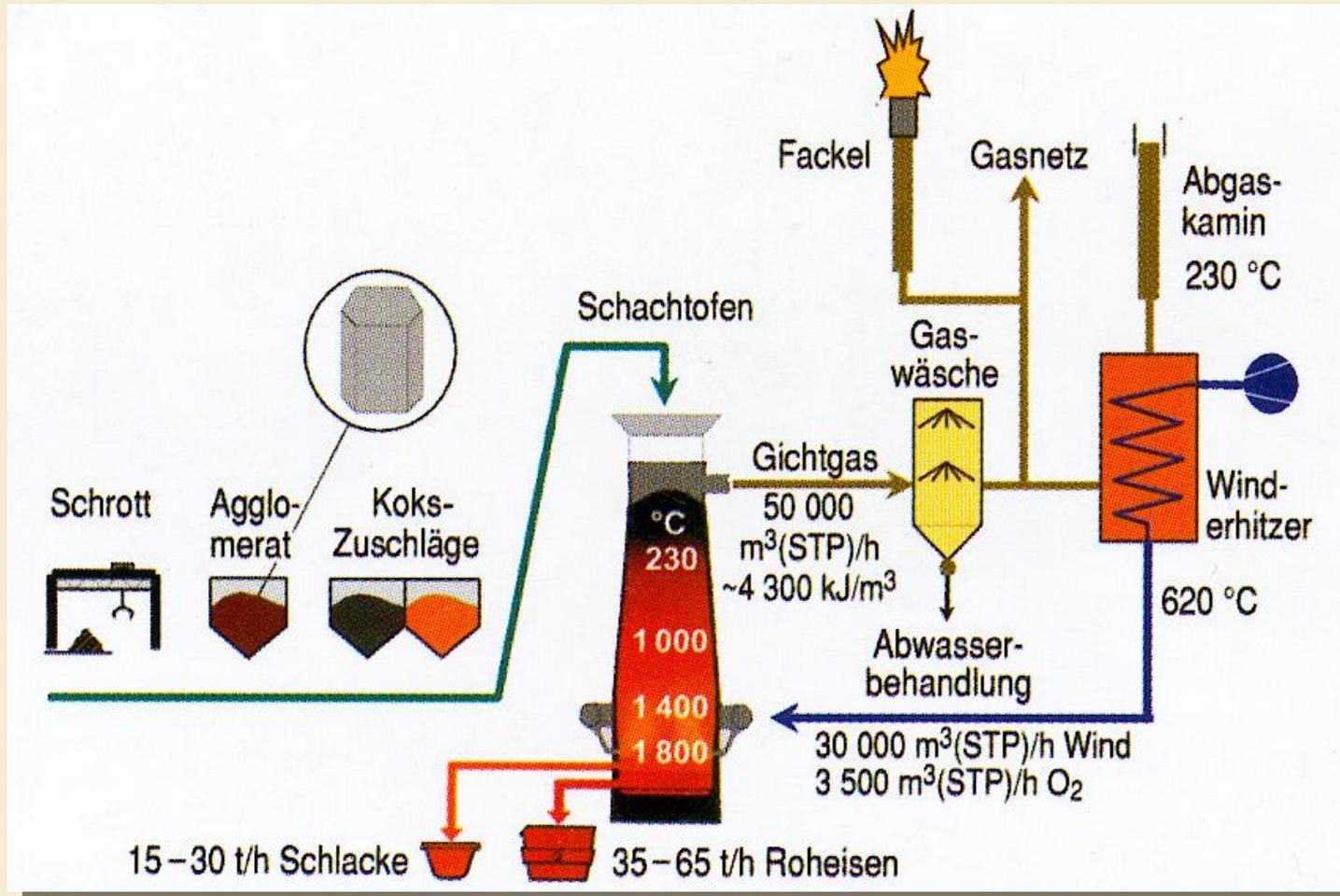
# TKSE Hot Briquetting and Oxy-Cup Furnace

# Hot Briquetting Process Flow Diagram



Rentz, O: Prozessintegrierte Umweltschutzmaßnahmen in der Eisen- und Stahlindustrie, BMBF Abschlussbericht 01RV9701, 1999

# Flow Diagram and Process Data of Shaft Furnace in Hamborn



Stahl und eisen 125 (2005) Nr. 2, S.21-24

# KONDEOS

*Industrielle Demonstrationsanlage zur definierten Metalloxid-Konditionierung von Elektroofenschlacken zur Erzeugung ökologischer Baustoffe und vermarktungsfähiger Metallfraktionen*



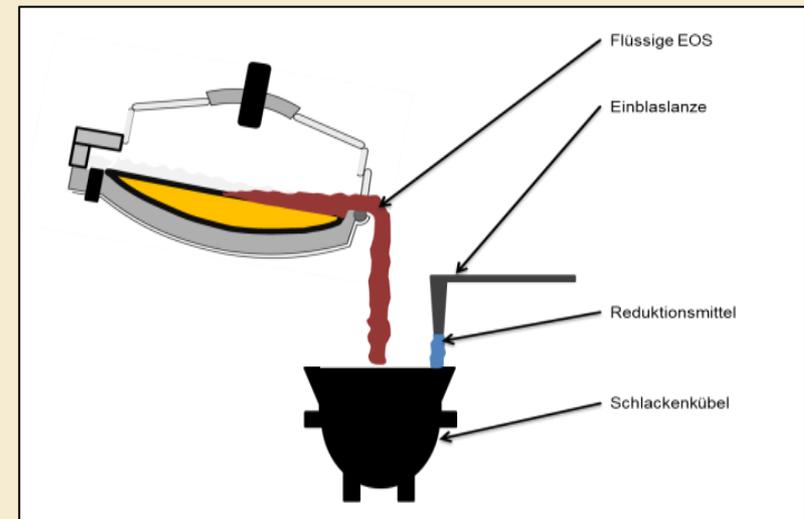
**Julian Kuschewski**, M.Sc. - Institut für Technologien der Metalle  
Universität Duisburg-Essen



**Dominik Ebert**, M.Sc. - Leiter Schmelzlabor  
FEHS – Institut für Baustoffforschung

## Versuchsablauf

- Einblasen der Reduktionsmittelmischung erfolgt gleichzeitig zum Abgießen der EOS
- Ziel der definierten Reduktion ist die Verringerung der Auslaugung der Metalle
- Hoher Reduktionsgrad führt zu einer hohen Viskosität der Schlacke und hohen Phosphorgehalten im Reduktionsmetall



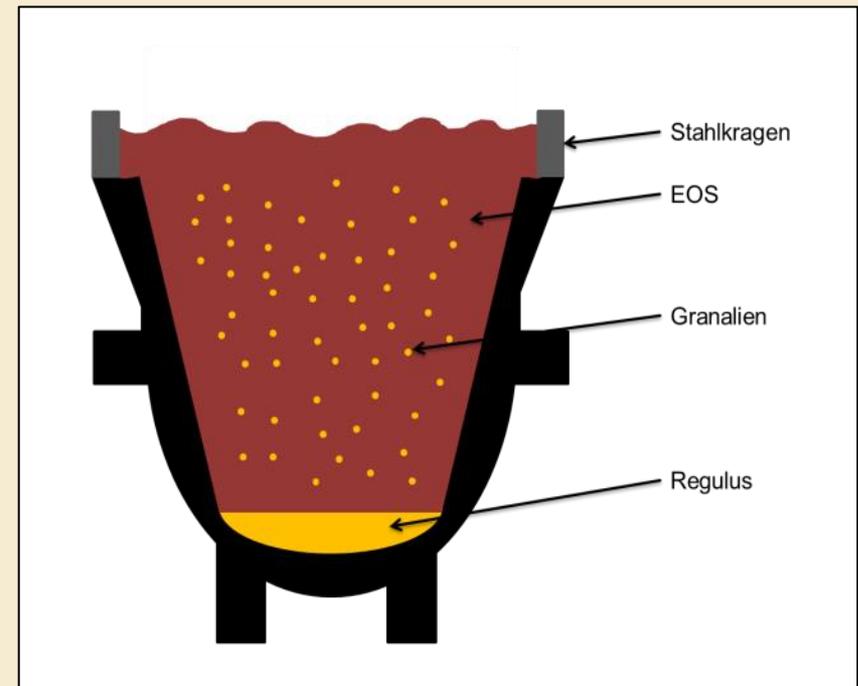
## Reduktionsreaktion

- Reaktionsgase sorgen für gute Durchmischung und Auflösung des Reduktionsmittels in der EOS
- Aufgrund der hohen Reaktionskinetik wurde in späteren Versuchen ein Kragen an der Pfanne angebracht und weitere Kübel mit einem größeren Volumen angeschafft.

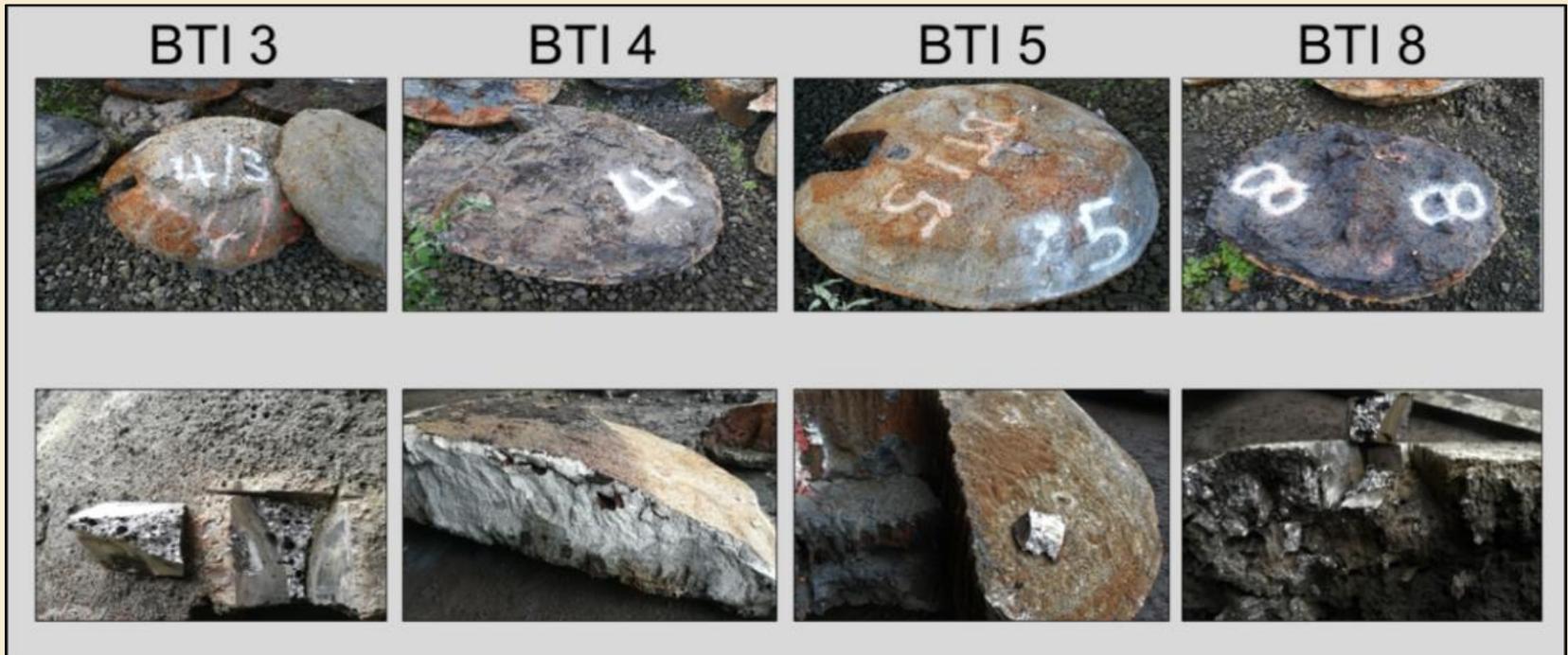


## Schematischer Schnitt durch den Schlackenkübel

- Reduzierte Metalle aus der EOS bilden Granalien
- Ausbildung eines Regulus am Pfannenboden
- Variation der Standzeiten



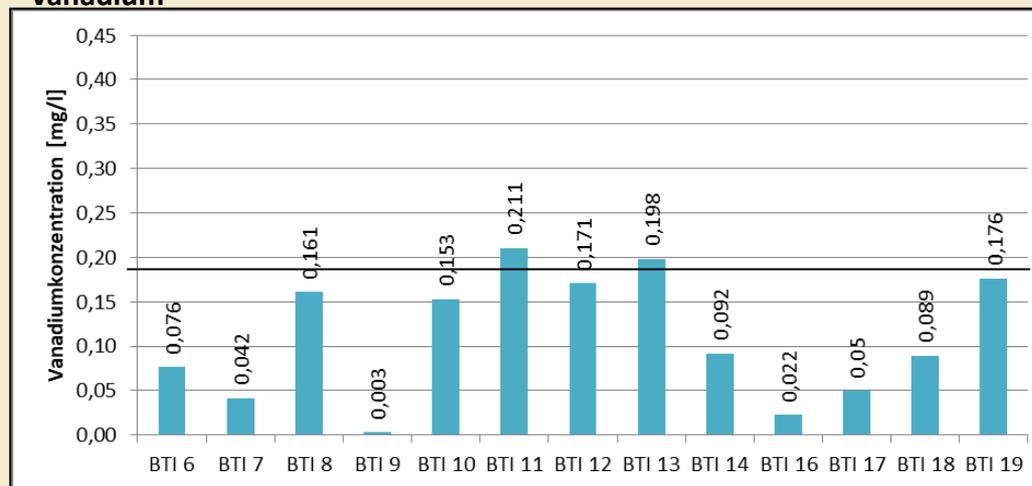
## Brechen und Trennen der Metallreguli



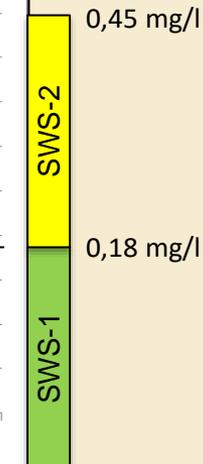
## Elutionsergebnisse

- Perkolationsverfahren  
W/F-Verhältnis 2:1  
Korngröße 0/32 mm
- Deutliche Absenkung der Molybdänkonzentration im Eluat (Referenz Klasse SWS-3)

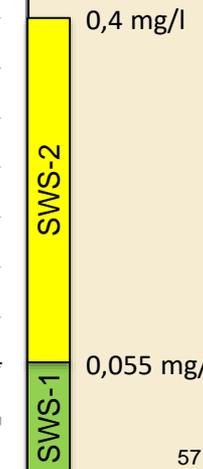
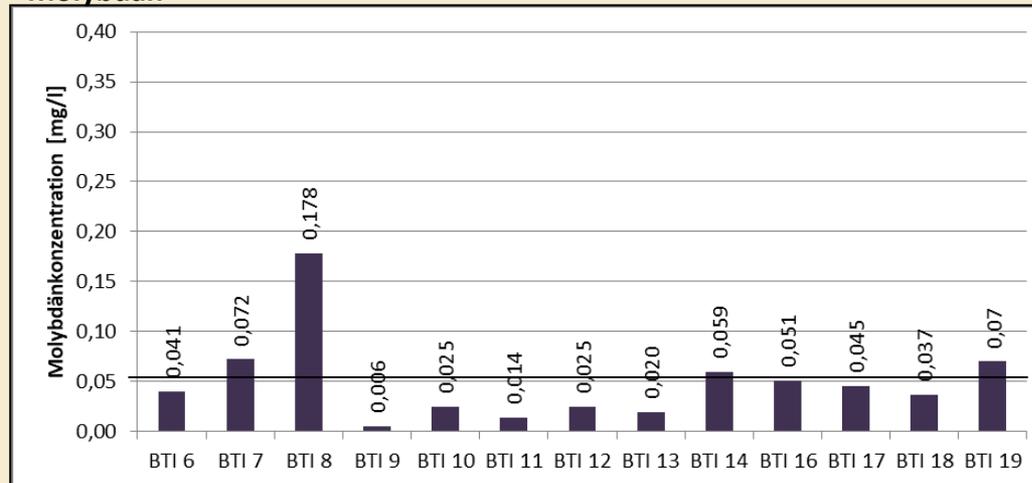
Vanadium



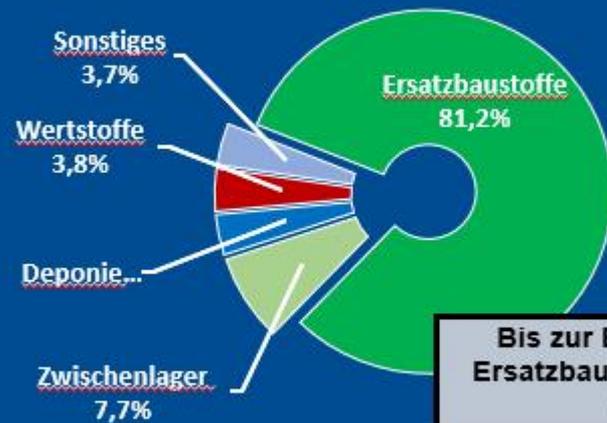
Grenzwerte



Molybdän



## EAF-Schlacke 2022 in Deutschland: 1,27 Mio. t



Bis zur Einführung der Ersatzbaustoffverordnung (EBV)

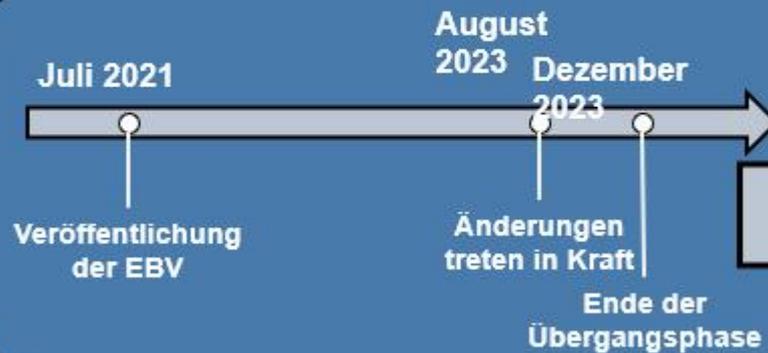
Quelle: FEHS - Institut für Baustoff-Forschung



Quelle: Recyclingportal



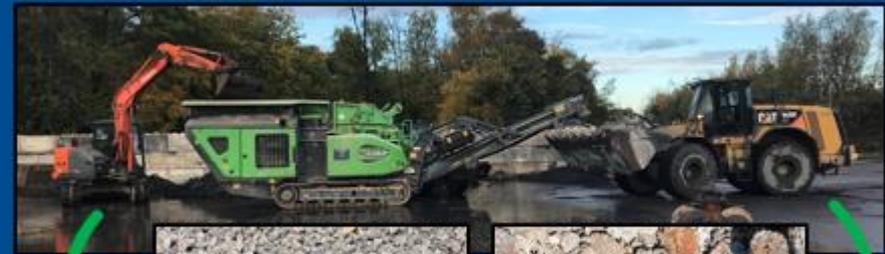
## Veröffentlichung der geänderten Ersatzbaustoffverordnung



## Deponie



- Die Schlacke wird zuerst durch einen Magnetbagger grob in eine oxidische und magnetische Fraktion aufgeteilt.
- Es folgt ein Mehrstufiger Brechprozess.
- Mittels eines Überbandmagneten wird die Schlacke in eine oxidische und magnetische Fraktion separiert.



