

CO₂-Minderung und Energieeffizienz (Teil 2)



DR-Versuchsanlage und DRI-Einschmelzer

Dipl.-Ing. Roland Pietruck, M. Eng. Daniel Adolphy, Dr. Daniel Schubert (tkSE)

BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: CO₂-Minderung und Energieeffizienz



- › Strategie der Transformation bei tkSE
- › Nachhaltigkeitszentrum am Standort Matenastrasse/Alsumerstrasse
- › Vorstellung der Pilotanlagen zur Transformation
 - › DRVA (H2-Stahl, BMW)
 - › DRI-Einschmelzer (MWIKE)
- › Zusammenfassung und Ausblick
- › Zeitraffervideo

Transformation der Stahlproduktion

Unser Beitrag zur Klimaneutralität

29.04.2026 | Dr. Daniel Schubert | Düsseldorf
thyssenkrupp Steel Europe AG

tkH₂Steel

engineering.tomorrow.together.



thyssenkrupp

thyssenkrupp Steel übernimmt Verantwortung und hat sich klare Ziele gesetzt

Unser Ziel bis zum Jahr 2030¹
(außerhalb SBTi-Validierung)

>30%

Unser Ziel bis zum Jahr 2032²
(SBTi-konform)

-38%

Unser Ziel spätestens 2045³
(SBTi-konform)

Net-Zero

THG-Emissionen in der
gesamten Wertschöpfungskette



1. -30 % CO₂-Emissionen im Jahr 2030 bezieht sich auf die absoluten Scope 1 und Scope 2 Emissionen (Referenzjahr 2018) – Zielfestlegung außerhalb SBTi-Validierung; 2. Beinhaltet eine Verringerung der THG-Emissionen in Scope 1, 2 und 3, die unter die Kerngrenze der Eisen- und Stahlindustrie fallen, um 38 % pro Tonne warmgewalzten Stahls bis 2032 gegenüber dem Basisjahr 2018 sowie eine Verringerung aller anderen THG-Emissionen in Scope 1 und 2 um 58,8 % und aller anderen THG-Emissionen in Scope 3 um 35 % innerhalb des gleichen Zeitraums (pro Tonne Warmband); 3. - 93 % absolute Reduzierung in Scope 1, 2 und 3 (pro Tonne Warmband).



Bau der größten deutschen Direktreduktionsanlage für CO₂-armen Stahl tkH₂Steel

thyssenkrupp bekräftigt führende Rolle bei Dekarbonisierung der Stahlindustrie

Gefördert durch:
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:
Ministerium für Wirtschaft,
Industrie, Klimaschutz und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



Das **Investitionsvolumen** für den Bau der Anlage am **Standort Duisburg** wird rd. 3 Mrd € umfassen



Die **innovative Technologie** wird in den bestehenden Produktionsprozess eingebunden und ermöglicht die **CO₂-arme Herstellung** des gesamten **Premium-Produktportfolios**



Die Anlage mit einer **Kapazität von 2,5 Mio t** direktreduziertem Eisen wird im Zielbetrieb über **3,5 Mio t CO₂ Emissionen** pro Jahr **einsparen**



2023 Förderzusage: Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz fördert gemeinsam mit dem Land Nordrhein-Westfalen das Dekarbonisierungsprojekt „tkH₂Steel“ mit rund 2 Mrd €.



15.01.2024 Baubeginn: Erhalt des Zulassungsbescheids zum vorzeitigen Baubeginn



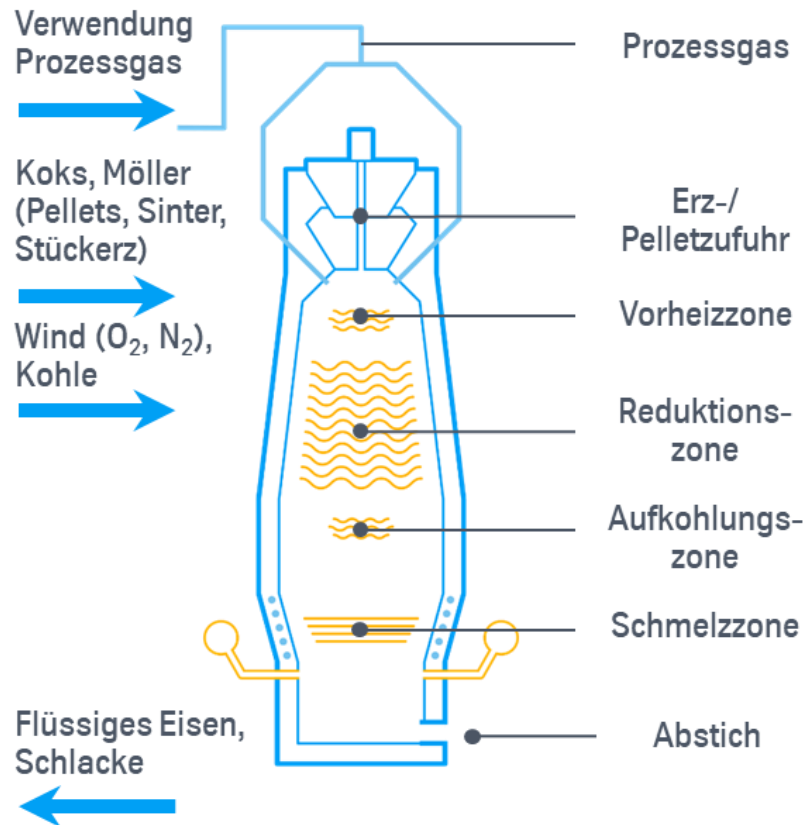
Start des Inbetriebnahmeprozesses **2027**



Ablösung der Hochofentechnologie durch innovative, klimaneutrale Roheisenherstellung

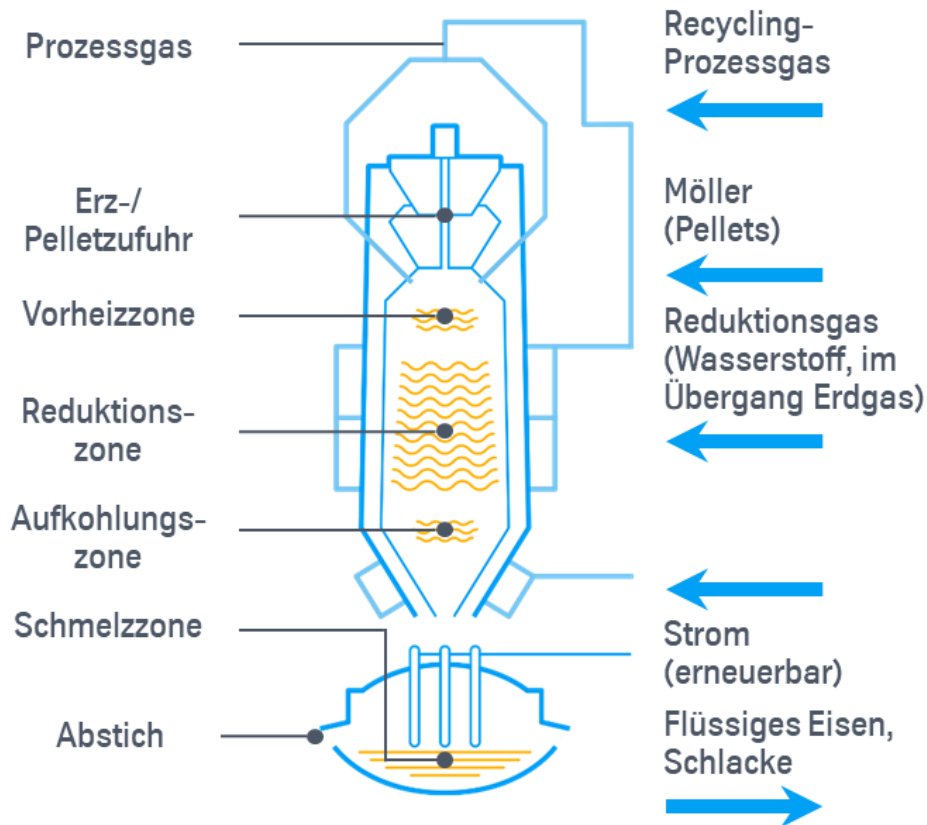
Klassischer Hochofen

Kohlenstoff als Reduktionsmittel und Energieträger



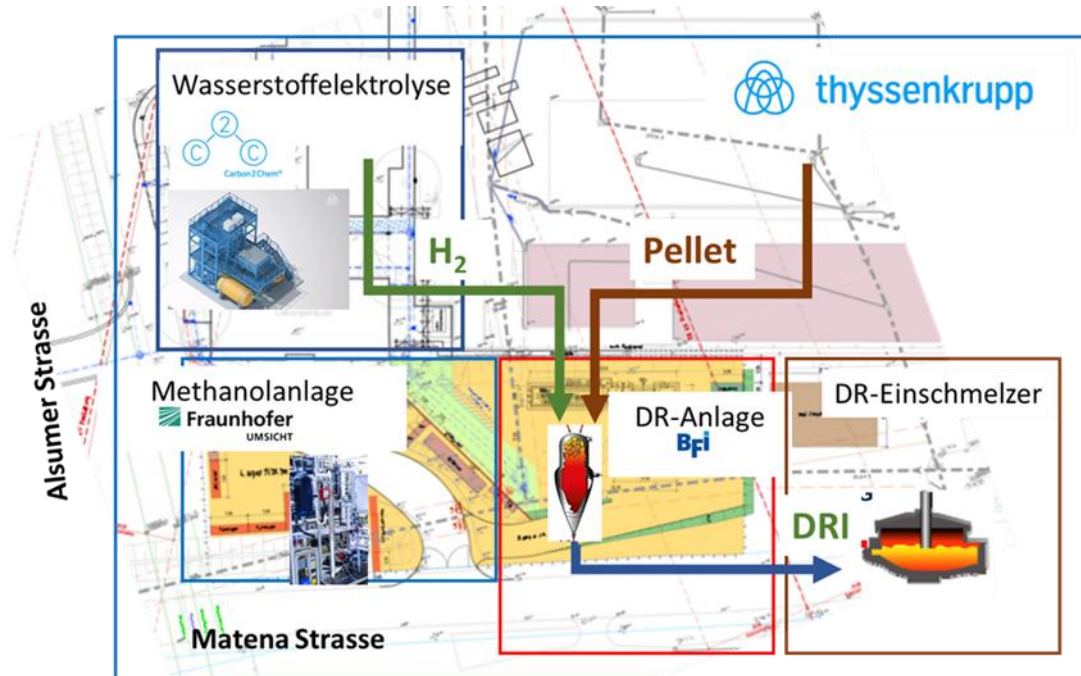
DR-Anlage mit Einschmelzer

Wasserstoff als Reduktionsmittel in DR-Anlage
Grüner Strom als Energieträger im Einschmelzer



