UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

Offen im Denken

Institut für Technologien der Metalle

Lehrstuhl für Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung

Recycling of Oxidic and Metallic Waste Materials

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike

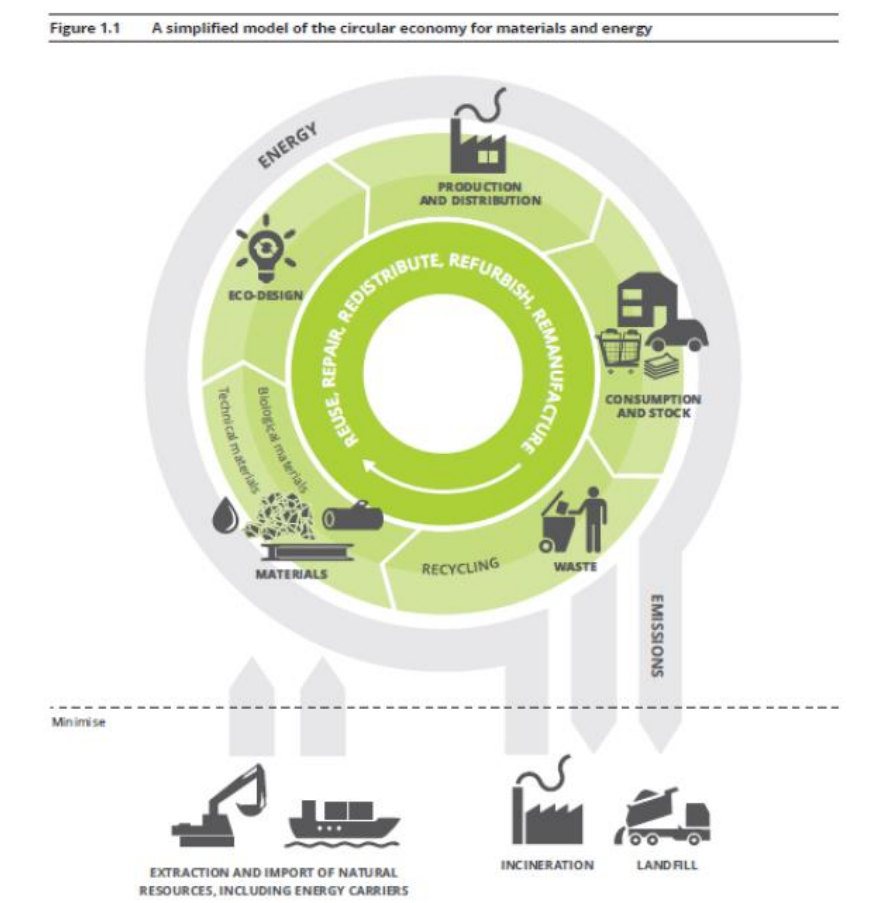
This Lecture Material is Protected by Copyright and Designed for Personal Use Only. Any Unauthorized Redistribution as well as Reproduction for Commercial Use of Part or All of this Document are Strongly Prohibited.

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

When is Recycling Effective?

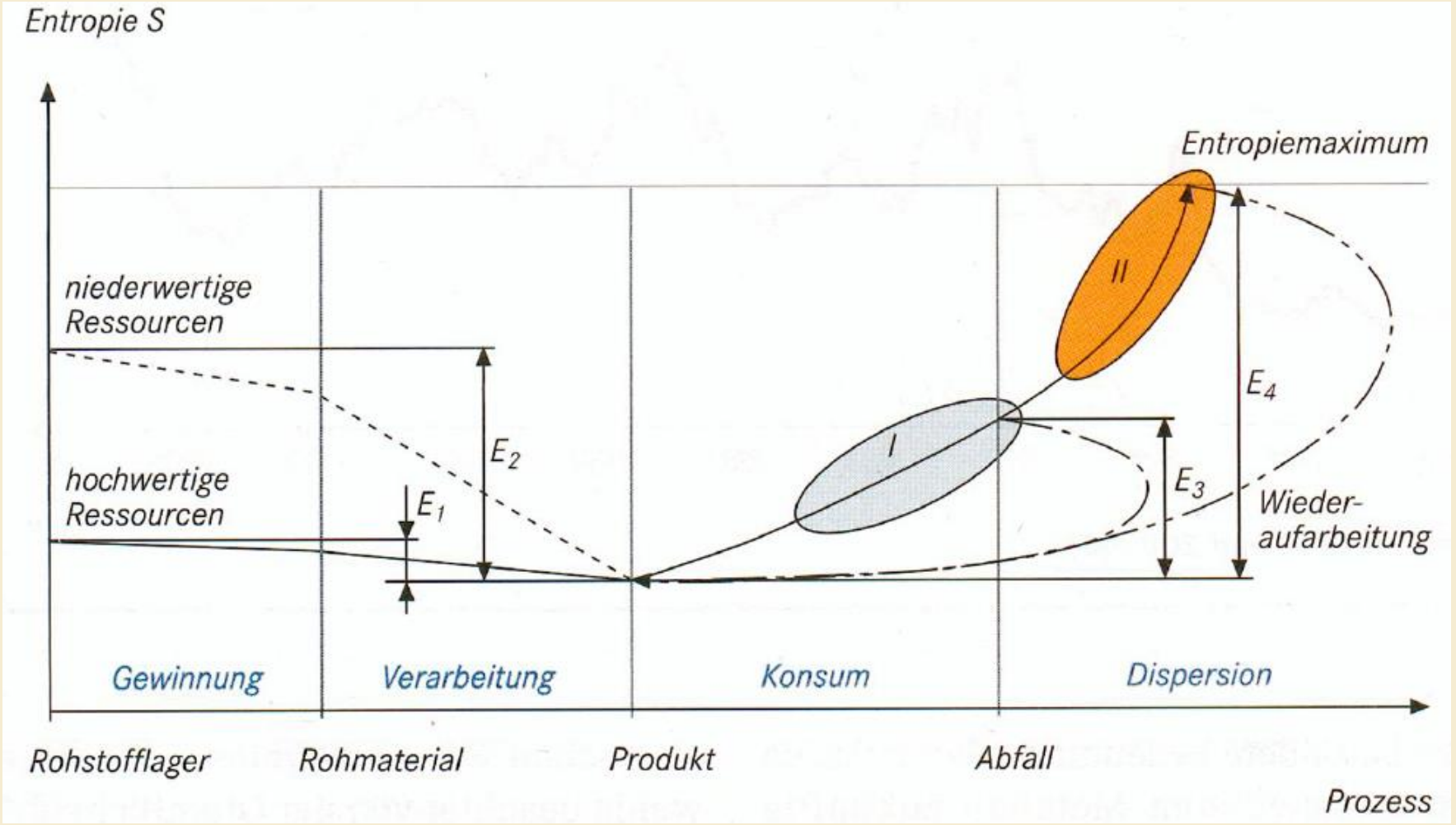
Model of Circular Economy



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

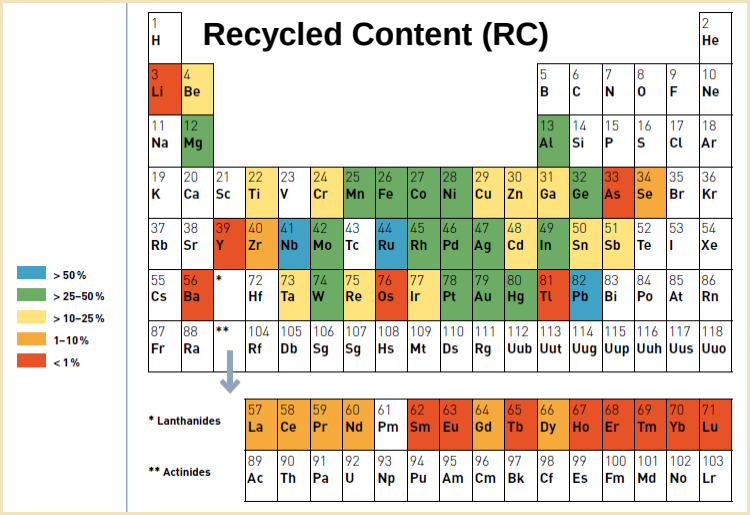
Deike, R.: Die besondere Bedeutung der Metalle unter dem Aspekt einer Circular Economy, WFZruhr Workshop: Qualitativ hochwertiges Recycling, Ein Beitrag zur Ressourcenschonung und zum Umweltschutz, Dortmund 10.05.17

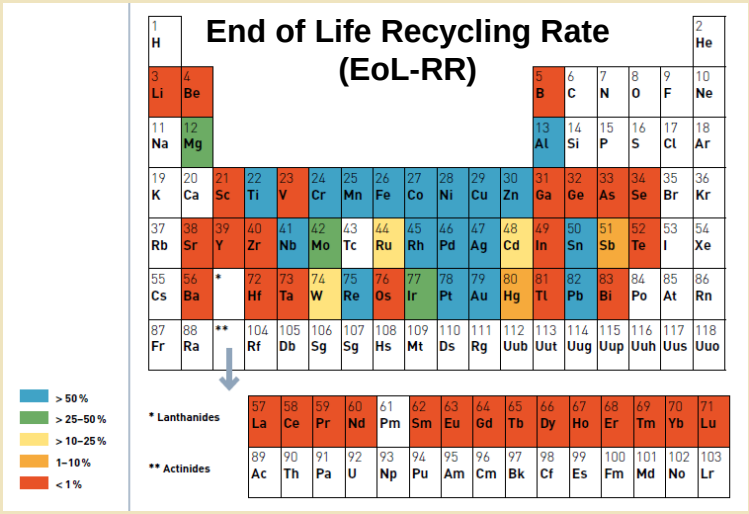
Entropy Development during the Production, Use, and Recycling of Products → Life Cycle



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: Recyling rates of metals, 2011, https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8702

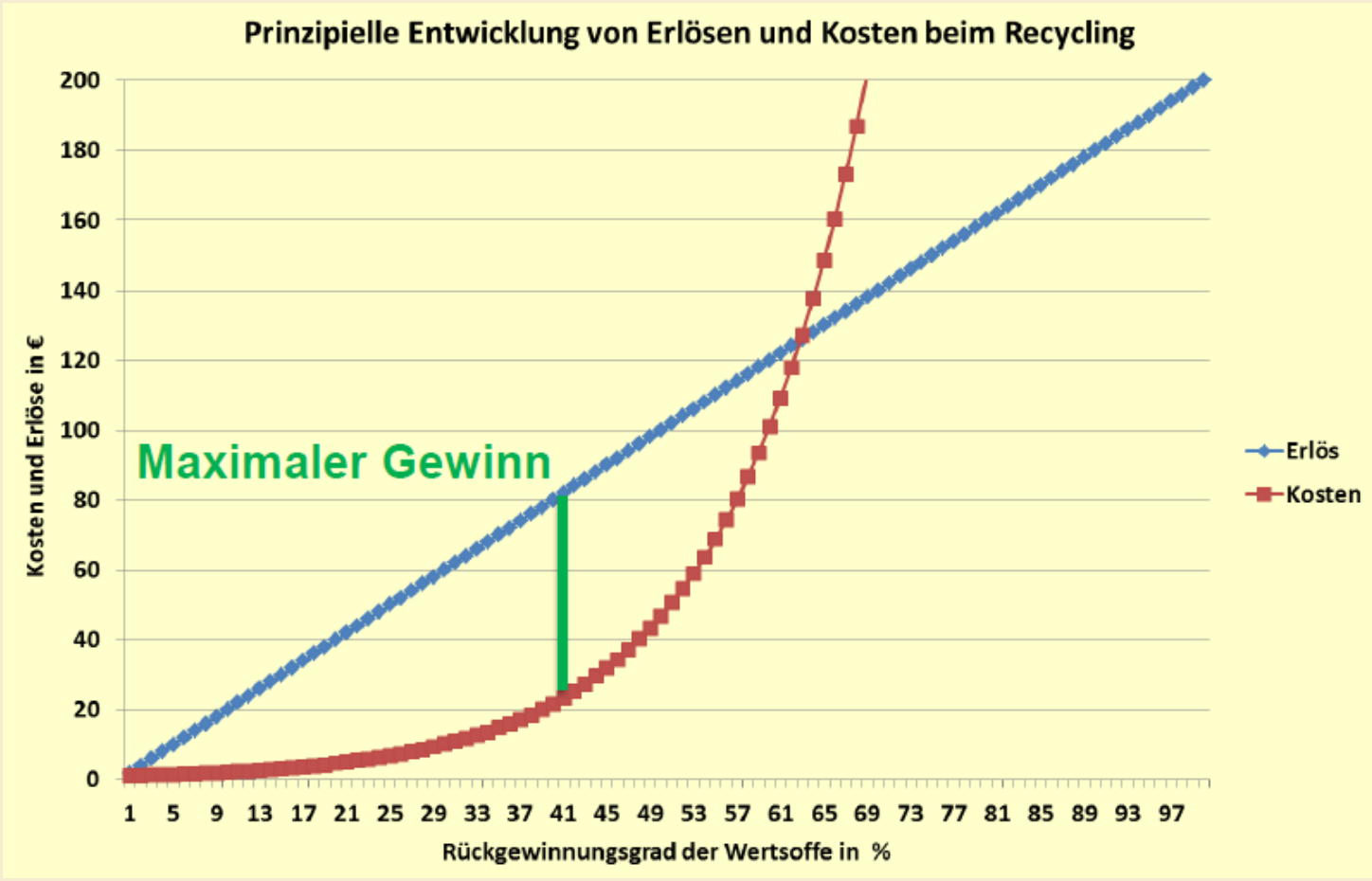
Average composition of cell phones

Tab. 2 Rückgewinnungsquoten und Rohstoffpreise ausgewählter Metalle im Mobiltelefon

Metall	Menge pro Mobiltelefon (kg)	Rückgewinnungs-quote (%)	Preis (USD/kg)[c)]	Zurück-gewonnene Menge (kg)	Wert der zurückgewonnenen Metalle (USD/Mobiltelefon)
Kupfer	0,015[a)]	95[b)]	7	0,01425	0,10
Silber	0,0005[a)]	95[b)]	430	0,000475	0,02
Gold	0,000027[b)]	98[d)]	22.280	0,00002646	0,59
Palladium	0,000015[a)]	95[b)]	11.413	0,00001425	0,16
				Summe	0,87

Hagelüken, C.: Ruhr-Symposium, 17.10.23

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

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

Scrap Recycling in the steel industry

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

Effective industrial recycling processes

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

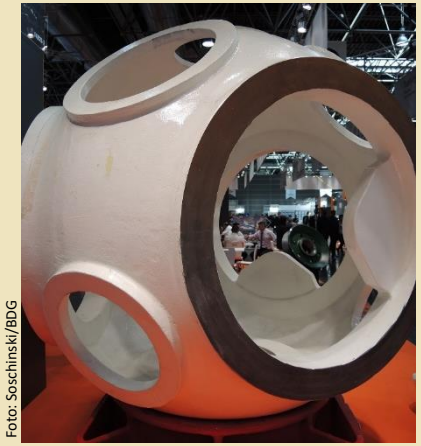


Foto: Soschinski/BDG

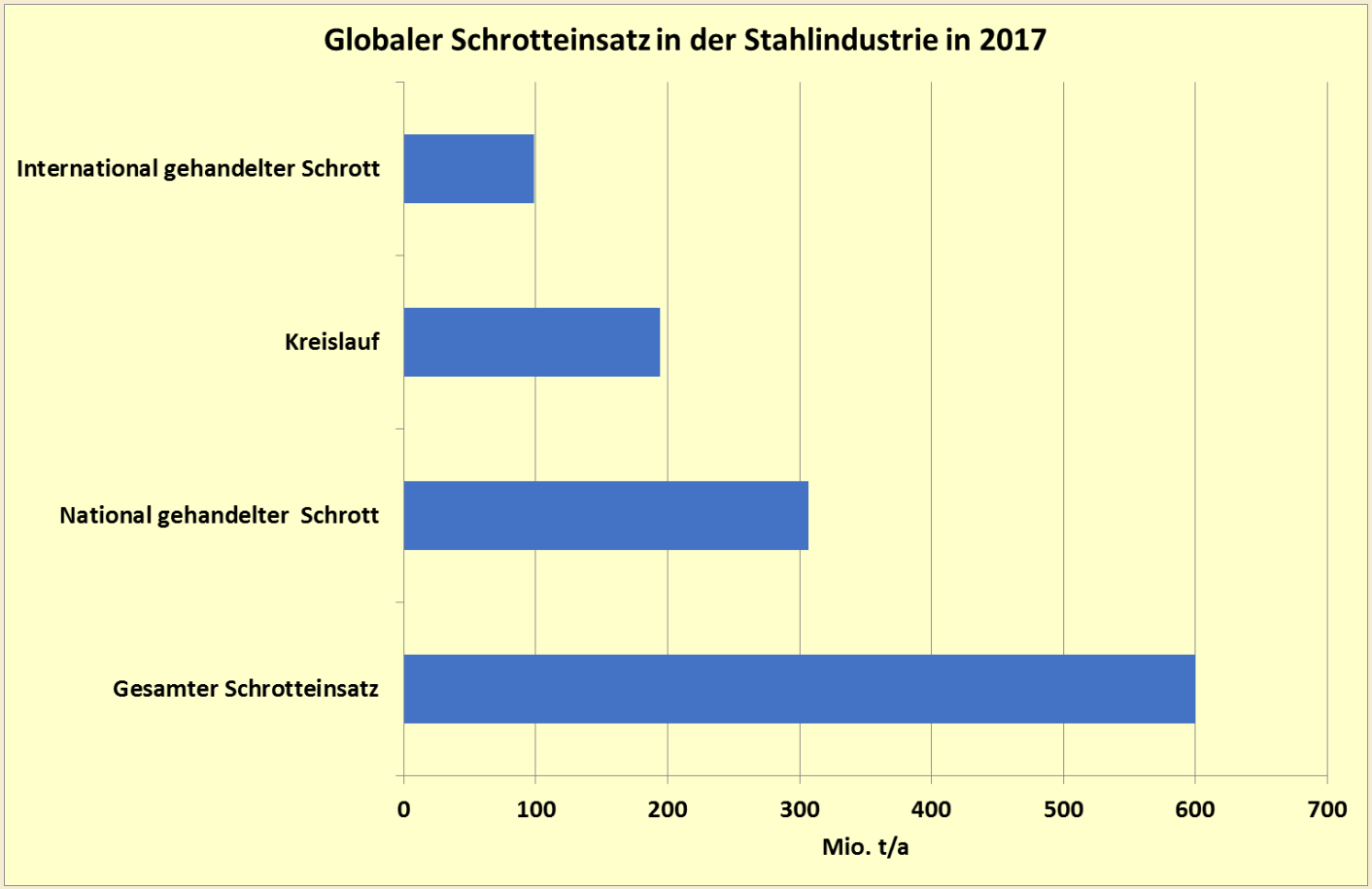
Foto: Soschinski/BDG

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

12 RESPONSIBLE CONSUMPTION AND PRODUCTION

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

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

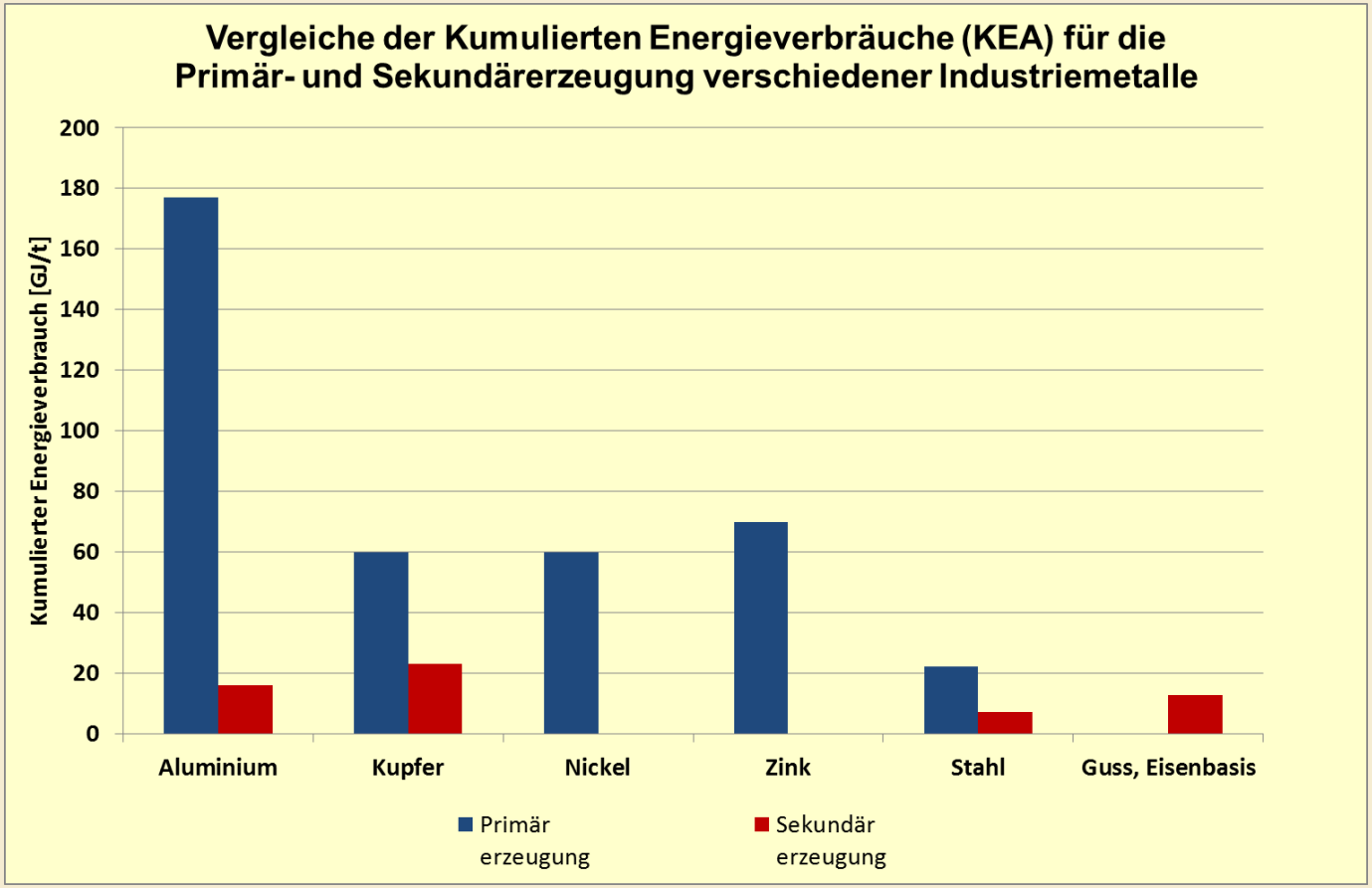
Offen im Denken

Zulässige Gehalte an Begleitelementen

Vormaterial	Brammen		Knüppel			Edelstahl	
Erzeugnis	Feinblech	Grobblech/Rohre	Betonstahl	Steelcord	Kaltstauchgüten	18/8	17/12/2
Analyse	%	%	%	%	%	%	%
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		

Stahl-Zentrum, Düsseldorf 2001

Cumulative energy consumption for the production of different elements

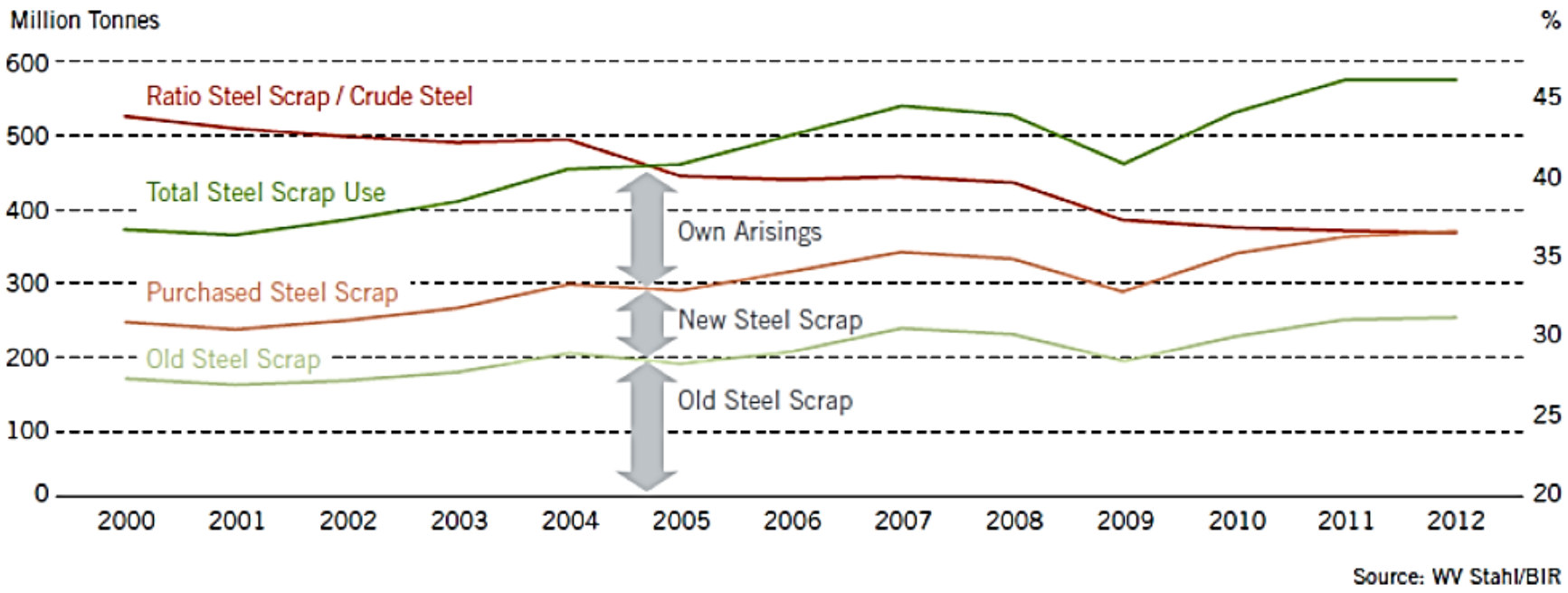


The energy consumption for the production of secondary metals from waste materials are lower than those used for the production of primary metals

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

Deike, R.: *Stahl ein nahezu 100% recycelbarer Werkstoff, Die Zukunft liegt in geschlossenen Rohstoffkreisläufen*, IGM Branchenkonferenz Stahl, Gelsenkirchen, 11.06.2015

Steel Production and Scrap Consumption 2000 – 2012



Bureau of International Recycling, www.bir.org

Summary of Scrap Varieties List

Kurzfassung der europäischen Schrottsortenliste

Sorte	Kurzbeschreibung	Max. Maße in m	Min. Gew. in t/m³	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

Scrap Varieties List

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.