Ersatzbaustoff



Separationseisen

- Die Schlacke wird zuerst durch einen Magnetbagger grob in eine oxidische und magnetische Fraktion aufgeteilt.
- Es folgt ein Mehrstufiger Brechprozess.
- Mittels eines Überbandmagneten wird die Schlacke in eine oxidische und magnetische Fraktion separiert.



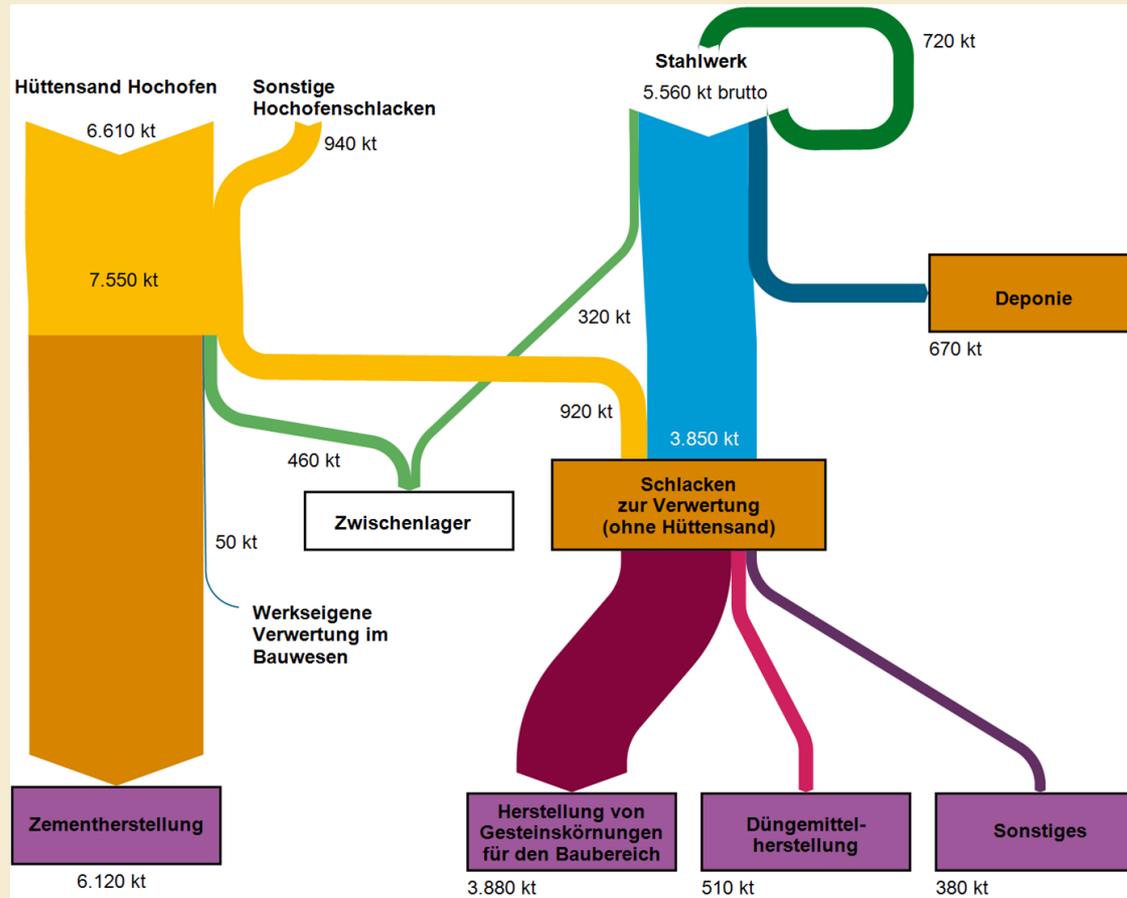
Ersatzbaustoff



Separationseisen

# Slag Use

# Slag Production of Iron and Steel Mill in 2013



<https://www.umweltbundesamt.de/schlacken-huettensande-aus-der-eisen-stahlerzeugung#verwertung-und-produktion-in-deutschland>

Erzeugung	2021	2020
Schlacke aus Stahlroheisenerzeugung	<b>7,52</b>	6,31
Schlacke aus sonstiger Roheisenerzeugung	<b>0,10</b>	0,10
<b>Summe Erzeugung</b>	<b>7,62</b>	6,41
davon: HS 6,90 HOS 0,72		
Lagerabbau	<b>0,87</b>	0,91
<b>Summe</b>	<b>8,49</b>	7,32

Nutzung	2021	2020
HOS (Gesteins- körnungen)	<b>0,29</b>	0,27
HOS (Baustoff- gemische)	<b>0,59</b>	0,48
HS zur Zement- herstellung	<b>7,41</b>	6,42
HS für andere Einsatzgebiete	<b>0,10</b>	0,08
Eigenverbrauch der Werke	<b>0,10</b>	0,07
<b>Summe</b>	<b>8,49</b>	7,32

Tabelle 1: Erzeugung und Nutzung von Hochofenschlacke 2021/2020 (jeweils in Mio. t)

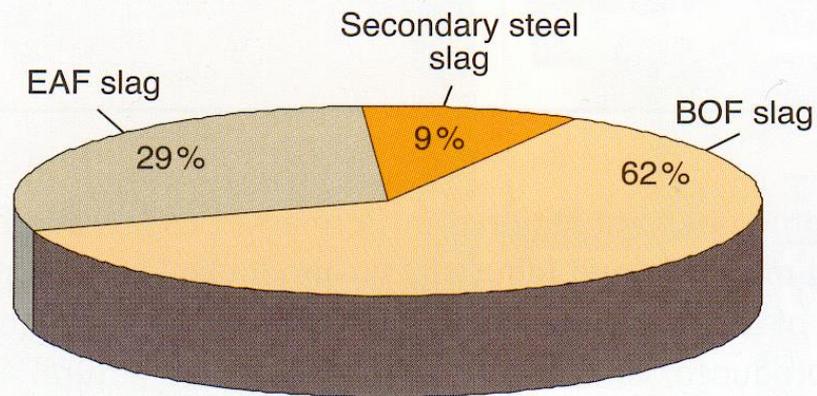
Erzeugung	2021	2020
Schlacke aus Oxygenstahlerzeugung	<b>2,82</b>	2,53
Schlacke aus Elektrostahlerzeugung	<b>1,58</b>	1,46
Schlacke aus Sonderverfahren	<b>0,58</b>	0,46
<b>Summe Erzeugung</b>	<b>4,98</b>	4,45
Lagerabbau		0,01
<b>Summe</b>	<b>4,98</b>	4,46

Nutzung	2021	2020
Metallurg. Kreislaufführung	<b>0,51</b>	0,61
Düngemittel	<b>0,40</b>	0,43
Baustoffe (Straßenbau, Erdbau, Wasserbau etc.)	<b>2,56</b>	2,66
Sonstiges	<b>0,31</b>	0,21
<b>Summe Verwendung</b>	<b>3,78</b>	3,91
Deponie	<b>0,44</b>	0,55
Zwischenlager	<b>0,76</b>	
<b>Summe</b>	<b>4,98</b>	4,46

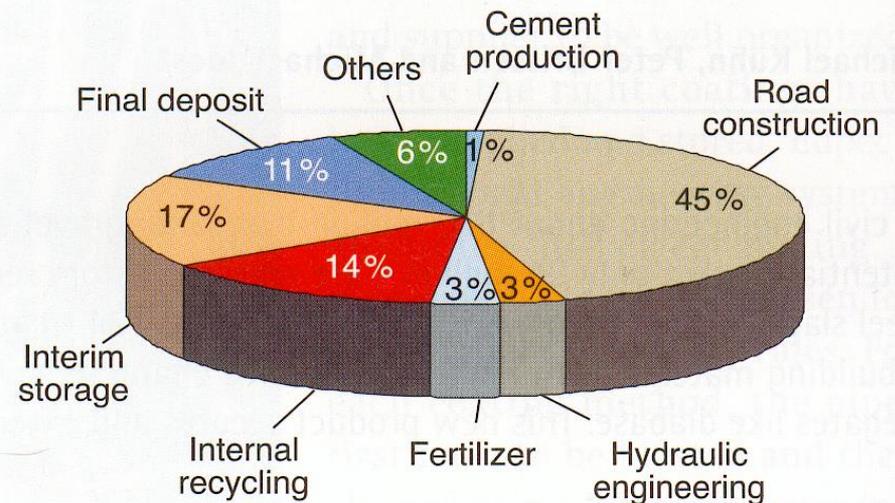
Tabelle 2: Erzeugung und Nutzung von Stahlwerksschlacke 2021/2020 (jeweils in Mio. t)

# Production and Utilization of Metallurgical Slag in Europe 2004

a) Production of steel slags in Europe [1]  
2004: 15.2 million t



b) Use of steel slags in Europe [1]  
2004: 15.2 million t



Quelle : Kühn, M.; Drissen, P.; Joost, M.: stahl und eisen 126 (2006) Nr.11, S.S159-166

## Institut für Technologien der Metalle



# KOMPASS – Kontinuierliche Öl- und Metallrückgewinnungs- Prozessanlage für Schlämme und Späne

Berliner Recycling Konferenz 2019

Berlin , 12. März 2019

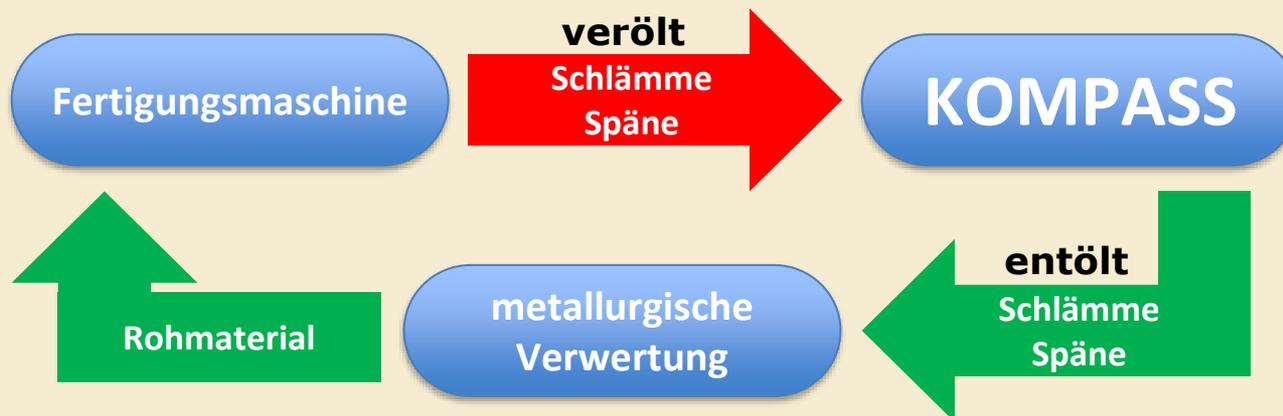
Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike



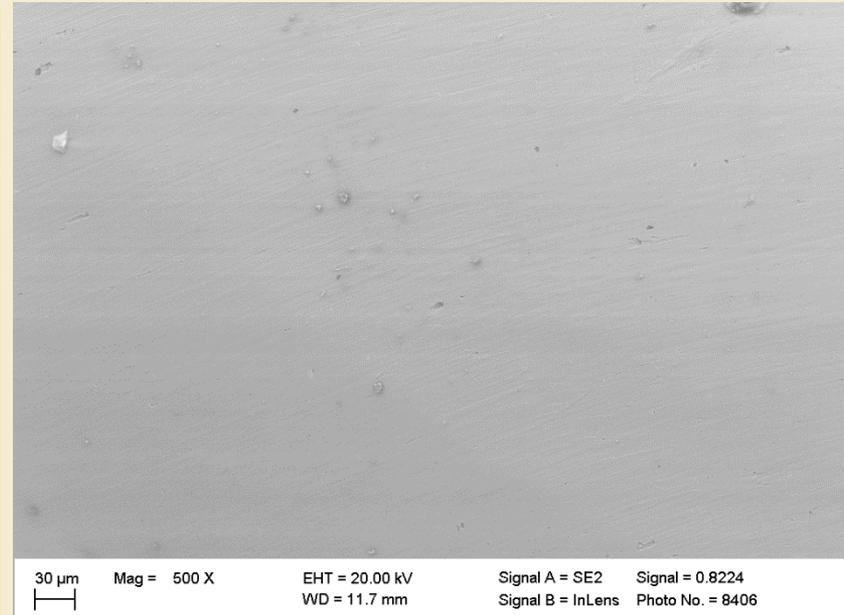
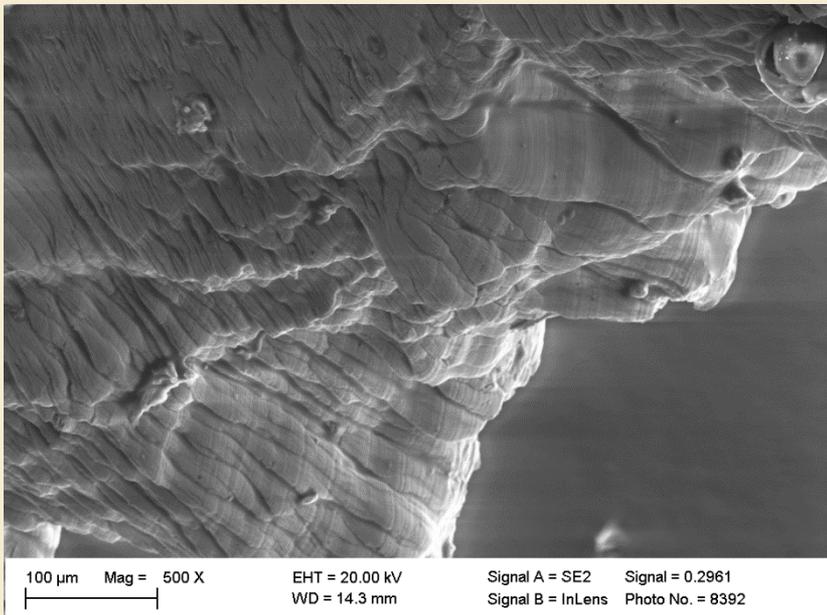
Pähler, N.; Biedermann, H.; Meynertz, U.; Reschke, C.; Schubert, D.; Erich, E.; Deike, R.: Rückführung kostbarer Wertstoffe durch Entölen von Spänen, Gießerei, Vol. 108, Nr.4, S.42-46, 2021.

<https://doi.org/10.17185/dupublico/74427>

- Erhöhung der Material- und Energieeffizienz in rohstoffintensiven Produktionssystemen
- Zielgerichtete Rückführung hochwertiger wirtschaftsstrategischer Wertstofffraktionen aus bisher weitgehend nicht genutzten Abfallströmen
- Entölung von Metallspänen
- Entölung von Metallschlämmen

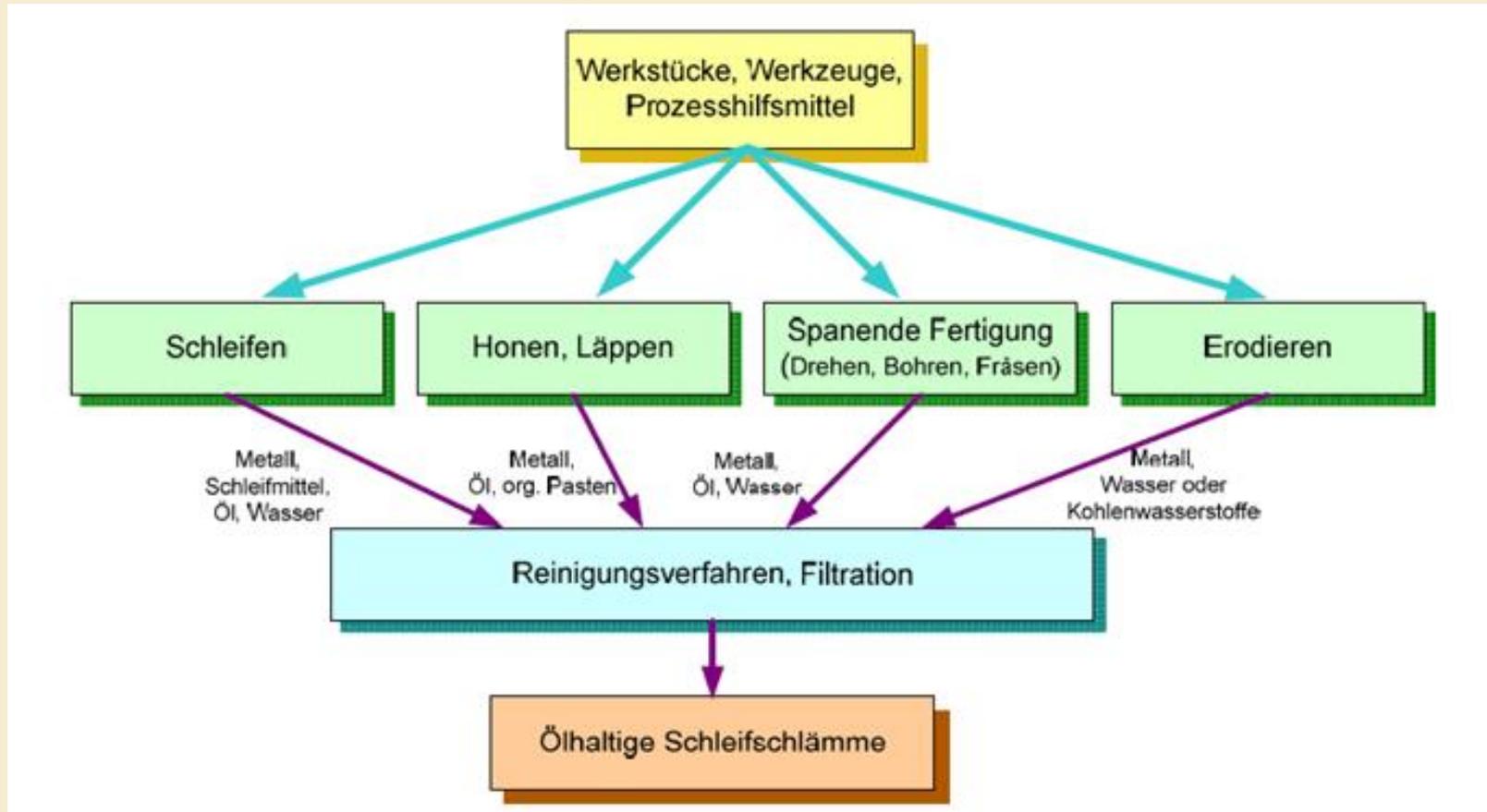


## Charakterisierung Späne am Beispiel eines 1.4849 Spans:

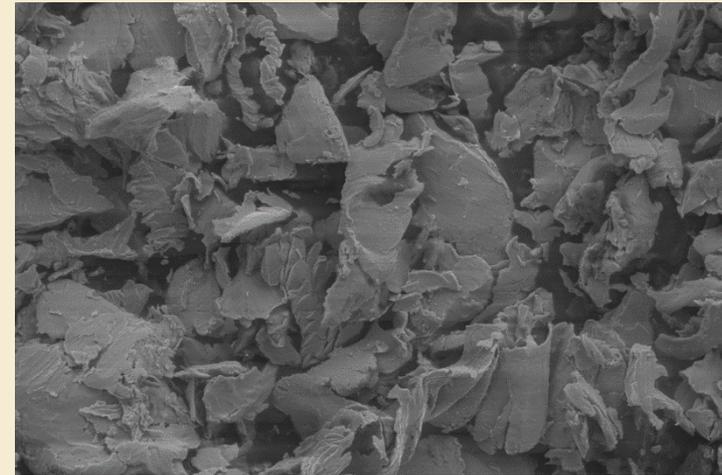


- Reinigung durch eine Tensidlösung in einem Gegenstromverfahren
- Der Ölgehalt konnte bis auf 0,01 % reduziert werden.
- Momentan wird auf Grundlage der Forschungsergebnisse eine Reinigungsanlage für Durchsätze bis zu 2 t/h gebaut.