tkSE und BFI sind:

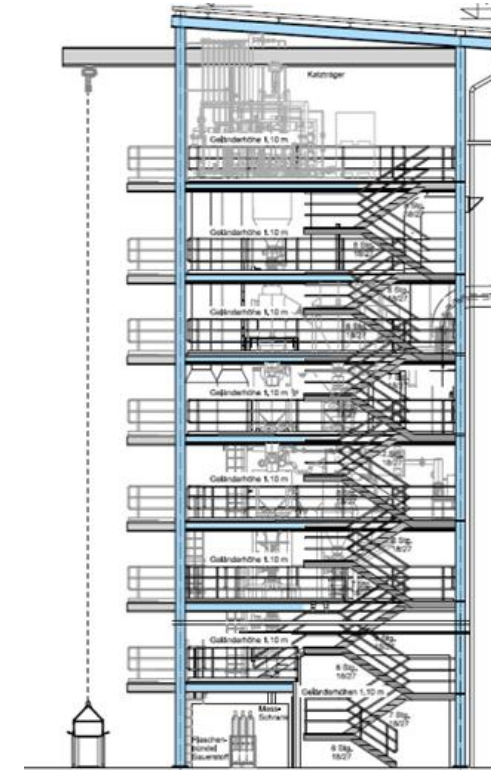
- ein sehr starkes Projektteam aus NRW
- Projektpartner in unmittelbarer Nähe des größten Stahlstandortes in Europa
- Vorreiter für die Dekarbonisierung der Stahlbranche
- **Portfolio:** Produktion von grünem Qualitätsflachstahl für alle Anwendungsbranchen mit vollem Produkt- und Gütenportfolio möglich
- **Qualität:** Weiterhin höchste Qualitäten in Bezug auf Umformbarkeit und Festigkeiten, Oberflächen- und elektromagnetische Eigenschaften
- **Prozesssicherheit:** Alle etablierten Produktionsprozesse ab Stahlwerk bleiben bestehen. Etablierte Gütenkonzepte müssen nicht geändert werden, Stabilität in Produktions- und Zulassungsprozessen



- › Die DR-Versuchsanlage ist in das Nachhaltigkeitszentrum integriert, das aus einer Elektrolyseanlage (zur Wasserstofferzeugung), einer Methanolanlage und einem DRI-Einschmelzer besteht
- › Unmittelbare Nachbarschaft zum tkSE-Stahlwerk in Duisburg

DR-Versuchsanlage

- › Im Real-Labor „H2Stahl“ wird eine **Versuchsanlage zur Direktreduktion** entwickelt, aufgebaut und in Versuchskampagnen betrieben
- › Gefördert durch das **BMWE**
- › Das Forschungsprojekt wird vom Koordinator, der **VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (BFI)**, in enger Zusammenarbeit mit der **thyssenkrupp Steel Europe AG** bearbeitet
- › Die Versuchsanlage wird von der **TS Elino GmbH**, Düren, in Zusammenarbeit mit BFI und tkSE entwickelt und gebaut
- › Laufzeit bis Ende 2028



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ziele H2-Stahl

- › Transformation der Roheisenerzeugung vom Hochofen in Richtung H₂-basierter Direktreduktion
- › Erzeugung eines direkt reduzierten Eisens (DRI) in einer speziell errichteten Direktreduktionsversuchsanlage (DRVA)
- › Recycling von Hüttenreststoffe in der DRVA
- › Einbindung in IN4climate.NRW zur Entwicklungsperspektiven in NRW als bedeutender Industriestandort der energieintensiven Grundstoffprozesse in den Arbeitsgruppen Wasserstoff, Kohlendioxidwirtschaft und Circular Economy
- › Erfahrung im Anlagenbetrieb
- › Erarbeitung von Sicherheitskonzepten

DR-Versuchsanlage - Projektumfang

- › DRVA
 - › Ausschreibung/Vergabe
 - › Basic- und Detailengineering
 - › Ausführungsplanung
 - › Bau
 - › Inbetriebnahme
 - › Betriebskampagnen im Mehrschichtbetrieb
 - › Auswertung und Berichterstattung
- › Sonderuntersuchungen im Technikum des BFI zur Begleitung der Betriebskampagnen
- › Simulationen und Modellberechnungen zur Abbildung der strömungstechnischen Effekte und Reaktionen im Pellet und zur thermodynamischen Abbildung des Schachtreaktors der DR-Versuchsanlage

DR-Versuchsanlage – 3D Layout

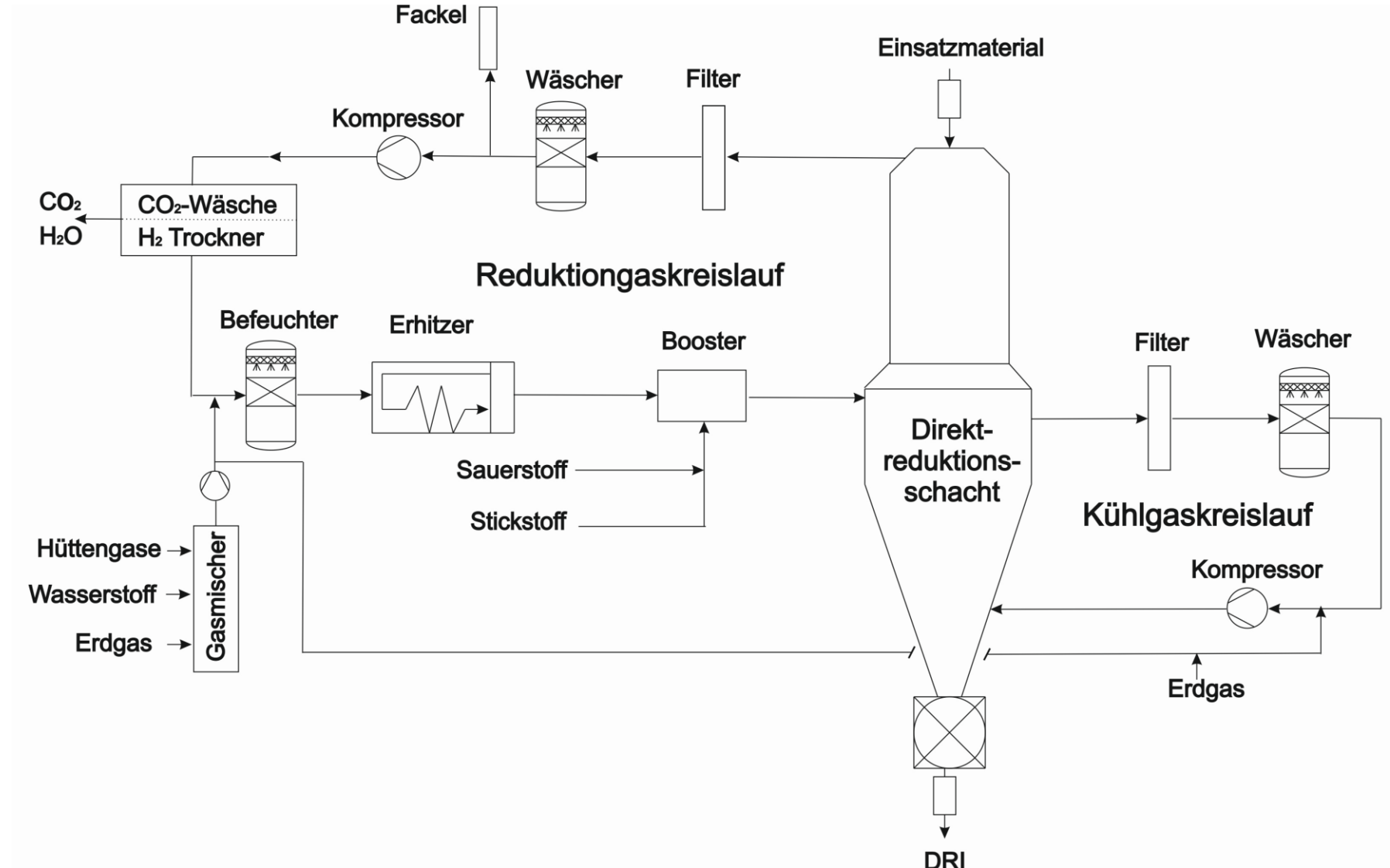


	DR Versuchsanlage
DRI Produkt	ca. 100 kg/h
Reduktionsgas	ca. 350 Nm ³ /h
Gastemperatur Gasdruck	< 1050 °C < 4.5 bar
Einsatzmaterial	Pellets (DR, HO) Stückerz Reststoffe
Feedgas	Wasserstoff Erdgas Koksofengas Konvertergas Gas-Mischungen