Verordnung (EWG) Nr.259/93 des Rates , 01.02.1993

Term of Payment

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

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

Term of Payment

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

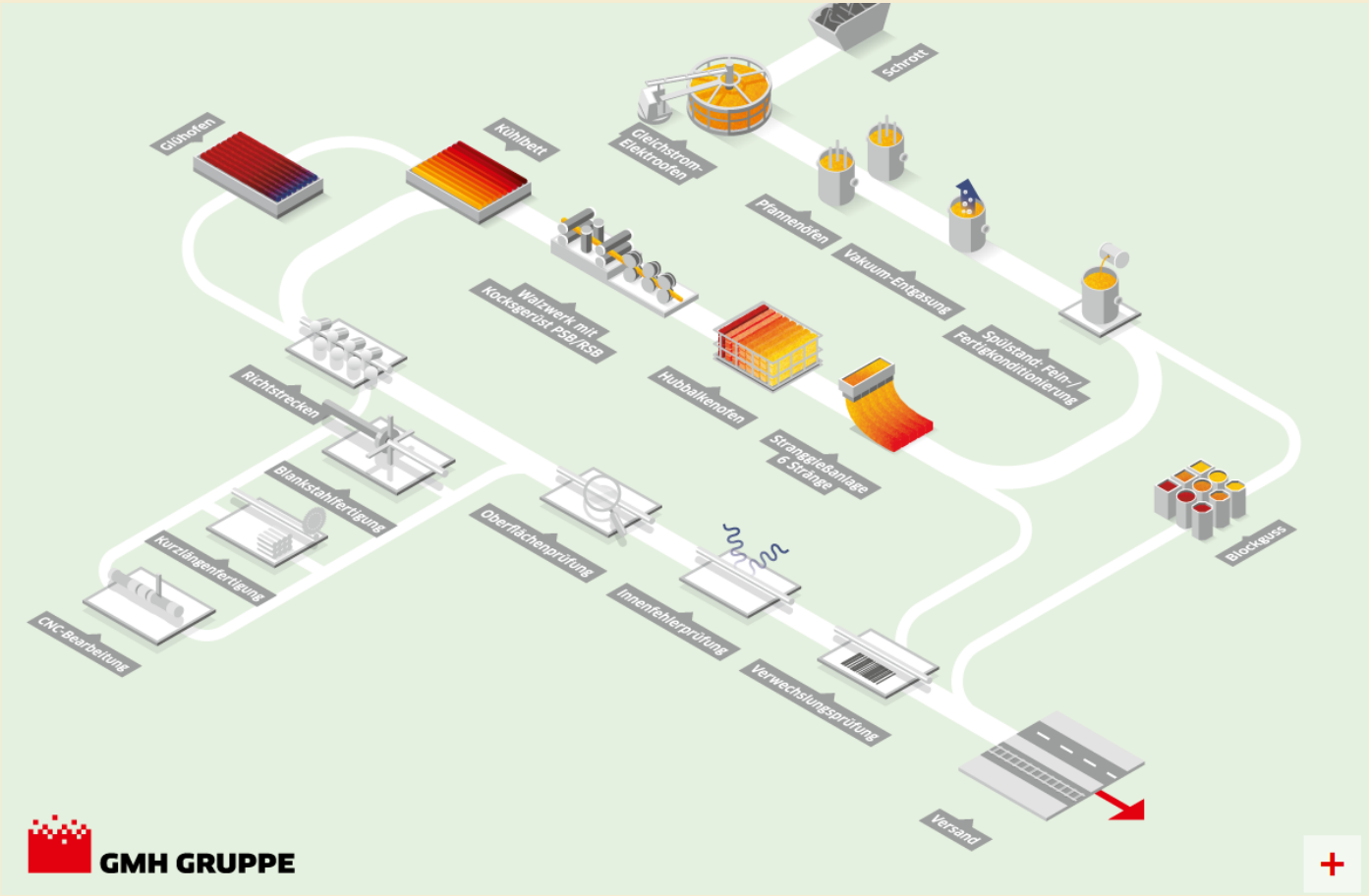
Wörlen, R.; Metzler-Müller, K.: Handelsklauseln im nationalen und internationalen Warenverkehr, Richard Boorberg Verlag 1996

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

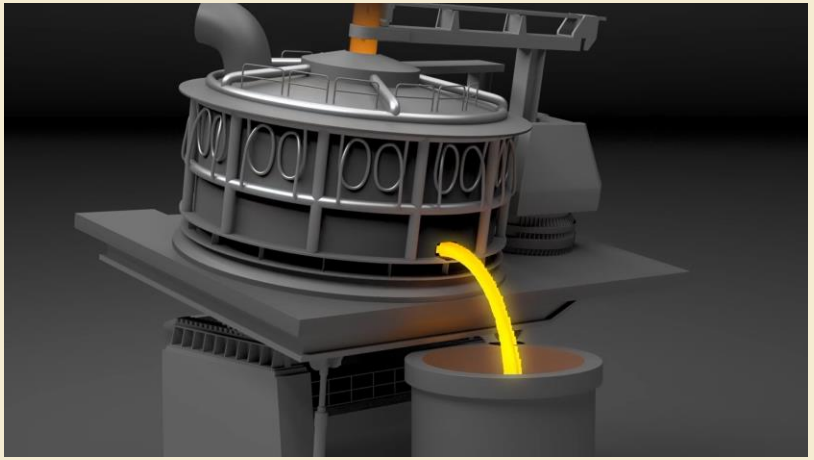
Zinc recycling from EAF dust with a rotary kiln

Steel Making Process Route by Electric Arc Furnace



https://www.gmh-gruppe.de/de-de/gmh-gruppe/wer-wir-sind/produktionsstandorte/georgsmarienhuette-gmbh.html

Steel Making Process Route by Electric Arc Furnace



https://www.gmh-gruppe.de/de-de/gmh-gruppe/wer-wir-sind/produktionsstandorte/georgsmarienhuette-gmbh.html

What happens with zinc during the incineration process?

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

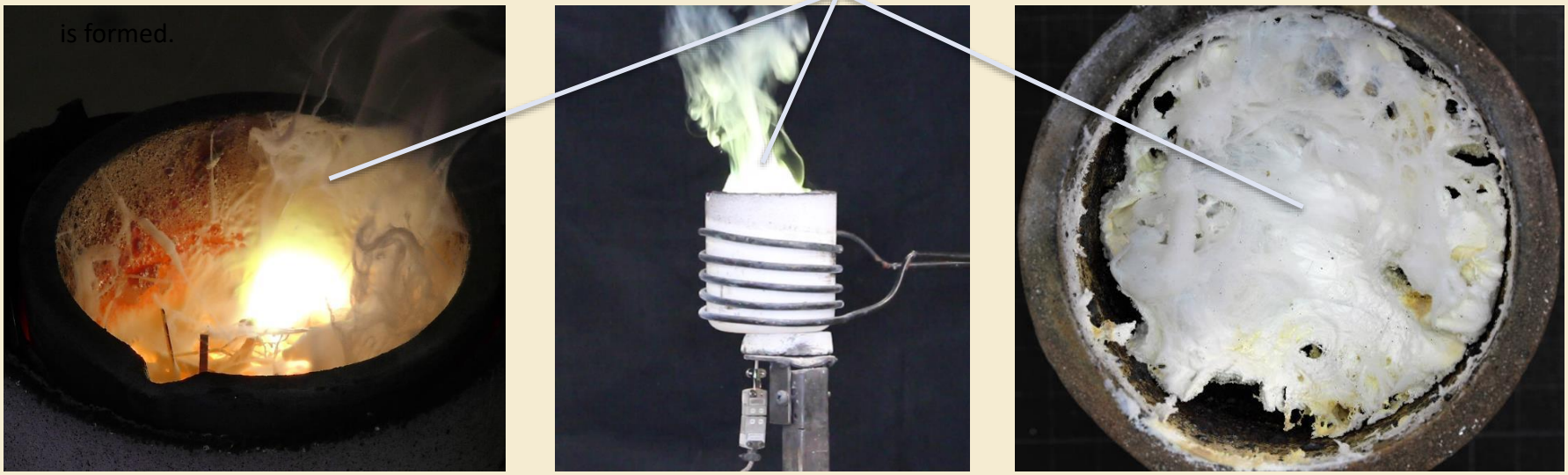
Offen im Denken

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

1. Zinc evaporates at 907°C :
   $\langle Zn \rangle \leftrightarrow \{Zn\}$ (Eq.1)

2. In the presence of oxygen
   - under oxidizing conditions zinc oxide (melting point: 1975°C) : $2\{Zn\}+\{O_2\} \leftrightarrow \langle ZnO \rangle$ (Eq. 2)
   - under reducing conditions zinc liquid (melting point: 420°C) : $\{Zn\} \leftrightarrow \langle Zn \rangle$ (Eq. 3)

Zink oxide (melting point : 1975°C) is formed.

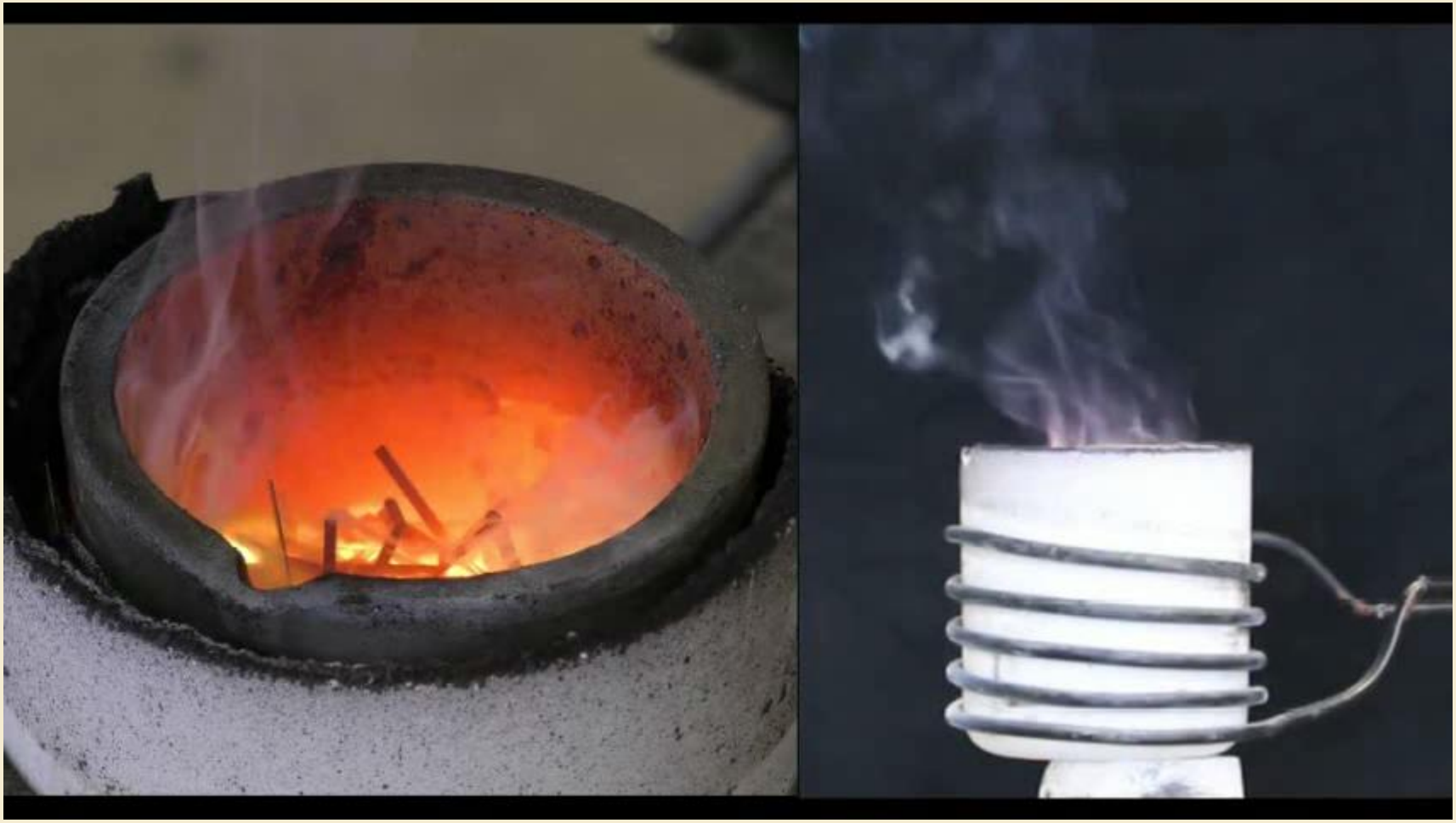


Deike, R.: *Metals in fine Fraction of Bottom Ash,* 3rd International VDI Conference Metals and Minerals Recovery from IBA Düsseldorf, 8th Nov. 2018,

What happens with zinc during the incineration process?

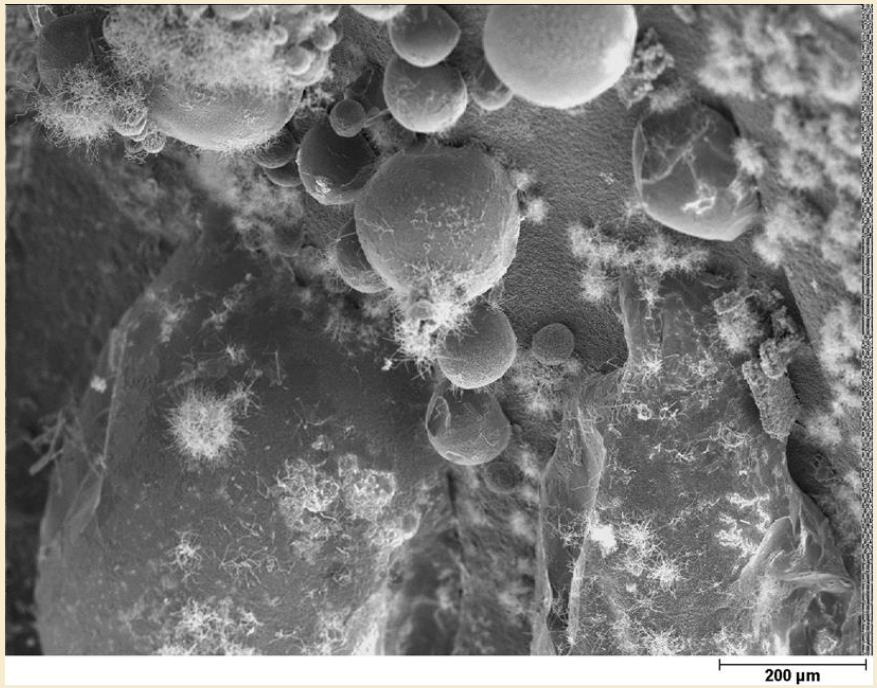
UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

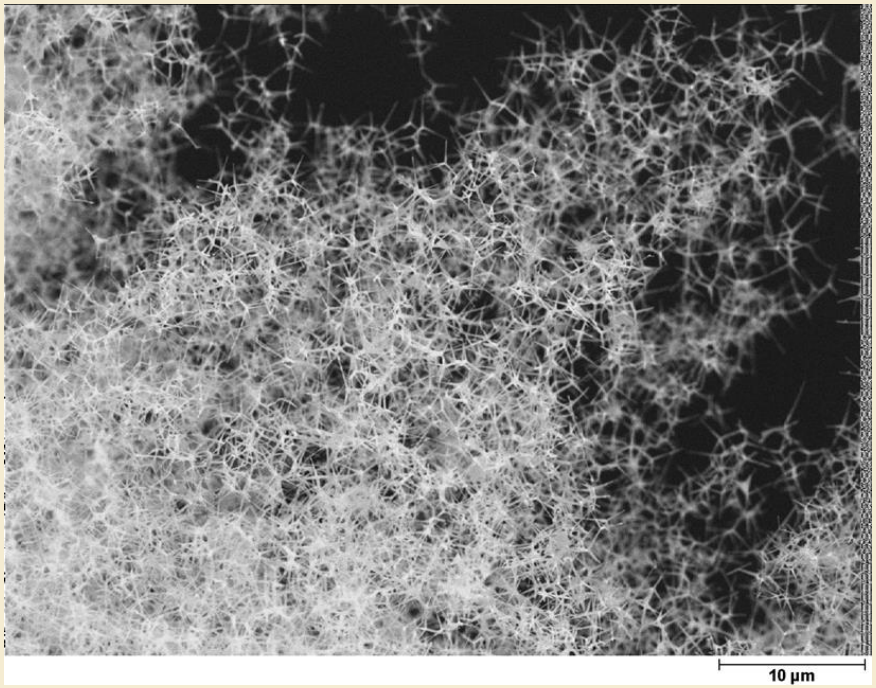
Offen im Denken



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

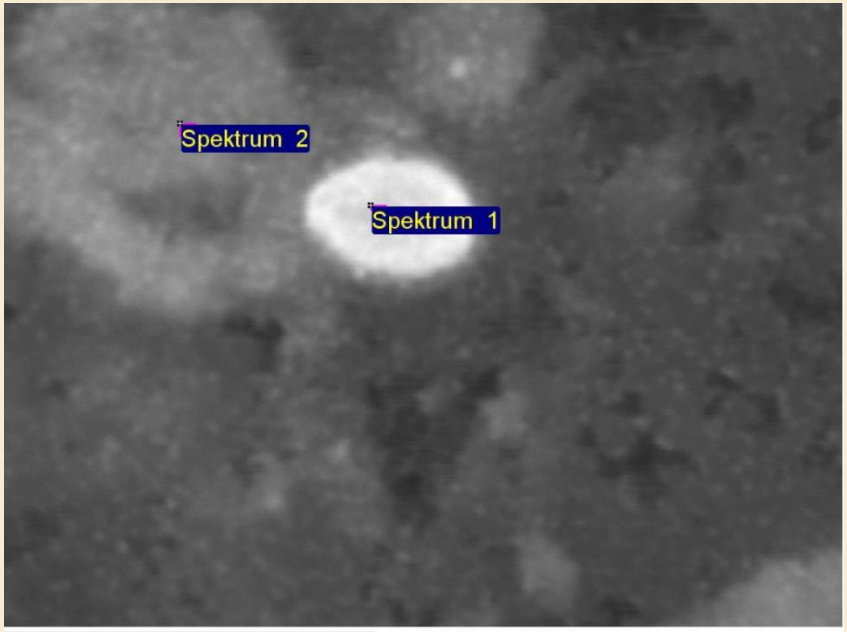
Different Zinc Reaction Products in dependence of gas atmosphere





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

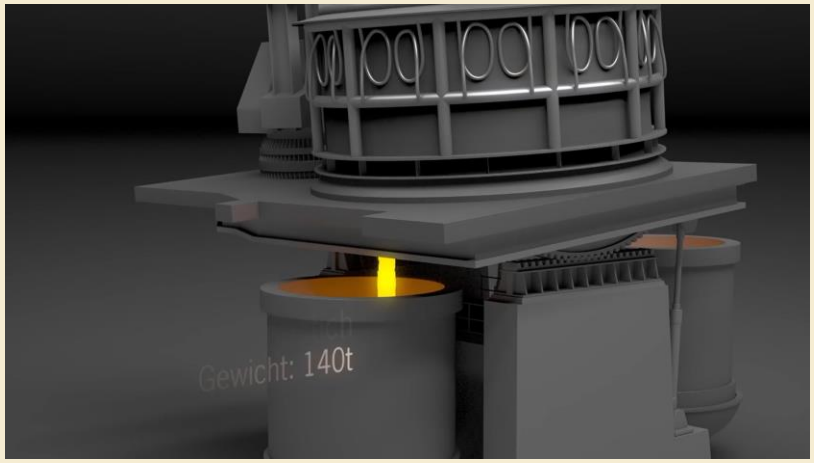
SEM Picture of Zinc Reaction Products

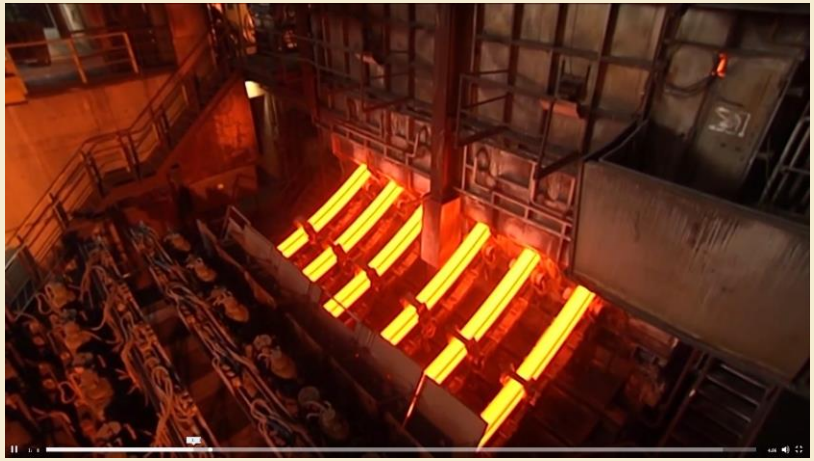


Spektrum	In Statistik	O	Zn	Total
Spektrum 1	Ja	4.78	95.22	100.00
Spektrum 2	Ja	26.76	73.24	100.00