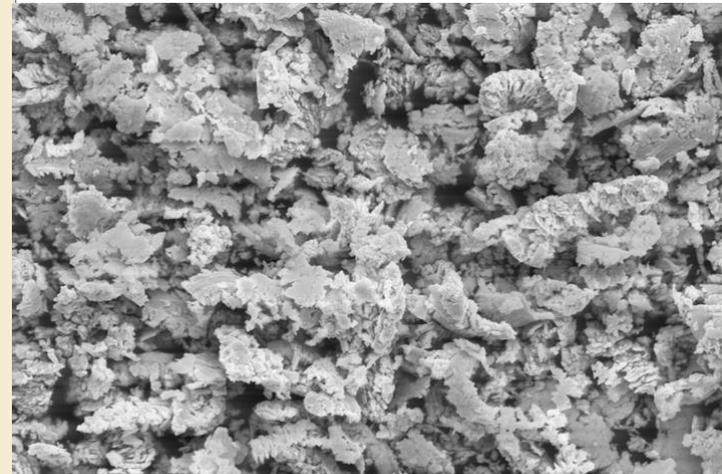




- Die Reinigung im Gegenstromverfahren ist bei diesen sehr feinen Pulvern ( $< 30 \mu\text{m}$ ) nicht effektiv.
- Die Kühlschmierstoffe werden während der Reinigung durch Tenside ersetzt, die durch ein Klarspülen nicht entfernt werden. Dies konnte anhand gaschromatografischer Untersuchungen des Schleifschlammes nachgewiesen werden.
- Durch die anhaftenden Tenside kommt es zu gleichen negativen Effekte wie bei Ölen. Bei der metallurgischen Verwertung treten Flammen- und Rauchbildung auf.
- Zudem ist die Förderung von feinen Pulvern im Senkrechtschneckenförderer sehr schwierig.

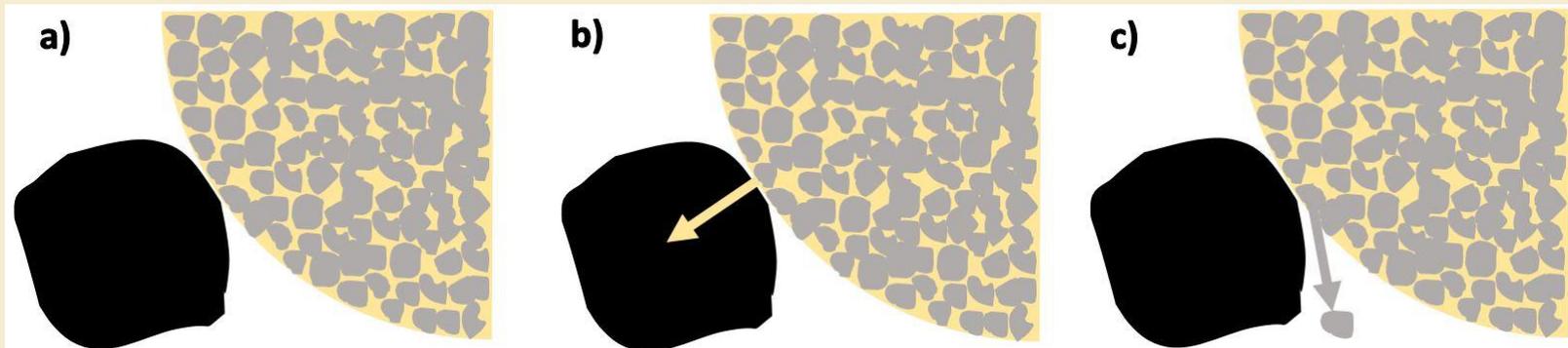


30  $\mu\text{m}$  Mag = 1.50 K X EHT = 15.00 kV Signal A = SE2 Signal = 0.8224  
WD = 16.1 mm Signal B = InLens Photo No. = 8420

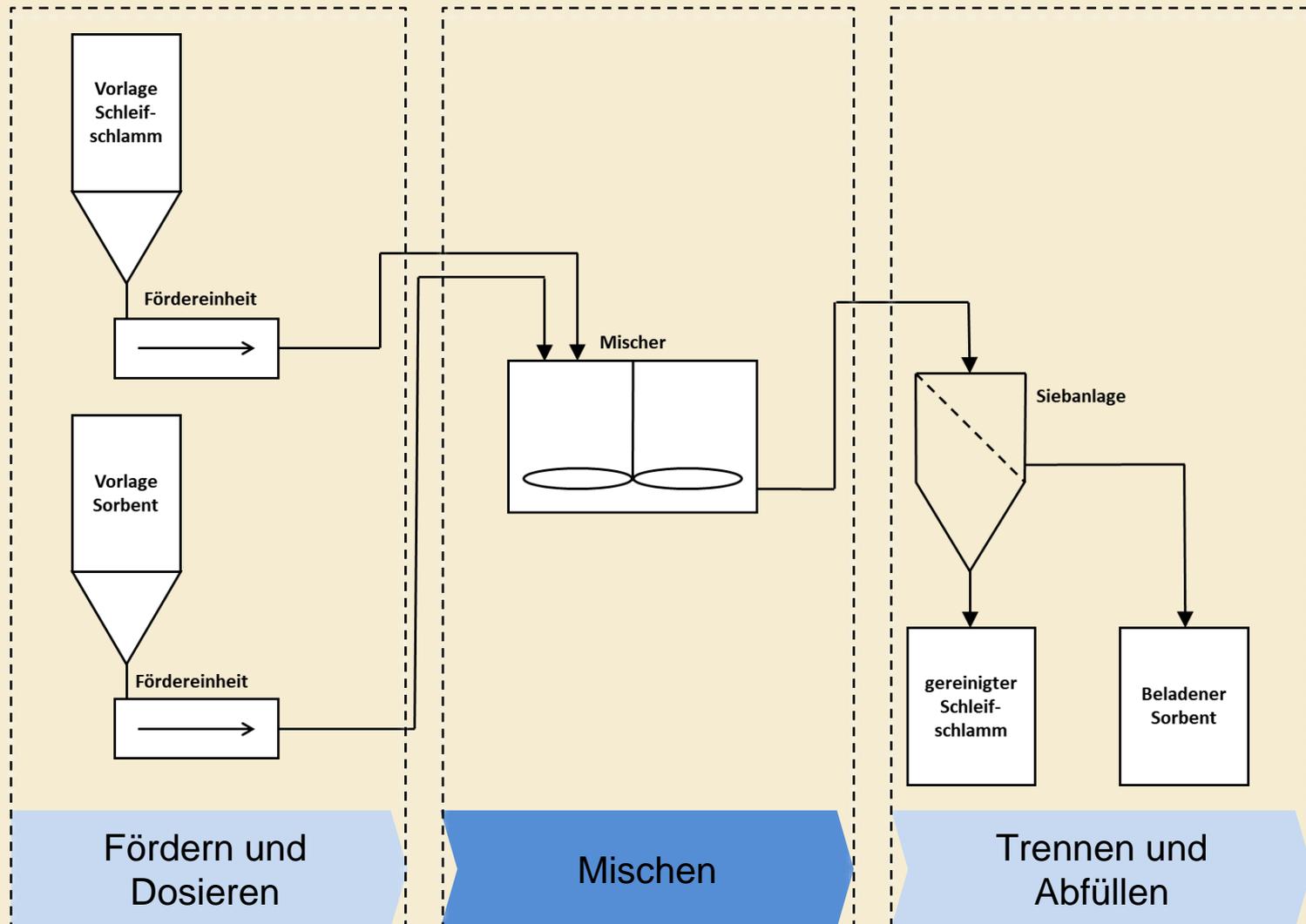


2  $\mu\text{m}$  Mag = 5.22 K X EHT = 20.00 kV Signal A = SE2 Signal = 0.8224  
WD = 16.0 mm Signal B = InLens Photo No. = 8425

- Daher wurde ein neuartiges trockenes Verfahren entwickelt, das durch adsorptive Vorgänge funktioniert.
- Der Schleifschlamm wird mit einem Ölbinder vermischt und anschließend durch Sieben getrennt.
- Es werden Restölgehalte von unter 1 % erreicht.
- Zudem wurde ein schnelles thermisches Analyseverfahren entwickelt.



a) Der Binder und das Schleifschlamm-Öl-Agglomerat kommen in Kontakt. b) Das Öl geht auf den Binder über. c) Das nun trockene Schleifschlamm-Partikel löst sich vom Agglomerat.

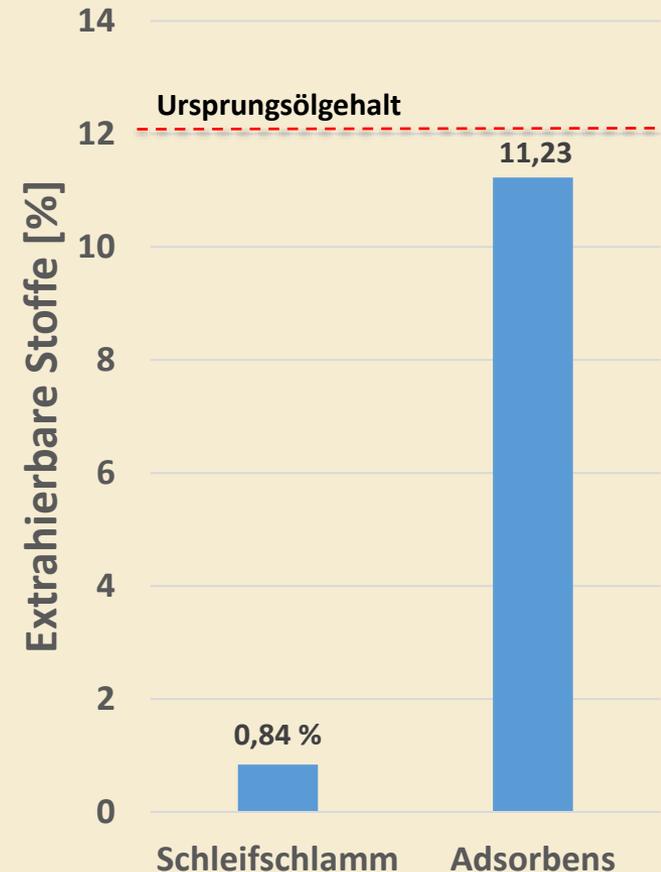




# Anlage ist betriebsbereit

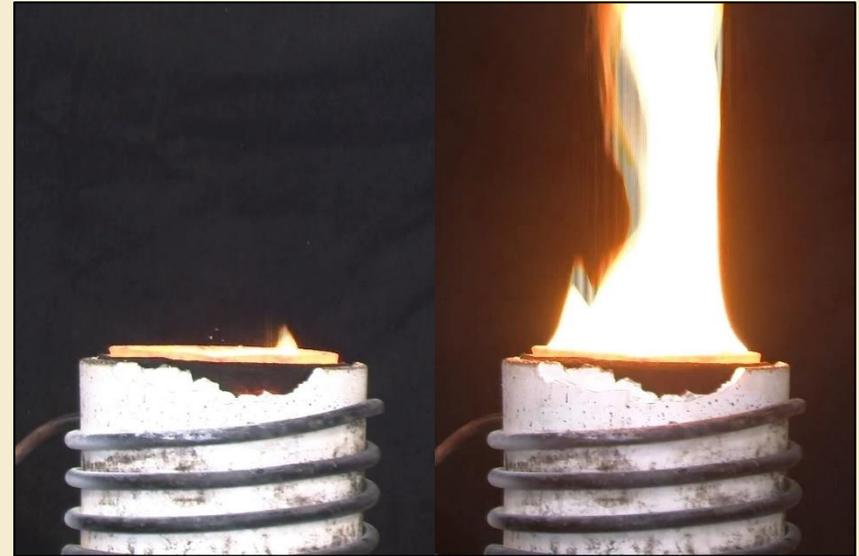


- Das vom Schleifschlamm abgelöste Öl lässt sich komplett im Adsorptionsmittel wiederfinden.
- Es müssen Verwertungswege für die beladenen Adsorptionsmittel gefunden werden, um nicht einen neuen Problemstoff zu erzeugen.
- Aktivkohle kann kostenlos beim Hersteller abgegeben werden und wird wieder aufbereitet.
- Trockenkoks kann als Brennstoff im Hochofen eingesetzt werden.
- Hochofenschlacken lassen sich evtl. in der Zementindustrie verwenden.



# Verwertung des gereinigten Materials pulverförmig

- Einfacher ist die Hinzugabe zu einer Schmelze.
- Das entölte Material zeigt im Gegensatz zum verölten Material kaum Flammenbildung.
- Die Ausbringung liegt je nach Element zwischen 82 und 98 %. Es bildet sich kaum Schlacke.
- Jedoch stellt die Handhabung des feinen Pulvers eine neue Herausforderung dar.

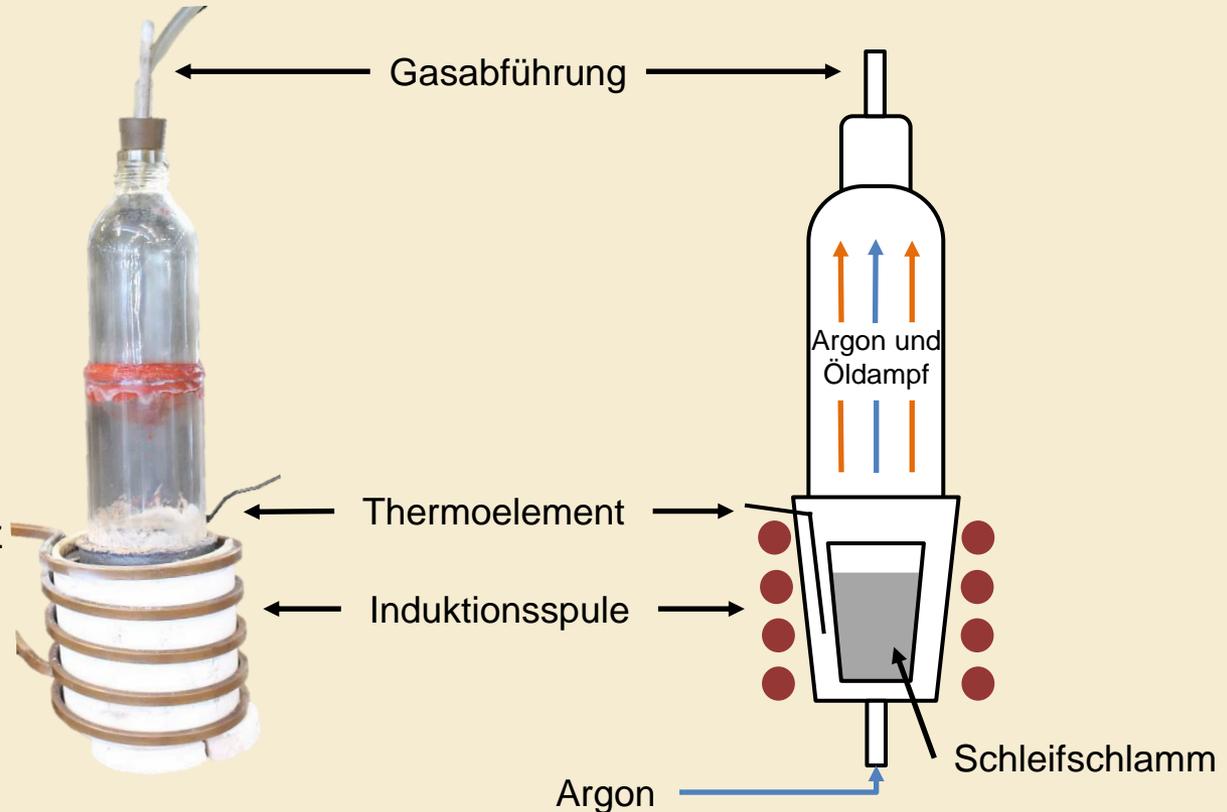


**Tabelle 1:** Chemische Zusammensetzung eines Schmelzversuchs (Masse Basismaterial: 478,5 g - Masse Schleifschlamm: 93,95 g)

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Al [%]	V [%]	W [%]
Basismaterial	0,415	0,307	0,608	0,012	0,025	0,182	0,044	0,029	0,002	0,007
Schleifschlamm	3,087	0,896	< 0,001	0,137	0,083	0,460	0,162	< 0,001	0,095	0,070
Basismaterial + Schleifschlamm	0,832	0,570	0,448	0,031	0,033	0,225	0,059	0,005	0,014	0,014
Theoretisch zu erwartende Gehalte	0,854	0,404	0,508	0,033	0,035	0,228	0,063	0,024	0,017	0,017
Ausbringung	97,5	141,2	88,3	94,1	93,0	98,5	94,2	20,0	82,4	82,4

# Analyseverfahren zur Bestimmung des Ölmassenanteils

- Der Schleifschlamm wird unter inerter Atmosphäre erhitzt, um die flüchtigen Bestandteile zu verdampfen.
- So wird ein Entzünden des Öls und eine gleichzeitige Oxidation des Metalls verhindert.
- Durch die Gewichtsänderung vor und nach dem Versuch wird der Masseanteil des Öls bestimmt.
- Das Verfahren ist deutlich schneller als z. B. eine Soxhlet-Analyse.