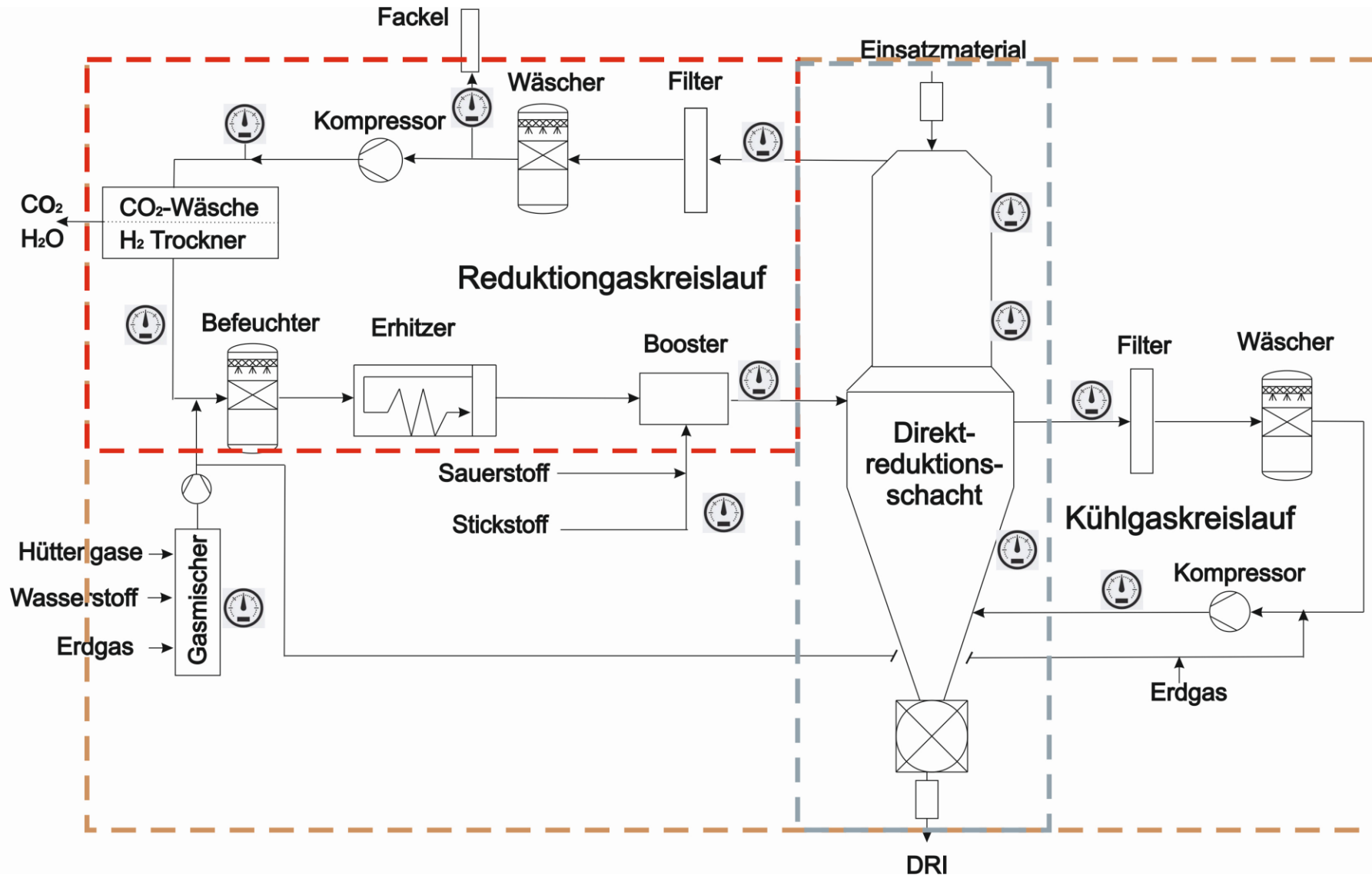
DR-Versuchsanlage - Wissenschaftliche Fragestellungen

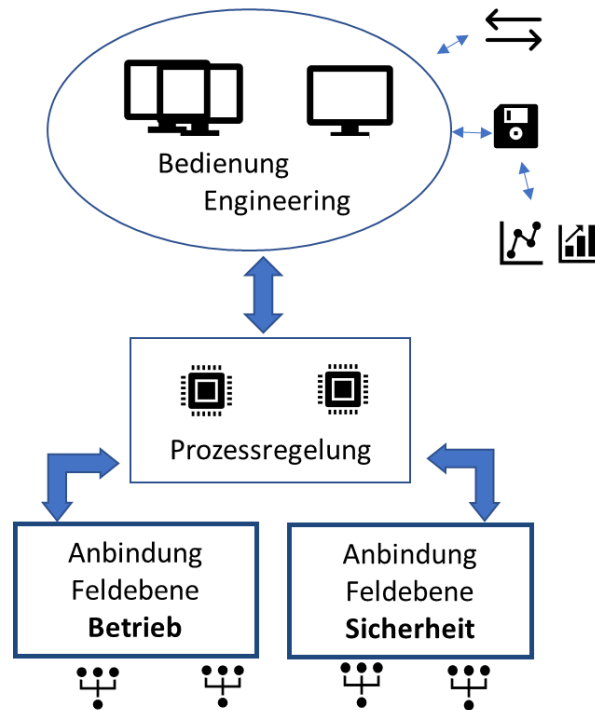
- › Erzielbare CO₂ Minderung in Anhängigkeit von Betriebsweisen und Einsatzstoffen
- › Bewertung der Reduktion/Aufkohlung von Eisenträgern in der DRVA
 - › Erzqualität/Erzträger
 - › Feedgasen
 - › Prozessparametern
- › Bewertung des Gasaufbereitung und Konditionierung
- › Verschleiß - Feuerfest-Verhalten in H₂ reicher Atmosphäre
- › Energie- und Stoffbilanzierung - Prozessoptimierung
- › Recycling von Reststoffen (Circular Economy)
- › Flexibilität des Prozesses hinsichtlich schwankender Medienversorgung

DR-Versuchsanlage - Prozessfließschema



DR-Versuchsanlage - Bilanzierung





- › Steuerung der DR-Versuchsanlage (SPS)
- › Datenerfassung (SPS)
- › Datenmanagement (Datenerfassungssystem)
 - › Aufbereitung
 - › Auswerten
 - › Berechnungen, Reporting
- › SPS als Teil der Sicherheitsmatrix

DRI-Einschmelzer

- › Im Projekt „DRI-Einschmelzer“ wird im Rahmen des proges.nrw Programms eine **Versuchsanlage zur Erzeugung von Roheisen aus DRI** entworfen, aufgebaut und Untersuchungen durchgeführt
- › Gefördert durch das **MWIKE**
- › Das Forschungsprojekt wird vom wissenschaftlichen Koordinator, der **VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (BFI)**, in enger Zusammenarbeit mit der **thyssenkrupp Steel Europe AG** bearbeitet
- › Bau einer DRI-Einschmelzer Pilotanlage als nachgeschaltete Stufe der DR-Versuchsanlage (Reallabor H2Stahl)
- › Die Versuchsanlage wird von der Grenzebach Maschinenbau GmbH, in Zusammenarbeit mit Bluemetals GmbH entwickelt und gebaut