All Results in Mass%

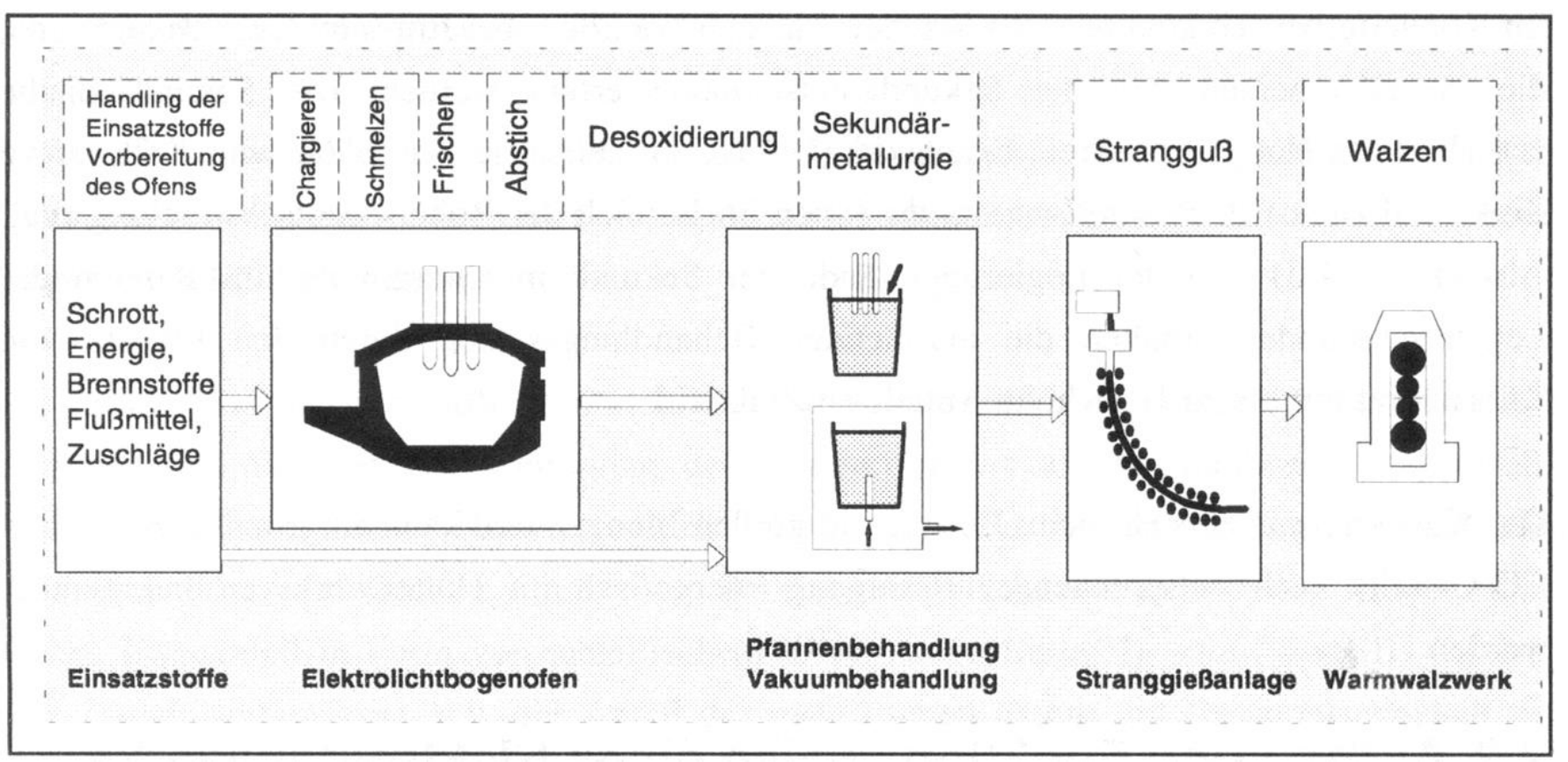
Steel Making Process Route by Electric Arc Furnace





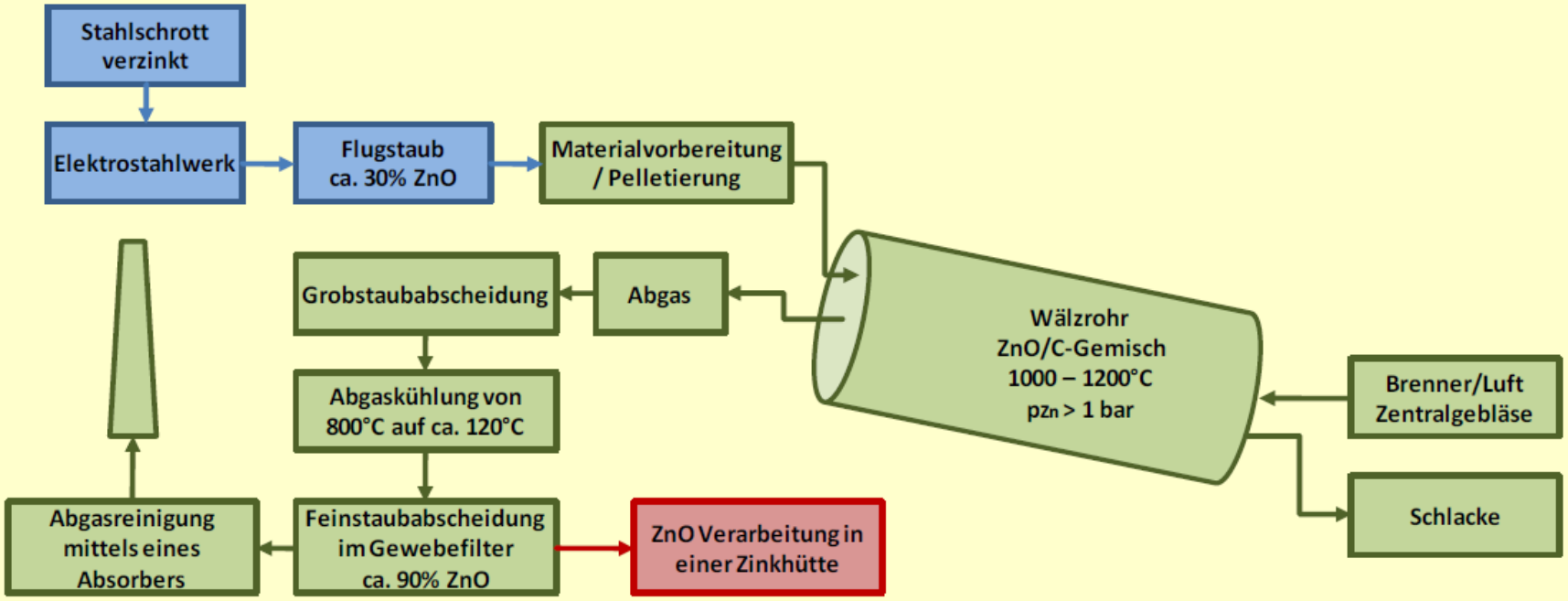
https://www.gmh-gruppe.de/de-de/gmh-gruppe/wer-wir-sind/produktionsstandorte/georgsmarienhuette-gmbh.html

Steel Making Process Route by Electric Arc Furnace



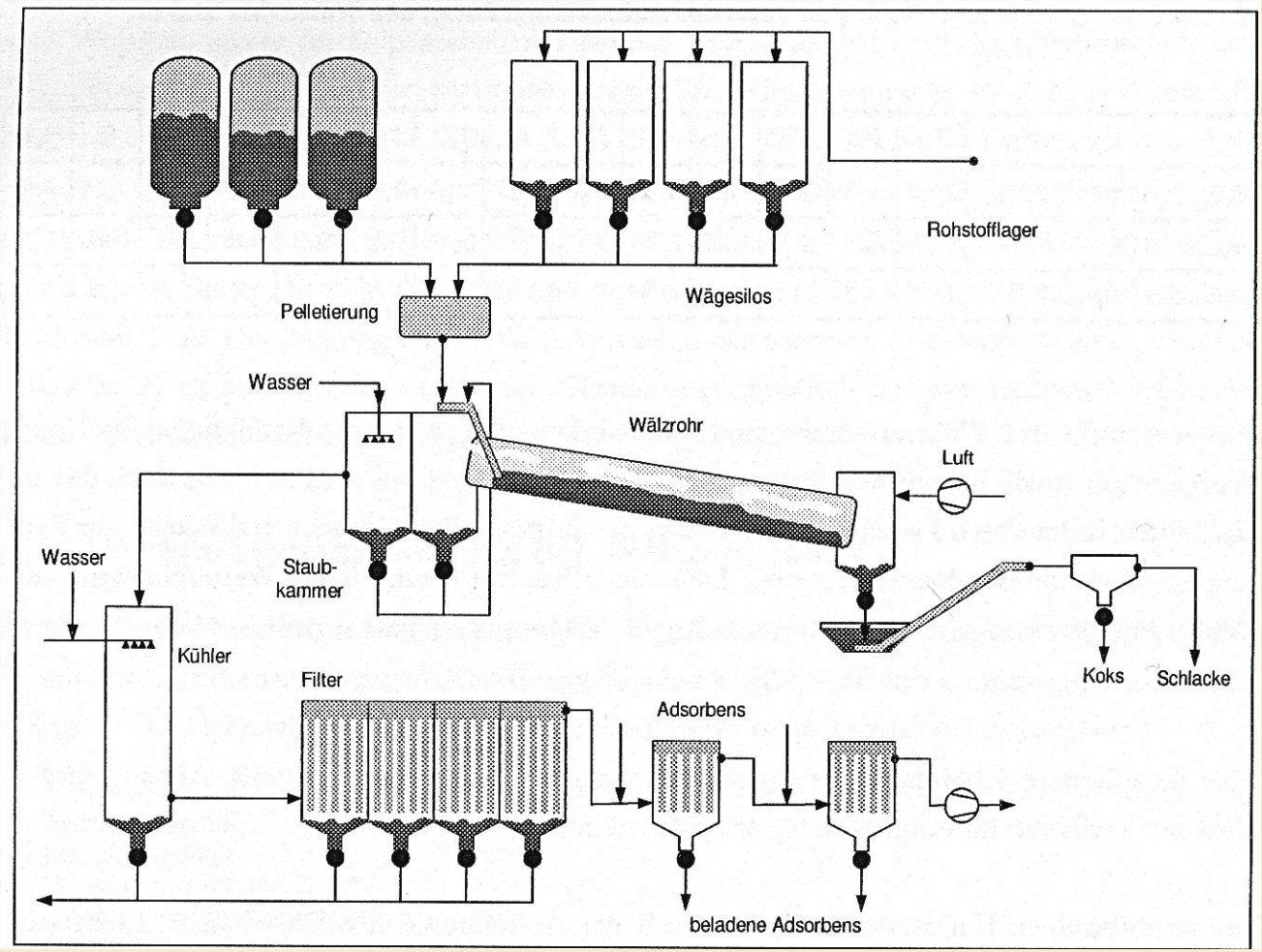
Rentz, O: Prozessintegrierte Umweltschutzmaßnahmen in der Eisen- und Stahlindustrie, BMBF Abschlussbericht 01RV9701, 1999

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



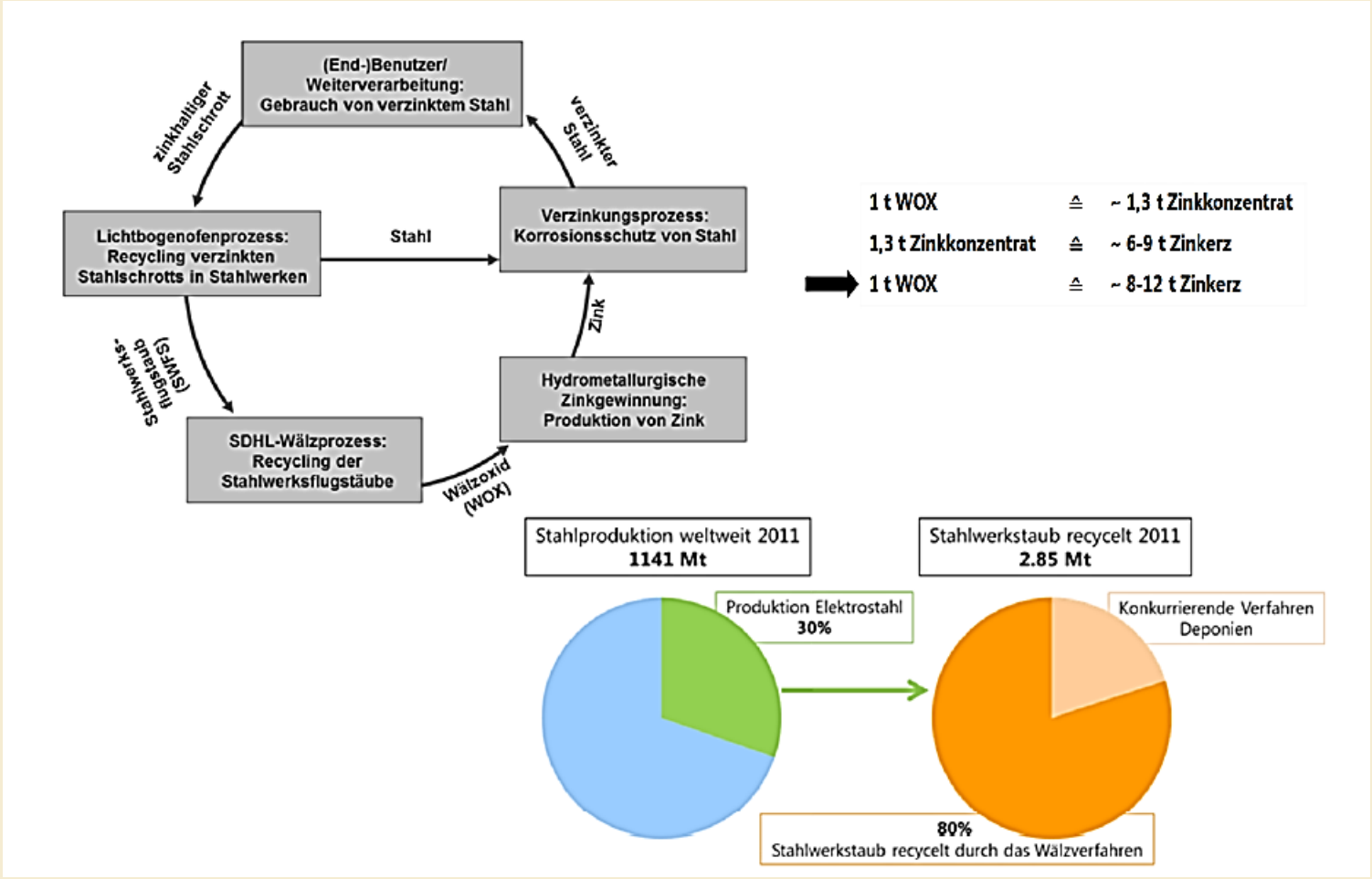
Deike, R.: Die zukünftige Bedeutung des Recyclings metallischer und oxidischer Reststoffe unter dem Aspekt veränderter globaler Rohstoffmärkte, in Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen (Hrsg. U.Teipel u. R.Schmidt), Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2011

Process Flow Diagram of Rotary Kiln Process



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

The Iron – Zinc Cycle



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

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

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

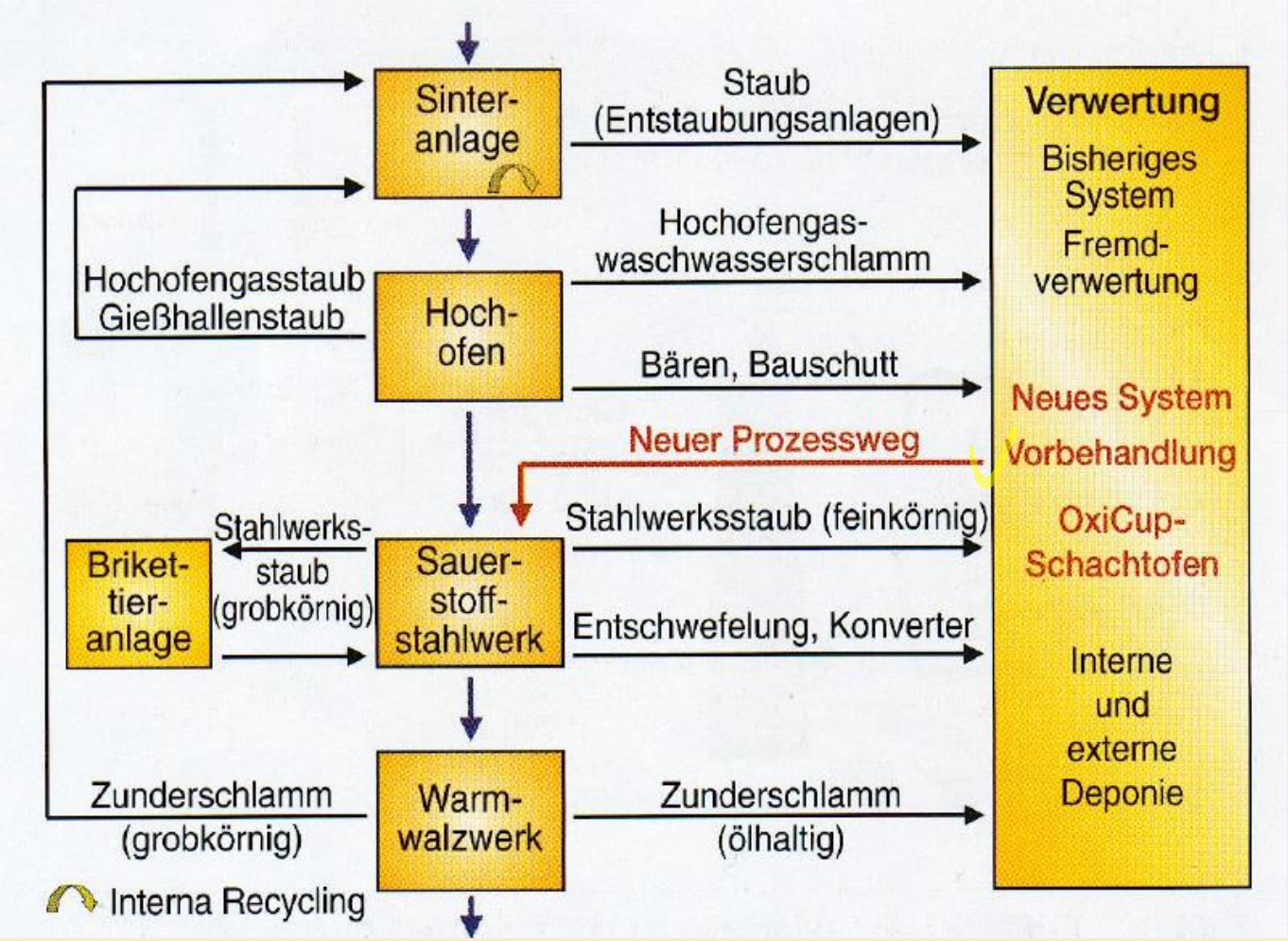
Dust and Sludge in the German Steel Industry in 2004

• 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
Total of Dust and Sludge	**:**	1,822,002 ton/a

Steel Production in Germany 2004

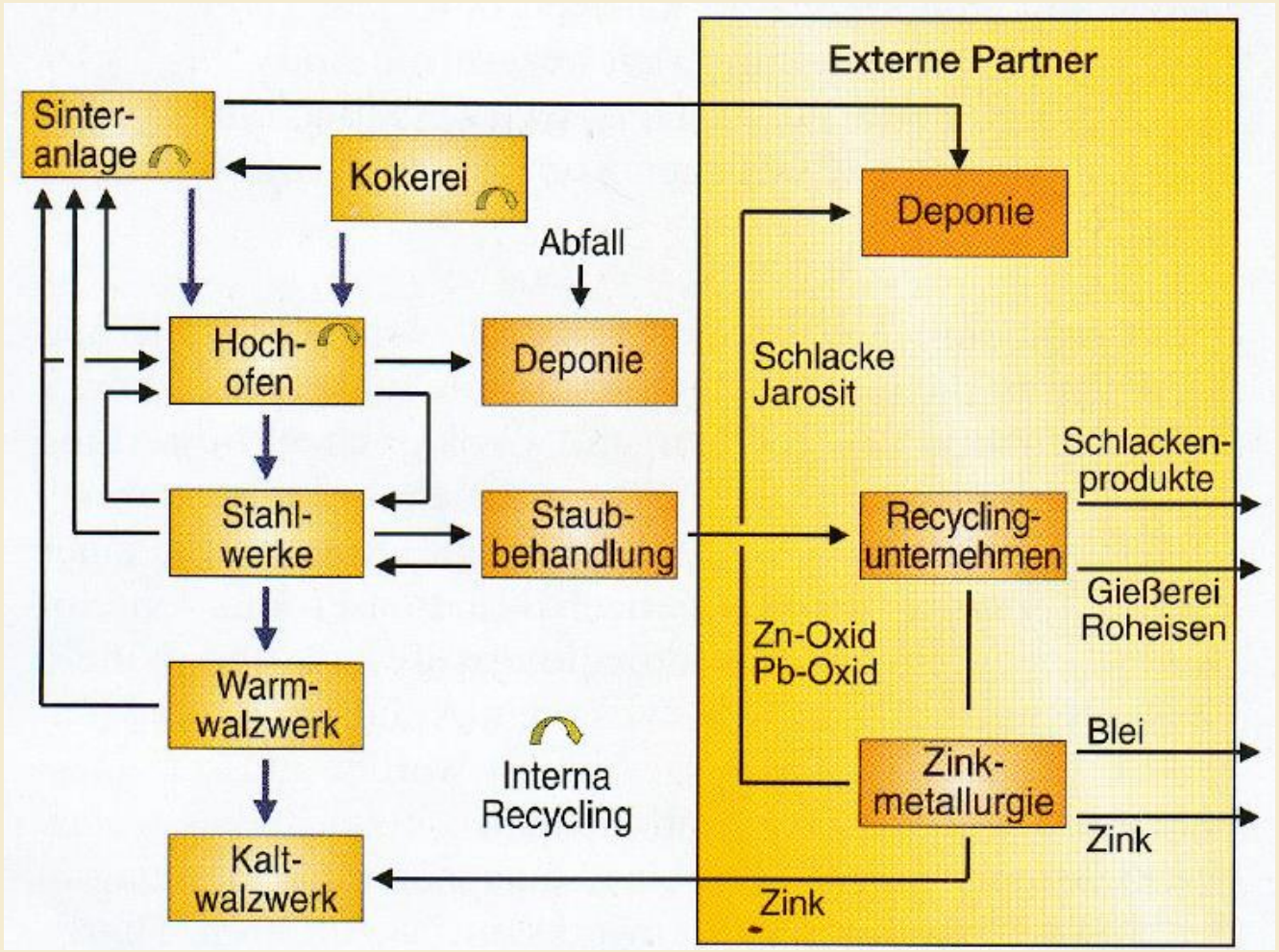
TOTAL Crude Steel Production in Germany	**46,408,000 ton/a**
• LD Converter Production Route (70%)	32,485,600 ton/a
• Electric Arc Furnace Production Route (30%)	13,922,400 ton/a
Dust and Sludge in Germany	
• LD Converter Production Route (51 kg/Steel)	1,656,765 ton/a
• EAF Production Route (11 kg/Steel)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