## 3. DIBRAS

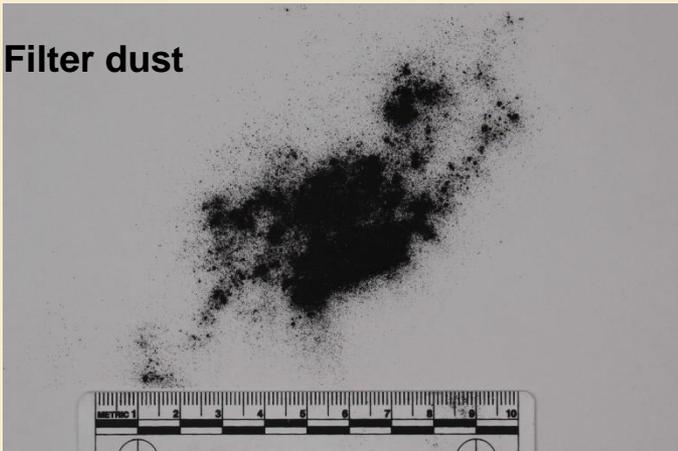
**Direkter Einsatz von selbstreduzierenden  
Briketts in den Aggregaten der Stahl- und  
Gießereiindustrie zur Verbesserung der  
Ressourcenbilanz**

Mill scale



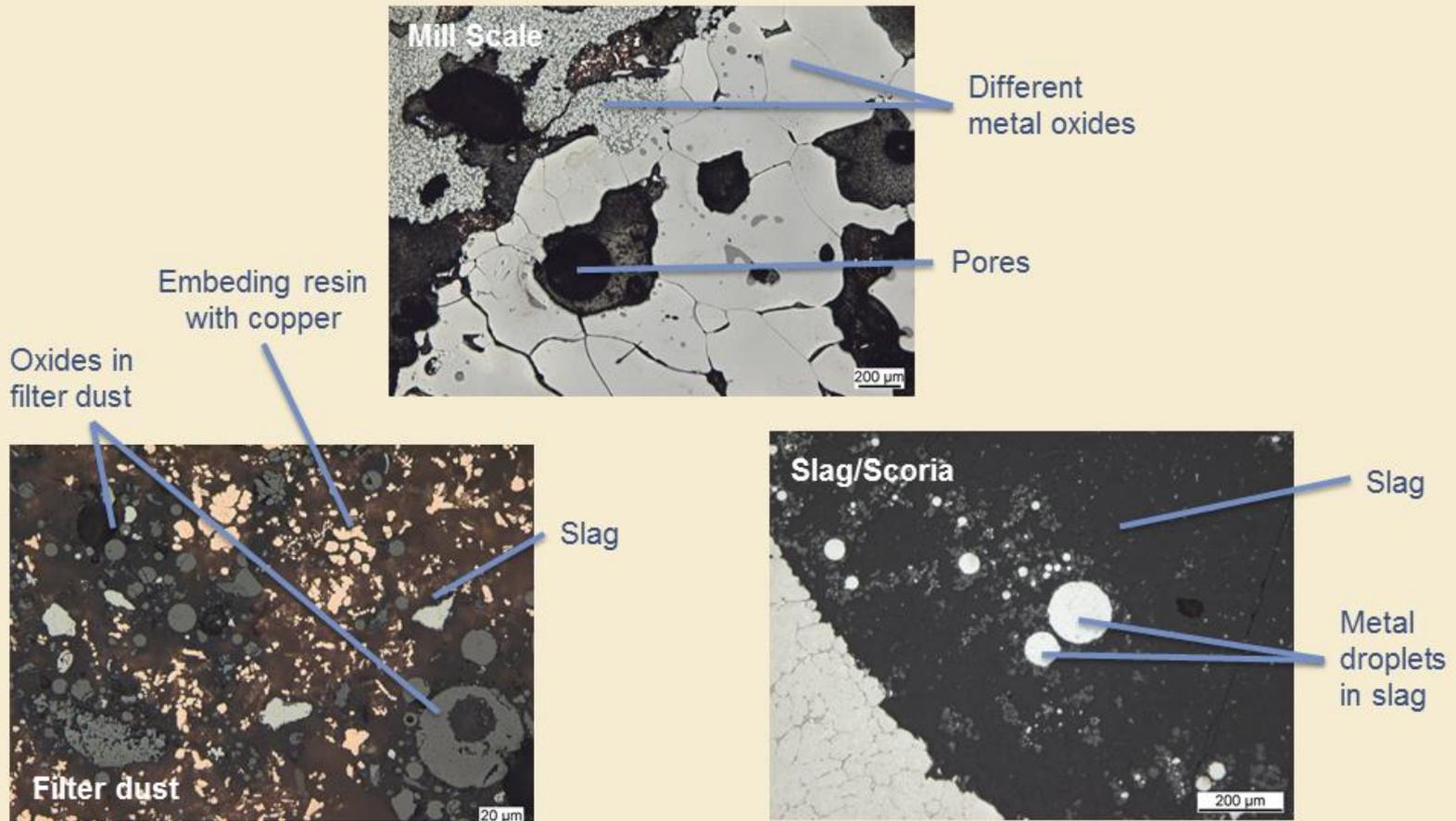
Pictures of mill scale, filter dust and slag from the high alloyed steel production.

Filter dust



Slag/Scoria

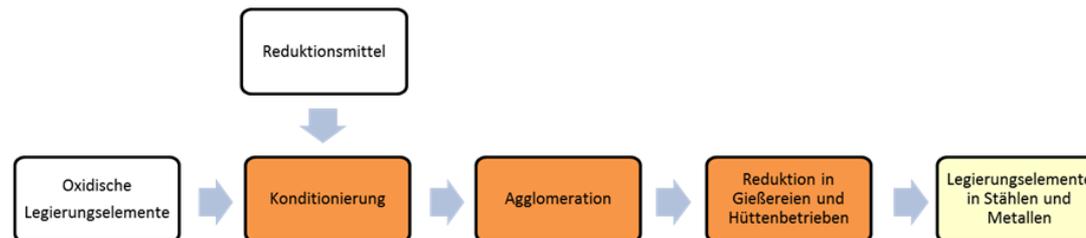






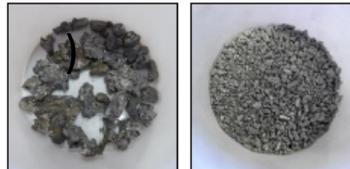
## DIBRAS

- Rückgewinnung der hochwertigen Legierungselemente aus Reststoffen aus metallurgischen Prozessen, d.h.:
  - Schlacke
  - Filterstaub
  - Walzzunder und Hammerschlag



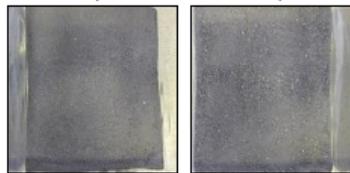


## Rückgewinnung von Metallen aus Oxiden in metallurgischen Schlacken



a)

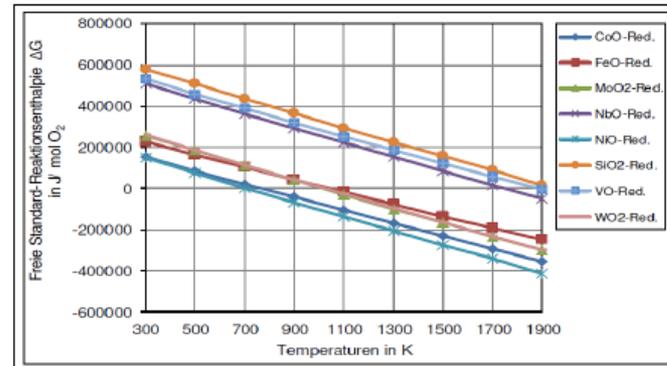
b)



c)

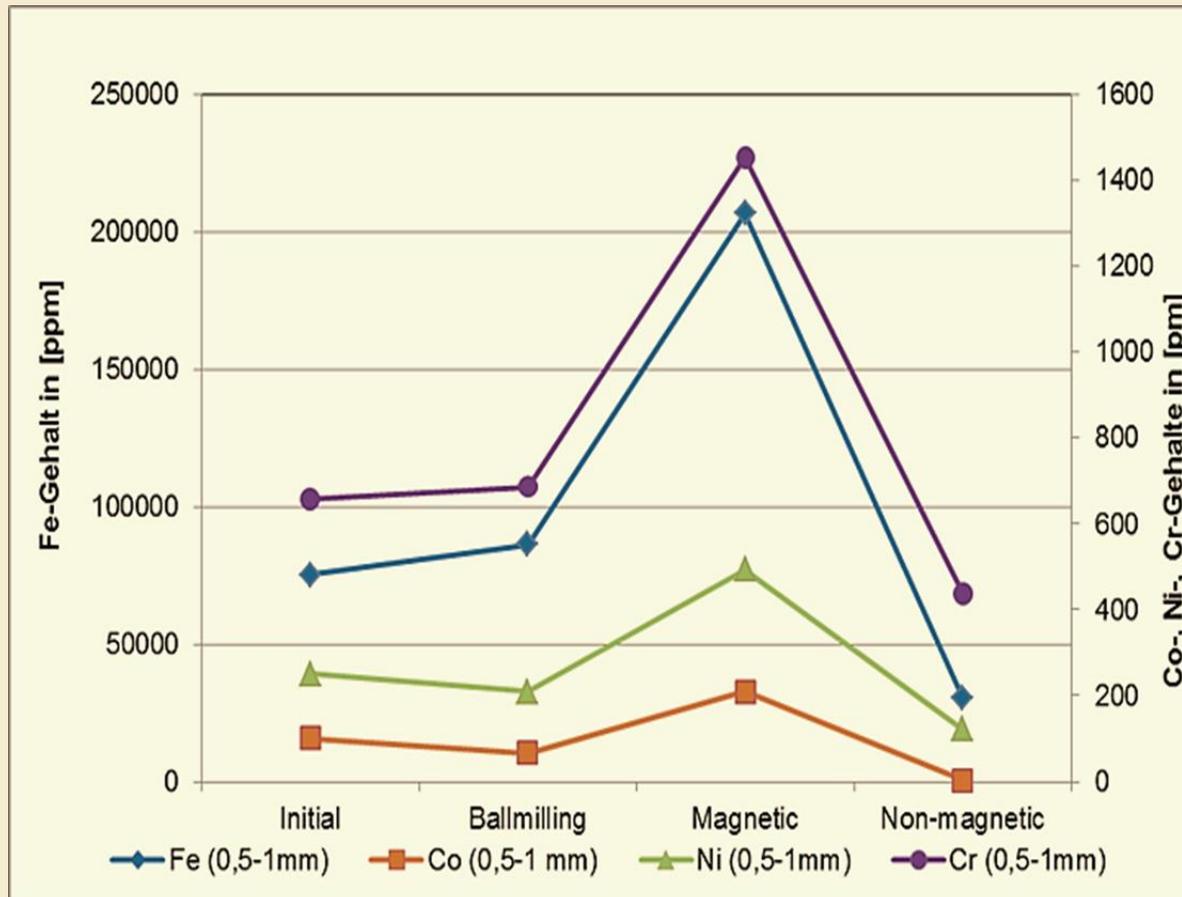
d)

Edelstahlschlacke	
a)	grobe Metallfraktion
b)	feine Metallfraktion
c)	magnetische Fraktion
d)	nicht-magnetische Fraktion



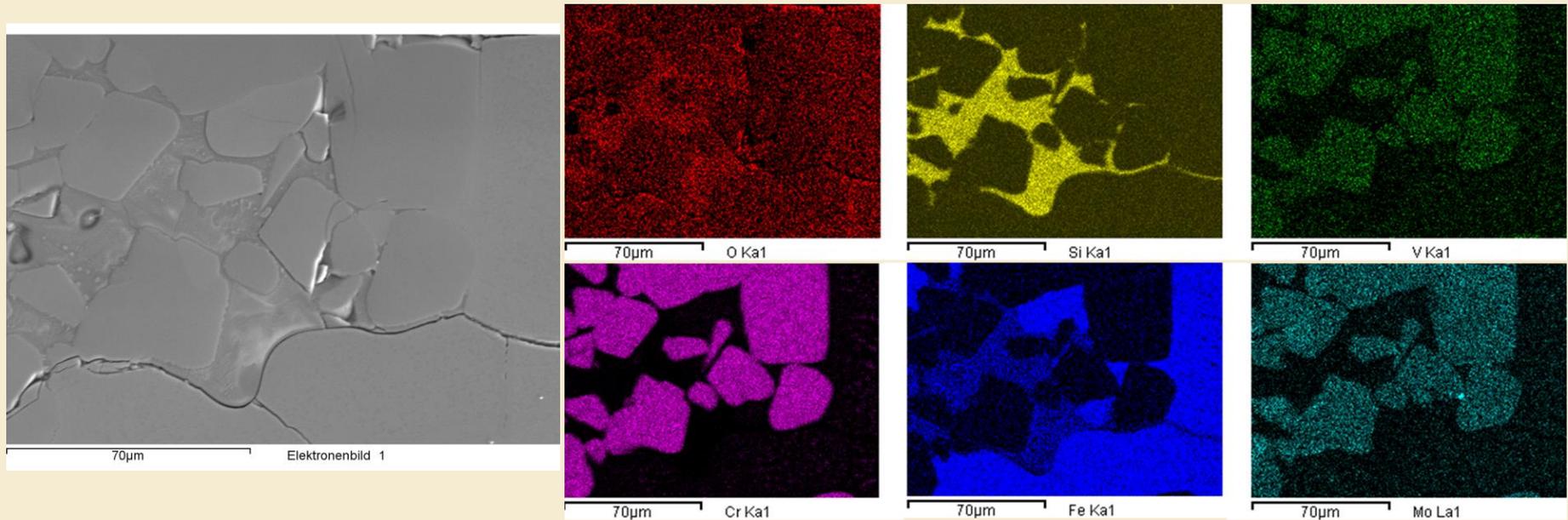
Element	Magnetische Fraktion [ppm]	Nicht-magnetische Fraktion [ppm]
Eisen	381.900	20.240
Kobalt	2.124	110
Nickel	702	57
Molybdän	2.949	205
Wolfram	1.717	160

Deike, R.: BMBF / MCTI Workshop of Brazilian-German R&D Cooperation on Rare Earths and Raw Materials of Strategic Economic Importance, Brasilia 21.09.2015



Deike, R.; Ulum, R.; Schubert, D.; Foppe, M.; Gellermann, C.; Lutz, S.: *The recycling potential of metals from MSW incineration residues*, Mining the Technosphere Potentials and Challenges, Drivers and Barriers, TU Vienna, 02.10.15,

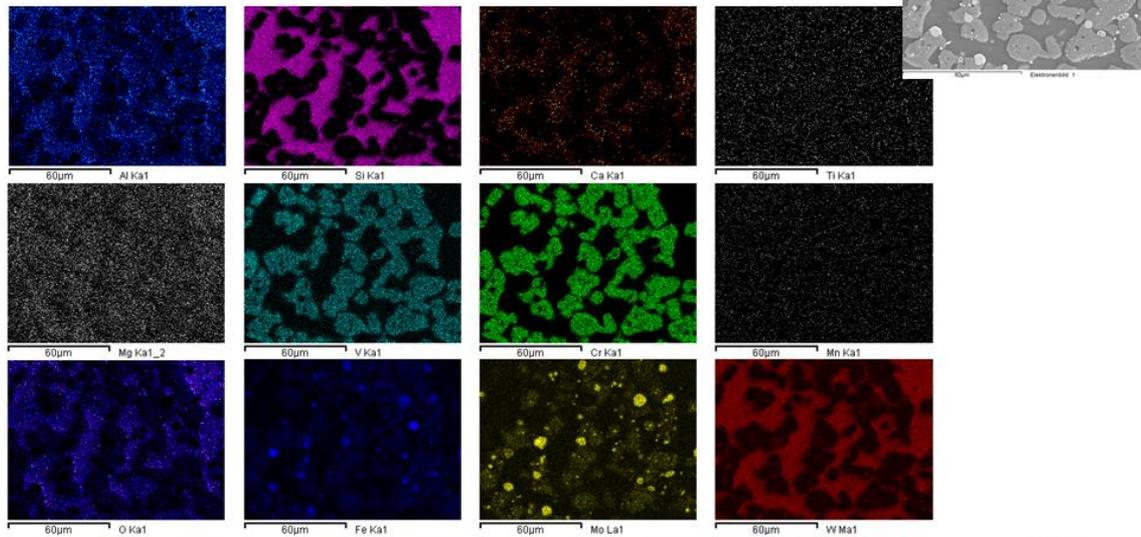
# Element Mapping eines Walzzunders





Innovative Technologien  
für Ressourceneffizienz  
Bereitstellung wirtschafts-  
strategischer Rohstoffe

