Stoffstrom-Modell des Forschungsauftrags „SCI4climate.NRW“

Veränderte Reststoffströme im Kontext der Transformation der Stahlindustrie

12. Sitzung der „Interdisziplinären Plattform zur Transformation der Stahlindustrie“
1. Oktober 2026 in Düsseldorf

Valdet Sadiku, VDEh-Betriebsforschungsinstitut

BFI Angewandte Spitzenforschung | VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Stahl

SCI4climate.NRW - Wissenschaftliche Begleitung auf dem Weg zur klimaneutralen Industrie

- **Ziel:**
  Wissenschaftliche Unterstützung der Transformation der energieintensiven Industrie hin zur Klimaneutralität in NRW
- **Fokus:**
  Bewertung von Technologien, Stoffströmen und Wertschöpfungsketten entlang zukünftiger industrieller Produktionssysteme
- **Beitrag des BFI:**
  Untersuchung der Transformation der Stahlindustrie und ihrer Auswirkungen auf Rohstoff-, Kohlenstoff- und Reststoffströme
- **Mehrwert:**
  Frühzeitige Identifikation von Veränderungen und neuen Potenzialen für industrielle Wertschöpfung und Kreislaufwirtschaft

Veränderungen der Stoffstromstruktur durch die Transformation

Heutige Referenzroute:
Klassische Hochofenroute

BF	→	HMD	→	BOF
Hochofen		*Roheisenentschwefelung*		*Konverter*

Zukünftige Transformationsrouten:
Direktreduktion-Einschmelzer-Route

DR	→	ESF	→	BOF
Direktreduktion		*Elektroreduktionsofen/ Einschmelzer*		*Konverter*

oder

Direktreduktion-Elektrolichtbogenofen-Route

DR	→	EAF
Direktreduktion		*Elektrolichtbogenofen*

Die Transformation verändert

- die Entstehung und Mengen metallurgischer Reststoffe
- deren Zusammensetzung
- die Verteilung kritischer Elemente
- die Voraussetzung für Rückführung und Verwertung

Betrachtete Prozessrouten und Systemgrenzen

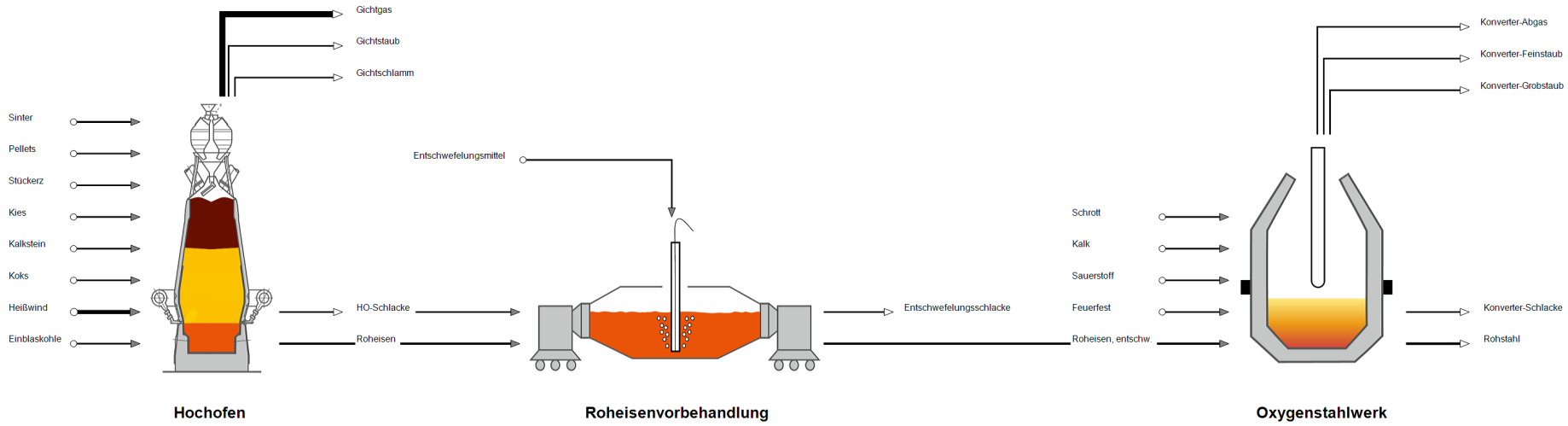
Referenz BF-HMD-BOF	Transformation 1 DR-ESF-BOF	Transformation 2 DR-EAF
Hochofen	Direktreduktion	Direktreduktion
Roheisenentschwefelung	Elektroreduktionsofen	Elektrolichtbogenofen
Konverter	Konverter	