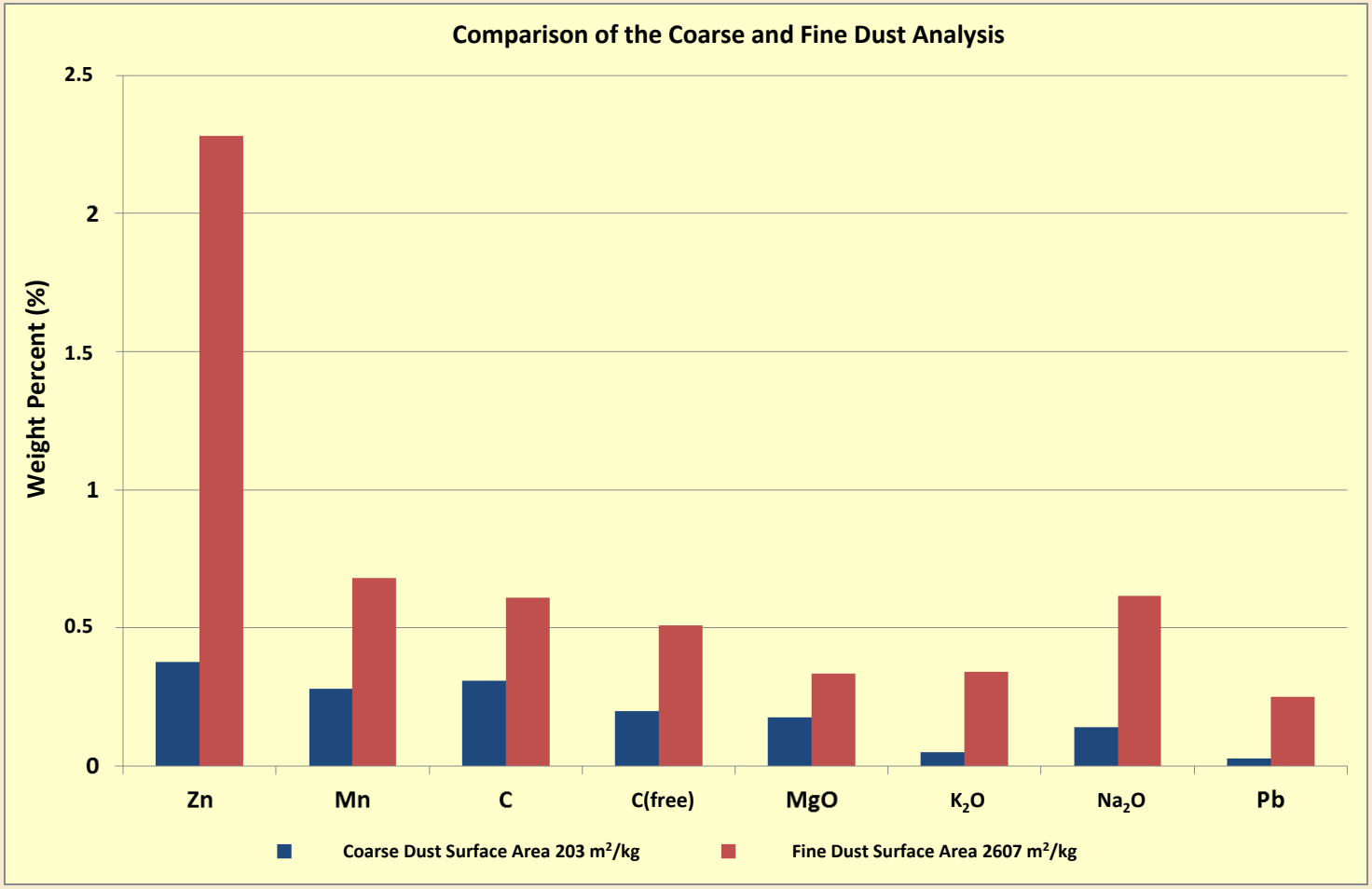
Stahl und eisen 123 (2003) Nr. 2, S.73-78

Average Amount of Waste in Steel Production

Reststoffe	Spezifische Mengen [kg/t flüssiger Stahl]
Sinteranlage	
• Staub	0,9 – 15
Hochofen	
• Gießhallenstaub	0,5 –1,5*
• Gichtgasreinigungsstäube und –schlämme	14
• Schlacke	280
Roheisenentschwefelung	9 – 18
Oxygenstahlwerk	
• 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
Elektrolichtbogenofen	
• Schlacken	
◦ unlegierte Stähle	129
◦ niedrig legierte Stähle	109
◦ hochlegierte und rostfreie Stähle	161
• Staub der Ofen- und Raumentstaubung	15
Stranggießen	4 – 6
Walzwerke und Oberflächenveredelung	
• 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

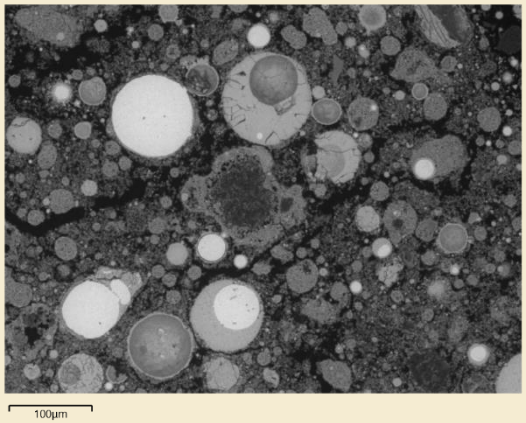
UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN
Offen im Denken

XRF Analysis according to DIN51001											
Oxide Composition						Element Composition					
Oxide	Wet (%)	Dry (%)	Oxide	Wet (%)	Dry (%)	Element	Wet (%)	Dry (%)	Element	Wet (%)	Dry (%)
Fe_2O_3	60.00	71.80	K_2O	0.09	0.11	Fe	41.97	50.22	K	0.07	0.09
CaO	10.20	12.21	V_2O_5	0.07	0.08	Ca	7.29	8.72	V	0.04	0.05
ZnO	4.09	4.89	Cr_2O_3	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_2	1.07	1.28	CdO	0.03	0.04	Si	0.50	0.60	Cd	0.03	0.03
Na_2O	0.99	1.18	TiO_2	0.03	0.04	Na	0.73	0.88	Ti	0.02	0.02
MnO	0.53	0.63	NiO_2	0.03	0.04	Mn	0.41	0.49	Ni	0.02	0.03
SO_3	0.29	0.35	Rest	3.93	4.70	S	0.25	0.29	Rest	2.16	2.58
Al_2O_3	0.22	0.26	Water	16.43	-	Al	0.12	0.14	Water	16.43	-
P_2O_5	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											

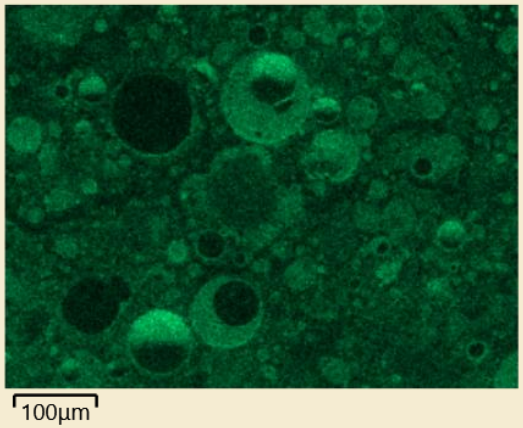
Kupka, T.; Scholz, R.: in Recycling und Rohstoffe, Bd.6 (Hrsg. K.J. Thomé-Kozmiensky, D.Goldmann), TK Verlag, Neuruppin, 2013

BOF- Dust Elementmapping

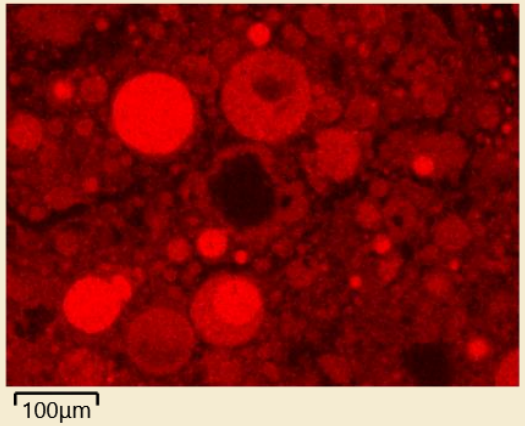
Elektronenbild



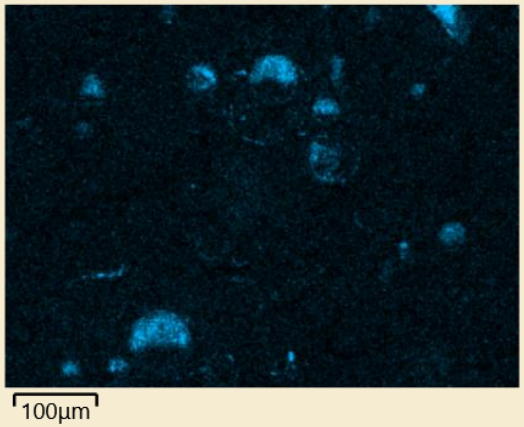
O Kα1



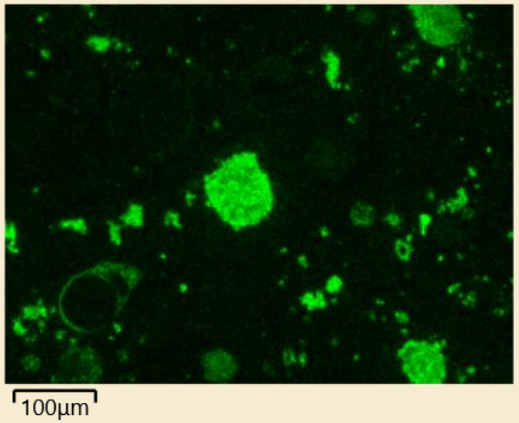
Fe Kα1



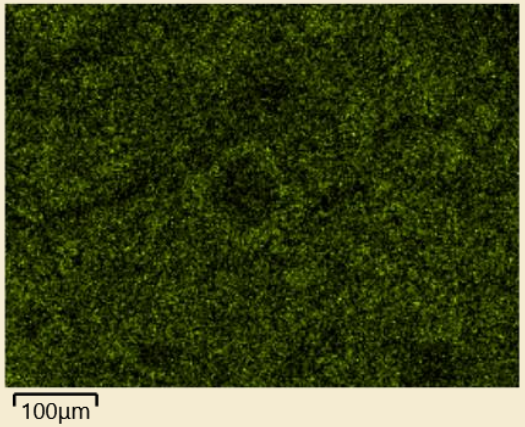
Al Kα1



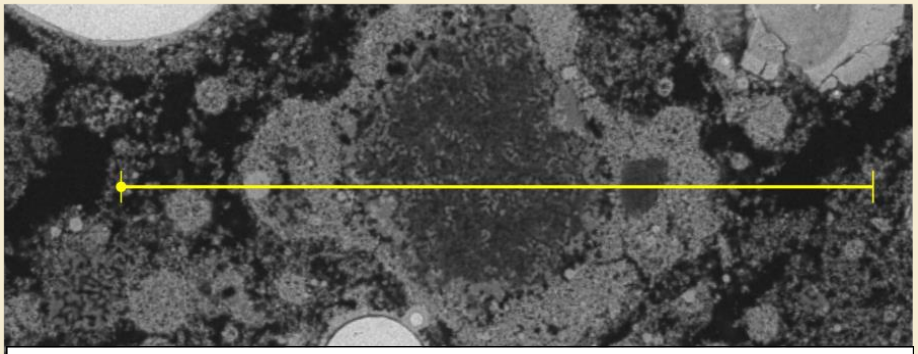
Ca Kα1

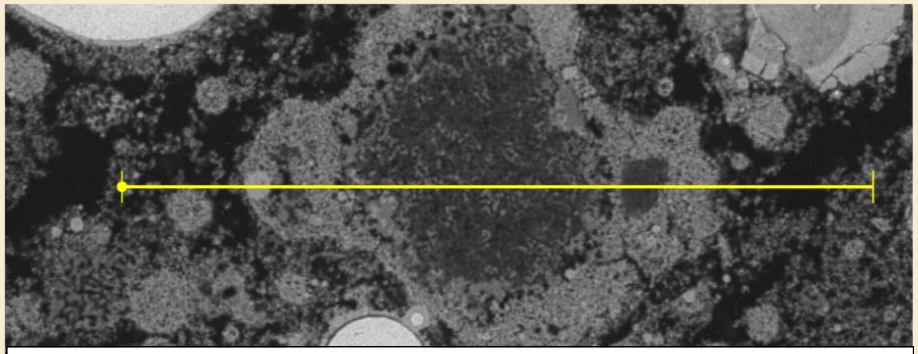


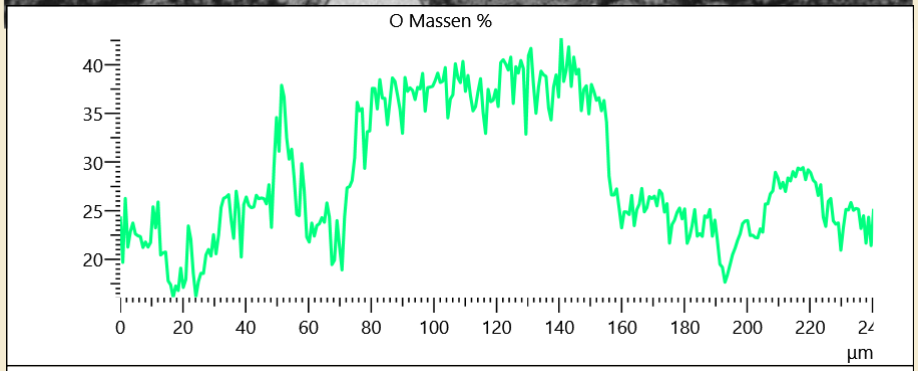
Zn Kα1

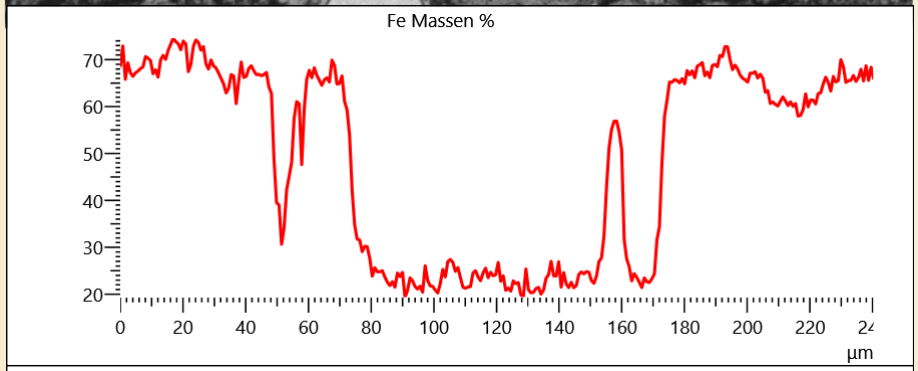


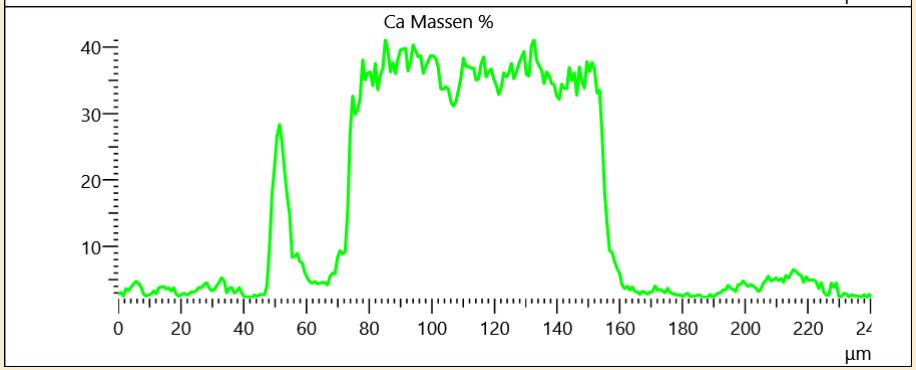
BOF-Dust line scan

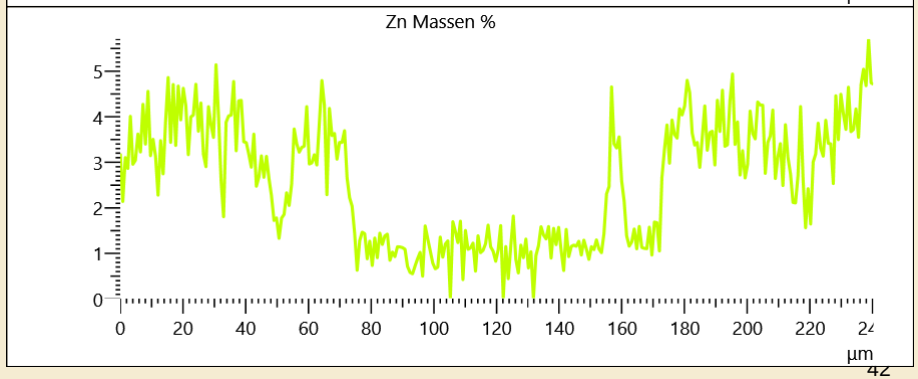










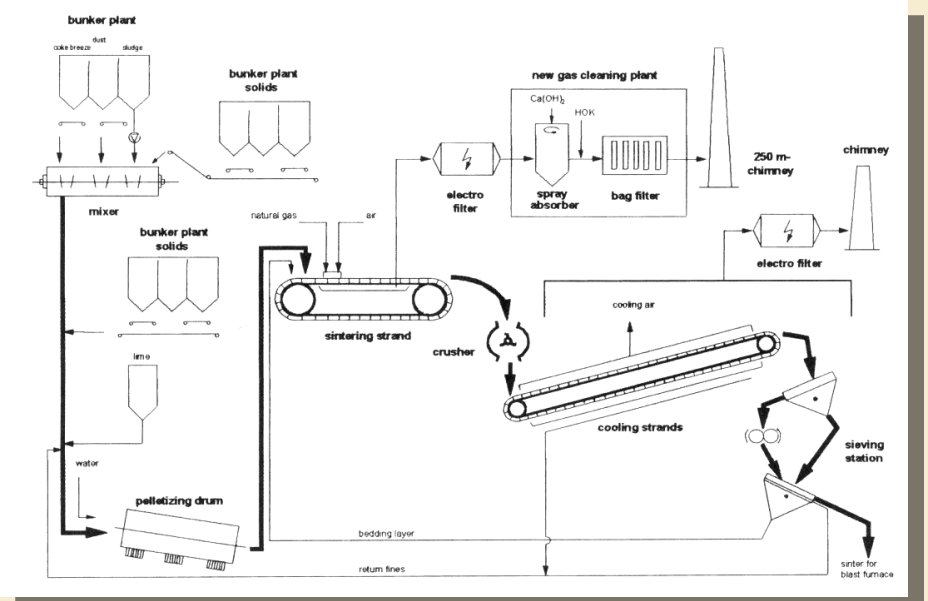


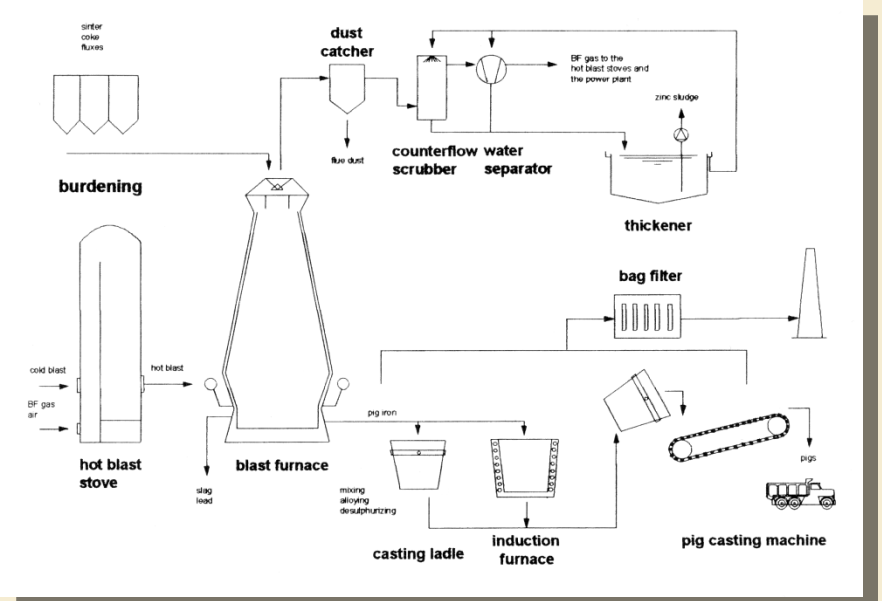
Chemical Composition of Waste Material from Production Process of Iron, Steel and Non-ferrous Industry

Type	H_2O %	Fe %	Mn %	Cr %	Zn %	Cu %	P %	C %	Cl %	K_2O %	Na_2O %
BF sludge	30-40	19	0,2	0,02	7,1	0,02	0,10	36,0	0,14	1,44	0,28
BOF dust	10-20	59	0,8	0,06	3,2	0,03	0,05	0,6	0,25	0,29	0,39
Sand blasting dust	<1	74	0,7	0,21	0,8	0,11	0,05	1,6	0,03	0,09	0,16
Cupola dust	0-2	14	2,6	0,07	4,8	0,09	0,09	21	0,41	2,11	0,74
Cu-sludge	20-30	11	0,1	2,00	0,7	22,8	0,85	13,8	0,26	0,11	0,80
P-sludge	40-50	22	1,7	0,06	9,7	0,03	14,6	2,0	0,15	0,14	2,20
Iron ore	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 an Ironmaking Congress, Paris, France, 19-22 June 2000

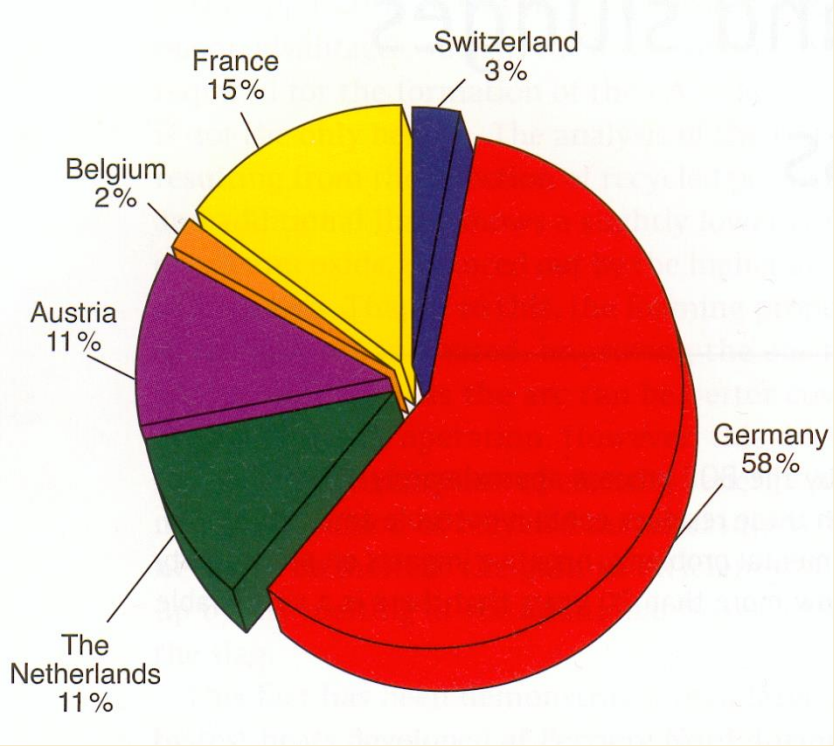
Process Flow Diagram of Sintering Line and Blast Furnace