## Analyse Ofenschlacke





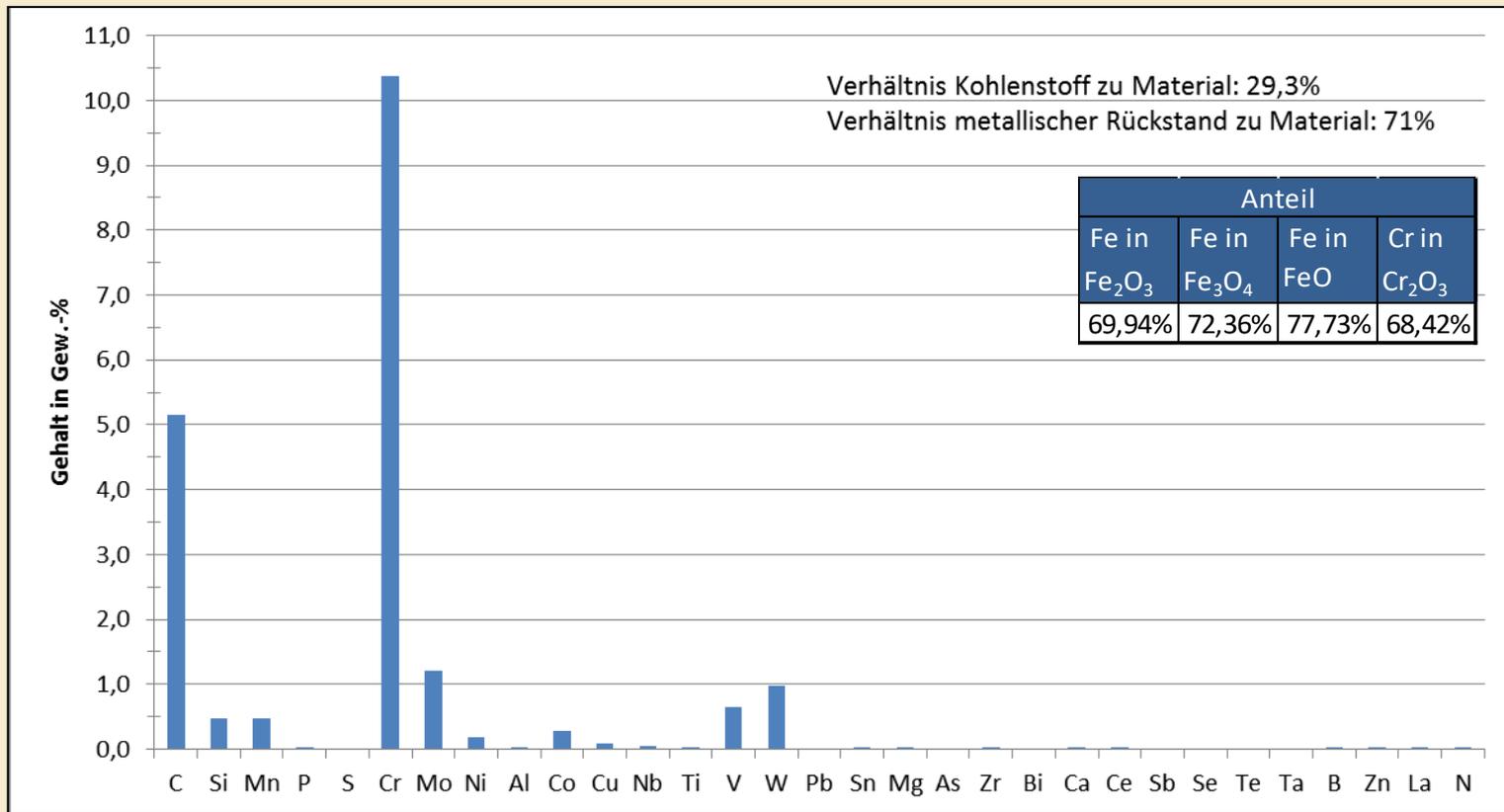
# Reduktionstests

- Tiegel aus reinem Graphit
- Ca. 100g Material
- Ca. 20-30% Ranco Elektrodengraphit
- Materialien vor Chargierung vermischt
- Externe Ofenregelung mittels Thermoelement
- Zieltemperatur: 1500 – 1600°C
- Versuchsdauer: 30 min ab Start des Ofens
- Abguss in Kupferkokille

Anteil			
Fe in Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe in Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe in FeO	Cr in Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
69,94%	72,36%	77,73%	68,42%



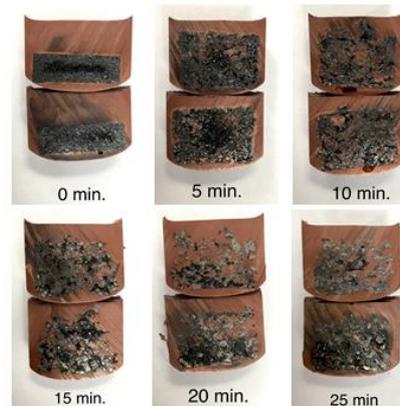
# Ergebnis eines Reduktionsversuches





## Brikettierung

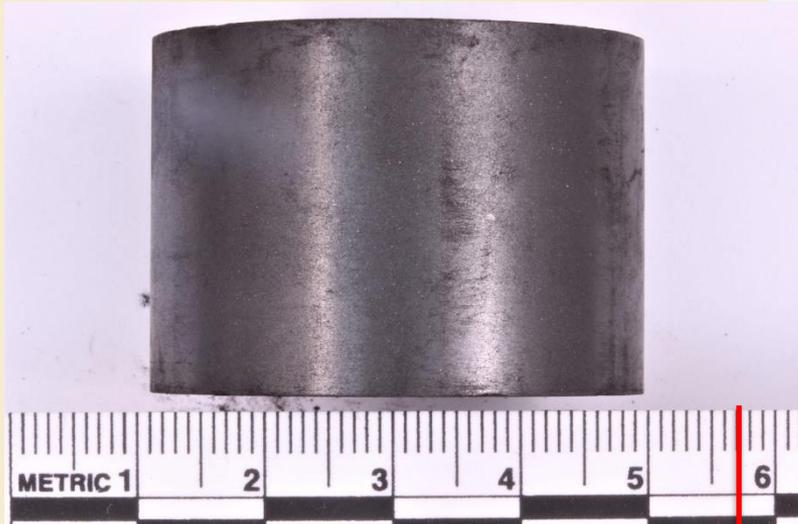
- Selbstreduzierende Briketts aus:
  - Kohlenstoff,
  - Reststoffen (z.B. Schlacke, Filterstaub oder Hammerschlag)
  - Binder.



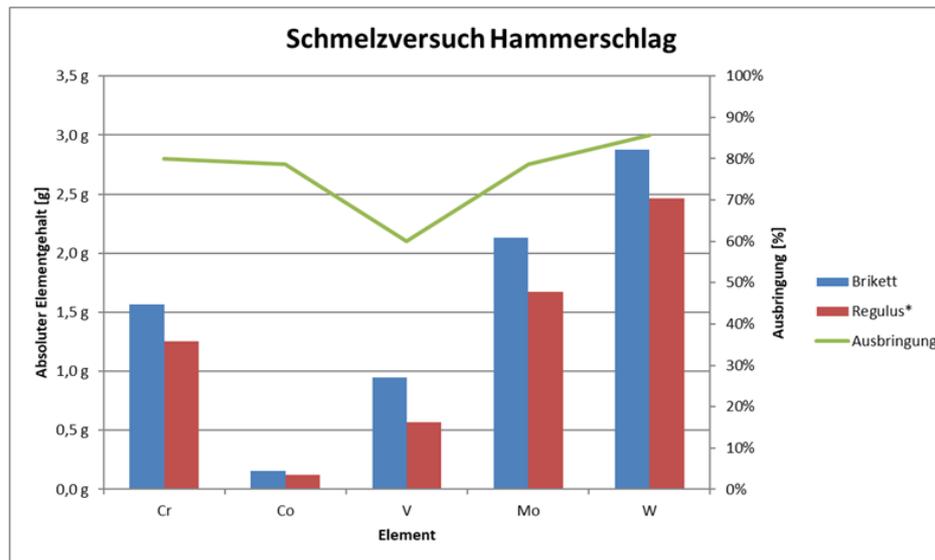
Briketts nach unterschiedlicher Dauer in  
einem Hochtemperaturofen bei 1600°C



# Veränderungen der Briketts bei 1100 °C und 30 min unter Luft.



## Schmelzversuche Hammerschlag



\* Metallgehalt im Regulus minus dem Metallgehalt des Basismaterial.



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Schmelzversuche mit selbstreduzierenden Briketts

itm

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

Offen im Denken



Abbildung 2.94: Chargierung der Briketts in die Schmelze im Elektrolichtbogenofen.



Abbildung 2.95: Eintauchvorgang der Briketts in die Schmelze.



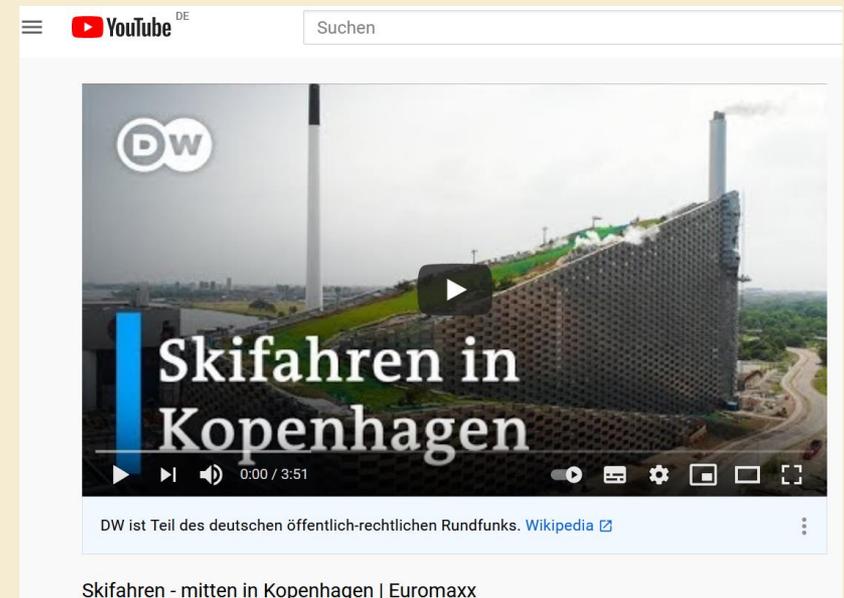
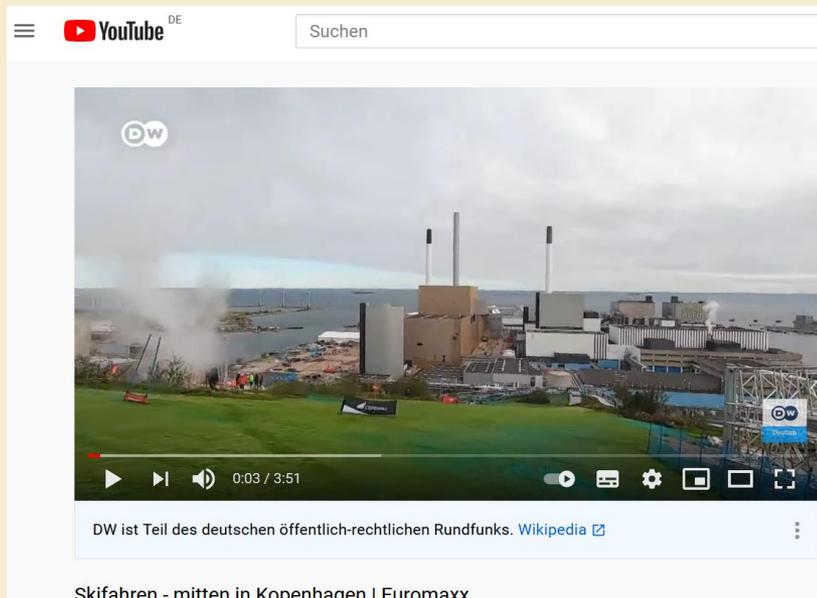
Abbildung 2.96: Blick in den Ofenraum mit Briketts auf der Oberfläche der Schmelze (1).

Deike, R.; Rabelo de Lima, A.R.; Ebert, D. et al.: :  
DIBRAS Direkter Einsatz von selbstreduzierenden  
Briketts, Inhaltsverzeichnis: Schlussbericht  
BMBF-Forschungsvorhaben Förderkennzeichen  
033R167 Verbundvorhaben,  
<https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:1760100374/DIBRAS>

# Recycling of Metals from Bottom Ash

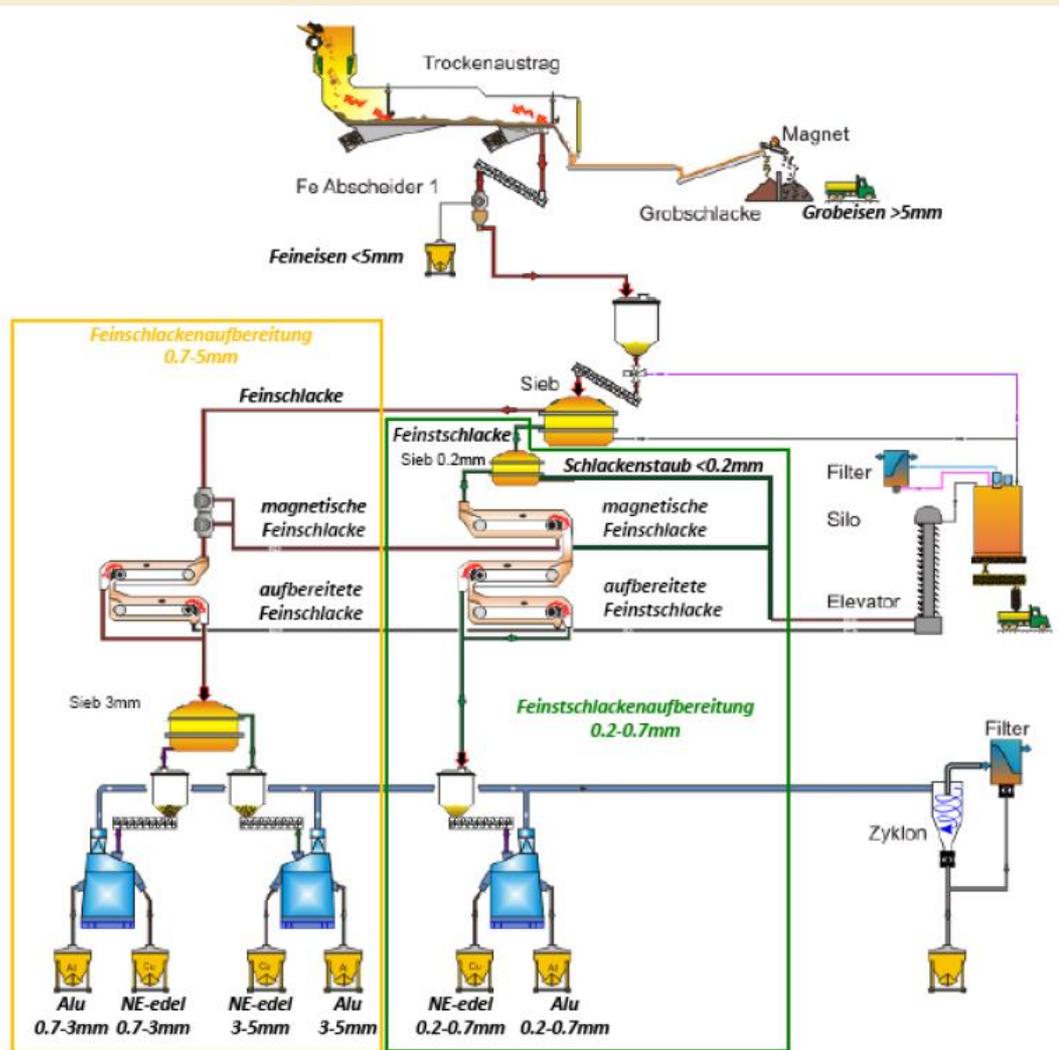


# The most modern waste incineration plant in the world in Copenhagen



<https://www.youtube.com/watch?v=dKPx4hzFsTU>

# Waste Incineration with Dry Slag Discharge

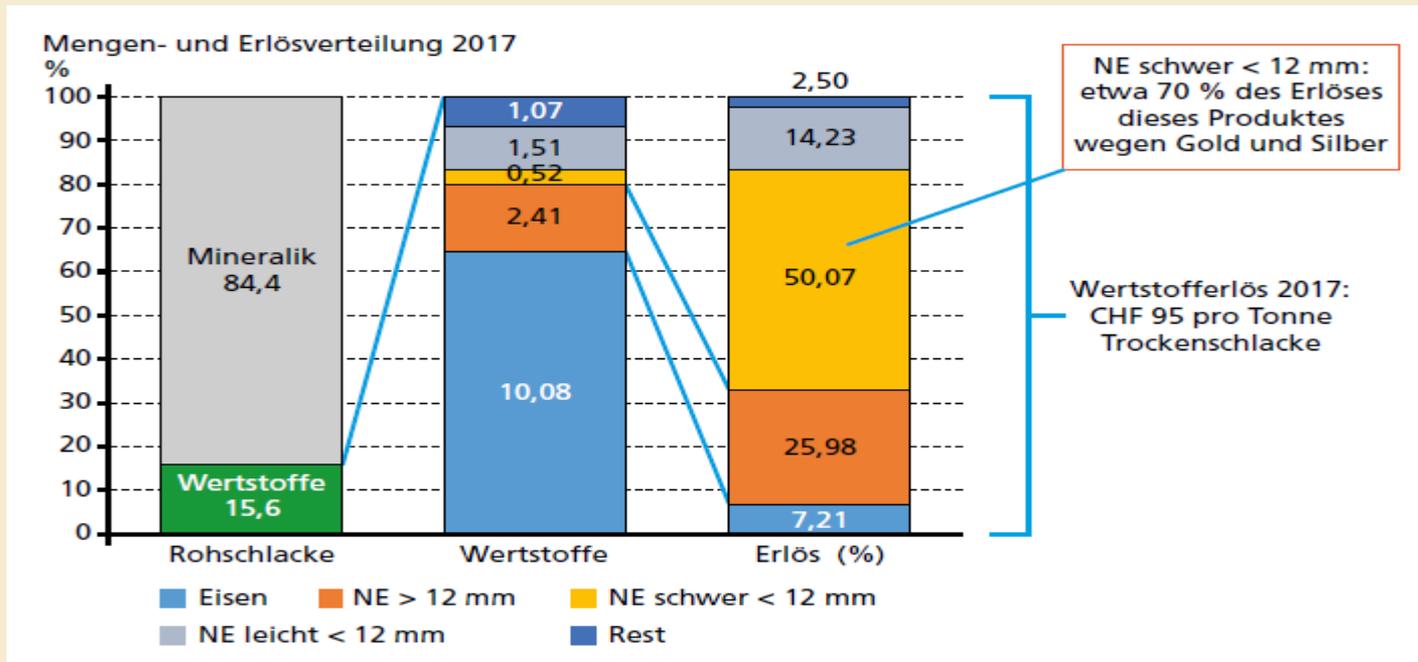


<https://www.zar-ch.ch/zar/die-stiftung/>

# Preparation of Various Different Metallic Particles by Appropriate Cleaning of the Fractions



# The distribution of metals in bottom ash and their economic importance



Böni, D.: Thermo-Recycling: Effiziente Gewinnung von Wertstoffen aus der Trockenschlacke, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5, Hrsg. S. Thiel und E. Thomé-Kozmiensky, TK-Verlag (ISBN: 978-3-944310-41-1), 2018

Deike, R.; Hoenig, V.: Feinschlacke – ein potenzieller Rohstoff für die Zementherstellung?; Thermo-Recycling als Chance für unsere Kreislaufwirtschaft, ZAR-Jubiläums- und Informationsveranstaltung, Bern 23.01.2020



# Erkenntnisse zum Einsatz von MV-Schlacke in der Zementindustrie

**R. Deike<sup>1</sup>, I. Adhiwiguna<sup>2</sup>, I. Zacharopoulos<sup>1</sup>, J. Geldermann<sup>1</sup>, R. Warnecke<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Universität Duisburg Essen – Institut für Technologien der Metalle