Untersuchungsrahmen

- Nordrhein-Westfalen im Vergleich zu Deutschland
- Referenzjahr 2019 bzgl. Stahlerzeugungsmengen
- Funktionale Einheit: 1 t Rohstahl (tRS)
- Stoffstrom-Bilanzierung der Referenz- und Transformationsrouten der Primärstahlerzeugung
- Zusätzliche Betrachtung der schrottbasierten EAF-Produktion

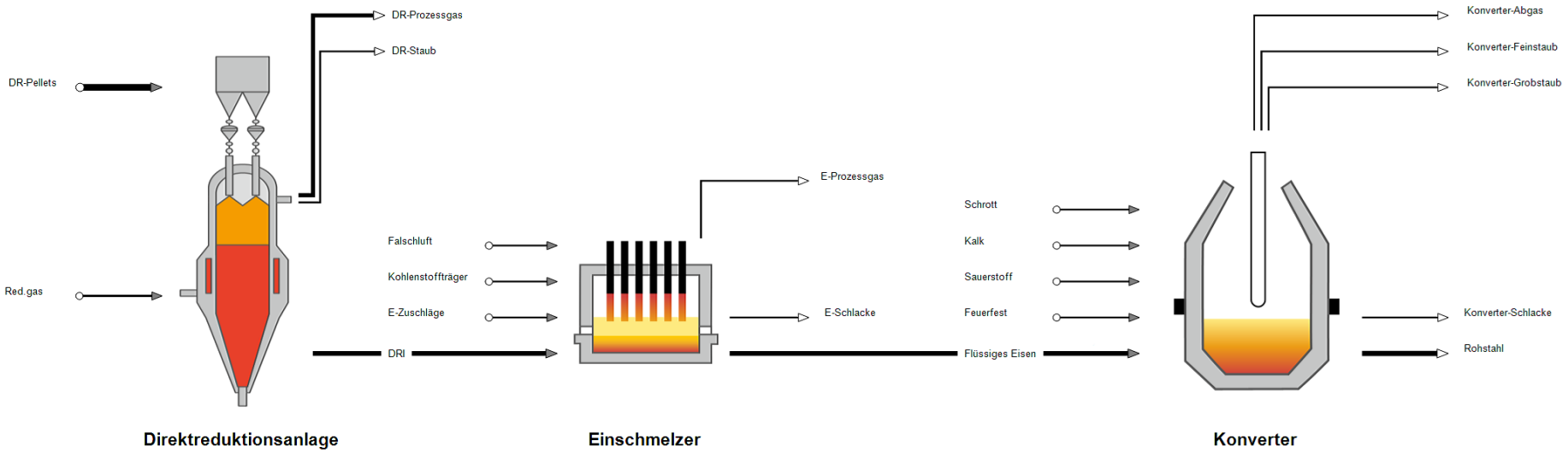
Prozess- und stoffstrombasierte Modellierung