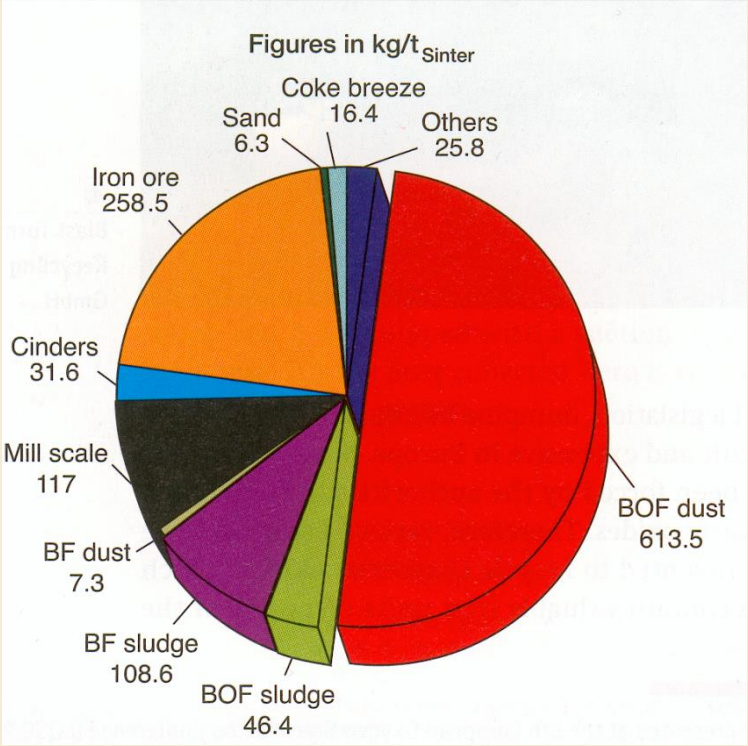




Deike, R.; Hillmann, C.: Scandinavian Journal of Metallurgy 1999, 28, S.86-91

Origin of the Residue and their Percentage in Sinter Mixture

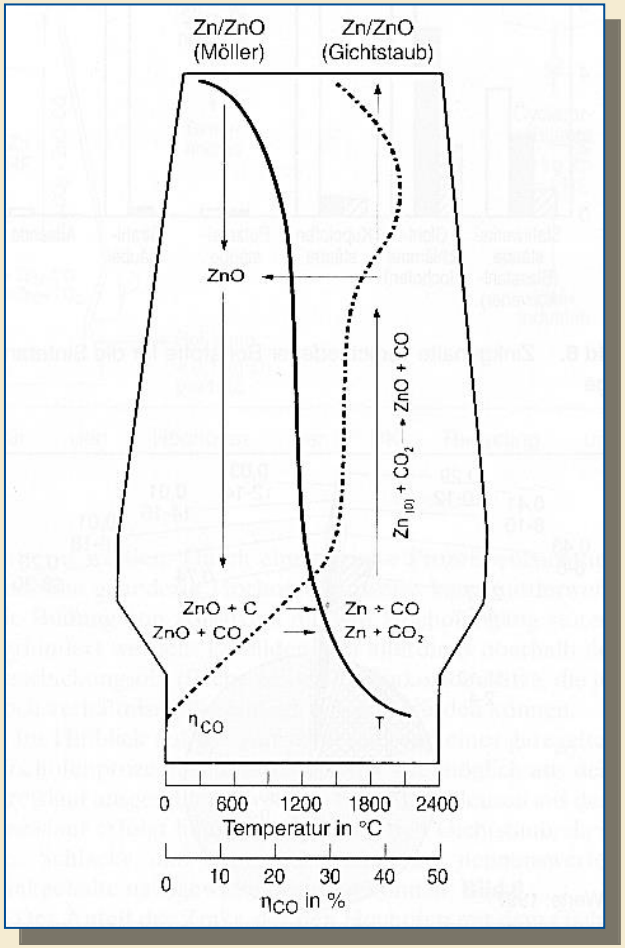




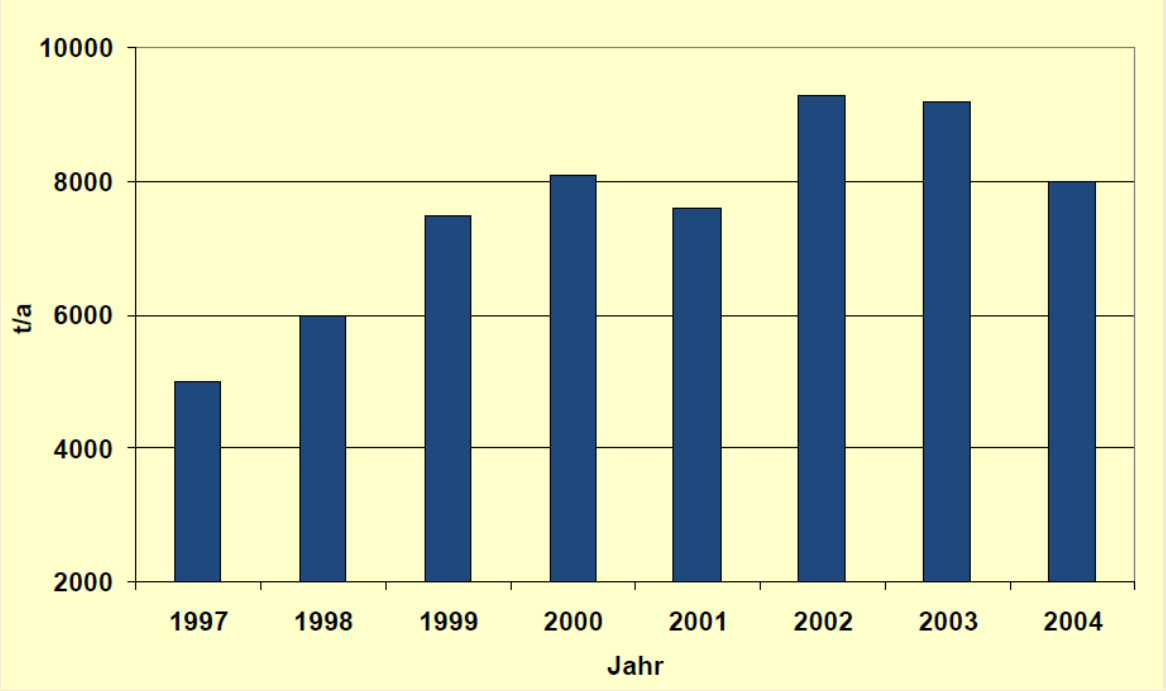
	% H_2O	% Fe	% Zn	% Na_2O	% K_2O
BOF dust 1	10.0	65.0	0.9	0.43	0.24
BOF dust 2	1.5	51.1	2.2	0.84	0.39
BOF dust 3	0.0	44.2	11.9	0.31	0.27
BOF sludge 1	21.1	44.8	1.3	0.14	0.10
BOF sludge 2	20.0	48.0	1.1	0.12	0.14

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

Zn Cycle in Blast Furnace ($ZnO + CO \Leftrightarrow Zn + CO_2$)

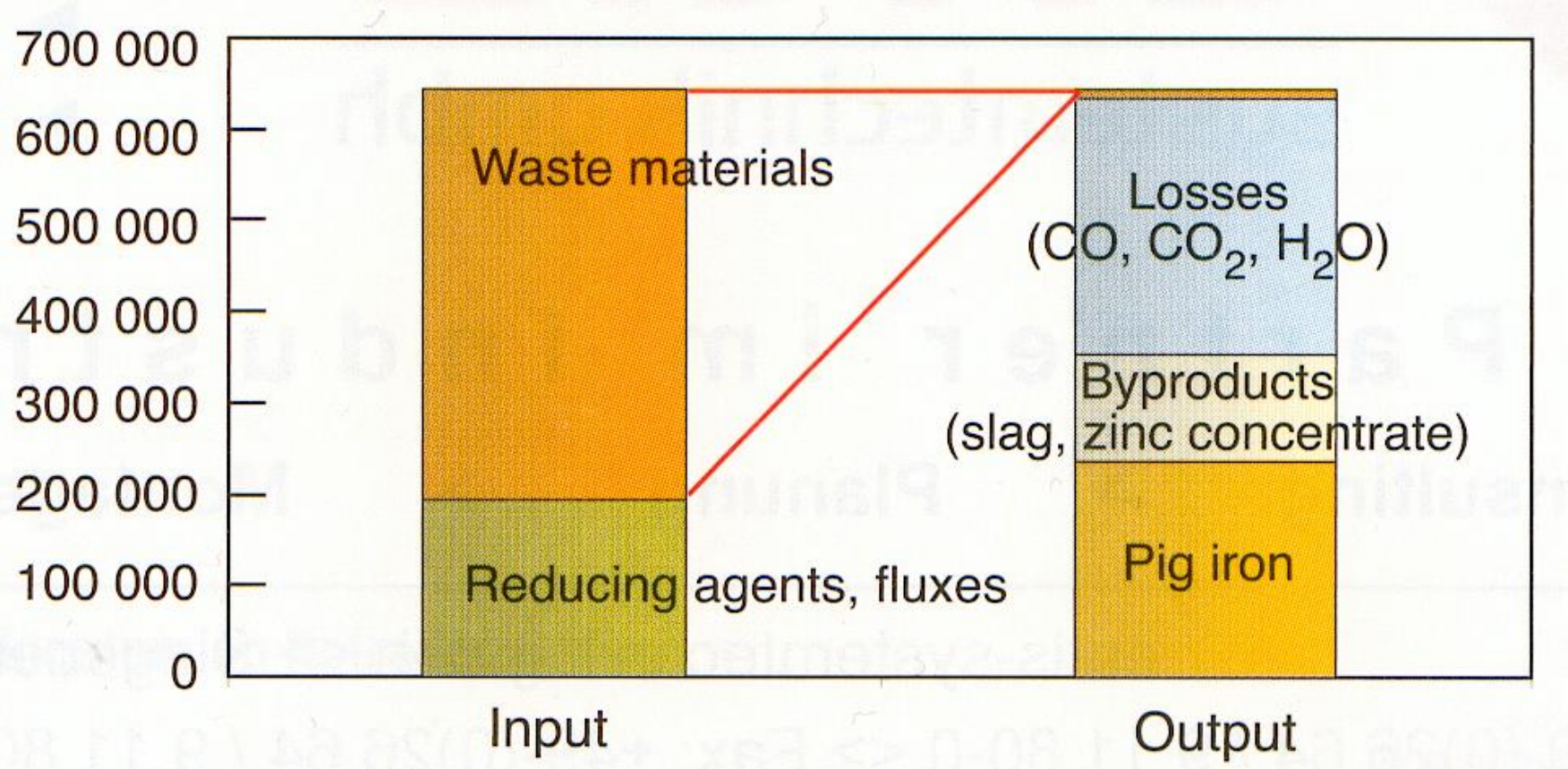


Deike, R.; Hillmann, C.: stahl und eisen 119 (1999) Nr.2, S.53-58



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



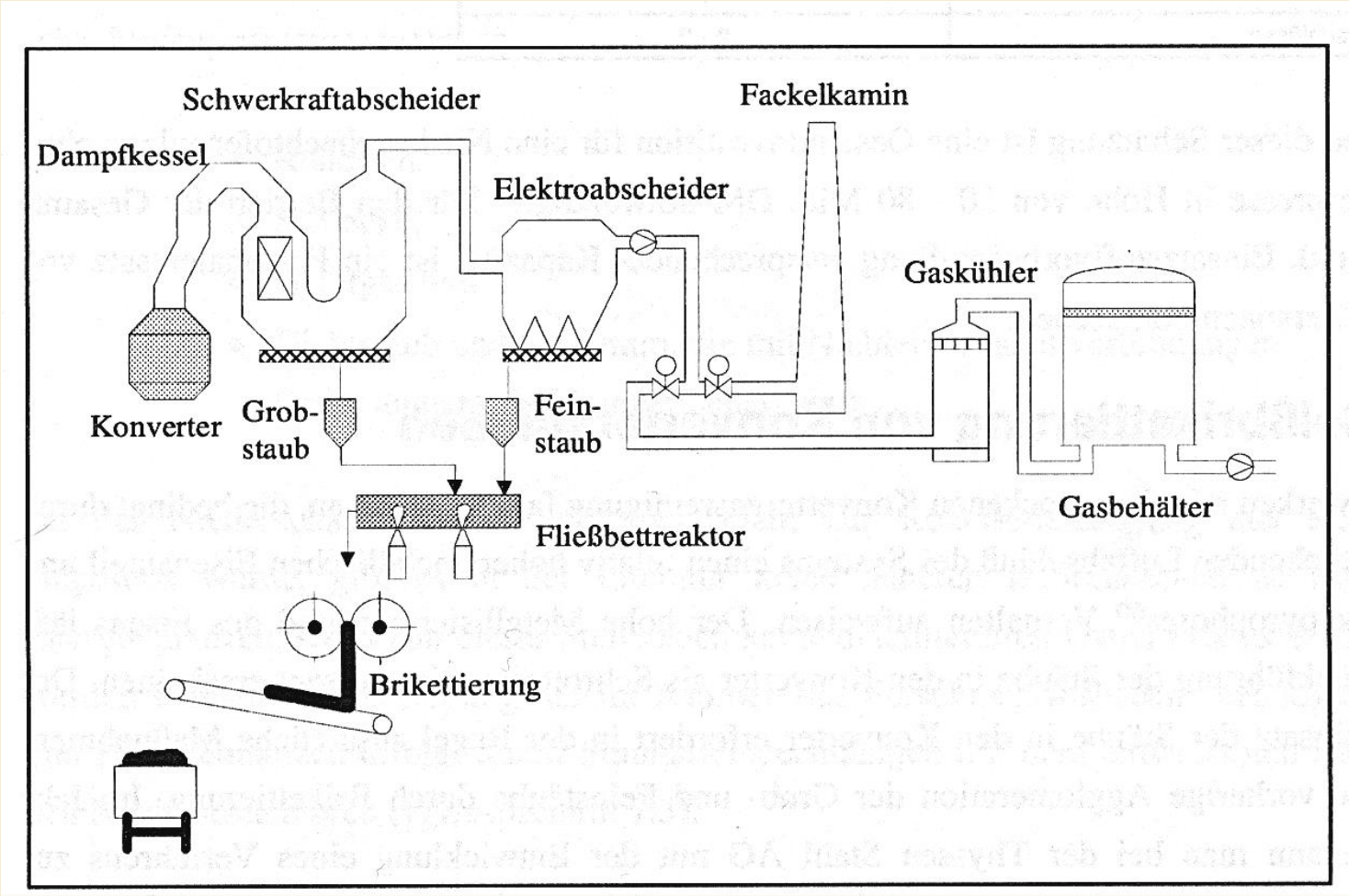
Hillmann, C.; Sassen, K.-J.: stahl und eisen 126 (2006) Nr.11, S.149-156

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

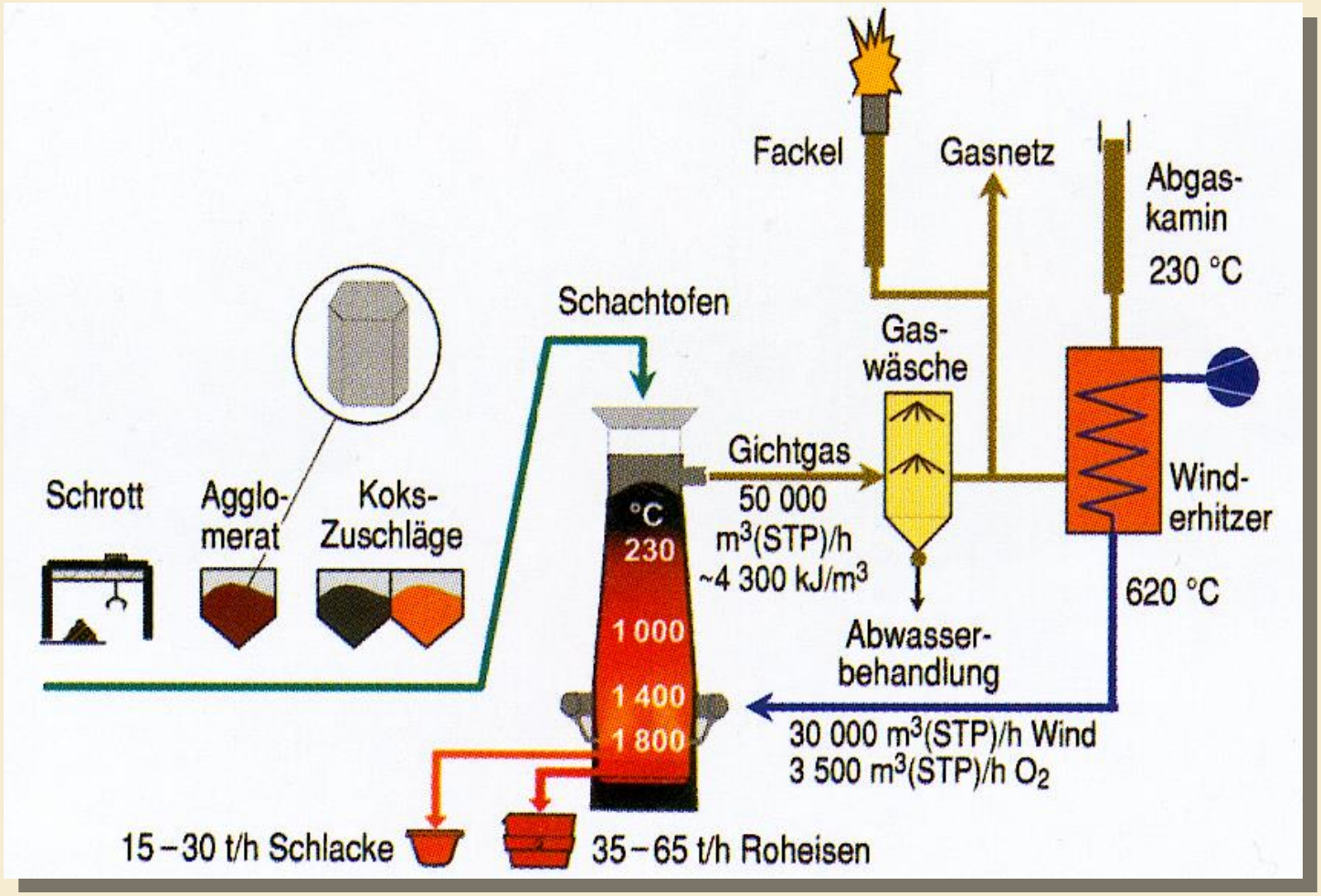
TKSE Hot Briquetting and Oxy-Cup Furnace

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

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN
Offen im Denken

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

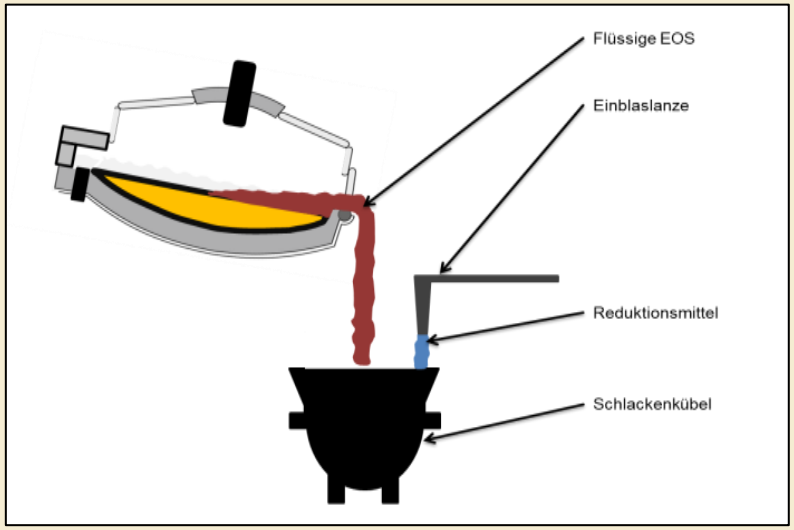
INSTITUT FÜR BAUSTOFF FORSCHUNG FEhS

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

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

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

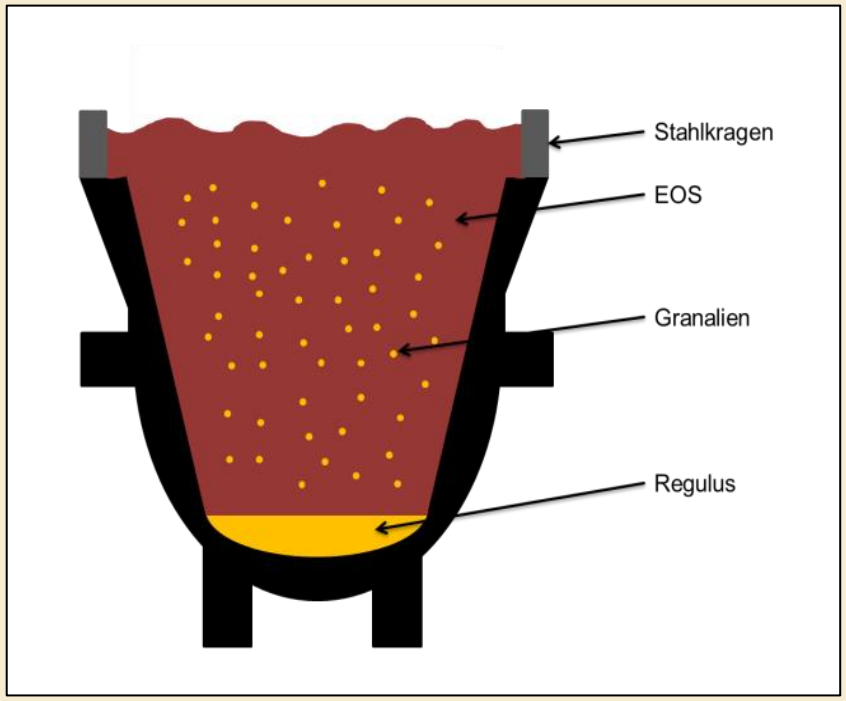


Reduktionsreaktion

- 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.