pti projektträger
jülich

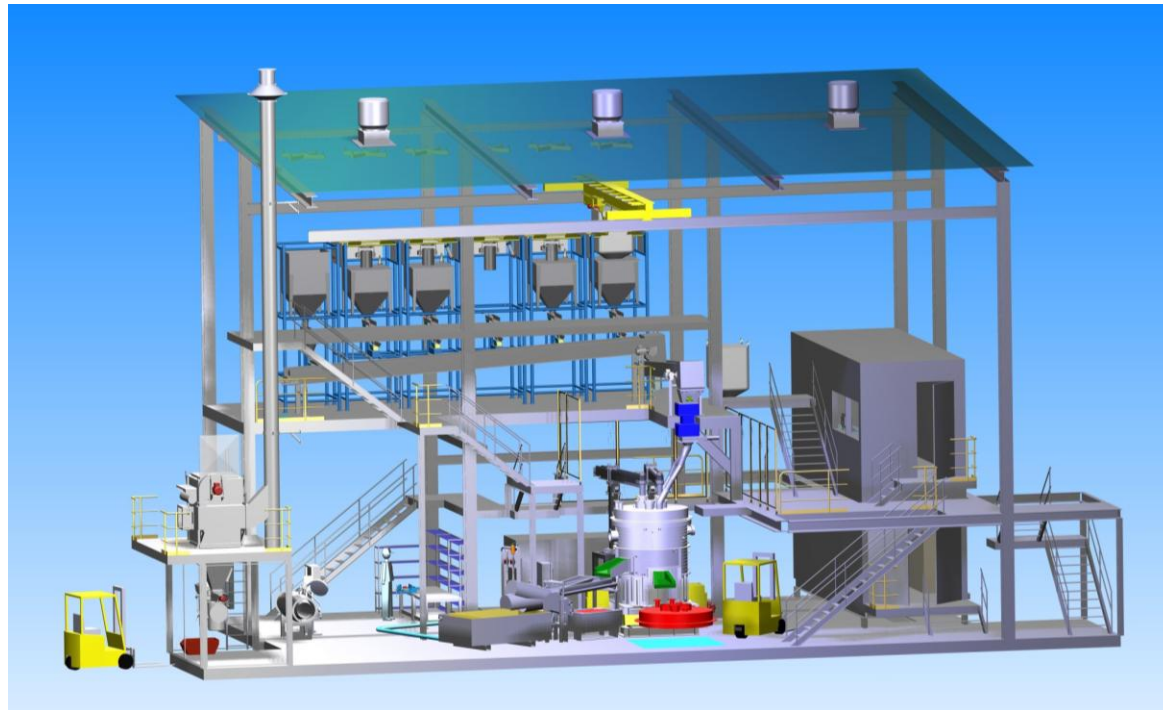
DRI-Einschmelzer - Ziele

- › Transformation der Roheisenerzeugung vom Hochofen in Richtung H₂-basierter Direktreduktion
- › Erzeugung eines hochofenähnlichen Roheisens aus dem direkt reduzierten Eisen (DRI) in einem speziell angepassten Elektroofen (DRI-Einschmelzer)
 - › Zielprodukt: Hochofenähnliches Roheisen für die Weiterverarbeitung in der Konverter-Route
 - › Nebenprodukt: Speziell angepasstes Schlackenprodukt als Ersatz für Hochofenschlacke (Hüttensand) in der Zementindustrie
- › Untersuchung des Einschmelzprozesses des erzeugten Eisenschwamms (DRI)
- › Recycling von Hüttenreststoffen (Stäube, Walzzunder) zur Förderung der Kreislaufwirtschaft

DRI-Einschmelzer - Projektumfang

- › Basic- und Detailengineering
- › Ausführungsplanung
- › Genehmigungsverfahren
- › Bau
- › Inbetriebnahme
- › Betriebskampagnen im Mehrschichtbetrieb
- › Auswertung und Berichterstattung
- › Sonderuntersuchungen im BFI-Technikum zur gezielten Unterstützung der Pilotversuche
- › Erarbeitung eines Verfahrenskonzeptes für eine Produktionsanlage
- › Simulationen und Modellrechnungen zur Abbildung der Reaktionen im DRI-Einschmelzer

DRI-Einschmelzer - Anlagenübersicht

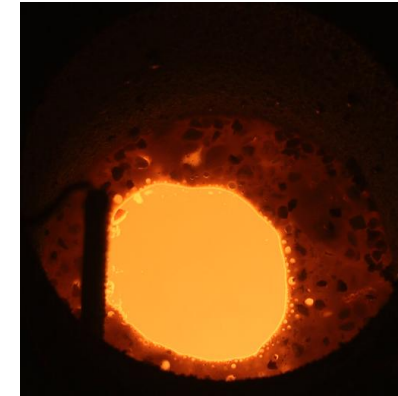
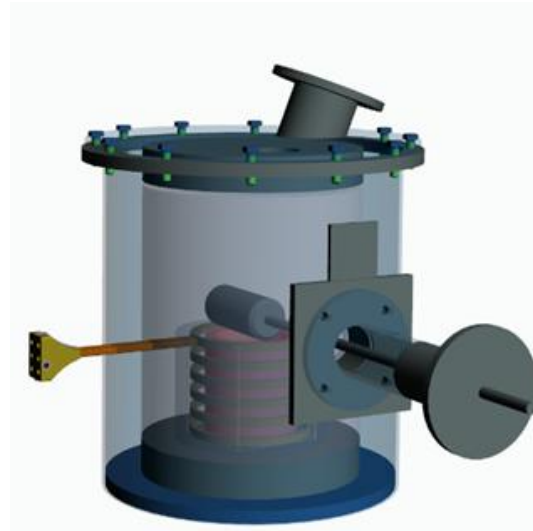
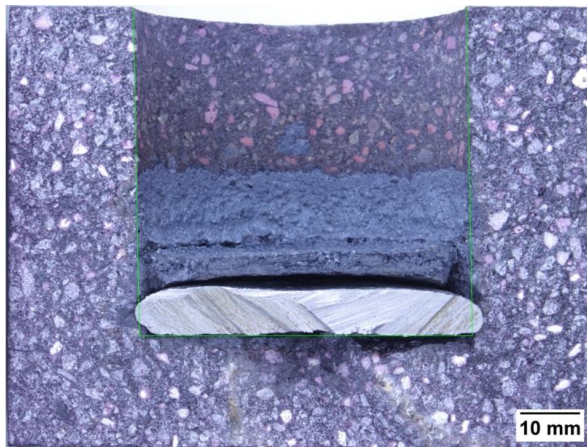


	DRI-Einschmelzer
Maße	Ofen außen Ø 2 m x 4 m Ofen innen Ø 0,9 m x 0,7 m
Leistung	~130 kW
Elektroden	Zwei Top-Elektroden Oder eine Top-Elektrode + Bodenelektrode
Einsatzmaterial	DRI / H-DRI Hüttenreststoffe Kohlenstoffträger (z.B. biogen) Kohlenstoffhaltige Reststoffe
Schmelzleistung	ca. 100 kg/h, maximal 200 kg/h
Produkt	Hochofenähnliches Roheisen
Nebenprodukt	Hütten sand
Abstiche	Roheisen Stündlich Schlacke alle 4 Stunden

- › **Schmelzverhalten des Eisenschwamms** aus der Direktreduktionsanlage bei verschiedenen Bedingungen und Erzqualitäten
- › **Optimierung der Eisenzusammensetzung** für nachfolgende Prozesse
- › **Konditionierung und Granulation der Schlacke** zur Substitution von Hochofenschlacke in der Bau- und Zementindustrie
- › **Bewertung von Gasentwicklung, Reinigung und Verwertung** der Prozessgase sowie Möglichkeiten zur CO₂-Abtrennung und -Nutzung
- › **Verhalten der Feuerfestmaterialien sowie der Elektroden** unter thermischer und chemischer Belastung
- › **Energie- und Stoffströme im Prozess** sowie Potenziale zur Effizienzsteigerung und energetischen Optimierung
- › **Recycling und Wiederverwertung von Nebenprodukten** durch gezielte Reduktion

DRI-Einschmelzer - Sonderuntersuchungen

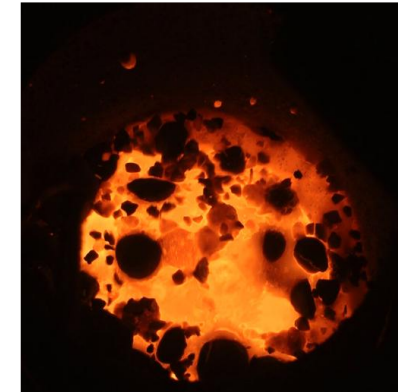
- › Ergänzende Versuche zu den geplanten und laufenden Pilotversuchen
 - › Feuerfestverhalten
 - › Einschmelzverhalten



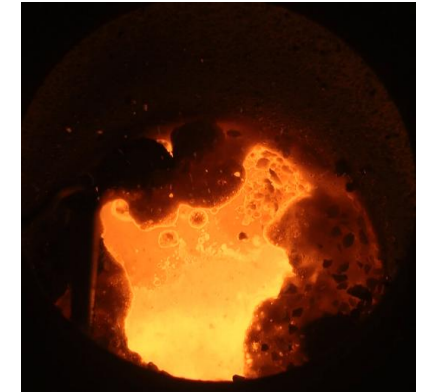
(a)



(b)