Flowsheet-Modell: BF-HMD-BOF



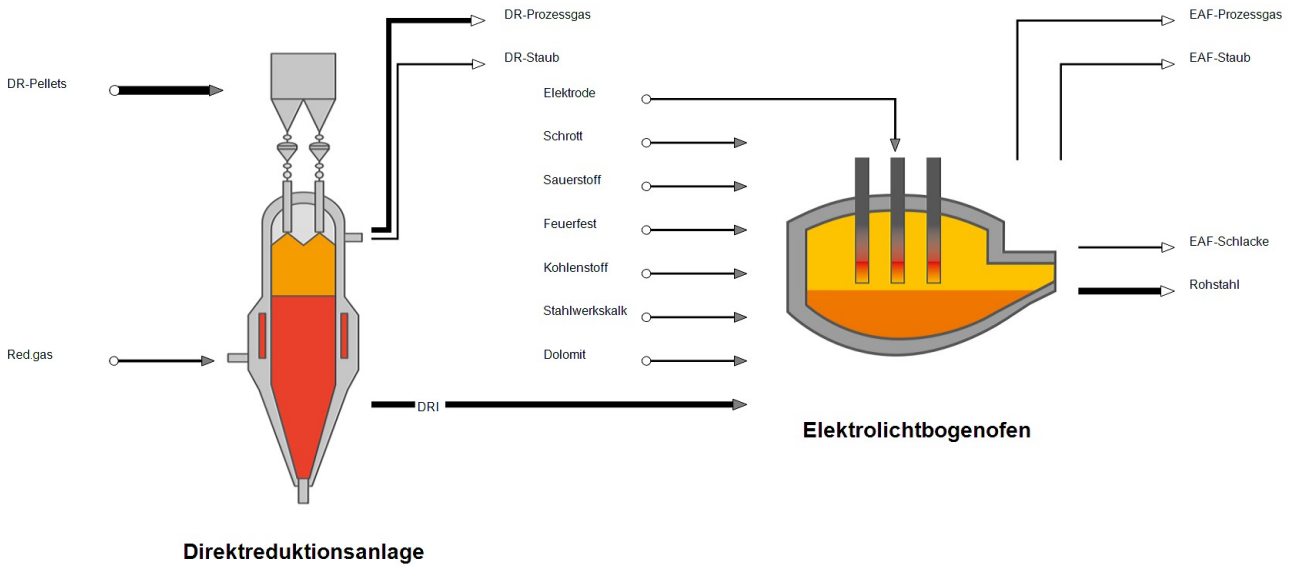
Prozess- und stoffstrombasierte Modellierung

Flowsheet-Modell: DR-ESF-BOF



Prozess- und stoffstrombasierte Modellierung

Flowsheet-Modell: DR-EAF



Ausgewählte kritische Elemente als Bewertungsgrößen

Elemente	Prozessroute (aktuell)	Eintrag	Austrag
S, P	BF-HMD-BOF	Kohle/Koks (dominant bei S), Eisenerz (dominant bei P)	Roheisen, BF-Schlacke, HMD-Schlacke, BOF-Schlacke, Rohstahl
	EAF	Schrott, C-Träger, Zuschläge	EAF-Schlacke, Rohstahl
Zn, Pb	BF-HMD-BOF	Möller, Konverterschrott	Gichtstaub u. -schlamm, BOF-Staub u. -schlamm
	EAF	Verzinkter Schrott	EAF-Staub
K, Na	BF-HMD-BOF	Möller	Gichtstaub u. -schlamm, HMD-Schlacke, BOF-Staub u. -Schlamm
	EAF	Schrott, Kunststoffe etc.	EAF-Staub

- Auswahl relevanter Elemente auf Basis von Prozessrelevanz und Datenverfügbarkeit
- Quantitative Stoffstrombewertung auf Basis belastbarer Literaturdaten
- Begrenzte Bewertbarkeit einzelner Elemente aufgrund von Datenlücken

Verteilung kritischer Elemente im Vergleich der Prozessrouten

Element	BF-HMD-BOF	DR-ESF-BOF	DR-EAF
S	100 % BF-/HMD-Schlacke	69 % ESF-Schlacke	99 % Rohstahl
P	67 % BOF-Schlacke	67 % BOF-Schlacke	90 % Rohstahl
Zn	100 % Gichtstaub/-schlamm	100 % BOF-Feinstaub	100 % EAF-Staub
Pb	100 % Gichtstaub/-schlamm	-	-
K	90 % BF-Schlacke	100 % ESF-Schlacke	-
Na	80 % BF-Schlacke	100 % ESF-Schlacke	-