<sup>2</sup> Pt. Zenith Allmart Precisindo, East Java, Indonesia

<sup>3</sup> Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

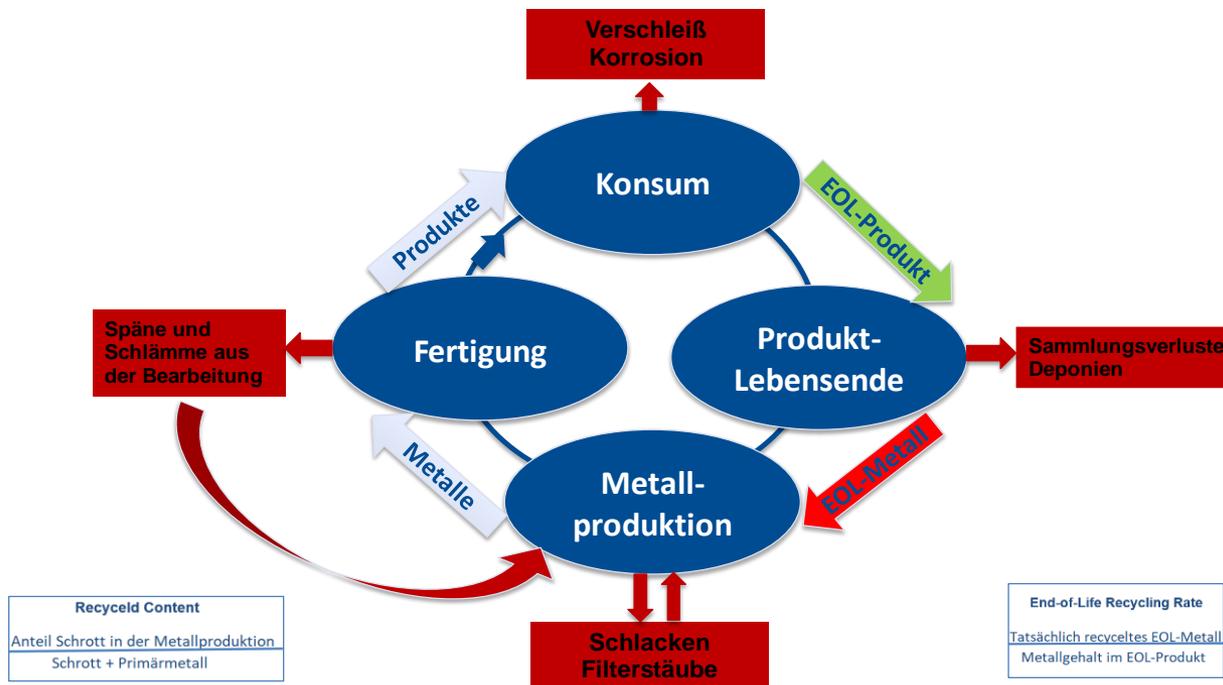
# Agenda

- 1. Voraussetzungen zur Realisierung wirtschaftlicher Recyclingverfahren**
- 2. Die wesentlichen charakteristischen Merkmale des EMSARZEM-Prozesses**
- 3. Verwendung der Output-Fractionen als sekundäre Rohstoffe im Open-Loop Recycling**
- 4. Ökonomische Bewertung des EMSARZEM-Prozesses**

**Voraussetzungen zur  
Realisierung  
wirtschaftlicher  
Recyclingverfahren**



# Voraussetzungen zur Realisierung ökonomisch und ökologisch erfolgreicher Recyclingverfahren

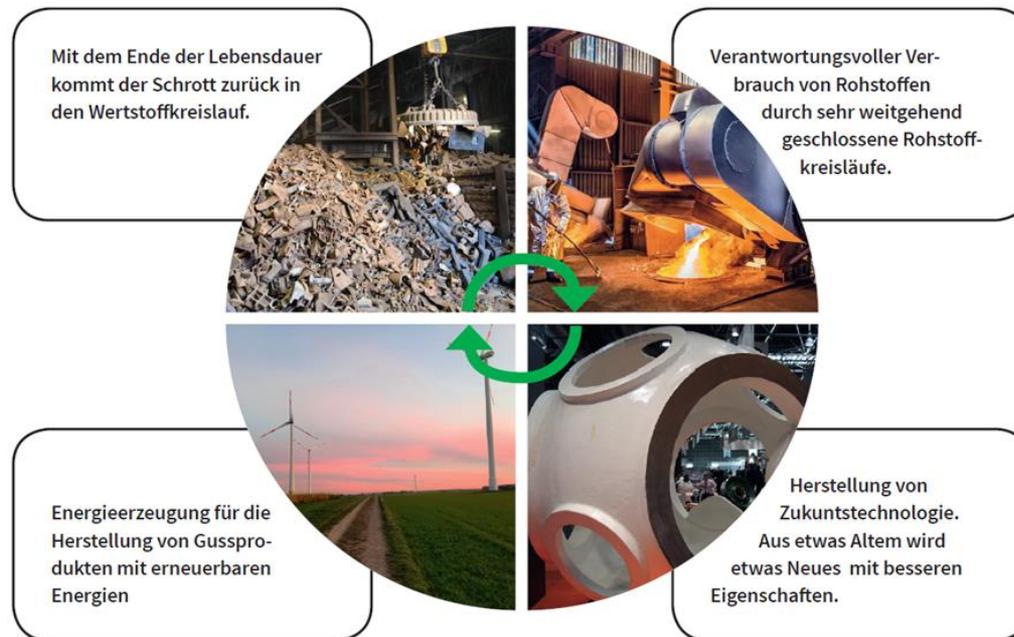


# Voraussetzungen zur Realisierung ökonomisch und ökologisch erfolgreicher Recyclingverfahren

- 1. In den Reststoffen müssen möglichst hohe Konzentrationen des Stoffes/der Stoffe enthalten sein, die zurückgewonnen werden sollen.**
- 2. Die Reststoffe dürfen nur geringe Konzentrationen an störenden Begleitstoffen enthalten.**
- 3. Die Anwendung einfacher und robuster Recyclingtechnologien sollte möglich sein.**
- 4. Die Verwendung der Sekundärprodukte sollte ohne Qualitätseinbußen möglich sein.**

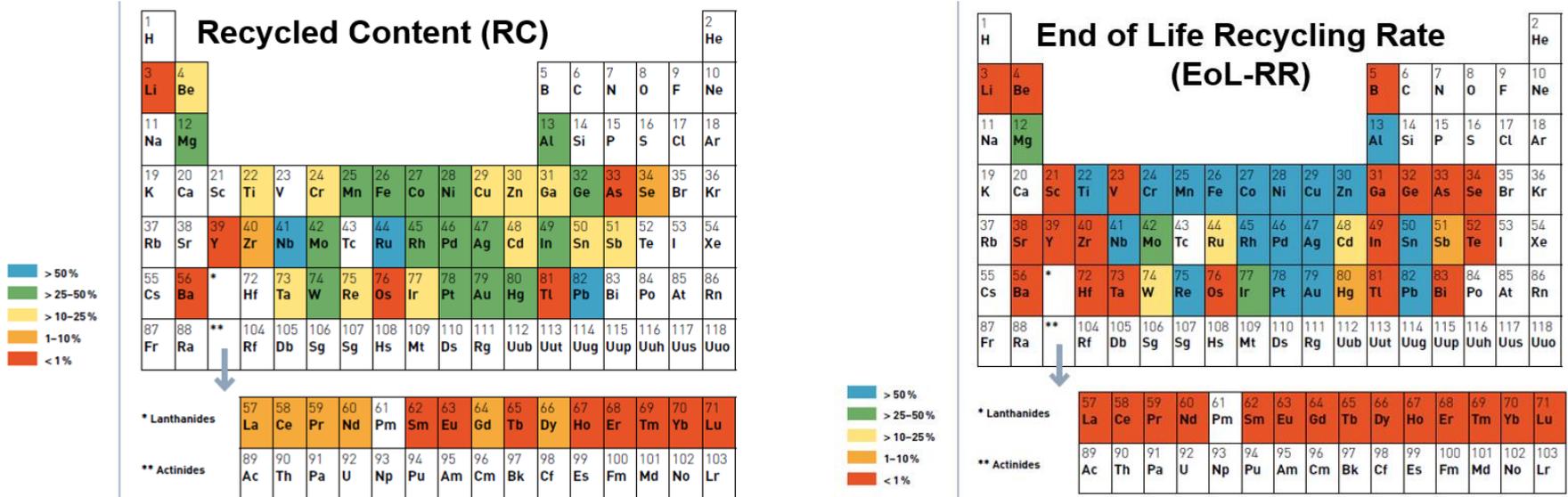
Deike, R.: *Ressourceneffizienz unter dem Aspekt sich verändernder internationaler Märkte für Industriemetalle*, Chemie Ingenieur Technik (CIT), Vol 84, Issue 10, p1685, 2012  
DOI 10.1002/cite.201200063

# Die Eisengießerei-Industrie ein gutes Beispiel für ein erfolgreiches



Deike, R.: *Die Bedeutung der Metalle in einer Circular Economy*, Giesserei Rundschau JHG 69, Nr. 04, S. 6-12, 2022, <https://doi.org/10.17185/duerpublico/78773>

# Wieso funktioniert das nicht bei allen Metallen?



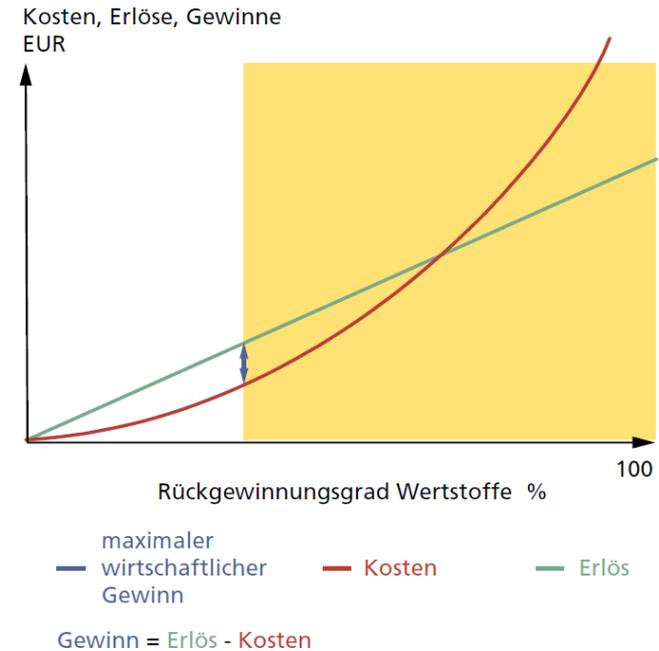
In Zeiten des Wirtschaftswachstums wächst der Anteil der Primärmetalle schneller als der Anteil der Sekundärmetalle, so dass der Recycled Content sinkt und wesentlich geringer ist als die EoL-Recycling-Rate. Darüber hinaus ist der Recycled Content von der Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen abhängig.

UNEP International Resource Panel: Recycling rates of metals, 2011, <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8702>

# Was ist eines der größten Probleme beim Recycling, das aber oft



Deike, R.: *Die Bedeutung von Eisen und Stahl für die Circular Economy.* stahl., Sonderdruck Nr. 1-2 | 2023, S. 3-10., <https://doi.org/10.17185/dupublico/78771>



Bunge, R.: *Recycling ist gut, mehr Recycling ist besser – oder nicht?*, in K. J. Thomé-Kozmiensky, D. Goldmann (Hrsg.) *Recycling und Rohstoffe – Band 9*, ISBN 978-3-944310-27-5, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

# Wie kann das Problem der Wertstoffrückgewinnung aus dissipativen

## Wir benötigen:

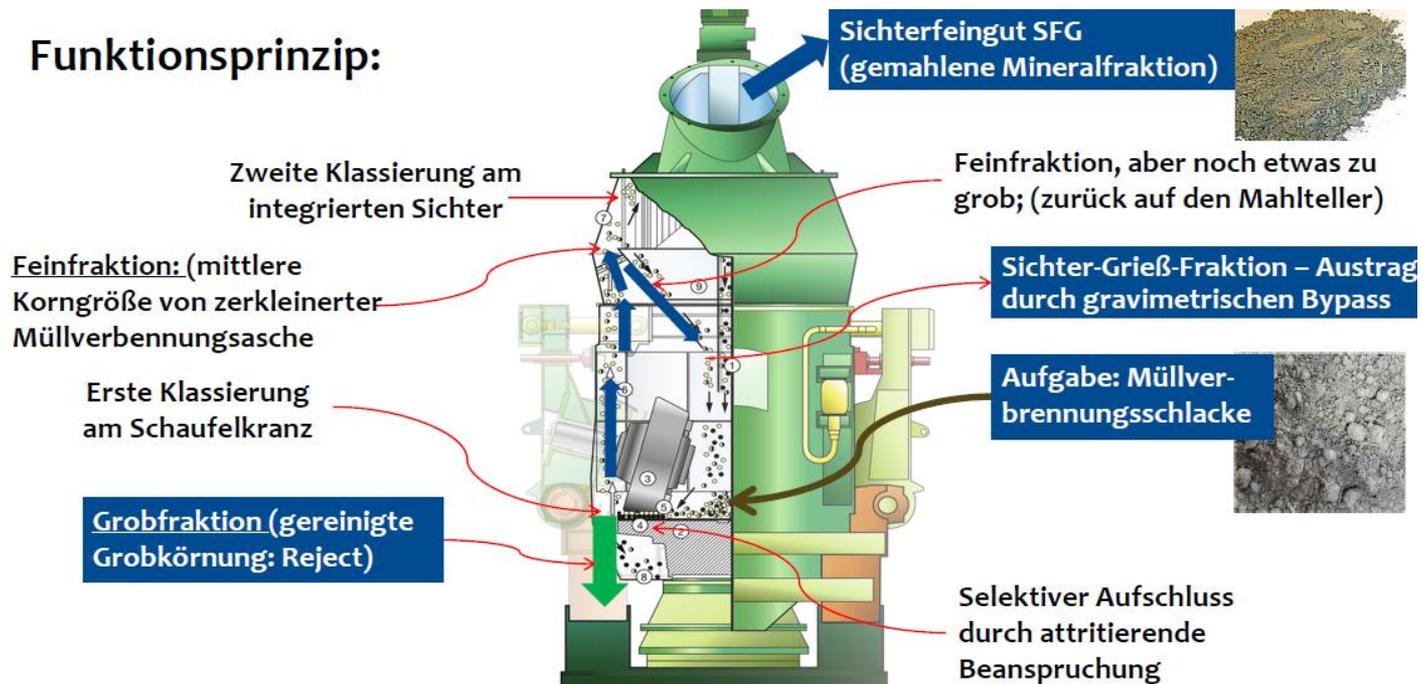
1. Eine effektive und wirtschaftliche Sammellogistik,
2. Prozesse mit denen komplex zusammengesetzte Materialströme in großen Massenströmen unter hohen Umweltschutzstandards verarbeitet werden können,
3. Prozesse in denen die dissipativ verteilten Wertstoffe aufkonzentriert werden,
4. Prozesse durch die mehrere Produkte gewonnen werden, für die

**Diese Anforderungen erfüllt die thermische Abfallbehandlung in Kombination mit einer modernen MV- Schlackenaufbereitung!**



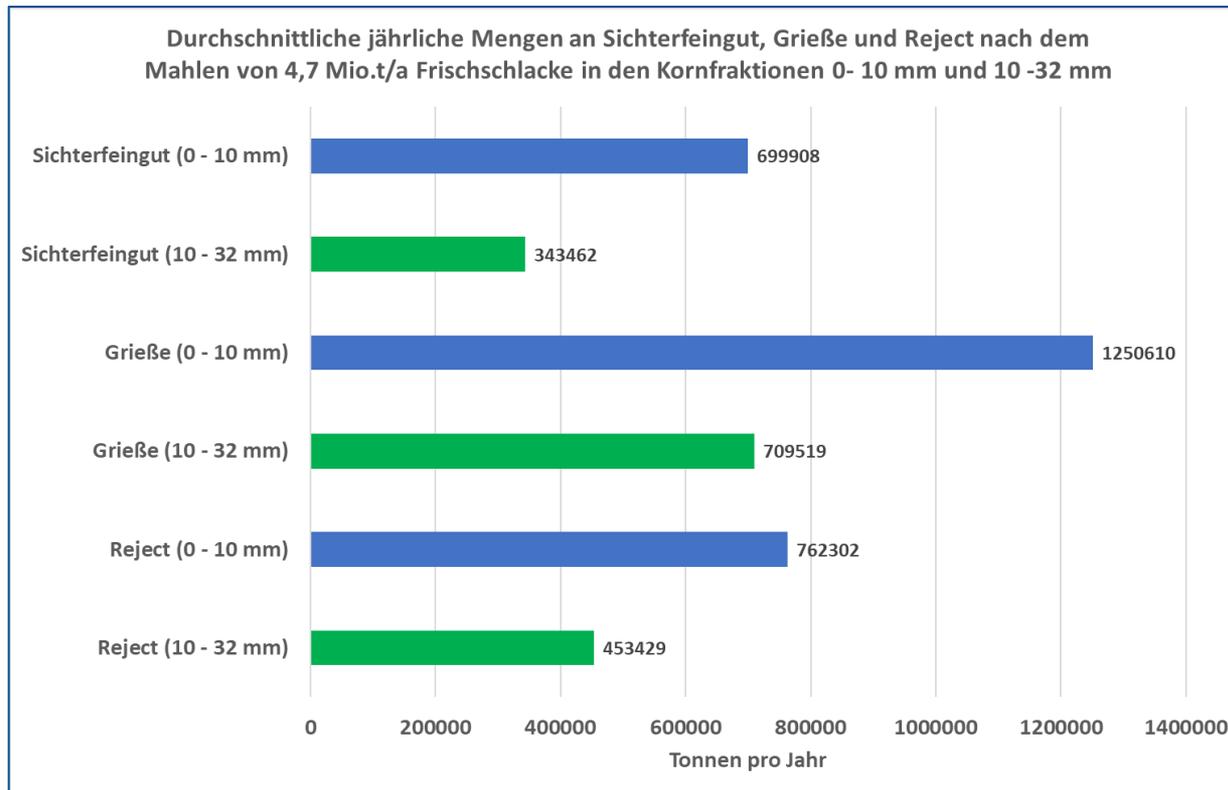
**Die wesentlichen  
charakteristischen  
Merkmale des  
EMSARZEM-Prozesses**