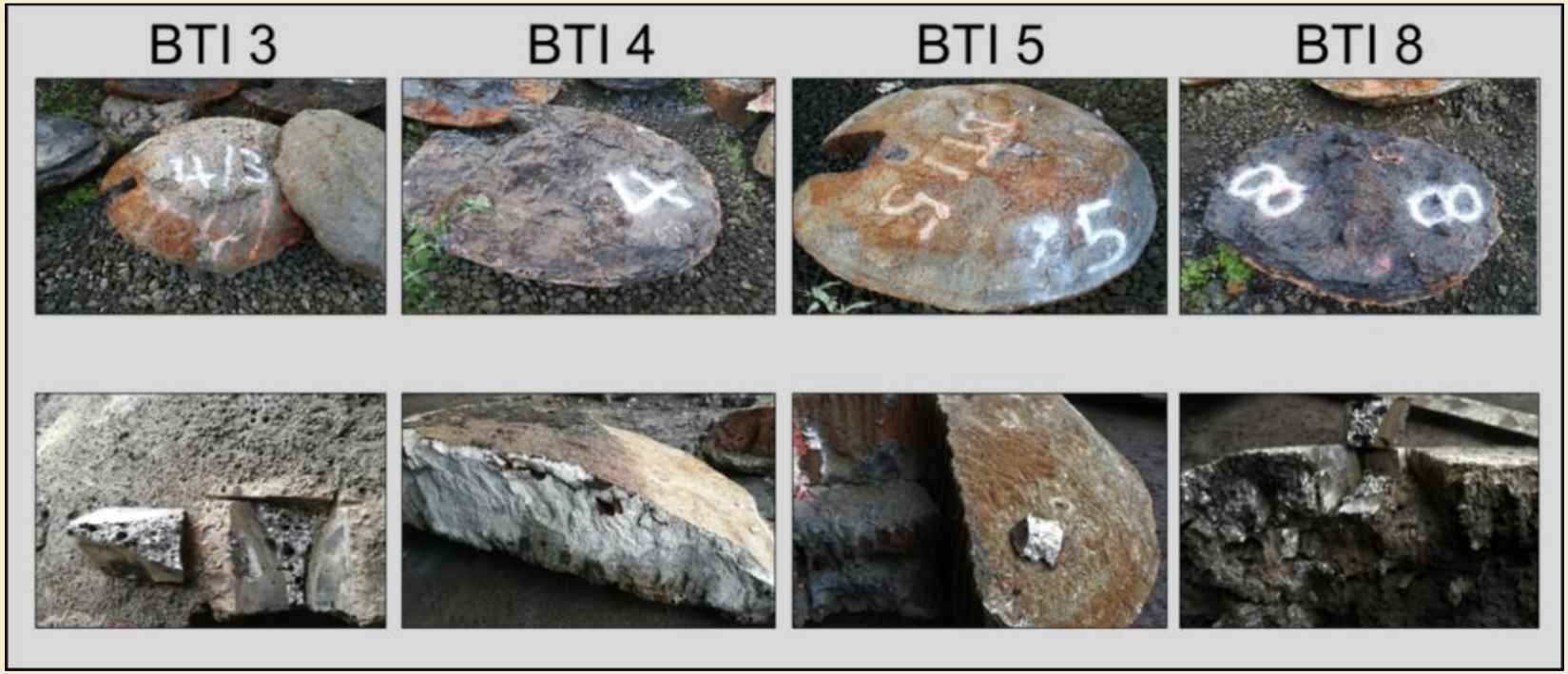
Schematischer Schnitt durch den Schlackenkübel

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



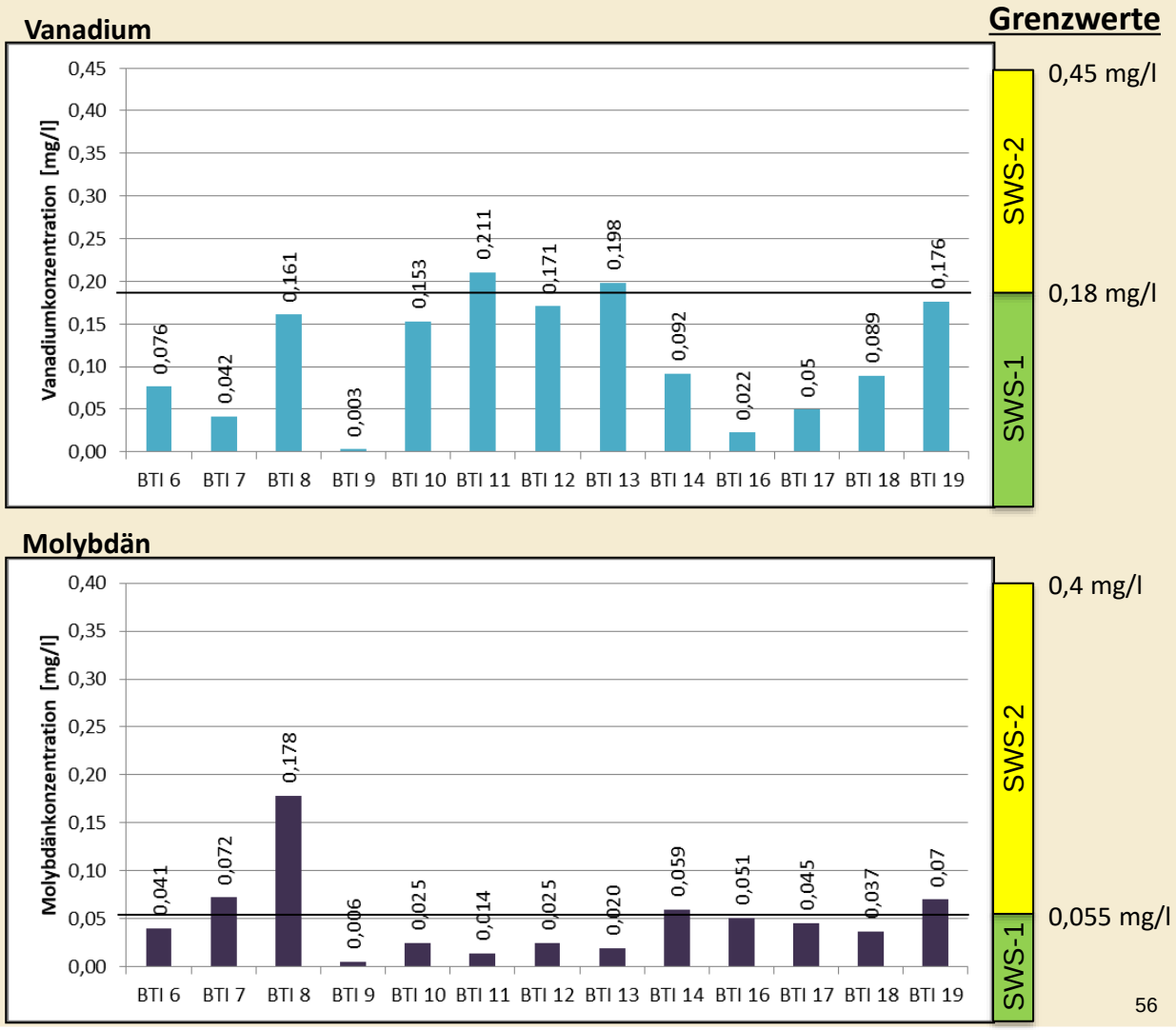
Probennahme an der Metallfraktion

Brechen und Trennen der Metallreguli



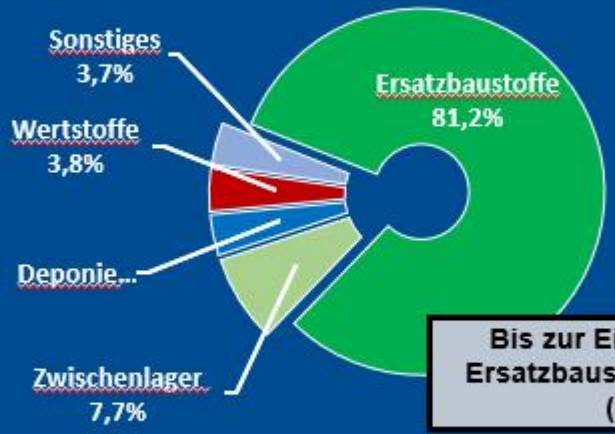
Elutionsergebnisse

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



Definierte Reduktion der Metalloxide

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



Bis zur Einführung der Ersatzbaustoffverordnung (EBV)

Quelle: FEhS - Institut für Baustoff-Forschung

Definierte Reduktion der Metalloxide

Definierte Reduktion der Metalloxide

- 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.

Offen im Denken

- 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

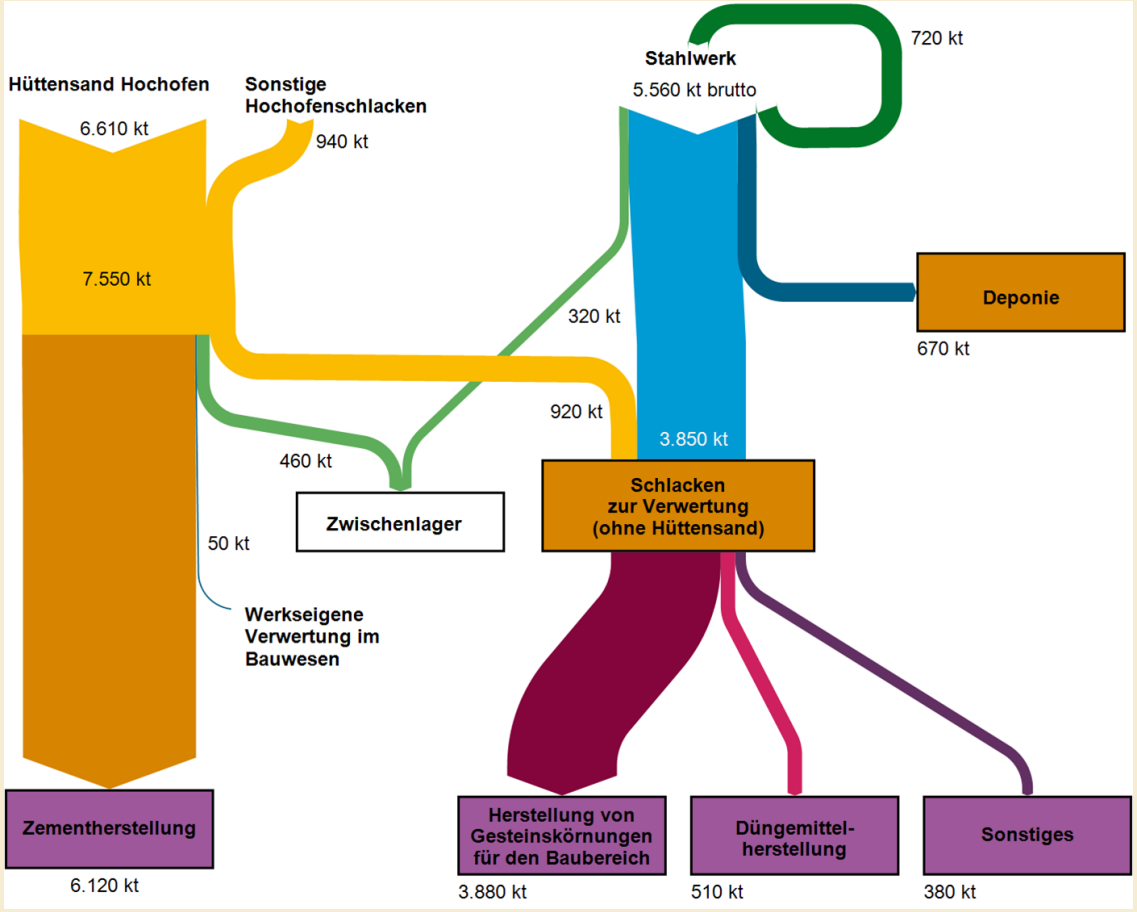
Separationseisen

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

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

Production and Utilization of Metallurgical Slag in Germany 2021

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

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

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

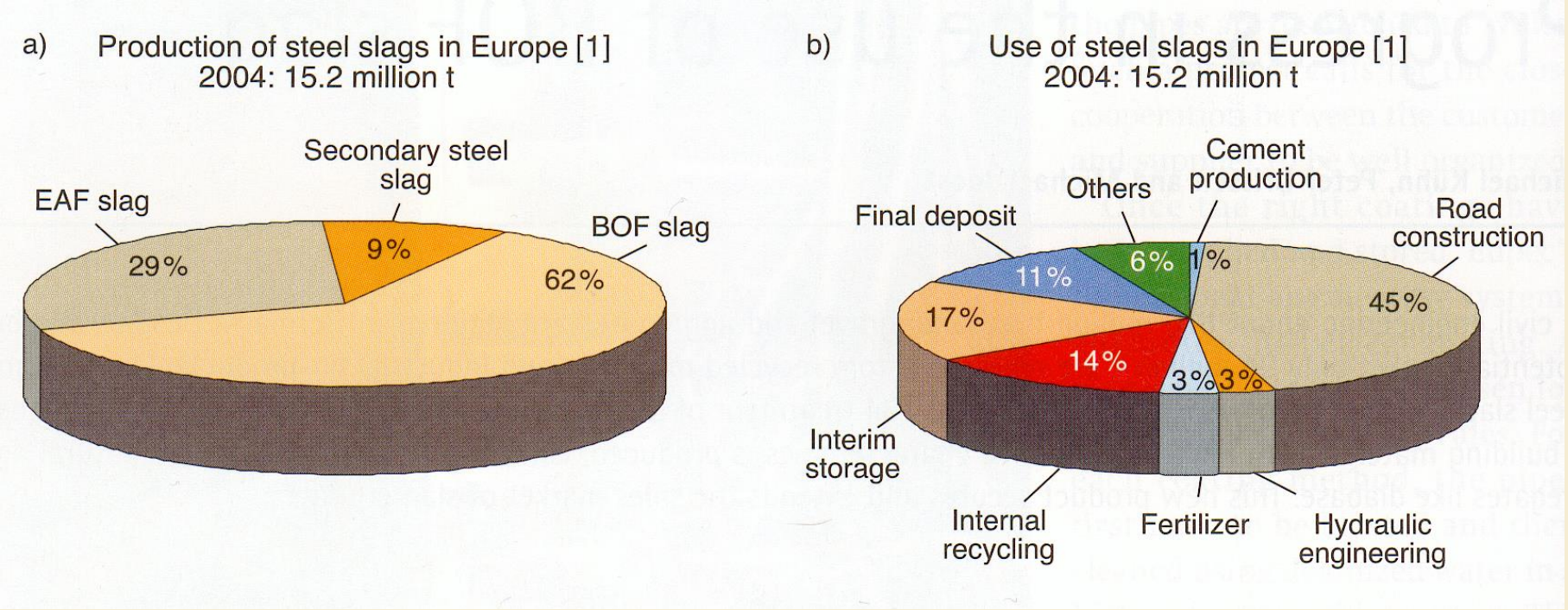
Erzeugung	2021	2020
Schlacke aus Oxygenstahlerzeugung	**2,82**	2,53
Schlacke aus Elektrostahlerzeugung	**1,58**	1,46
Schlacke aus Sonderverfahren	**0,58**	0,46
Summe Erzeugung	**4,98**	4,45
Lagerabbau		0,01
Summe	**4,98**	4,46

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

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

FEhS-Report 2022

Production and Utilization of Metallurgical Slag in Europe 2004



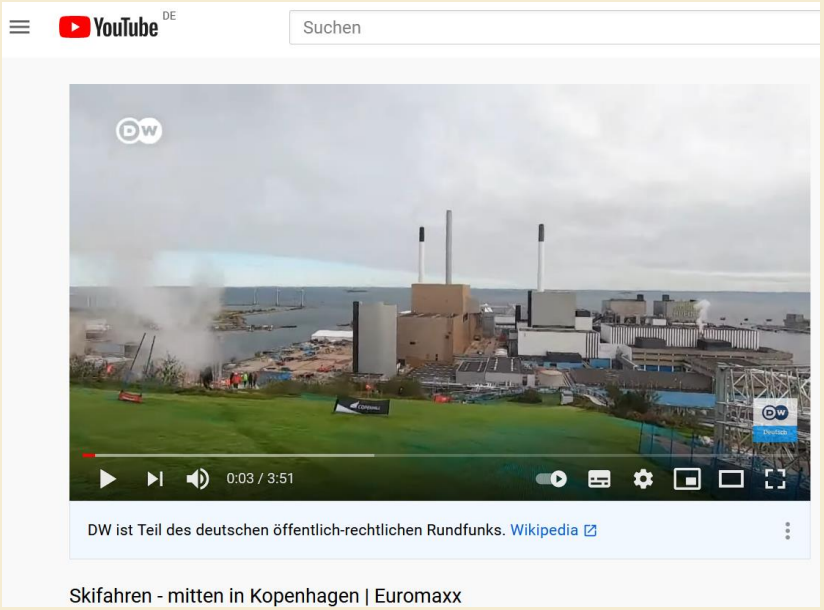
Quelle : Kühn, M.; Drissen, P.; Joost, M.: stahl und eisen 126 (2006) Nr.11, S.S159-166

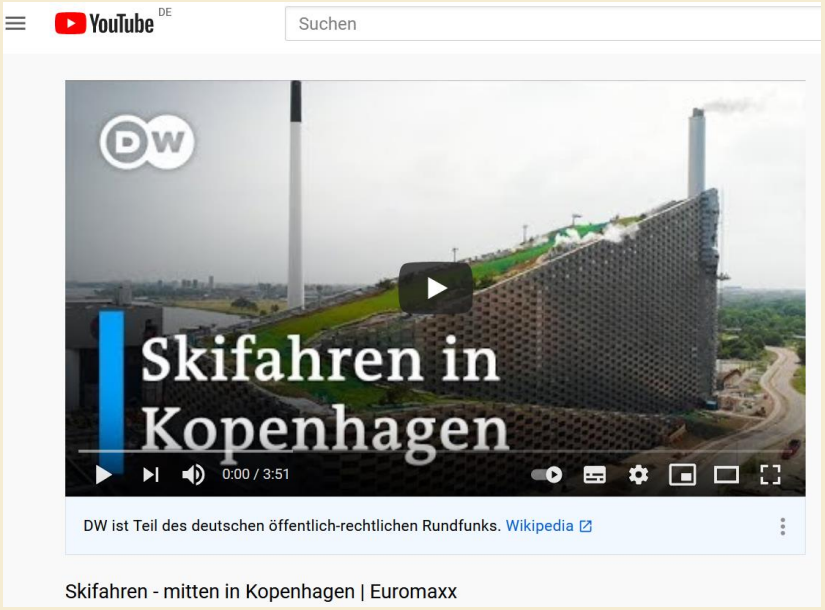
UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

Recycling of Metals from Bottom Ash

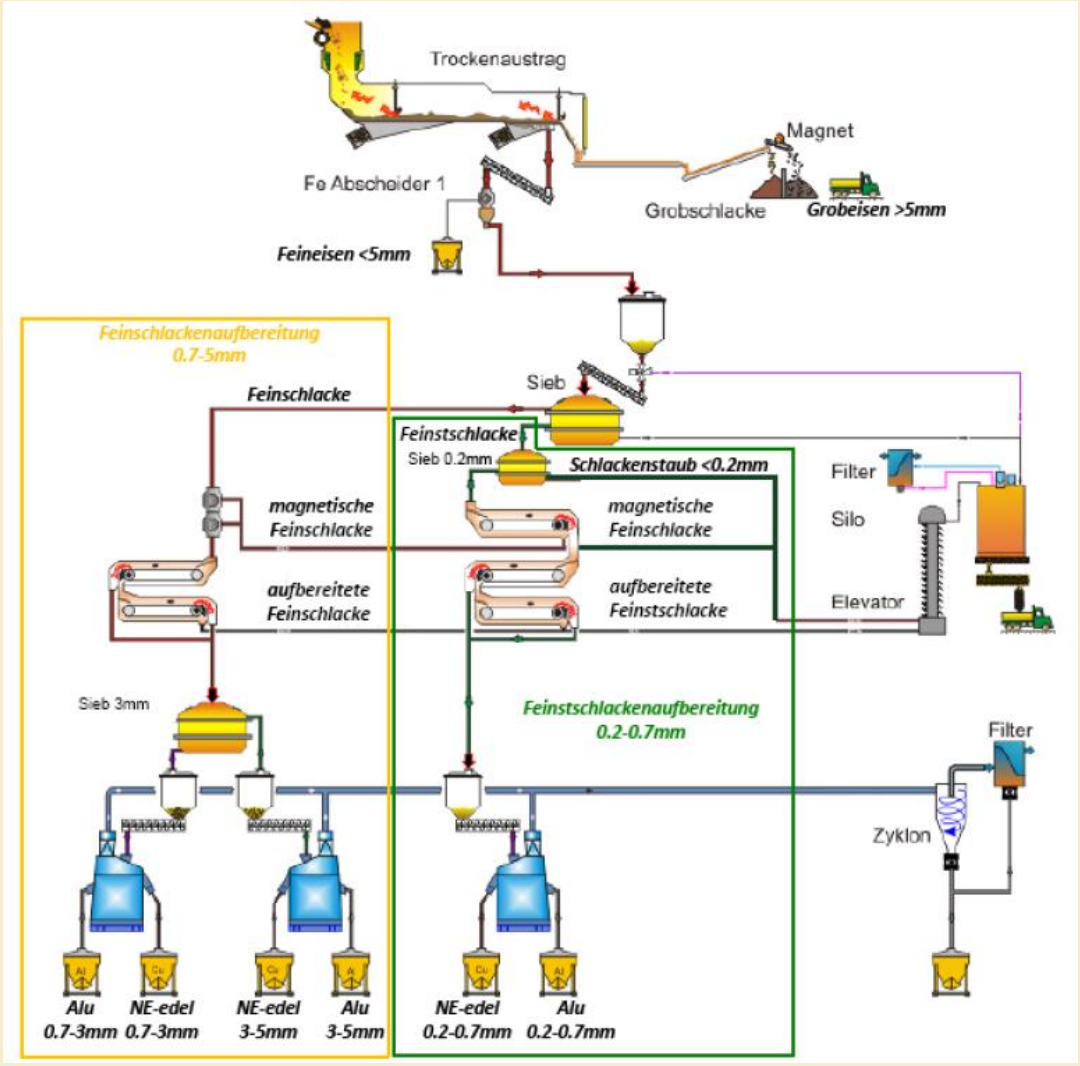
The most modern waste incineration plant in the world in Kopenhagen





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

Waste Incineration with Dry Slag Discharge

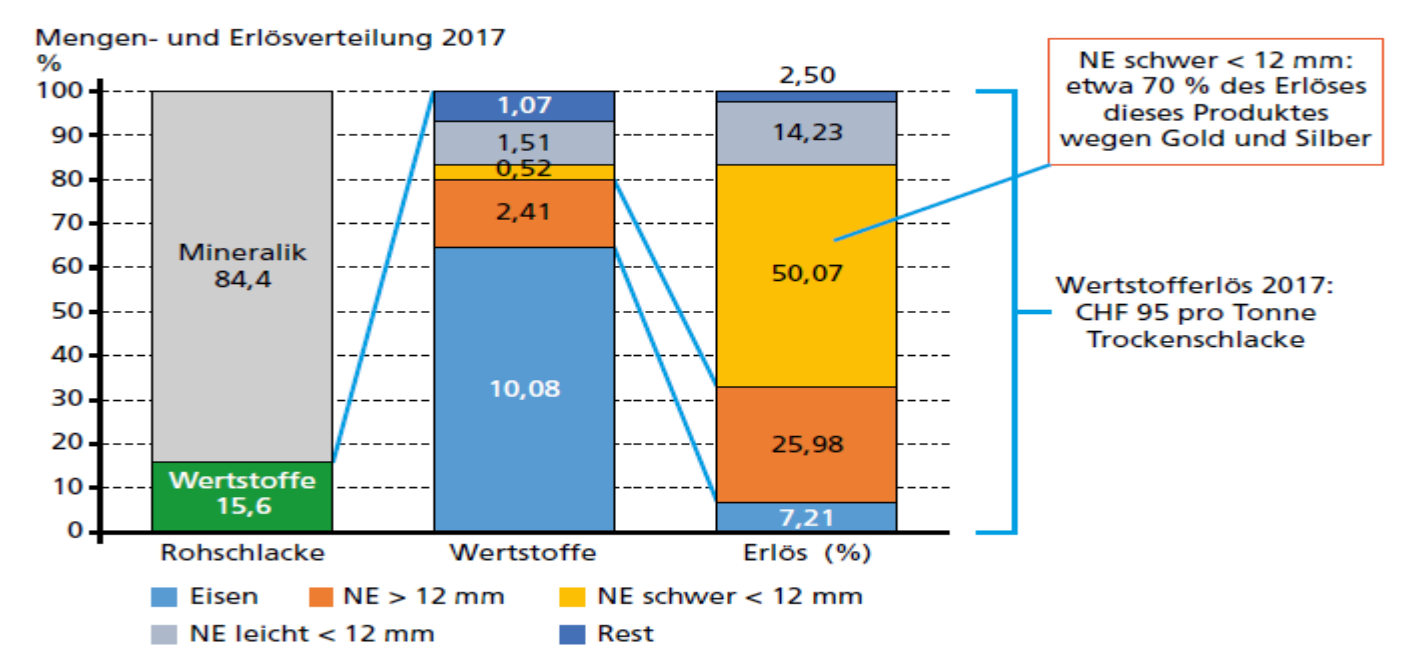


https://www.zar-ch.ch/zar/die-stiftung/

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

Deike, R.; Brümmer, A.: ZAR - Stiftung Zentrum für Nachhaltige Abfall- und Resourcennutzung, Hinwil, 21.03.2012