- **DR-ESF-BOF:**
  ESF-Schlacke übernimmt mehrere Austragsfunktionen → S, Na und K werden dort gebündelt
- **DR-EAF:**
  S und P verbleiben überwiegend im Rohstahl → 99 % S und 90 % P
- **Alle Routen:**
  Zn wird über die Gasreinigung ausgeschleust → Gichtstaub/-schlamm, BOF-Feinstaub, EAF-Staub

Transformation verändert die Reststoffmengen

Produkt bzw. Reststoff	Mengen für NRW [Mio. t/a]				Mengen für D [Mio. t/a]			
	BF-HMD-BOF	DR-ESF-BOF	DR-EAF	Differenz heute - morgen	BF-HMD-BOF	DR-ESF-BOF	DR-EAF	Differenz heute - morgen
Σ Stäube & Schlämme	0,76	0,24	0,15	-0,37	1,52	0,24	0,50	-0,77
Σ Schlacken	4,76	0,93	0,63	-3,20	9,39	0,93	2,20	-6,25
Σ Zinkhaltiger, verwertungskritischer Reststoffe < 4 Gew.-% Zn	0,40	0,10	0,11	-0,19	0,80	0,10	0,38	-0,32
Σ Schlacken zur Nutzung in der Zementindustrie, (analog) Hüttensand	2,94	0,38	0	-2,56	5,80	0,38	0	-5,42
Σ Schlacken zur Nutzung in der Bauindustrie	1,53	0,55	0,63	-0,35	3,02	0,55	2,20	-0,26

51 % weniger **Stäube & Schlämme**

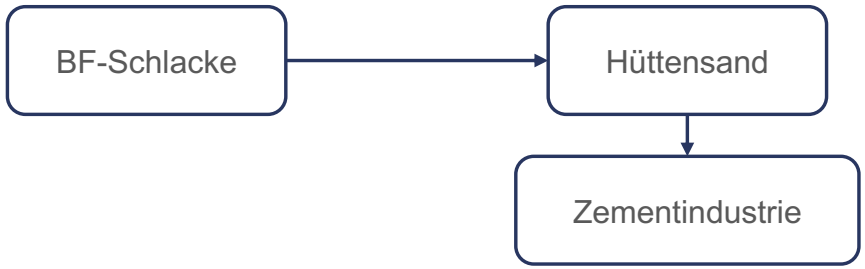
67 % weniger **Schlacken**

93 % weniger **zementrelevante Schlacken**

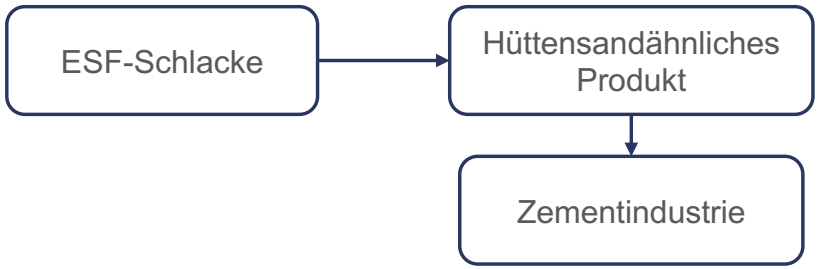
↓ **Hochofenbasierte Reststoffe:**
Rückgang eines heute wichtigen Stoffstroms für die Zementindustrie