## Funktionsprinzip:

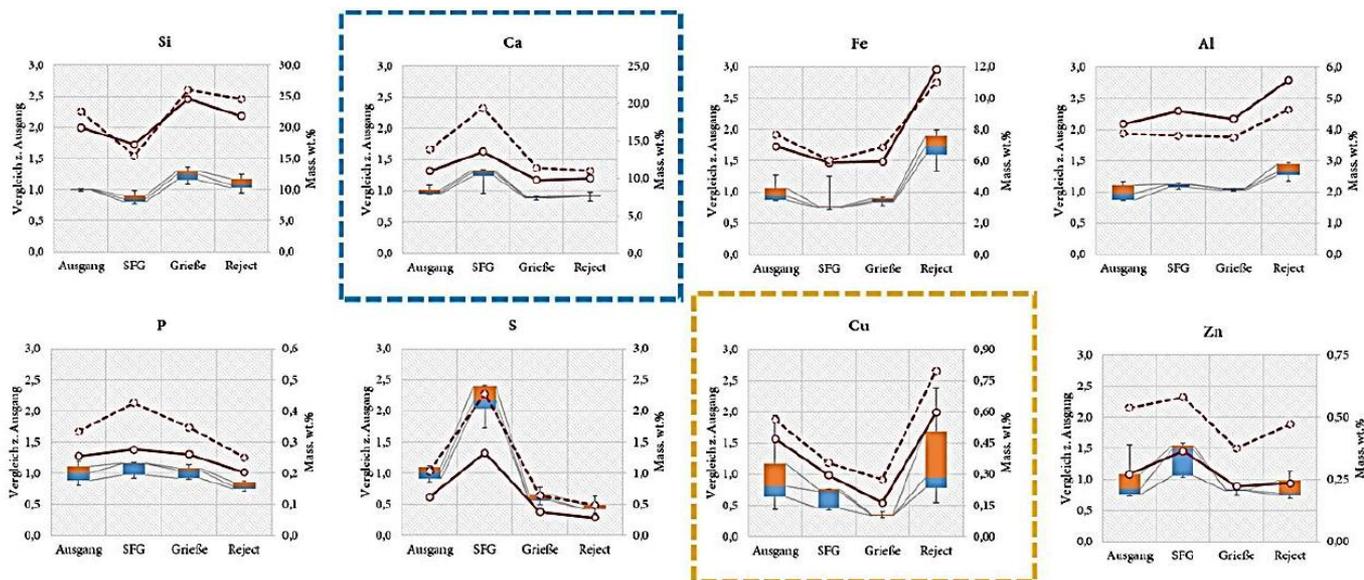


Deike, R.; Ruhkamp, W.; Adhiwiguna, I.; Warnecke, R.: *Einsatz von Rostasche – Feinfraktion < 10 mm als Rohstoff für die Herstellung von Zement und Beton*, BKMNA 24, Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Berlin, 12-13.06.2024

# Anteile an Sichterfeingut, Grieße und Reject nach dem Mahlen von

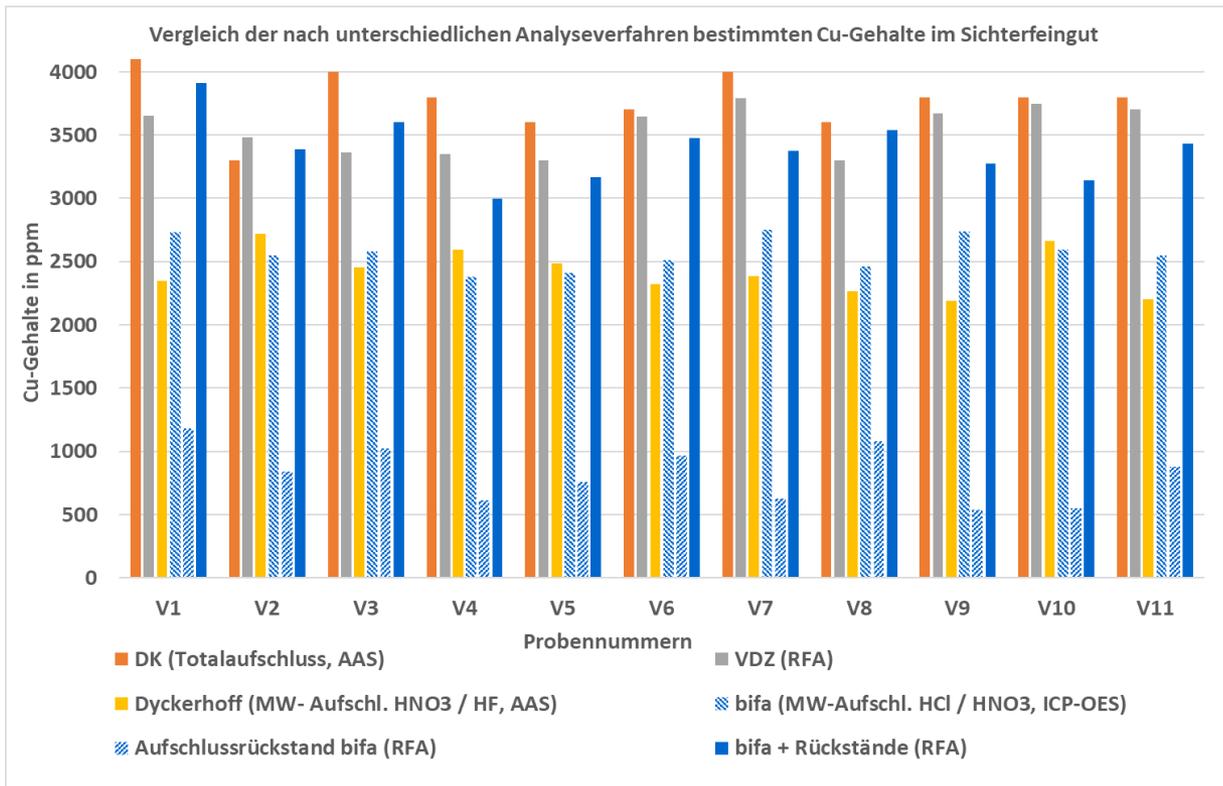


# Veränderungen der Gehalte wichtiger Elemente in der Feinfraktion (Sichterfeingut), der



--○-- Massenanteil in Gewichtsprozent (gemessene Messwerte) – Fraktion 0-10mm  
 —●— Massenanteil in Gewichtsprozent (gemessene Messwerte) – Fraktion 10-32mm  
 Im Vergleich zum Ausgang (relative Messwerte)

Deike, R.; Adhiwiguna, I.; Warnecke, R.: *EMSAZEM Einsatz von Müllverbrennungsschlacke als Rohstoff für die Zementherstellung*, VGBE energy, Produkte aus der thermischen Abfallverwertung 2024, Augsburg, 27.11.2024



## Moderne Separationstechnologie im Industriemaßstab



## Magnetscheidung



## Wirbelstromscheidung



# Elementgehalte in den magnetischen und Nicht-Eisen-Fractionen der

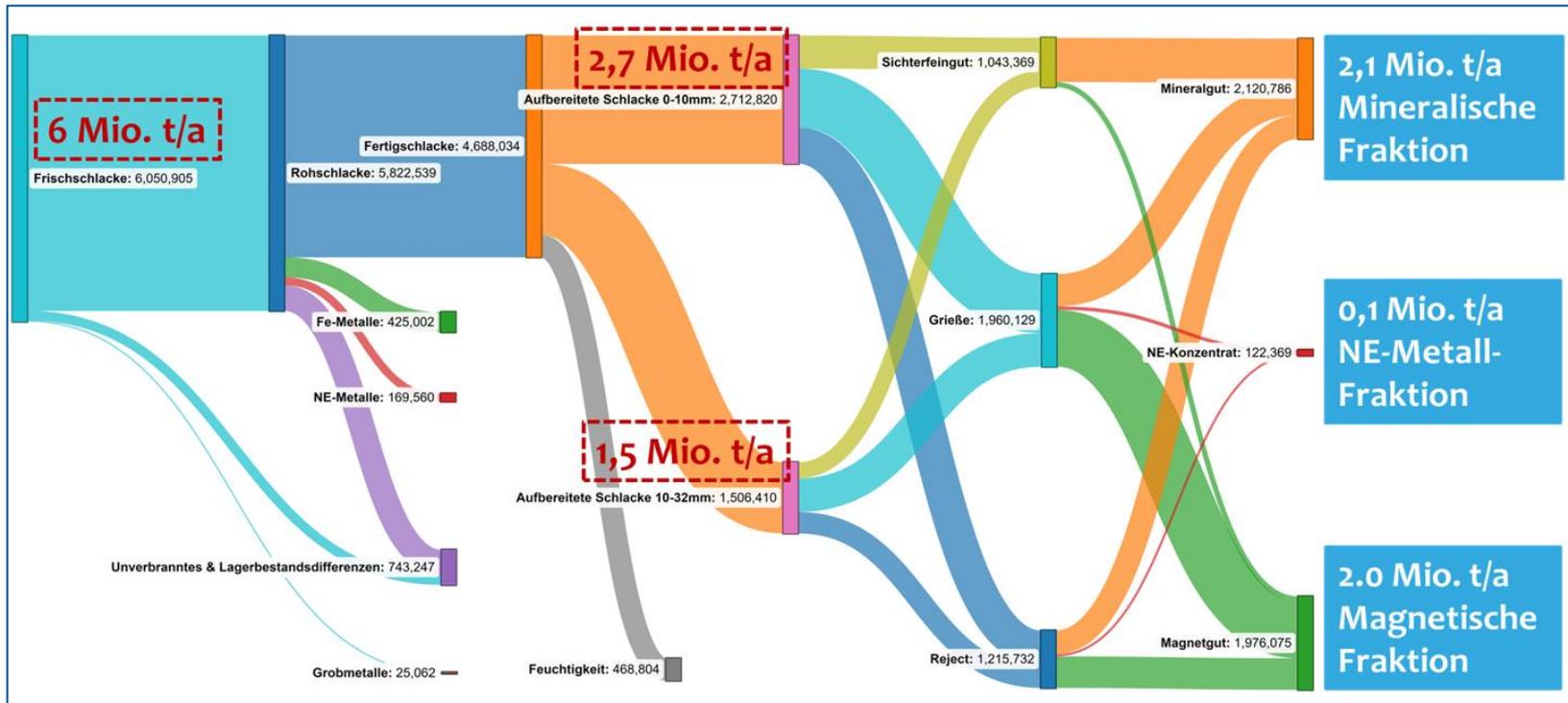
Elemente		Magnetischer Anteil der Grieße (58 %)	NE-Anteil der Grieße (5 %)	Mineralischer Anteil der Grieße (37 %)
Silicium (Si)	Gew.%	22,70	34,30	30,10
Calcium (Ca)	Gew.%	12,20	6,70	10,20
Eisen (Fe)	Gew.%	11,60	0,70	1,50
Aluminium (Al)	Gew.%	3,90	4,30	2,70
Natrium (Na)	Gew.%	2,30	3,70	2,60
Magnesium (Mg)	Gew.%	1,40	0,80	1,00
Titan (Ti)	Gew.%	0,81	0,29	0,60
Kalium (K)	Gew.%	0,87	0,63	0,88
Schwefel (S)	Gew.%	0,70	0,26	0,50
Kupfer (Cu)	Gew.%	0,26	0,65	0,20
Zink (Zn)	Gew.%	0,39	0,23	0,33
Chlor (Cl)	Gew.%	0,44	0,15	0,35
Phosphor (P)	Gew.%	0,40	0,13	0,29
Barium (Ba)	Gew.%	0,28	0,14	0,20
Mangan (Mn)	Gew.%	0,18	0,04	0,07
Blei (Pb)	Gew.%	0,07	0,11	0,09
Chrom (Cr)	Gew.%	0,11	0,02	0,03
Strontium (Sr)	ppm	387	218	304
Zirkon (Zr)	ppm	336	240	263
Nickel (Ni)	ppm	401	62	93
Zinn (Sn)	ppm	134	159	112
Antimon (Sb)	ppm	173	73	87
Cobalt (Co)	ppm	92	40	40
Molybdän (Mo)	ppm	60	9	19
Vanadium (V)	ppm	60	17	27
Rubidium (Rb)	ppm	30	20	34
Niob (Nb)	ppm	20	7	12
Arsen (As)	ppm	9	22	9

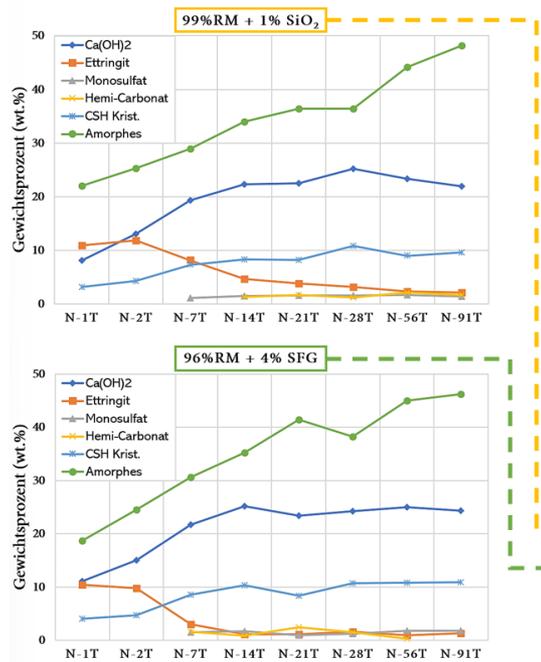
Elemente		Magnetischer Anteil des Rejects (51 %)	NE-Anteil des Rejects (5 %)	Mineralischer Anteil des Rejects (44 %)
Silicium (Si)	Gew.%	20,70	20,80	30,30
Calcium (Ca)	Gew.%	12,70	7,50	10,30
Eisen (Fe)	Gew.%	16,90	1,20	2,30
Aluminium (Al)	Gew.%	3,80	21,50	2,60
Natrium (Na)	Gew.%	2,50	2,80	3,00
Magnesium (Mg)	Gew.%	1,50	0,90	1,10
Titan (Ti)	Gew.%	0,79	0,28	0,47
Kalium (K)	Gew.%	0,63	0,64	0,74
Schwefel (S)	Gew.%	0,53	0,68	0,34
Kupfer (Cu)	Gew.%	0,70	7,37	0,47
Zink (Zn)	Gew.%	0,35	1,73	0,36
Chlor (Cl)	Gew.%	0,28	0,29	0,23
Phosphor (P)	Gew.%	0,32	0,16	0,22
Barium (Ba)	Gew.%	0,29	0,13	0,18
Mangan (Mn)	Gew.%	0,25	0,12	0,12
Blei (Pb)	Gew.%	0,07	1,03	0,20
Chrom (Cr)	Gew.%	0,13	0,03	0,18
Strontium (Sr)	ppm	401	193	362
Zirkon (Zr)	ppm	324	318	479
Nickel (Ni)	ppm	452	178	333
Zinn (Sn)	ppm	199	990	267
Antimon (Sb)	ppm	140	128	84
Cobalt (Co)	ppm	83	13	52
Molybdän (Mo)	ppm	55	20	24
Vanadium (V)	ppm	64	38	30
Rubidium (Rb)	ppm	24	33	31
Niob (Nb)	ppm	25	10	16
Arsen (As)	ppm	7	22	16



**Verwendung der Output-  
Fraktionen als sekundäre  
Rohstoffe im Open-Loop  
Recycling**

# Theoretisch in Deutschland anfallende Output-Fractionen aus dem



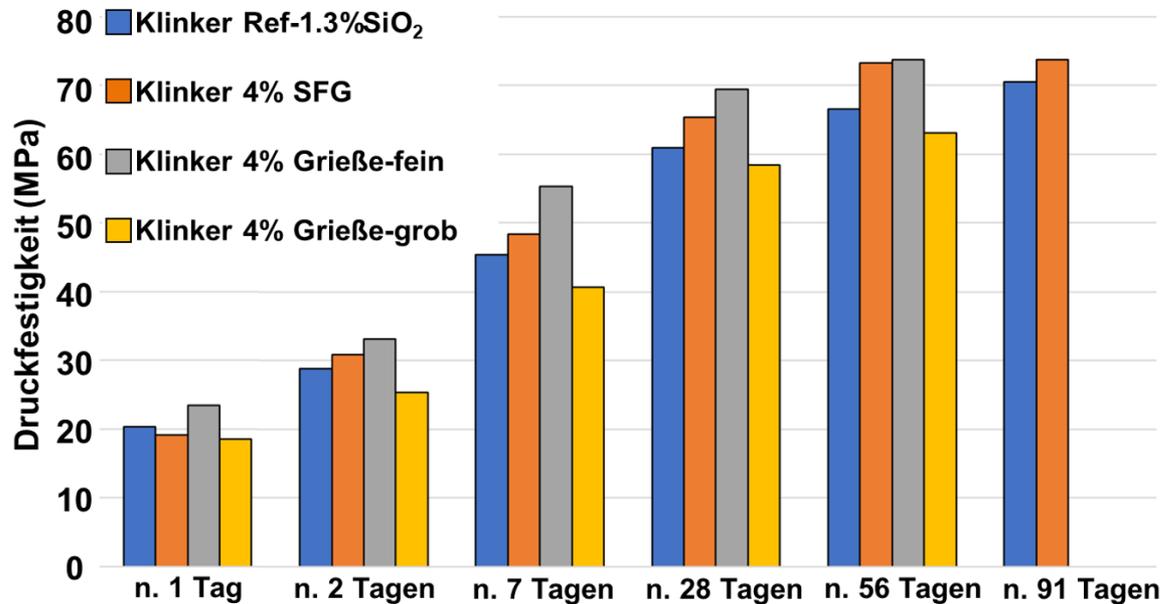


**DRUCKFESTIGKEIT VON ZEMENT-PROBEN NACH 56 TAGEN**

#Wilhelm-Dyckerhoff-Institut für Baustofftechnologie

Deike, R.; Ruhkamp, W.; Adhiwiguna, I.; Warnecke, R.: *Einsatz von Rostasche –Feinfraktion < 10 mm als Rohstoff für die Herstellung von Zement und Beton*, BKMNA 24, Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Berlin, 12-13.06.2024