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[1], I. Adhiwiguna[2] , I. Zacharopoulos[1], J.Geldermann[1], R. Warnecke[3]

[1] Universität Duisburg Essen – Institut für Technologien der Metalle

[2] Pt. Zenith Allmart Precisindo, East Java, Indonesia

[3] Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH

Gefördert durch:

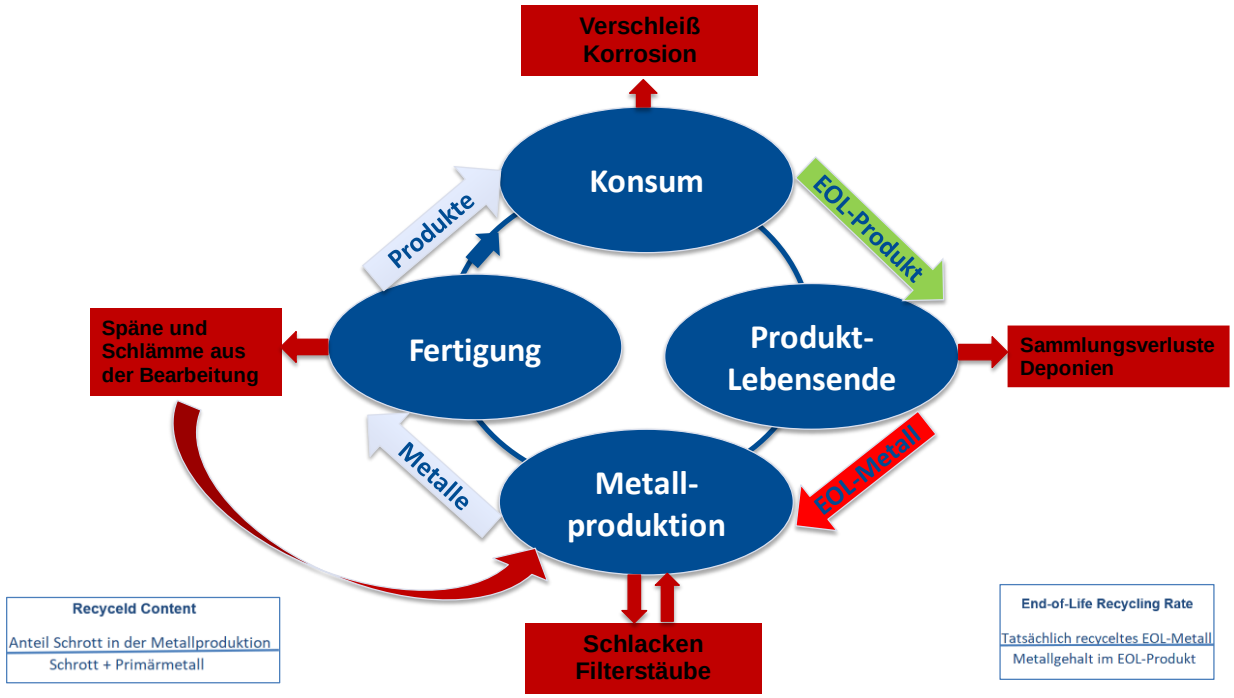
Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Agenda

1. Voraussetzungen zur Realisierung wirtschaftlicher Recyclingverfahren
2. Die wesentlichen charakteristischen Merkmale des EMSARZEM-Prozesses
3. Verwendung der Output-Fraktionen 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

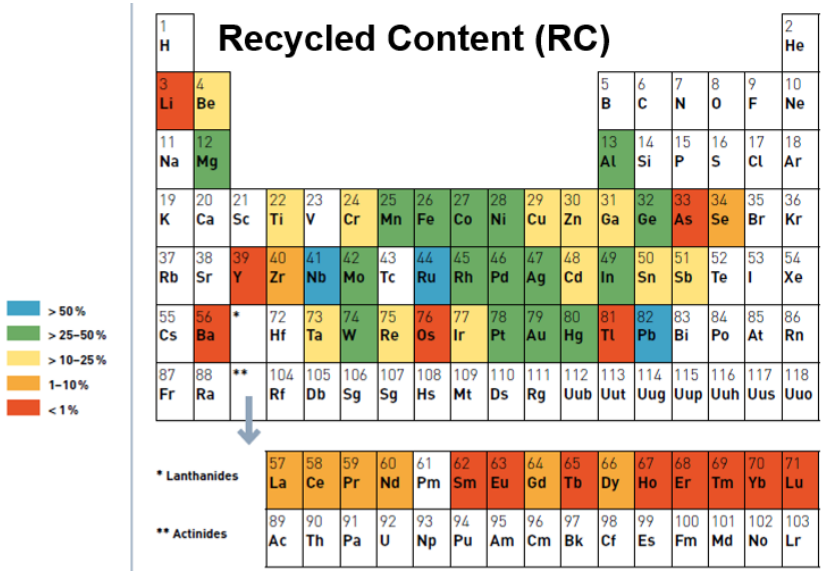
1. **In den Reststoffen müssen möglichst hohe Konzentrationen des Stoffes/der Stoffe enthalten sein, die zurückgewonnen werden sollen.**
2. **Die Reststoffe dürfen nur geringe Konzentrationen an störenden Begleitstoffen enthalten.**
3. **Die Anwendung einfacher und robuster Recyclingtechnologien sollte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

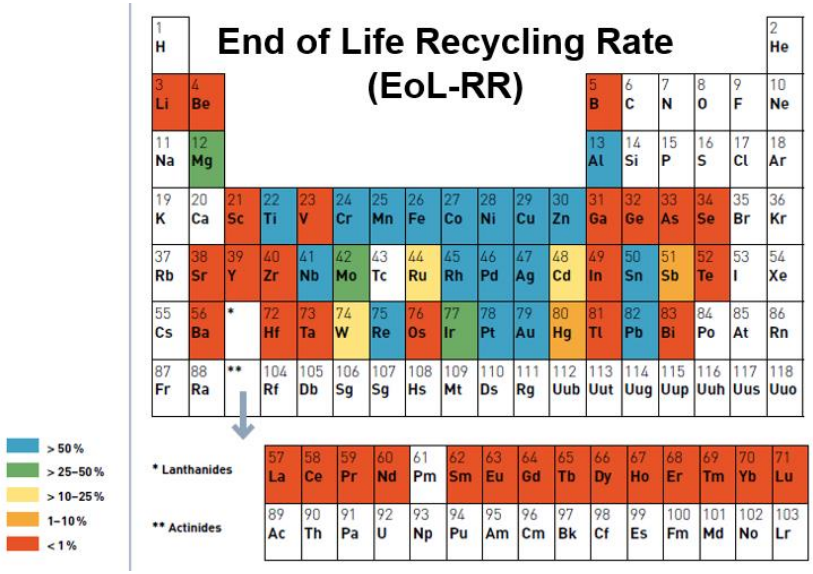
Deike, R.: *Ressourceneffizienz unter dem Aspekt sich verändernder internationaler Märkte für Industriemetalle*, Chemie Ingenieur Technik (CIT), Vol 84, Issue 10, p1685, 2012
DOI 10.1002/cite.201200063

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/duepublico/78773

Wieso funktioniert das nicht bei allen Metallen?



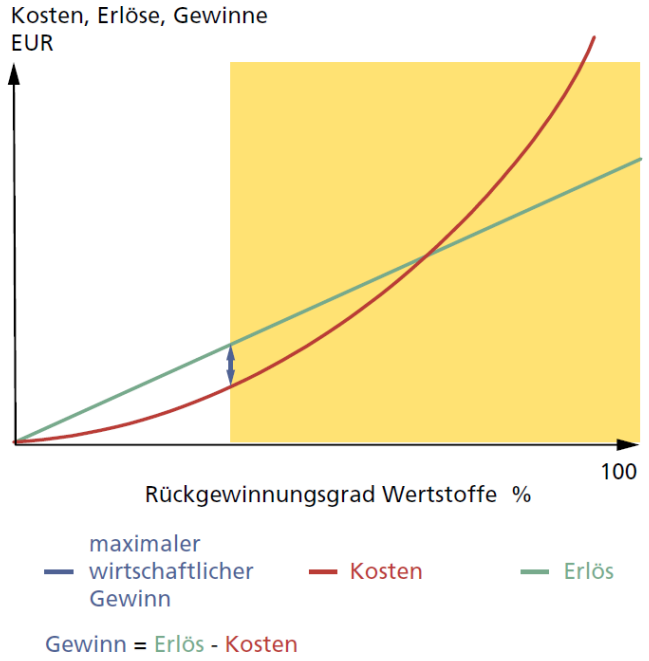


In Zeiten des Wirtschaftswachstums wächst der Anteil der Primärmetalle schneller als der Anteil der Sekundärmetalle, so dass der Recyceld Content sinkt und wesentlich geringer ist als die EoL-Recycling-Rate. Darüber hinaus ist der Recyceld Content von der Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen abhängig.

UNEP International Resource Panel: Recyling 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/duepublico/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

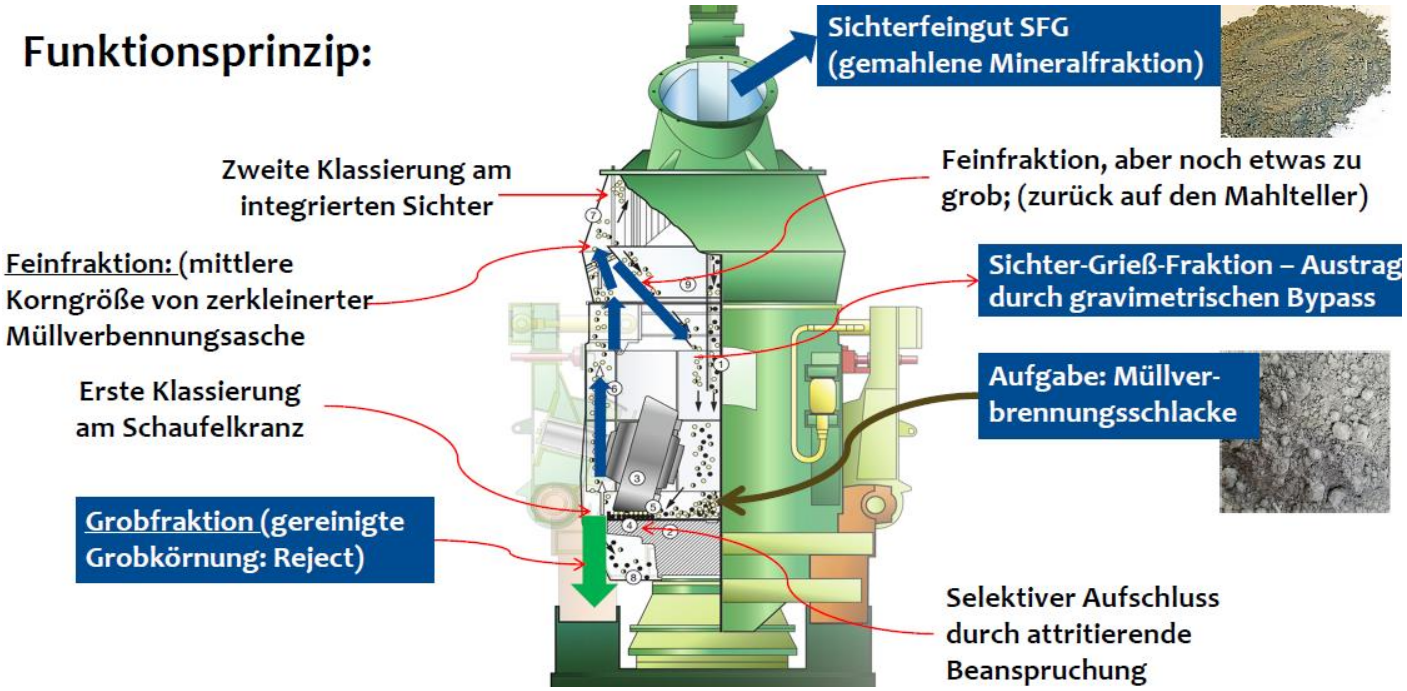
Wie kann das Problem der Wertstoffrückgewinnung aus dissipativen

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**

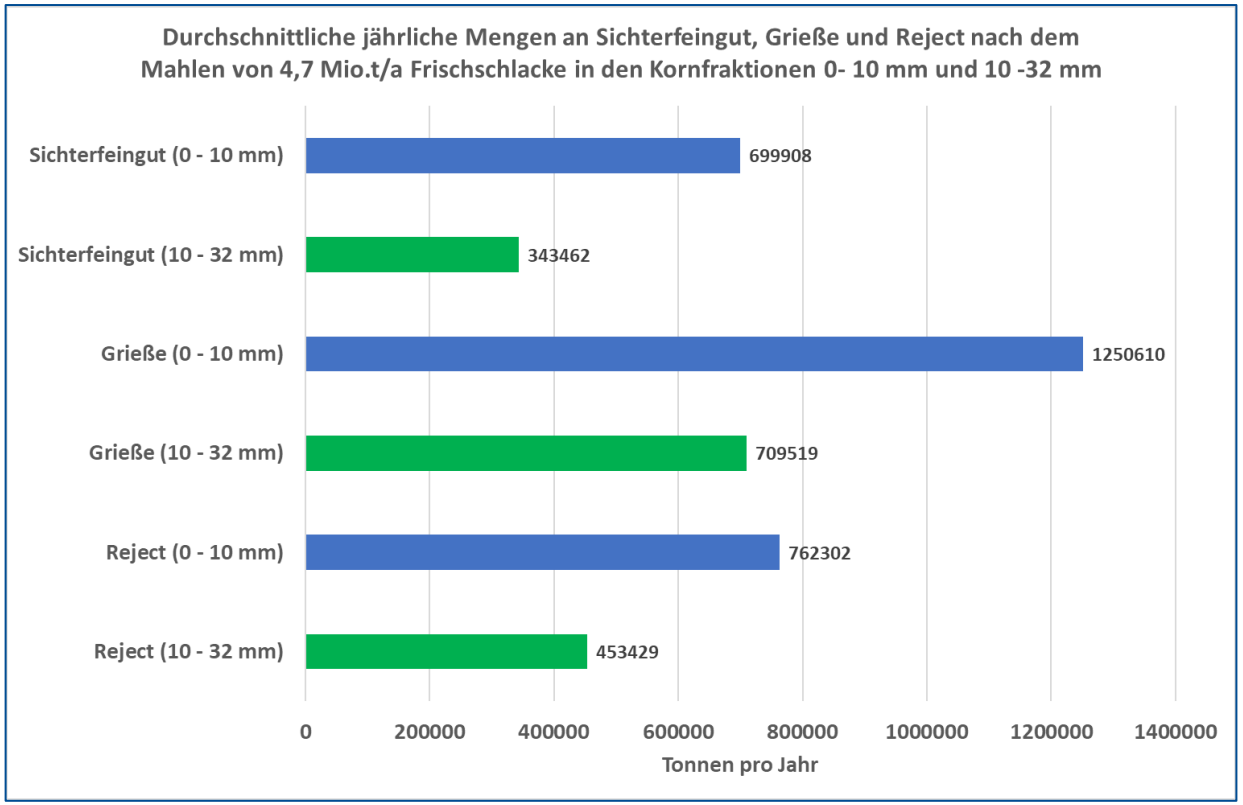
Diese Anforderungen erfüllt die thermische Abfallbehandlung in Kombination mit einer modernen MV- Schlackenaufbereitung!

Die wesentlichen charakteristischen Merkmale des EMSARZEM-Prozesses

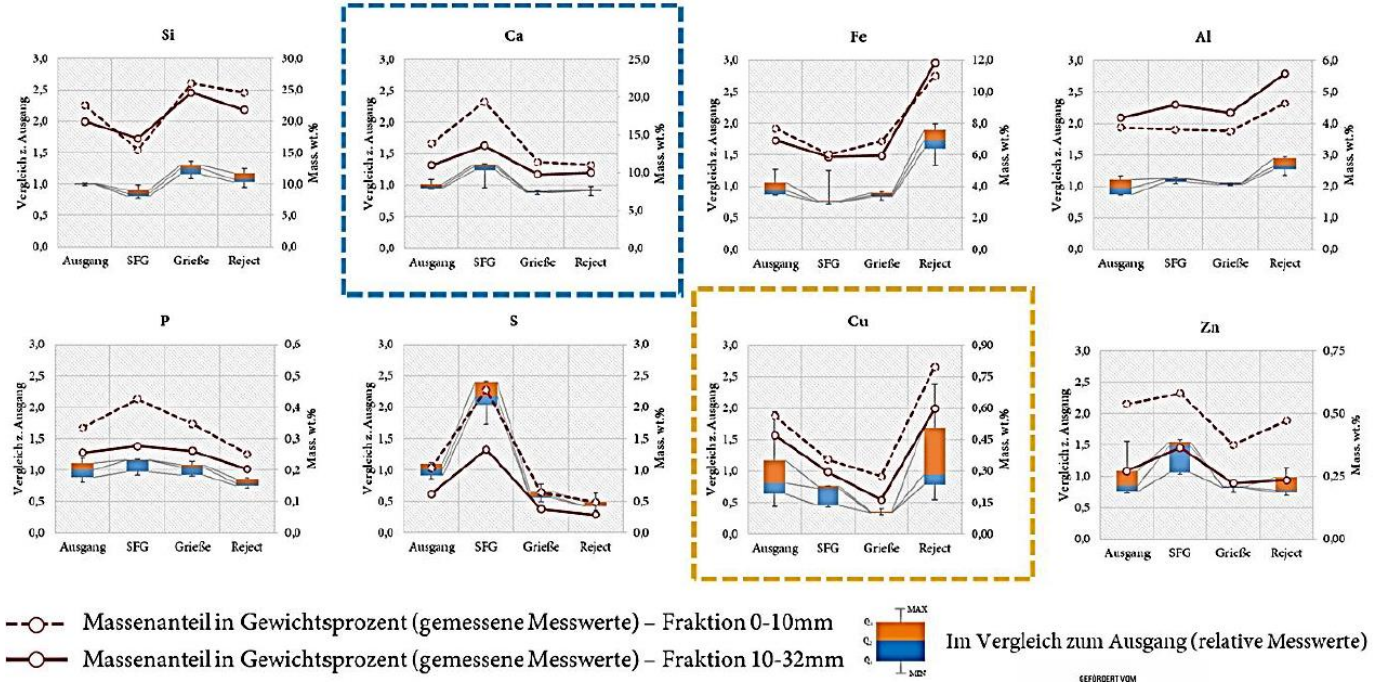


Deike, R.; Ruhkamp, W.; Adhiwiguna, I.; Warnecke, R.: *Einsatz von Rostasche –Feinfraktion < 10 mm als Rohstoff für die Herstellung von Zement und Beton*, BKMNA 24, Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Berlin, 12-13.06.2024

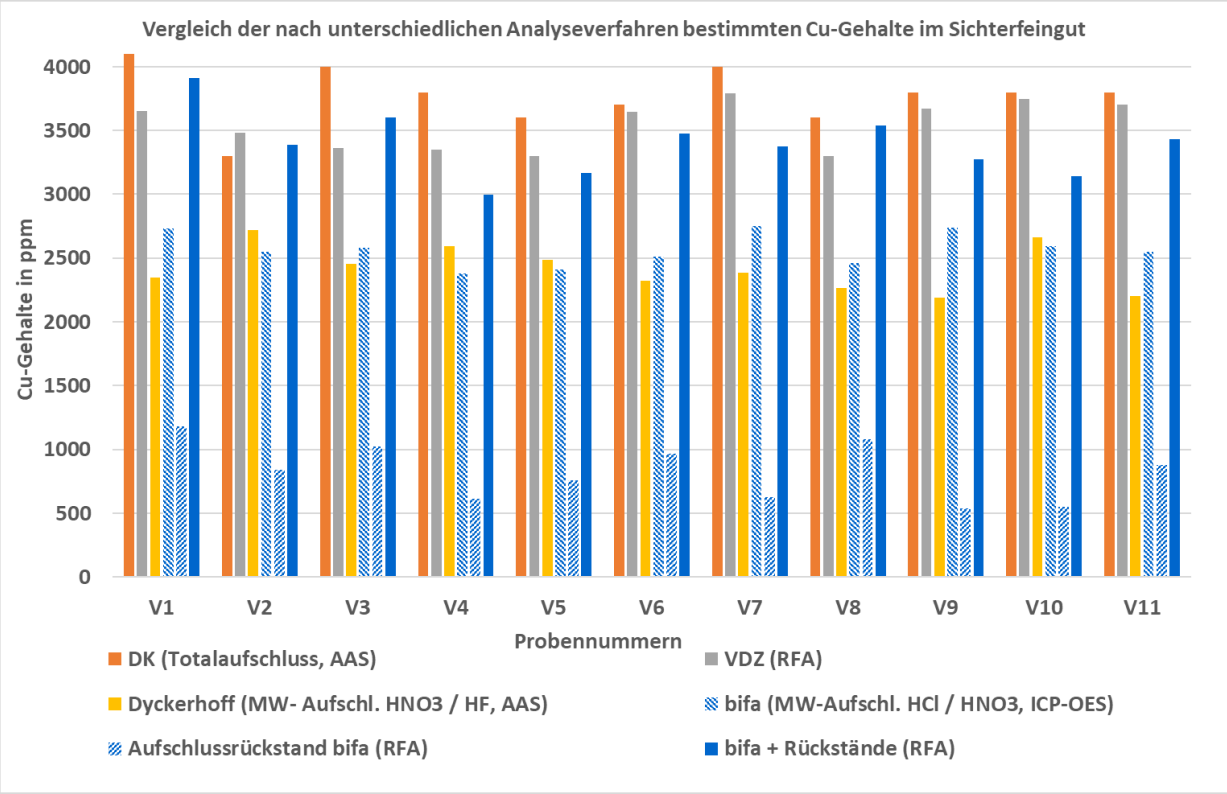
Anteile an Sichterfeingut, Grieße und Reject nach dem Mahlen von



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



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


Vergleich der nach unterschiedlichen Analyseverfahren bestimmten Cu-Gehalte im Sichterfeingut
Cu-Gehalte in ppm
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
V1
V2
V3
V4
V5
V6
V7
V8
V9
V10
V11
Probennummern
DK (Totalaufschluss, AAS)
VDZ (RFA)
Dyckerhoff (MW- Aufschl. HNO3 / HF, AAS)
bifa (MW-Aufschl. HCl / HNO3, ICP-OES)
Aufschlussrückstand bifa (RFA)
bifa + Rückstände (RFA)