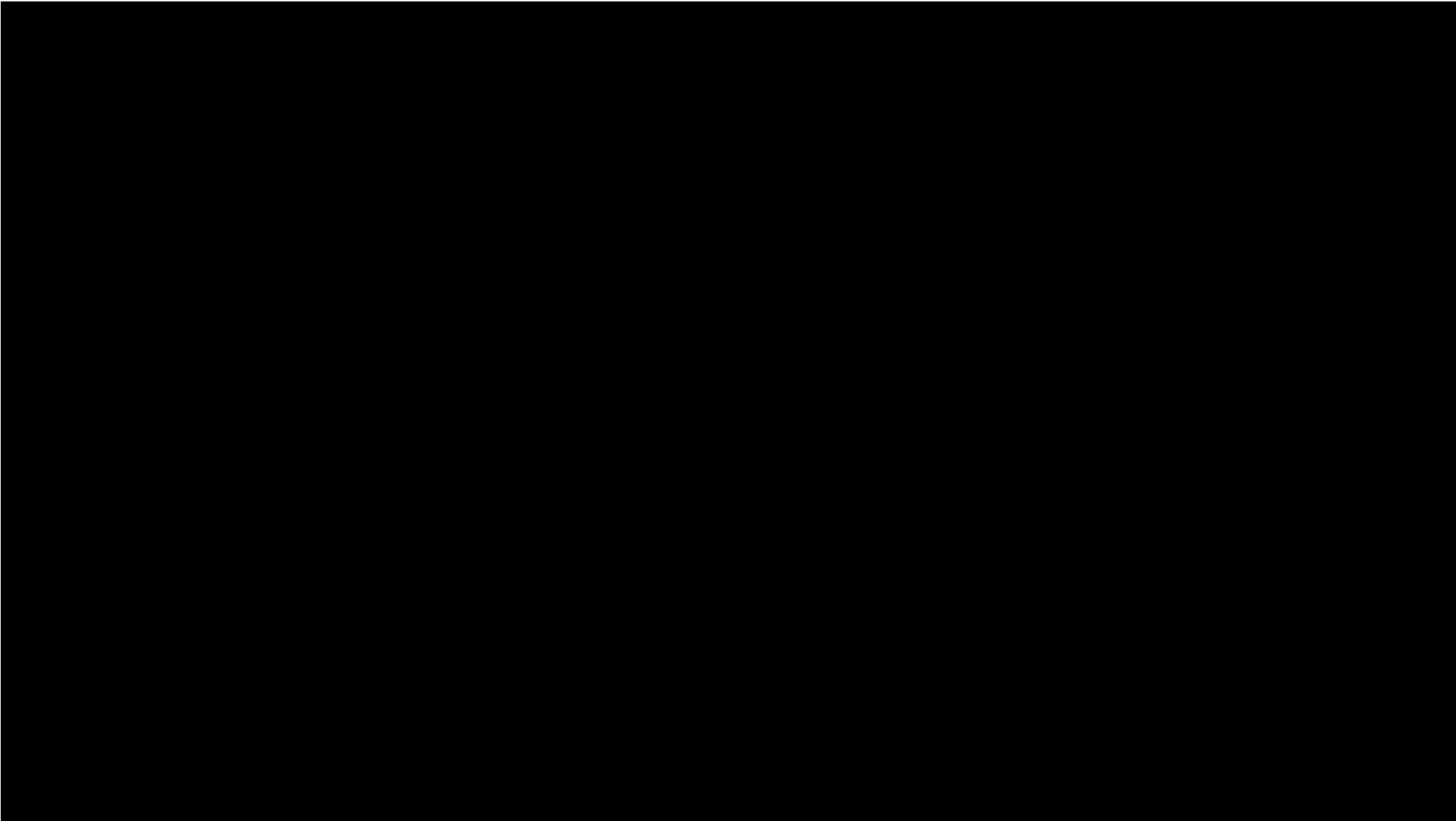


(c)



(d)

- › Der Transformationspfad für erhebliche CO₂-Einsparungen in der Stahlindustrie wurde beschrieben
- › Die neuen Versuchsanlagen sind in das Nachhaltigkeitszentrum integriert
- › Der Bau beider Anlagen läuft aktuell nach Plan
- › Die Inbetriebnahme der DRVA ist für Frühjahr 2027 geplant
- › Die Inbetriebnahme des DRI-Einschmelzers ist für Herbst 2026 geplant
- › Zusätzlich werden im Technikum des BFI in Düsseldorf spezielle Untersuchungen durchgeführt
- › Es werden Simulationen und Modellberechnungen durchgeführt, um die strömungstechnischen Effekte und Reaktionen im Schachtreaktor der DRVA abzubilden
- › Umfangreiche Erfahrungen für den Betrieb der geplanten Großanlage bei tkSE in Duisburg werden im Rahmen beider Projekte gesammelt



Kontakt: Dipl.-Ing. Roland Pietruck

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf

Telefon +49 98492-891

E-Mail Roland.Pietruck@bfi.de · www.bfi.de

E-Mail Roland.Pietruck@bfi.de · www.bfi.de

Telefon +49 98492-891

Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Κontak: Dipl.-Ing. Roland Pietruck

Kontakt: M. Eng. Daniel Adolphy

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf

Telefon +49 98492-356

E-Mail Daniel.Adolphy@bfi.de · www.bfi.de

E-Mail Daniel.Adolphy@bfi.de · www.bfi.de

Telefon +49 98492-356

Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Κontak: M. Eng. Daniel Adolphy

Kontakt: Dr. Daniel Schubert (tkSE)

thyssenkrupp Steel Europe AG

Leitung – Versuchsanlagen Transformation

Competence Center Metallurgy – Sustainable Steel Produktion –

Versuchsanlagen Transformation

E-Mail daniel.schubert@thyssenkrupp-steel.com

E-Mail daniel.schubert@thyssenkrupp-steel.com

Versuchsanlagen Transformation

Competence Center Metallurgy – Sustainable Steel Produktion –

Leitung – Versuchsanlagen Transformation

thyssenkrupp Steel Europe AG

Κontak: Dr. Daniel Schubert (tkSE)

Analysemethoden zur Porositätsbestimmung von Eisenoxidpellets

Alexa Kala

BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: CO₂-Minderung und Energieeffizienz



Porenbildung

- › während der Pelletierung und der anschließenden thermischen Härtung
- › Beeinflusst vor allem durch Gangartanteil, Partikelgröße und Zusatzstoffe

Einfluss der Porosität

- › Reduktionskinetik während der Direktreduktion
 - › Erhöhte Porosität führt zu mehr Fläche für Gas-Feststoff-Reaktion
 - › Mechanische Festigkeit
- › Im folgenden werden zwei physikalische Messmethoden und zwei bildgebende Messmethoden zur Porositätsbestimmung erläutert



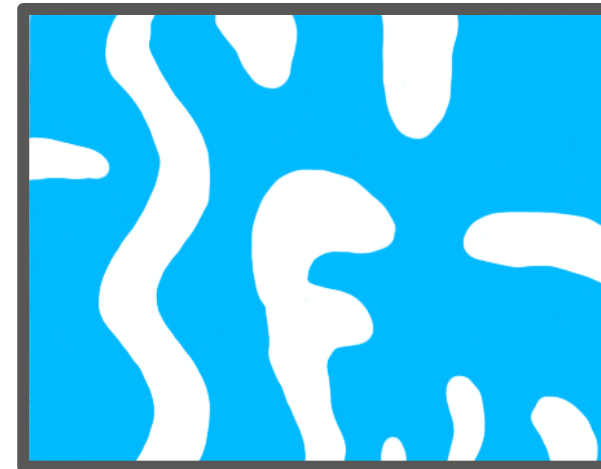
Offene und geschlossene Porosität

Geschlossene Porosität



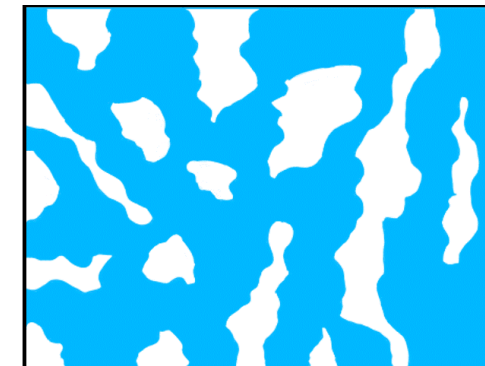
- › Geschlossene Poren sind von der Umgebung isoliert
- › Nur wenige Analysen können die geschlossenen Poren erfassen

Offene Porosität



- › Medien können in offene Poren eindringen
- › Entscheidend für Reduzierbarkeit

- › Offene Poren vergrößern sich während der Reduktion
- › Zuvor geschlossene Poren können sich öffnen
- › Neue Poren werden gebildet



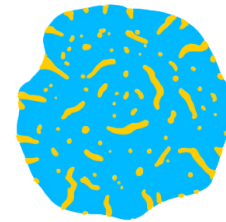
Porositätsbestimmung mittels der Dichtemethode

- › Porosität Φ berechnet sich aus der wahren Dichte ρ und der scheinbaren Dichte/Umschlagsdichte ρ_0



Wahre Dichte ρ
› Alle Poren vom Volumen abgezogen

$$\Phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_0}$$



Scheinbare-/ Umschlagsdichte ρ_0
› Volumen beinhaltet alle Poren

Wahre Dichte

Helium-Gaspyknometer

- › Geschlossene Poren nicht Messbar
- › Für Bestimmung der wahren Dichte muss Pellet zuvor gemahlen werden

Scheinbare Dichte / Umschlagsdichte

Trockene Verdrängung

Flüssigkeitsverdrängung

Beschichtete Verdrängung

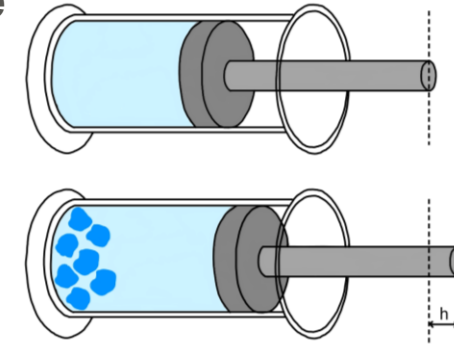
- › Wichtig ist bei der Methode, dass kein Medium in die Poren eindringt

Porositätsbestimmung mittels der Dichtemethode

Methoden zur Bestimmung der scheinbaren Dichte / Umschlagsdichte

Trockene Verdrängung

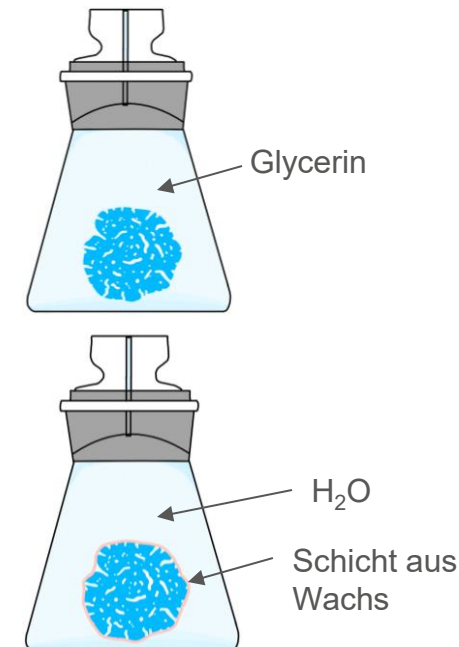
- › Verdrängungsvolumen wird in einem festen Medium gemessen
- › Geeignet für Pelletschüttungen
- › Zerstörungsfrei