↑ **EAF-basierte Reststoffe:**
Zunehmende Bedeutung, insbesondere von Schlacken

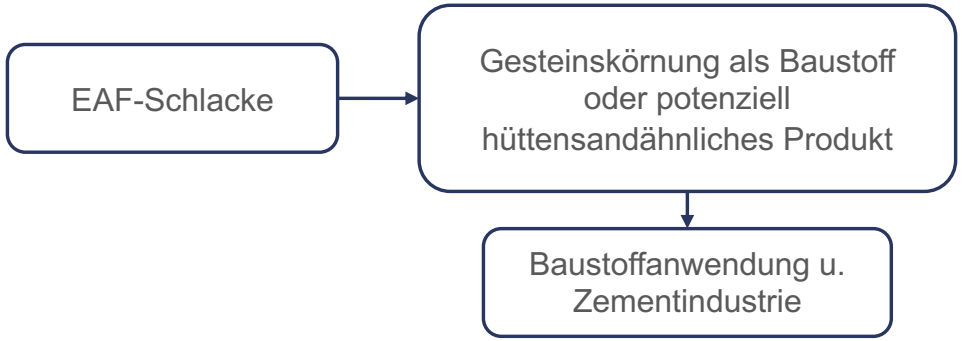
Veränderte Reststoffe – veränderte Verwertungsbedingungen



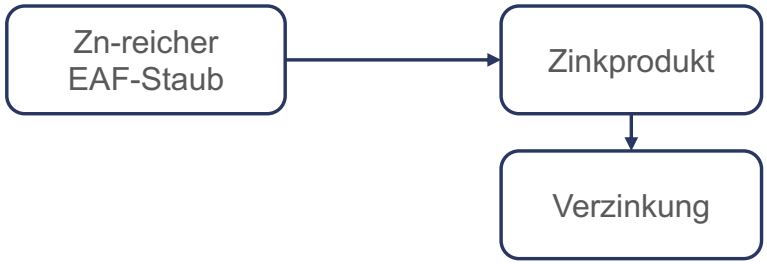
→ **Rückgang eines etablierten Sekundärrohstoffs**



→ **Qualifizierung erforderlich**



→ **Anzupassende Additivierung im Schmelzprozess**



→ **Behandlung / Zn-Rückgewinnung**

Grundlegende Veränderungen der Reststofflandschaft

1. **Rückgang des Reststoffaufkommens**
   Deutliche Reduzierung der Reststoffmengen
   insbesondere bei hochofenbasierten Reststoffen
2. **Veränderung der Stoffstromstruktur**
   Verlagerung der Austragspfade kritischer Elemente
   von mehreren spezialisierten Reststoffströmen hin zu konzentrierten bzw. veränderten Austragspfaden
3. **Verlust etablierter Verwertungswege**
   Deutlicher Rückgang der BF-Schlacke
   und damit der Verfügbarkeit von Hüttensand als etabliertem Sekundärrohstoff für die Zementindustrie
4. **Entwicklung neuer Verwertungskonzepte**
   Zunehmende Bedeutung von ESF- und EAF-Schlacken
   und Erfordernis ihrer Qualifizierung für zukünftige stoffliche Nutzungen

SCI4climate.NRW – Nächste Schritte

Transformationspfade

- Abbildung realer Übergangs- und Zwischenzustände
- Bewertung schrittweiser Transformationspfade
- Entscheidungsbasis für zukünftige Produktionsstrukturen

Modell-Erweiterung

- Präzisierung von Kohlenstoffbedarf und Prozessgasmengen
- Erweiterung um Gasphasen und Prozessgase

Sensitivität & Einsatzstoffe

- Einflussgrößen und Bandbreiten kritischer Stoffströme
- Eisenträgerqualitäten und Reststoffanteile
- Schrottverfügbarkeit und Aufbereitungsbedarf

Reststoffnutzung & Sektorkopplung

- Bewertung von Mengen, Qualitäten und Recyclingfähigkeit
- Identifikation verbleibender, schwierig verwertbarer Reststoffe
- Additiv-/Bindemittelbedarf und Auswirkung auf Zement- und Baustoffsektor

Kontakt: M.Sc. Valdet Sadiku
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf
Telefon +49 98492-218 · Fax +49 211 98492-202
E-Mail valdet.sadiku@bfi.de · www.bfi.de

BFI Angewandte Spitzenforschung | VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Stahl