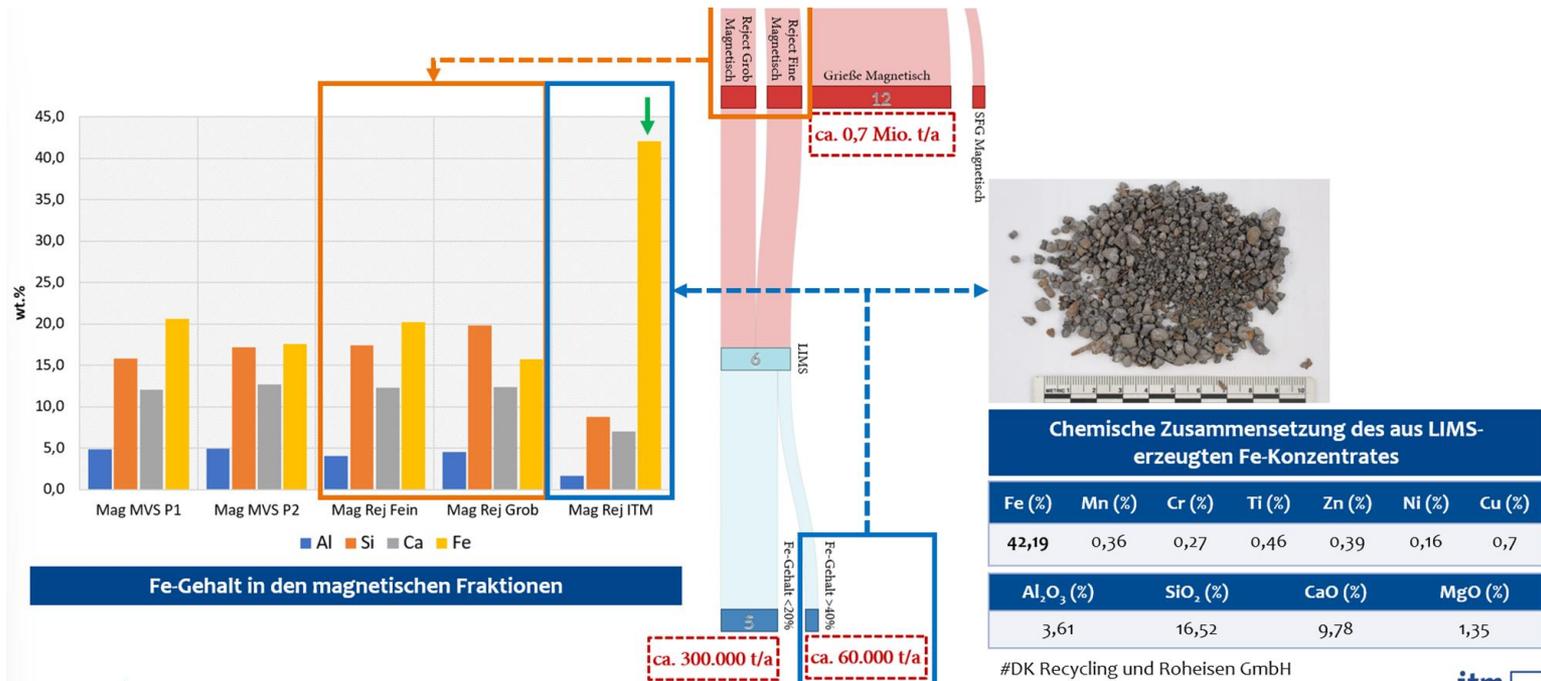
# Druckfestigkeitsprüfungen von Zementen mit unterschiedlichen



#Wilhelm-Dyckerhoff-Institut für Baustofftechnologie

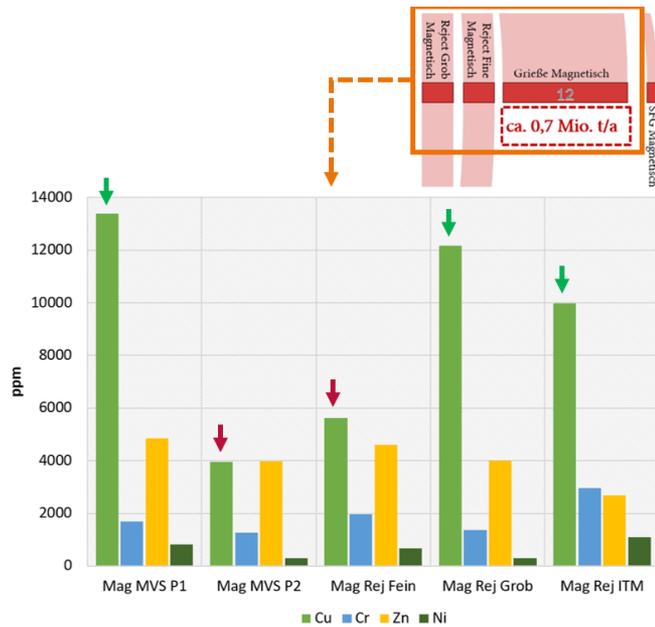
Deike, R.; Adhiwiguna, I.; Warnecke, R.: *EMSAZEM Einsatz von Müllverbrennungsschlacke als Rohstoff für die Zementherstellung*, VGBE energy, Produkte aus der thermischen Abfallverwertung 2024, Augsburg, 27.11.2024

# Mit schwächeren Magneten können höhere Eisengehalte in der

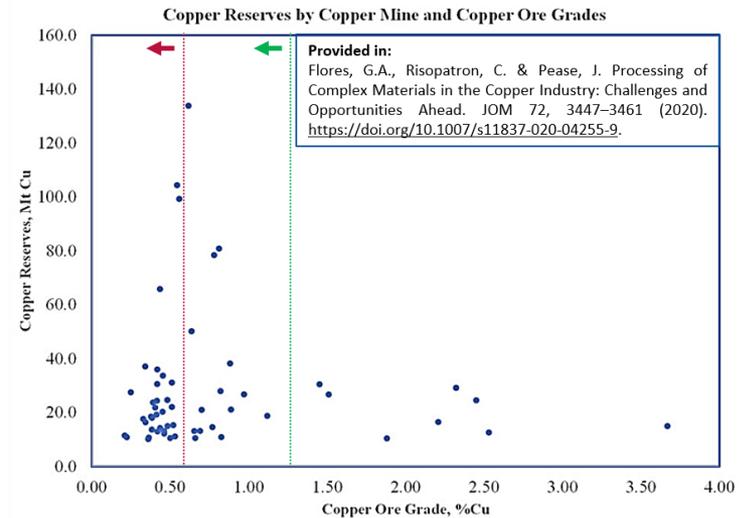


Deike, R.; Adhiwiguna, I.; Warnecke, R.: *EMSAZEM Einsatz von Müllverbrennungsschlacke als Rohstoff für die Zementherstellung*, VGBE energy, Produkte aus der thermischen Abfallverwertung 2024, Augsburg, 27.11.2024

# Magnetische Fraktionierung in der Kupfererzeugung



Spurenelemente in den magnetischen Fraktionen



Cu-Gehalte in größten Lagerstätten weltweit

Deike, R.; Ruhkamp, W.; Adhiwiguna, I.; Warnecke, R.: *Einsatz von Rostasche –Feinfraktion < 10 mm als Rohstoff für die Herstellung von Zement und Beton*, BKMNA 24, Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Berlin, 12-13.06.2024

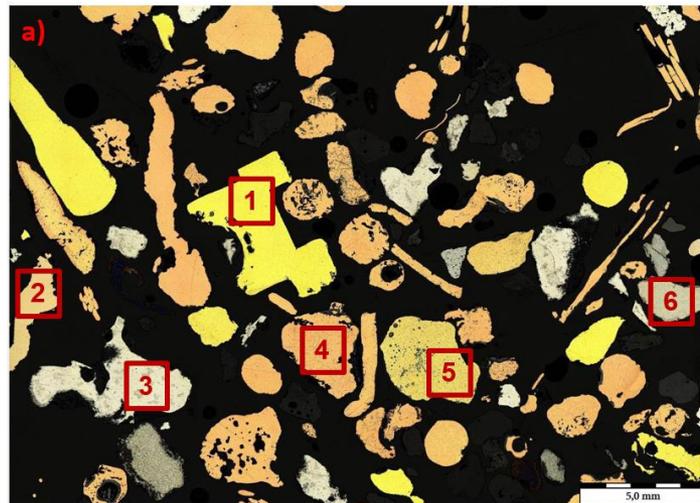


**Umschmelzen**

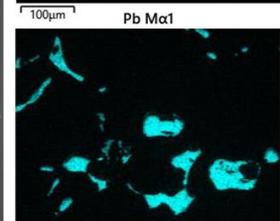
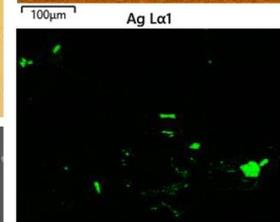
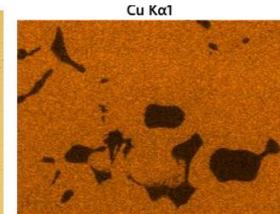
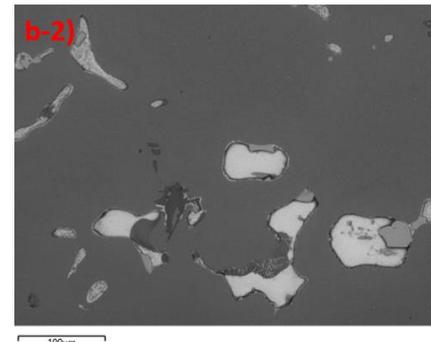
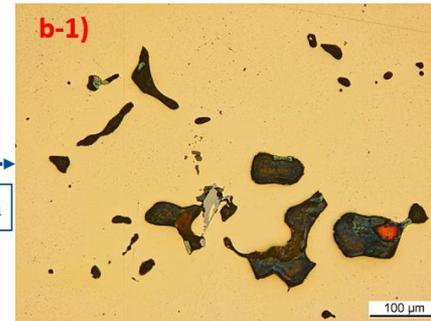


Element (%)	Aurubis <sup>1</sup>	Aurubis <sup>2</sup>	ITM	Bachema
Cu	85.4	83.2	83.3	
Sn	2.57	2.89	2.27	
Pb	4.0	6.9	7.8	
Zn	3.4	3.7	3.4	
Fe	0.8	1.1	0.7	
Ni	0.3	0.3	0.3	
As	0.01	0.03	0.01	
Sb	0.1	0.3	0.2	
Bi	0.01	0.04	0.01	
Al	0.04	0.05	0.01	
Ag in ppm	7673.8			7200
Au in ppm	35.2			33.5
Pt in ppm	0.03			
Pd in ppm	1.17			

# Lichtmikroskopische Analyse von Metallpartikel aus separierter NE-



Umschmelzen

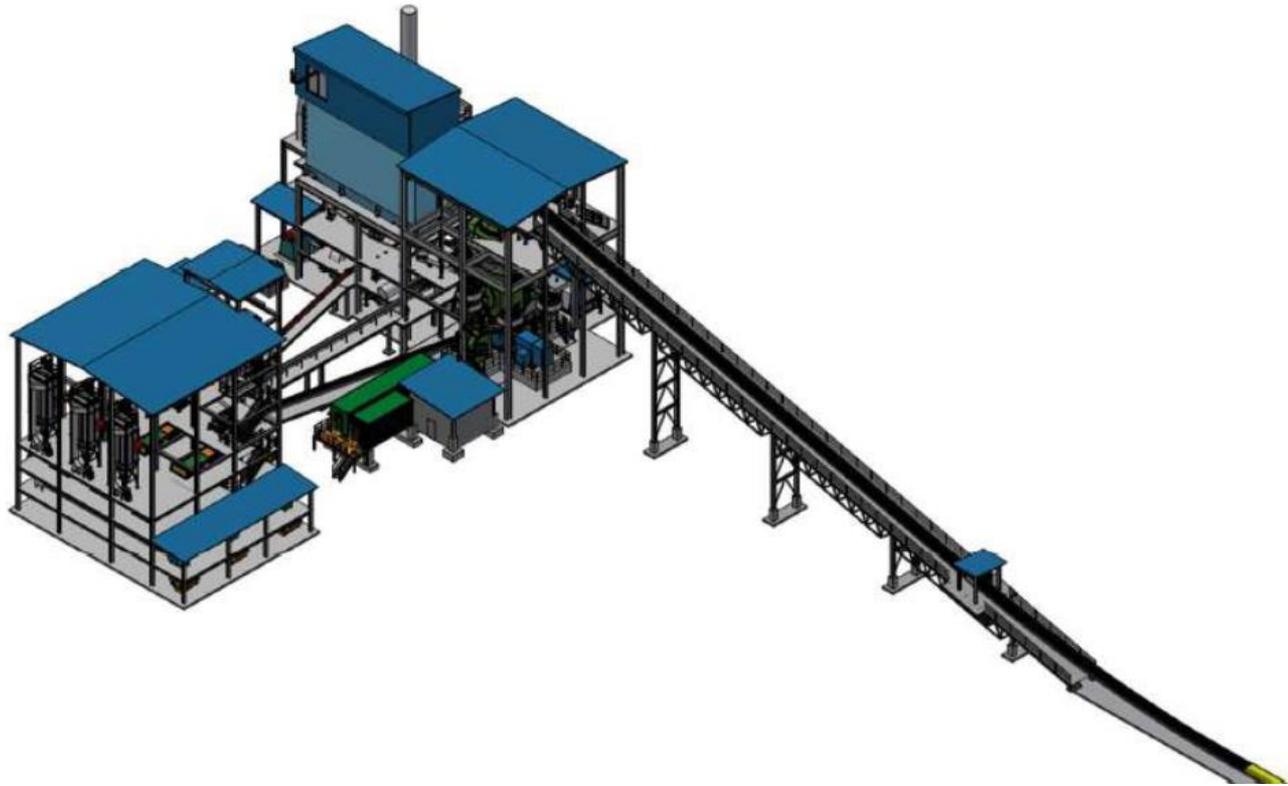


- |            |               |
|------------|---------------|
| 1 Cu-Zn    | 4 Cu-Metal    |
| 2 Cu-Zn-Sn | 5 Cu-Zn-Sn-Ni |
| 3 Zn-Al-Cu | 6 Al-Cu       |

Deike, R.: Einsatz von MV-Schlacke als Rohstoff für die Zementherstellung, ReMin-Abschlusskonferenz, Goslar, 20.06.2024

# Ökonomische Bewertung des EMSARZEM- Prozesses





# Elementgehalte in den magnetischen und Nicht-Eisen-Fractionen der

1. **Status Quo (2023):** Der Betrieb nutzt Erdgas mit einem spezifischen Verbrauch von 19,947 GJ/h und bezieht Strom aus dem Strommix DE 2023. Sekundärrohstoffe substituieren Primärrohstoffe zu 80 %, der CO<sub>2</sub>-Preis für vermiedene Emissionen liegt bei null, und die Produktpreise entsprechen dem aktuellen Markt.

2. **Hohe Ambitionen 2030:** Die grüne Transformation setzt sich durch, erneuerbare Energien dominieren den Strommix. Eine effizientere Müllverbrennung senkt den Erdgasverbrauch auf 16,234 GJ/h, während die Stromkosten auf 0,10 €/kWh sinken. Höhere Rohstoff- und Abfallverwertungspreise werden erwartet. Die Qualität der Sekundärrohstoffe steigt, mit einem Substitutionsfaktor von bis zu 100 %. Der CO<sub>2</sub>-Preis für vermiedene Emissionen wird berücksichtigt.

3. **Worst Case 2030:** Die grüne Transformation bleibt aus oder verläuft unzureichend. Ineffiziente Müllverbrennung erhöht den Erdgasverbrauch auf 23,829 GJ/h. Die Stromkosten sinken leicht auf 0,09 €/kWh, während der Strommix unverändert bleibt. Sekundärrohstoffe erfüllen nicht die zukünftigen Anforderungen, was den Substitutionsfaktor auf 20 % reduziert.

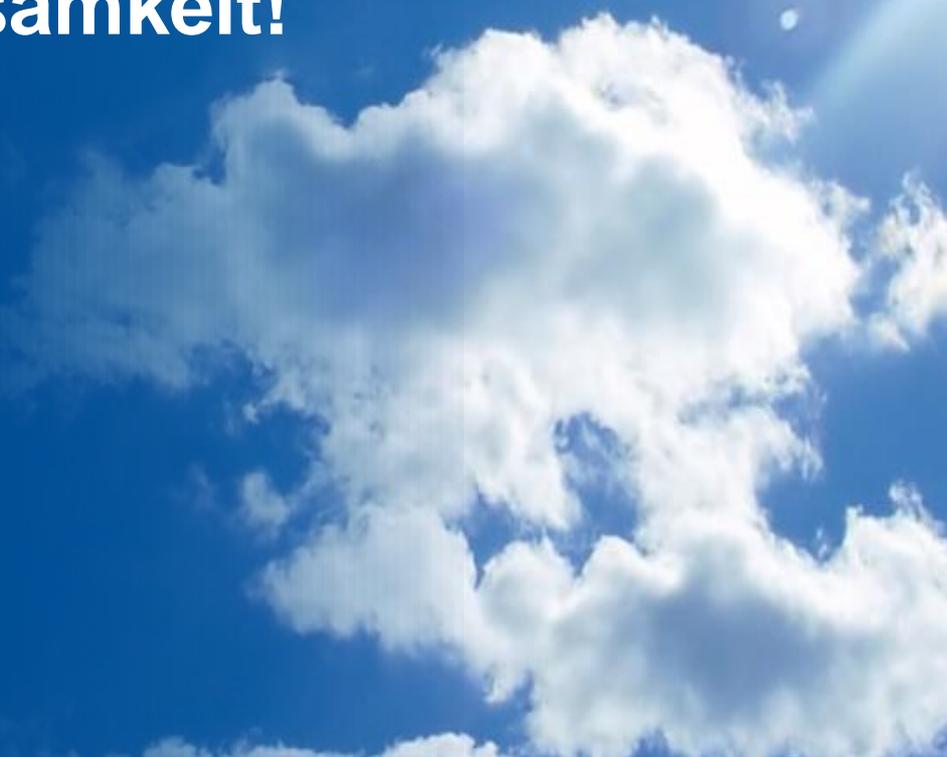
Zacharopoulos, L., Geldermann, J., 2025. Ökonomische und ökologische Bewertung des EMSARZEM-Industriemodells. <https://doi.org/10.17185/duerpublico/83603>

# Elementgehalte in den magnetischen und Nicht-Eisen-Fractionen der

Operator		2023 Basis-Szenario	2030 Hohe Ambitionen	2030 Worst Case
+	Summe Betriebskosten	16,71 €	12,57 €	14,54 €
+	Summe investitionsabhängige Kosten	11,51 €	9,25 €	13,77 €
=	<b>Kosten pro 1 Tonne aufbereitete MV-Schlacke</b>	28,22 €	21,83 €	28,32 €
	potenzielle Erlöse aus Produkten	8,94 €	69,27 €	3,40 €
+ Erlös - Kosten =	<b>Option Aufbereitung der Schlacke: potenzieller Nettoerlös/-kosten</b>	- 19,28 €	47,44 €	- 24,91 €
	Option Verwertung der Fertigschlacke	- 25,00 €	- 100,00 €	- 15,00 €
+ Nettoerlös/-kosten - Verwertungsoption =	<b>Ersparnis durch Aufbereitung</b>	5,72 €	147,44 €	- 9,91 €

Zacharopoulos, L., Geldermann, J., 2025. Ökonomische und ökologische Bewertung des EMSARZEM-Industriemodells. <https://doi.org/10.17185/duerpublico/83603>

**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!**



## 8.2 Papers

## 8.3. Glasses