Quelle: nach
<https://micromeritics.com/de/products/geopyc/#request-info>

Flüssigkeitsverdrängung

- › Mittels Pyknometer nach Hubbard
- › Medium: Wasser x, Ethanol x, Glycerin ✓
- › Geeignet für einzelne Pellets
- › Zerstörend



Beschichtete Verdrängung (ASTM C 914)

- › Durchführung gleich wie Flüssigkeitsverdrängung
- › Pellet wird zuvor mit Wachs beschichtet und in Wasser gemessen



Quelle: <https://micromeritics.com/de/porosimetry/>

Funktionsweise:

- › Quecksilber dringt mittels Drucks in die Poren des Pellets ein
- › Aus aufgebrachten Druck und Hg-Volumen können Porosität und Porengrößenverteilung sowie Skelett- und Umschlagsdichte bestimmt werden

Einschränkungen

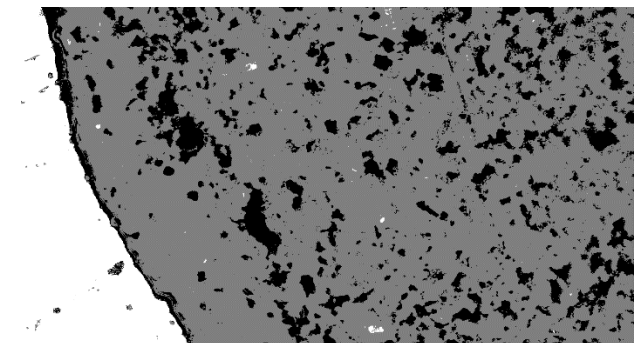
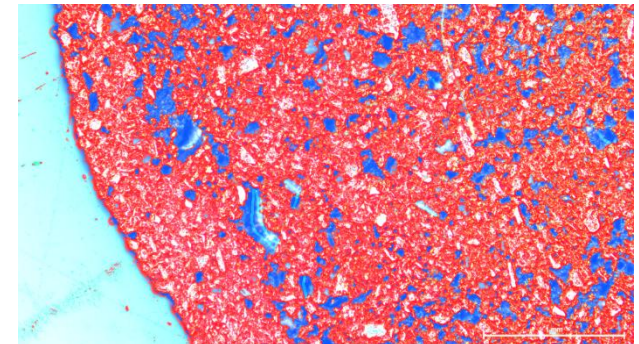
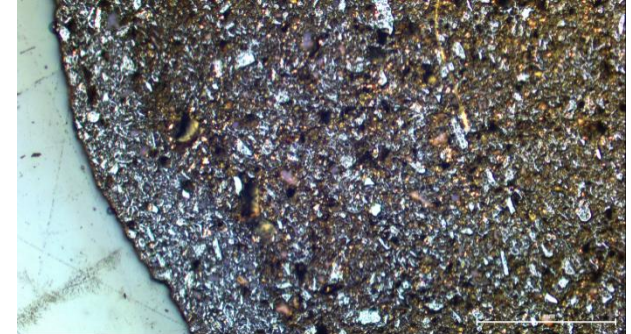
- › Nur offene Porosität messbar
- › Porenform nicht messbar
- › Penetrometer meist zu klein für Messung ganzer Pellets
 - › Brechen der Pellets nötig

Funktionsweise:

- › Das Pellet muss in der Mitte getrennt werden und ein metallographischer Schliff angefertigt werden
- › Von dem Pellet werden unter einem Lichtmikroskop oder einem REM, Bilder aufgenommen
- › Die Bilder werden mittels Bildanalyseprogrammen hinsichtlich Porosität, Porengröße und –form ausgewertet
- › Porosität ergibt sich aus dem Verhältnis der Porenfläche zur Gesamtoberfläche

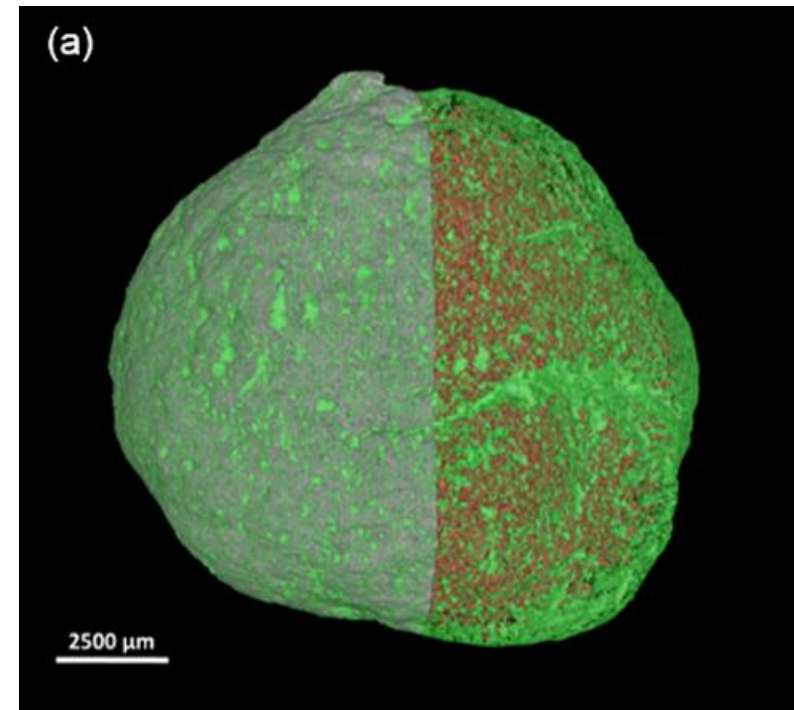
Ergebnis:

- › Geschlossene und geöffnete Porosität wird betrachtet
- › Es wird nur ein Querschnitt des Pellets betrachtet
- › Porenform stark abhängig von Trennmethode/-position



Porositätsbestimmung mittels Micro-CT

- › 3D-Bildgebung durch zahlreiche Röntgen Querschnittsaufnahmen eines Pellets
- › Für Einzelpelletanalyse geeignet
- › Zerstörungsfreie Methode
- › Keine Probenvorbereitung
- › Differenzierung zwischen offenen und geschlossenen Poren möglich
- › Porengröße und -form sowie die Lage der Poren im Pellet können klar bestimmt werden



Quelle: K. S. Augustoa und S. Paciornika, „Porosity Characterization of Iron Ore Pellets by X-Ray Microtomography,“ Material Research, 2017.

Aktuelle Lage

- › Einfluss der Porenstruktur (Größe, Form, Verteilung) auf die Direktreduktion wurde nur begrenzt untersucht
- › Einsatz recycelter Rohstoffe verändert Pelletstruktur und Porosität

Ausblick auf die Zukunft

- › Gemeinsames Forschen mit einer einheitlichen Messmethode zum Einfluss der Porenstruktur auf das Reduktionsverhalten
- › Bestimmen optimaler Porenstruktur und Porosität, bei der mechanische Festigkeit und Reduktionskinetik des Pellets im Gleichgewicht ist

Vorteile für Betreiber von Direktreduktionsanlagen

- › Verkürzen der Reduktionszeit und Senkung des Energie und Gasverbrauches durch den Einsatz von optimierten Pellets hinsichtlich der Porosität und Porenstruktur
 - › Senkung der Prozesskosten

Kontakt: B. Eng. Alexa Kala

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf

Telefon +49 98492-225

E-Mail alexa.kala@bfi.de · www.bfi.de

E-Mail alexa.kala@bfi.de · www.bfi.de

Telefon +49 98492-225

Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Kontakt: B. Eng. Alexa Kala

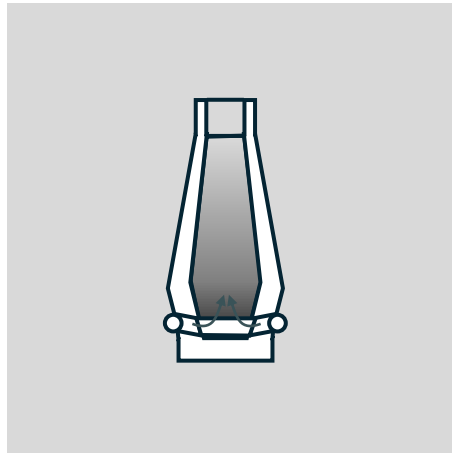
Dekarbonisierung und Generationswechsel - Die zweifache Herausforderung der Stahlindustrie

M. Sc. Jonas van Bracht

BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: CO₂-Minderung und Energieeffizienz





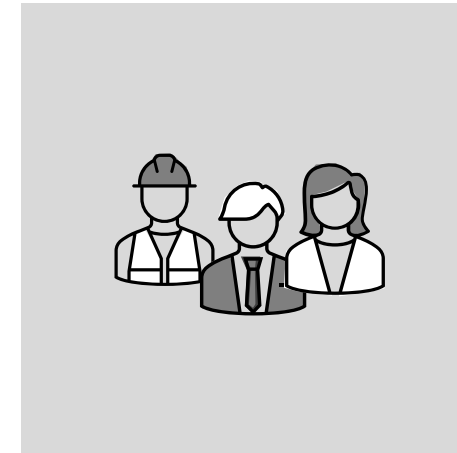
TECHNOLOGISCHER WANDEL

Neue Verfahren,
Energiequellen, digitale
Werkzeuge und
Management



SUPER PROJEKT

Ein innovativer Ansatz, der beide
Themen miteinander verbindet und
Synergien aufzeigt, die zur
Bewältigung der Herausforderungen
beitragen