Anwendung moderner Separationstechnologien im Industriemaßstab

Moderne Separationstechnologie im Industriemaßstab

Magnetscheidung

Wirbelstromscheidung

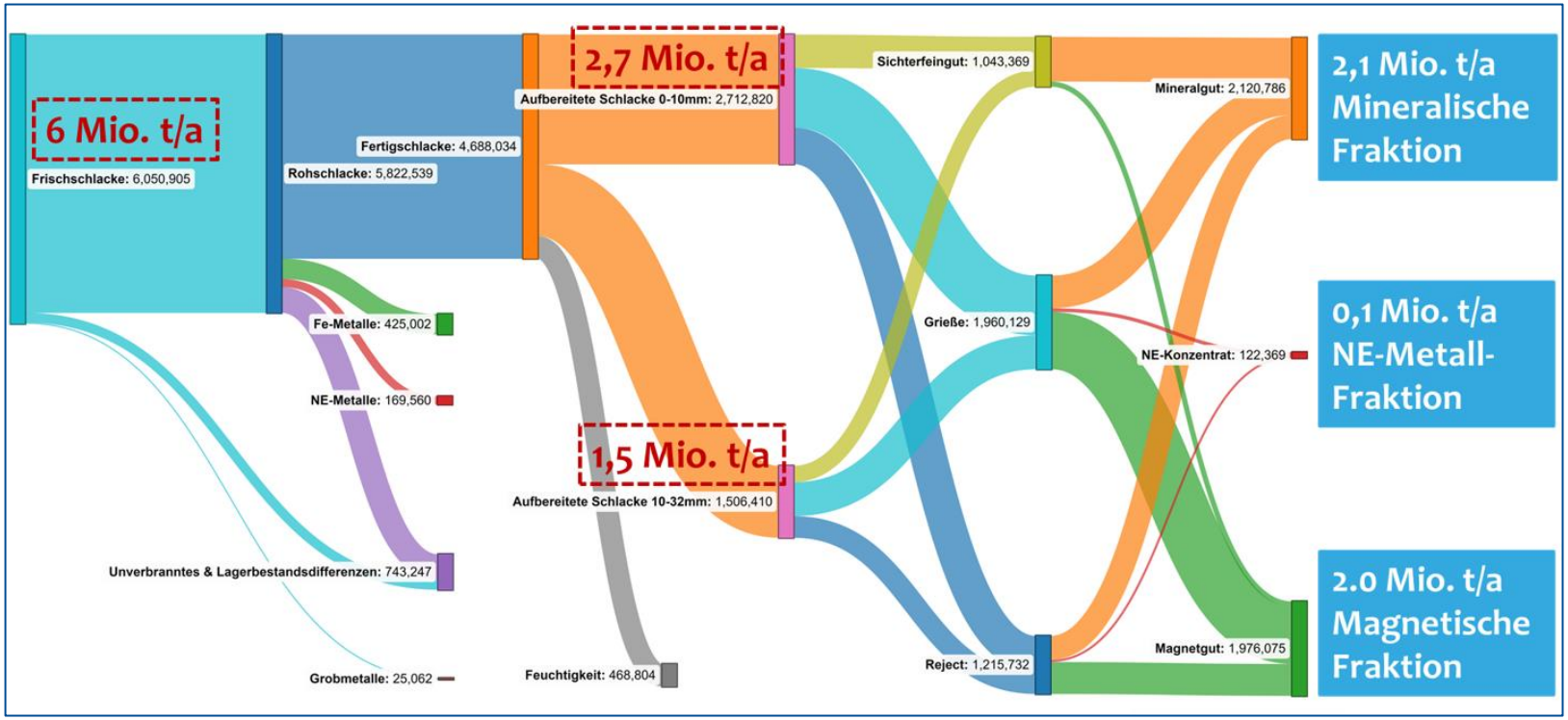
Elementgehalte in den magnetischen und Nicht-Eisen-Fraktionen der

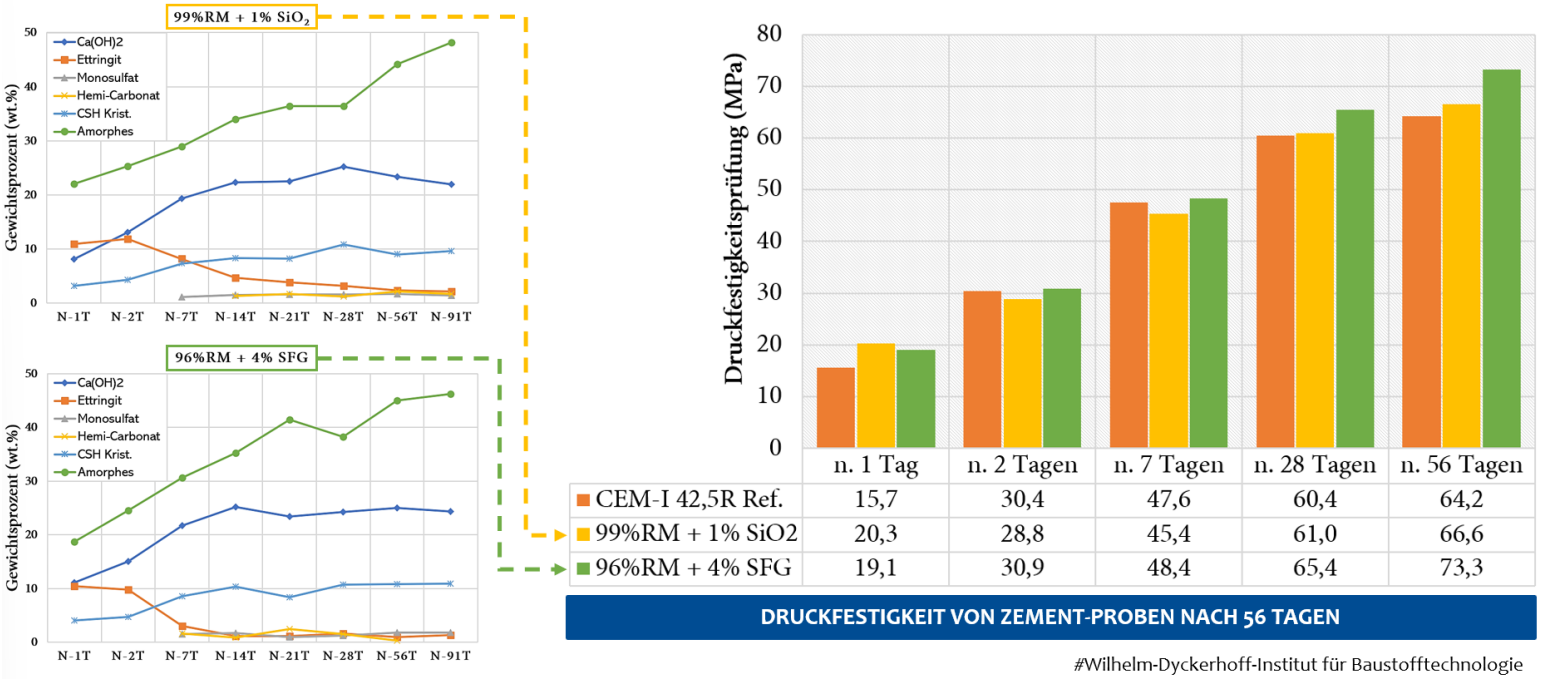
Elemente		Magnetischer Anteil der Grieße (58 %)	NE-Anteil der Grieße (5 %)	Mineralischer Anteil der Grieße (37 %)
Silicium (Si)	Gew.%	22,70	34,30	30,10
Calcium (Ca	Gew.%	12,20	6,70	10,20
Eisen (Fe)	Gew.%	11,60	0,70	1,50
Aluminium (Al)	Gew.%	3,90	4,30	2,70
Natrium (Na)	Gew.%	2,30	3,70	2,60
Magnesium (Mg)	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

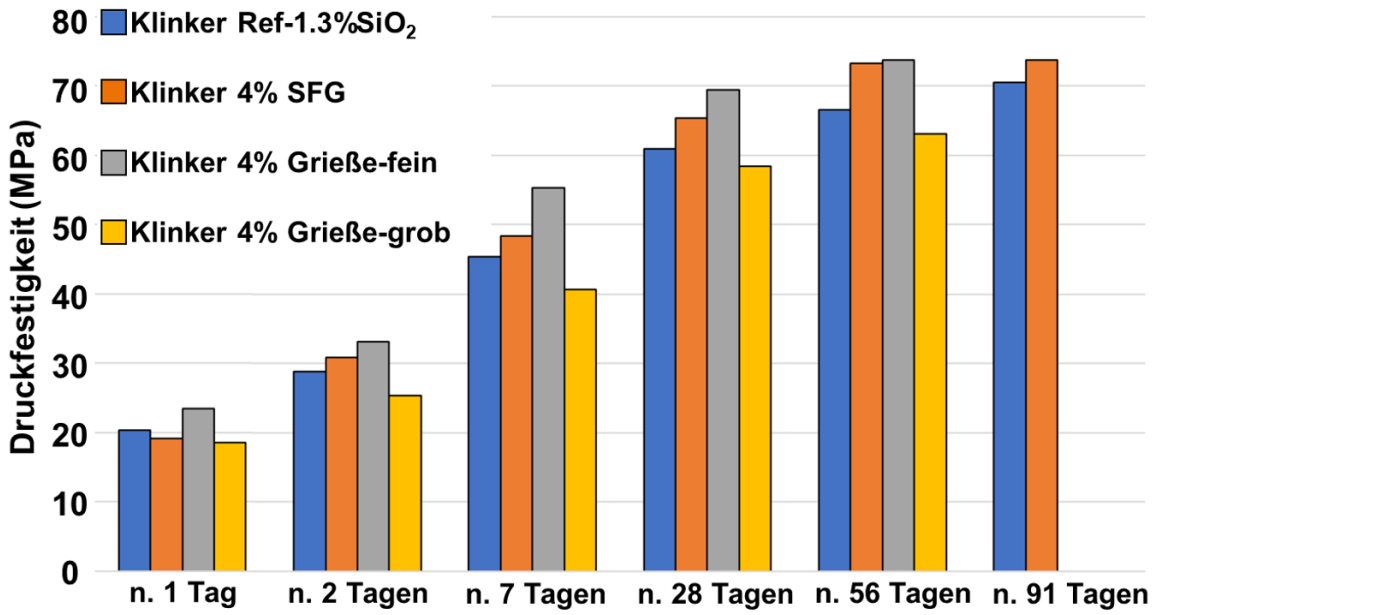
Theoretisch in Deutschland anfallende Output-Fraktionen aus dem





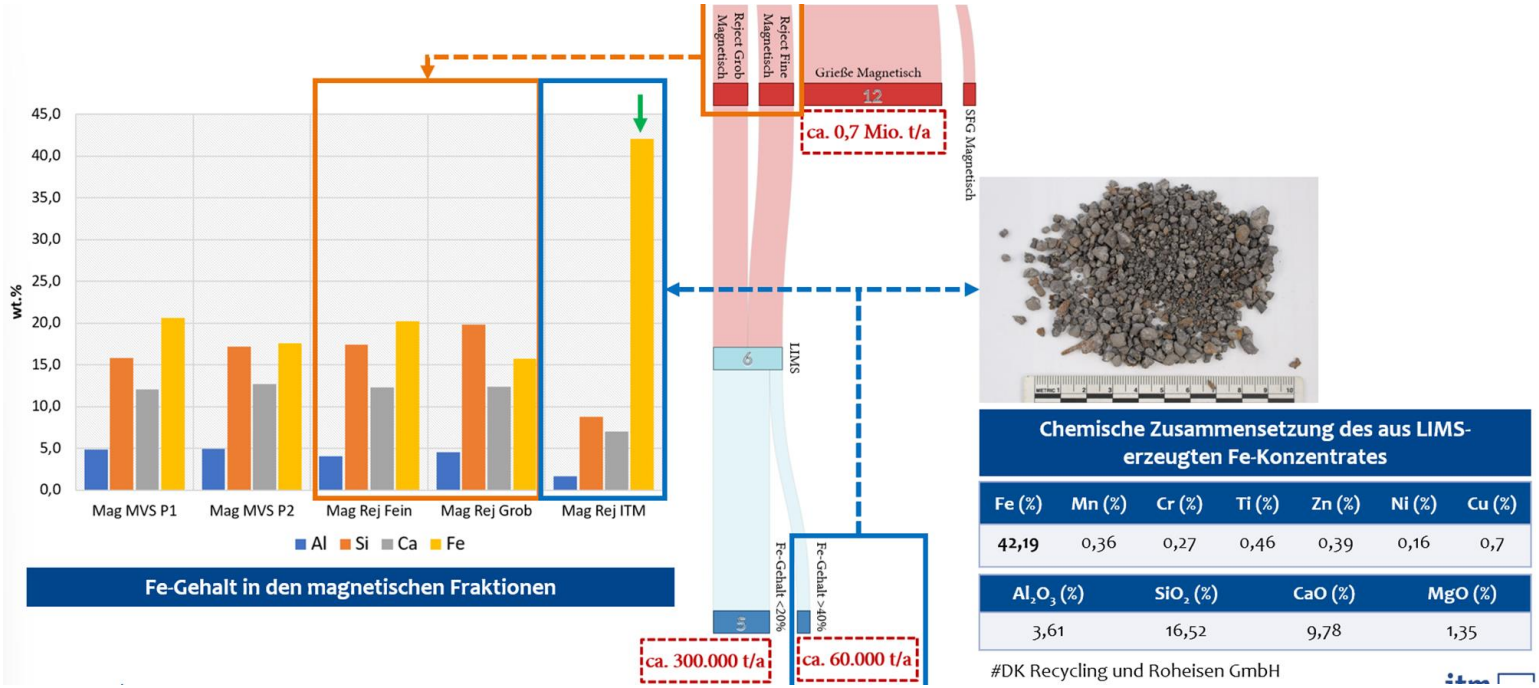
Deike, R.; Ruhkamp, W.; Adhiwiguna, I.; Warnecke, R.: *Einsatz von Rostasche –Feinfraktion < 10 mm als Rohstoff für die Herstellung von Zement und Beton*, BKMNA 24, Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Berlin, 12-13.06.2024

Druckfestigkeitsprüfungen von Zementen mit unterschiedlichen



Deike, R.; Adhiwiguna, I.; Warnecke, R.: *EMSARZEM 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



Chemische Zusammensetzung des aus LIMS-erzeugten Fe-Konzentrates

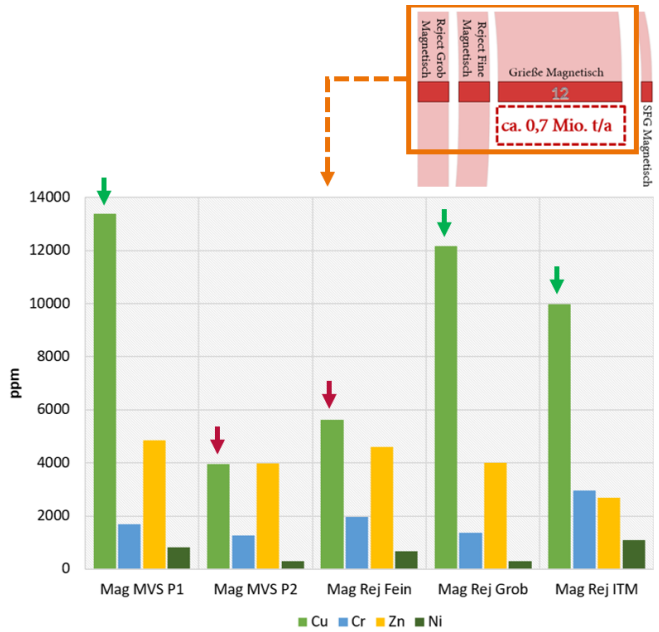
Fe (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ti (%)	Zn (%)	Ni (%)	Cu (%)
42,19	0,36	0,27	0,46	0,39	0,16	0,7

Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	CaO (%)	MgO (%)
3,61	16,52	9,78	1,35

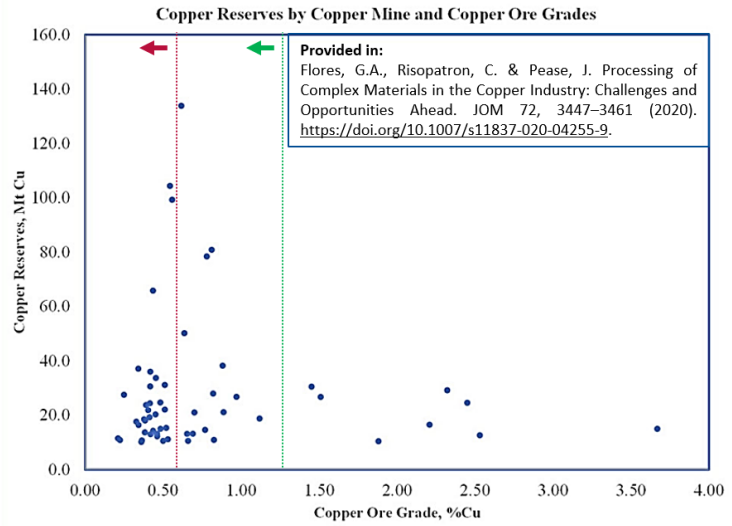
#DK Recycling und Roheisen GmbH

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

Magnetische Fraktion in der Kupfererzeugung



Spurenelemente in den magnetischen Fraktionen



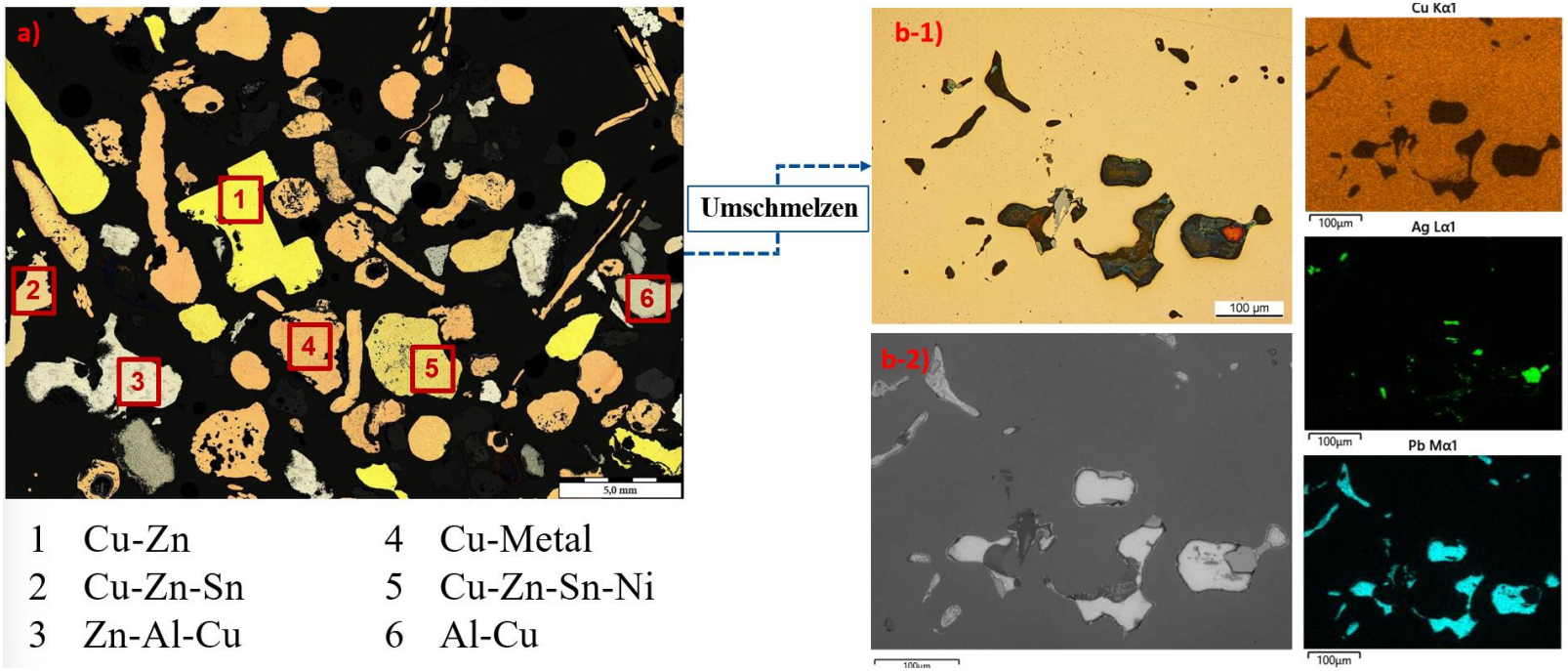
Cu-Gehalte in größten Lagerstätten weltweit

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[1]	Aurubis[2]	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			

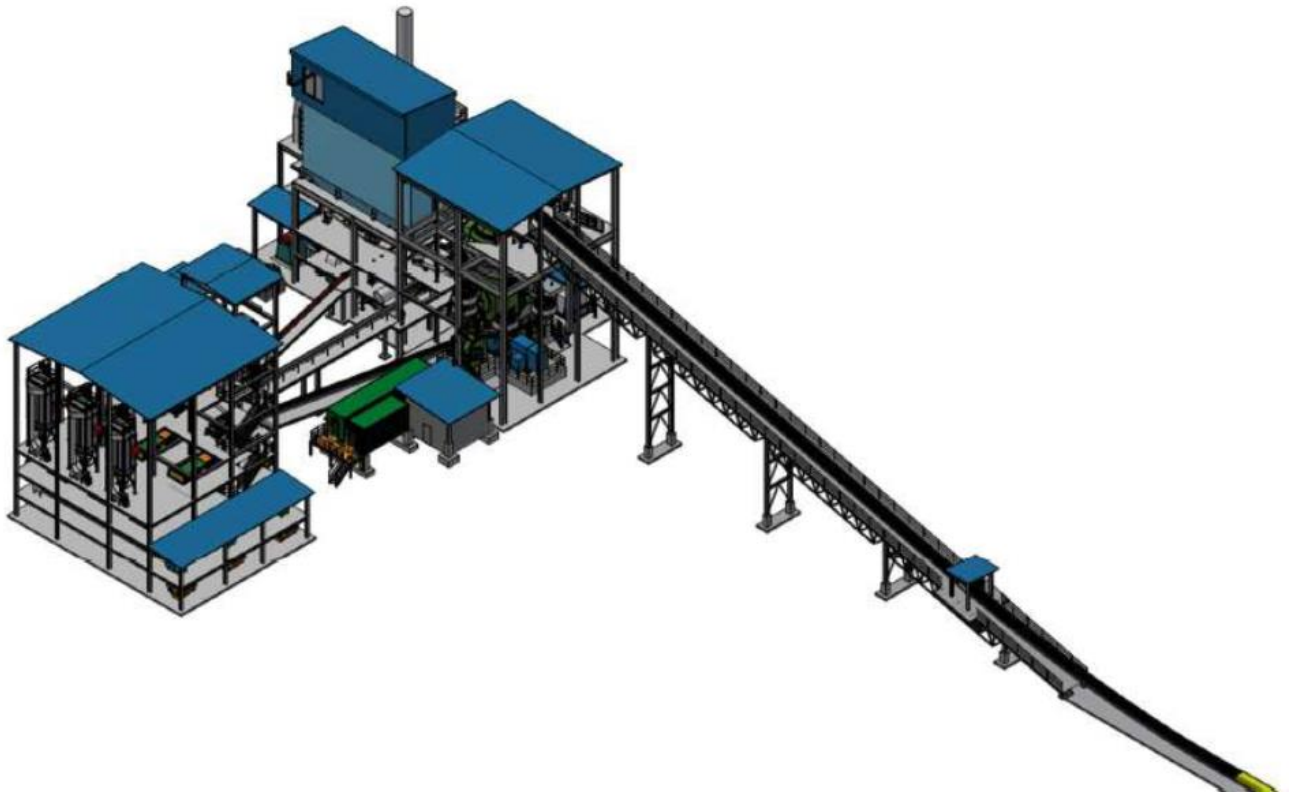
Lichtmikrokopische Analyse von Metallpartikel aus separierter NE-



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-Fraktionen der

1. **Status Quo (2023):** Der Betrieb nutzt Erdgas mit einem spezifischen Verbrauch von 19,947 GJ/h und bezieht Strom aus dem Marktmix DE 2023. Sekundärrohstoffe substituieren Primärrohstoffe zu 80 %, der CO_2-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_2-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/duepublico/83603

Elementgehalte in den magnetischen und Nicht-Eisen-Fraktionen 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 €
=	**Kosten pro 1 Tonne aufbereitete MV-Schlacke**	28,22 €	21,83 €	28,32 €
	potenzielle Erlöse aus Produkten	8,94 €	69,27 €	3,40 €
+ Erlös - Kosten =	**Option Aufbereitung der Schlacke: potenzieller Nettoerlös/-kosten**	- **19,28 €**	**47,44 €**	- **24,91 €**
	Option Verwertung der Fertigschlacke	- 25,00 €	- 100,00 €	- 15,00 €
+ Nettoerlös/-kosten - Verwertungsoption =	**Ersparnis durch Aufbereitung**	**5,72 €**	**147,44 €**	- **9,91 €**

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

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

8.2 Papers

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

8.3. Glasses