WANDEL DER BELEGSCHAFT

Erfahrungsverlust durch
Pensionierungen, Mangel
an qualifizierten
Nachwuchskräften

Projektübersicht: SUPER – Sustainable Future steel production and people recruiting and skilling

› Konsortium

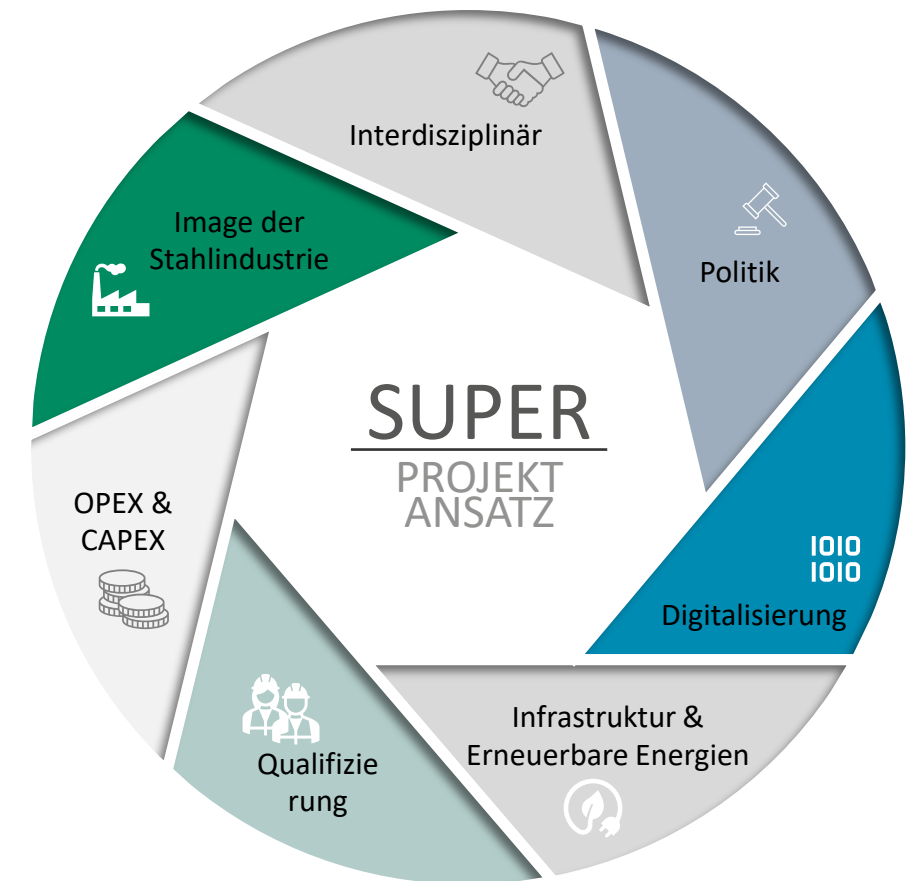
- › VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (Koordinator)
- › RINA Consulting - Centro Sviluppo Materiali
- › K1-MET GmbH
- › Technische Universität Dortmund
- › EIT Raw Materials GmbH
- › Scuola Superiore Sant'Anna
- › Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny
- › European Steel Technology Platform

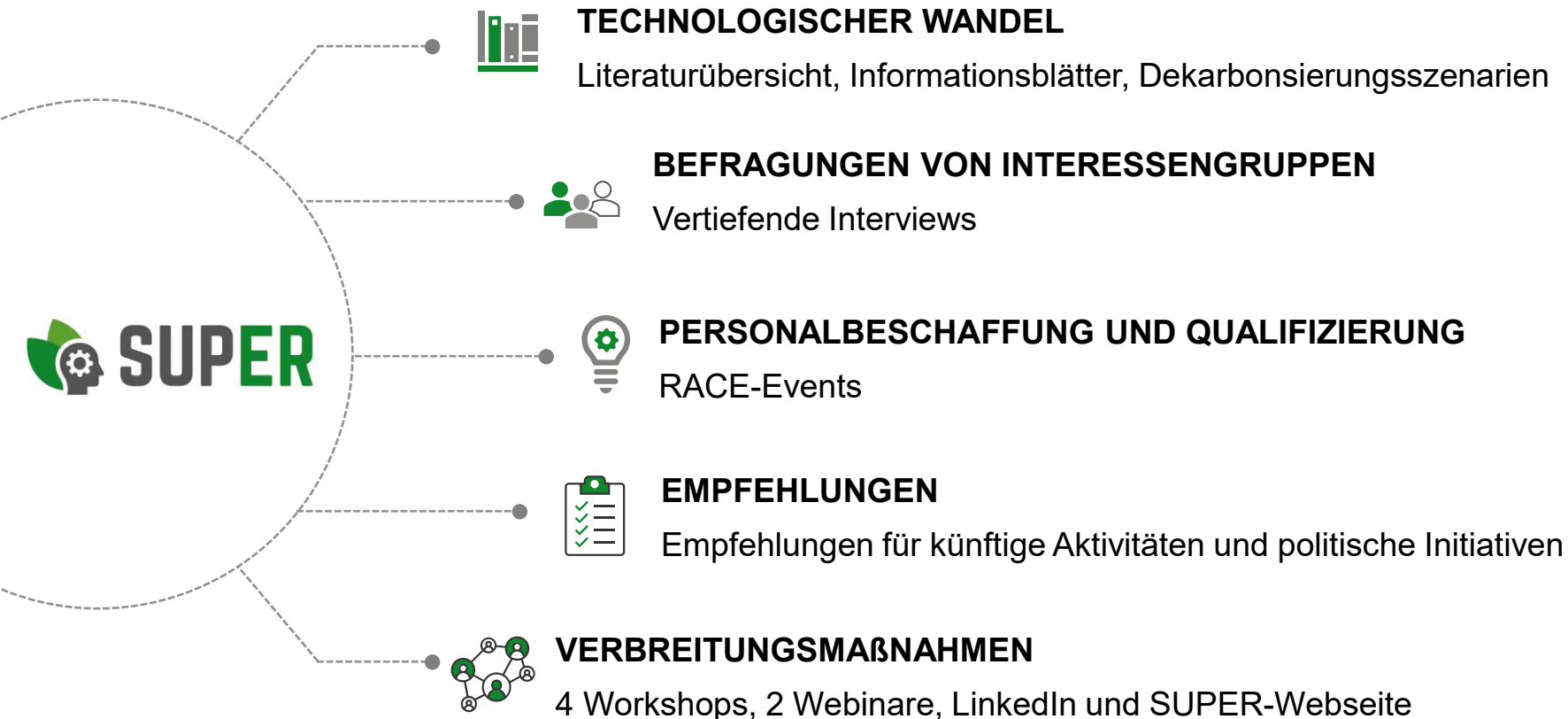
› Laufzeit

- › 01.06.2025 bis 30.05.2027, zwei Jahre

› Webseite

- › <https://www.project-super.eu/>



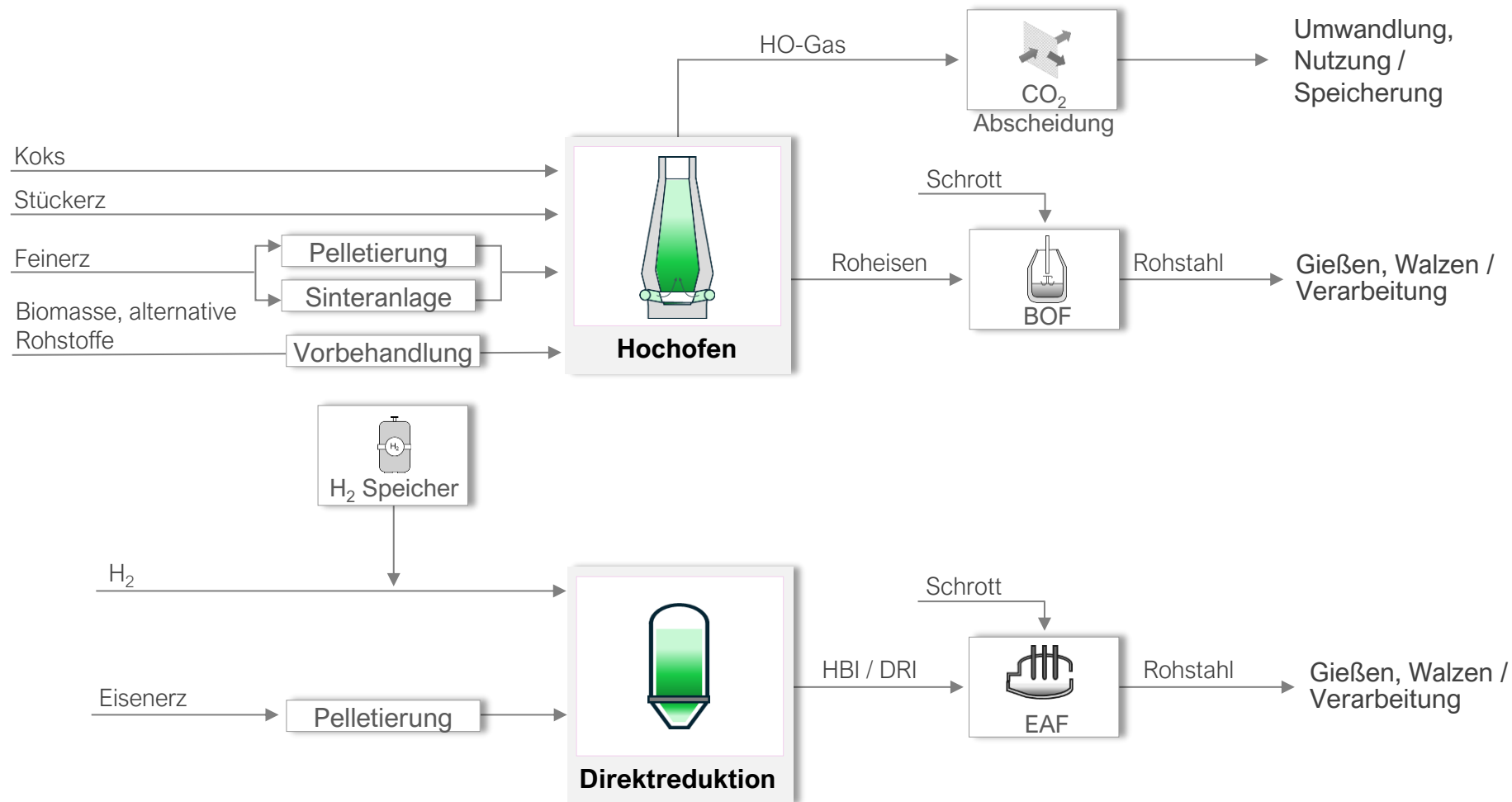


-  › Unterstützung der Transformation hin zu einer CO₂-armen Stahlindustrie
 - › SUPER fördert den Wissensaustausch über Dekarbonisierungstechnologien, indem unter anderem Stahlhersteller durch Workshops, Umfragen und Experteninterviews eingebunden werden.

-  › Unterstützung der Transformation der Belegschaft
 - › SUPER fördert die Kompetenzentwicklung und Personalbeschaffung, um die Stahlindustrie als umweltfreundlichen, digitalen und modernen Arbeitsgeber zu positionieren.

-  › Empfehlungen für die zukünftige Arbeit:
 - › SUPER gibt Empfehlungen für künftige Maßnahmen und politische Initiativen, um durch interdisziplinäre Zusammenarbeit die Synergien zwischen Dekarbonisierung und Wandel der Arbeitswelt zu nutzen.

Update: Technologien und Technologierouten



Technologische Transformationspfade:

Hochofenroute (Bestand optimieren)

- Alternative Energieträger: Einsatz von Biomasse und alternativen Kohlenstoffquellen
- Elektrifizierung und H₂: Teilweiser Kohle-Ersatz durch Wasserstoff & Strom.
- Carbon Management: Anwendung von CCU/S zur Emissionsminderung.

DR-EAF-Route (Systemwechsel)

- Direktreduktion: Umstieg von Erdgas auf grünen Wasserstoff.
- EAF-Betrieb: Nutzung von 100% zertifiziertem Grünstrom.
- Kreislaufwirtschaft: Einsatz von hochwertigem Stahlschrott.

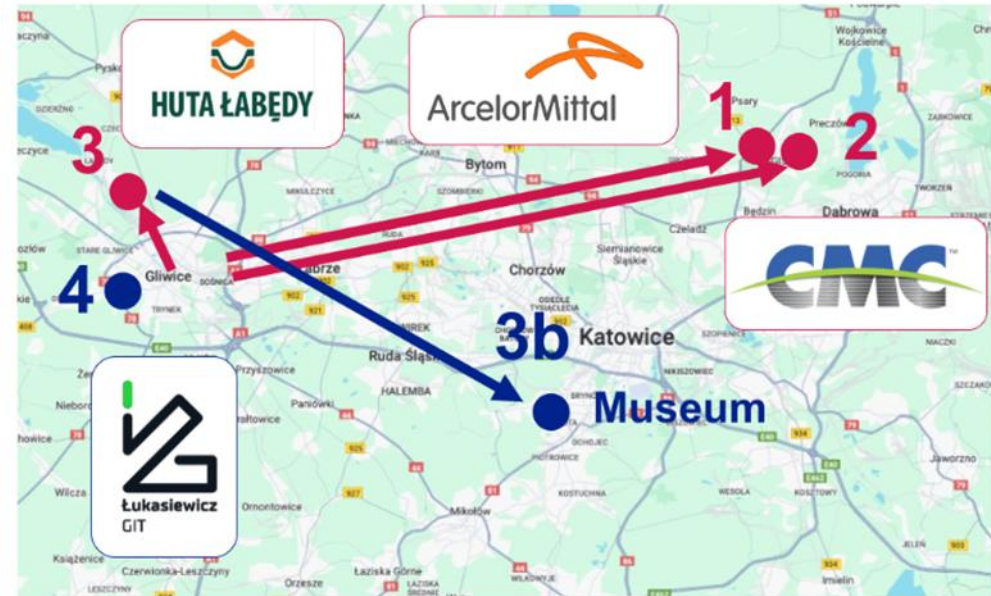
- › Methodik und Aktualisierung der Transformations-Szenarien
 - › **GS4E-Ansatz:** Nutzung der bewährten "Green Steel for Europe" Methodik für hohe Vergleichbarkeit.
 - › **Kontext-Check:** Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen (Energiekrise, Ukraine-Krieg, Gasverfügbarkeit).
 - › **Praxis-Check:** Absicherung der Erfolgsfaktoren und Hindernisse (z. B. Verfügbarkeit von Ökostrom) durch direktes Feedback von Experten und der Industrie.
 - › **Technologie:** Integration aktueller Trends und State-of-the-Art in die bestehenden Technologiepfade.
- › Szenarien & Fokus (2030–2050)
 - › **Fokus:** Schwerpunkt auf energieintensiver Primärstahlproduktion (sekundäre Prozesse als Basis-Analyse).
 - › **Kern-Outputs:** Prognosen zu Produktionsvolumina, CO₂-Emissionsprofilen und Ressourcenbedarf (Erneuerbare, H₂, Rohstoffe).

- › RACE (Raw & Circular Economy Expedition) ist ein einzigartiges, immersives Lernprogramm von EIT RawMaterials, das Talente und Industrie zusammenbringt, um durch die Bearbeitung realer Herausforderungen die nachhaltige und innovative Zukunft der europäischen Rohstoff- und Stahlbranche zu gestalten.

- › Kernziele sind...
 - › **Fachwissen und Innovation:** Verständnis der Wertschöpfungskette mit Fokus auf Dekarbonisierung.
 - › **Praxisbezug:** Direkter Kontakt zwischen Talenten (Studierende/Young Professionals) und der Industrie.
 - › **Skill-Entwicklung:** Stärkung unternehmerischer und transversaler Kompetenzen durch reale industrielle Herausforderungen.
 - › **Image-Boost:** Positionierung der Stahlbranche als moderne, innovative und nachhaltige Schlüsselindustrie.
 - › **Nachwuchssicherung:** Gewinnung neuer Talente für die grüne Transformation.

Personalrekrutierung und Qualifizierung: RACE (2)

- › Vier Gastgeber aus Polen:
 - › ArcelorMittal, Huta Labedy, CMC (Industrie)
 - › GIT (Forschungsinstitut)
- › 45 Teilnehmer aus 31 Ländern
- › Eine Woche Programm – 23. bis 30. August



- › Es wurden zwei Umfragen durchgeführt, um die Veränderung der Wahrnehmung der Studierenden vor und nach dem RACE zu erfassen:
 - › 4 von 5 Teilnehmern hatten einen positiven Gesamteindruck von der Stahlindustrie, die positive Einstellung zur Branche stieg um ein Drittel
 - › Etwa 30 % der Teilnehmer bewerteten die Branche nach der Teilnahme an der Veranstaltung als „sehr innovativ“ (vor der Veranstaltung waren es 13 %)

Kontakt: M. Sc. Jonas van Bracht

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf

Telefon +49 98492-503

E-Mail jonas.van-bracht@bfi.de · www.bfi.de

E-Mail jonas.van-bracht@bfi.de · www.bfi.de

Telefon +49 98492-503

Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Abtrennung von CO₂ auf Basis eines Kombinationsverfahrens aus Gashydratbildung und Prozesswasserbehandlung

Susanna Wan, Martin Hubrich

BFI-Kolloquium, Düsseldorf, 29.04.2026

Themenfeld: CO₂-Minderung und Energieeffizienz



Motivation und Ausgangslage

- › **Regulatorische Zielvorgabe:** CO₂-freie Industrieproduktion bis 2050 – European Green Deal
- › **Ressourcendruck:** Klimawandel verstärkt Wasserstress und limitiert Wasserentnahme bei hohem Wasserbedarf in der Stahlindustrie
- › **Verlangsamter H₂-Umstieg:** Steigender Bedarf an CC-Technologien
- › Industrie benötigt Lösungen, die Emissionen senken und Wasserverbrauch reduzieren, **ohne Produktionsstillstand** zu verursachen
- › **Bestehende CC-Technologien:** energieintensiv, kostenintensiv, hoher Wasserverbrauch
- › **Wasserrückgewinnung:** Herausforderung beim Konzentrat Handling

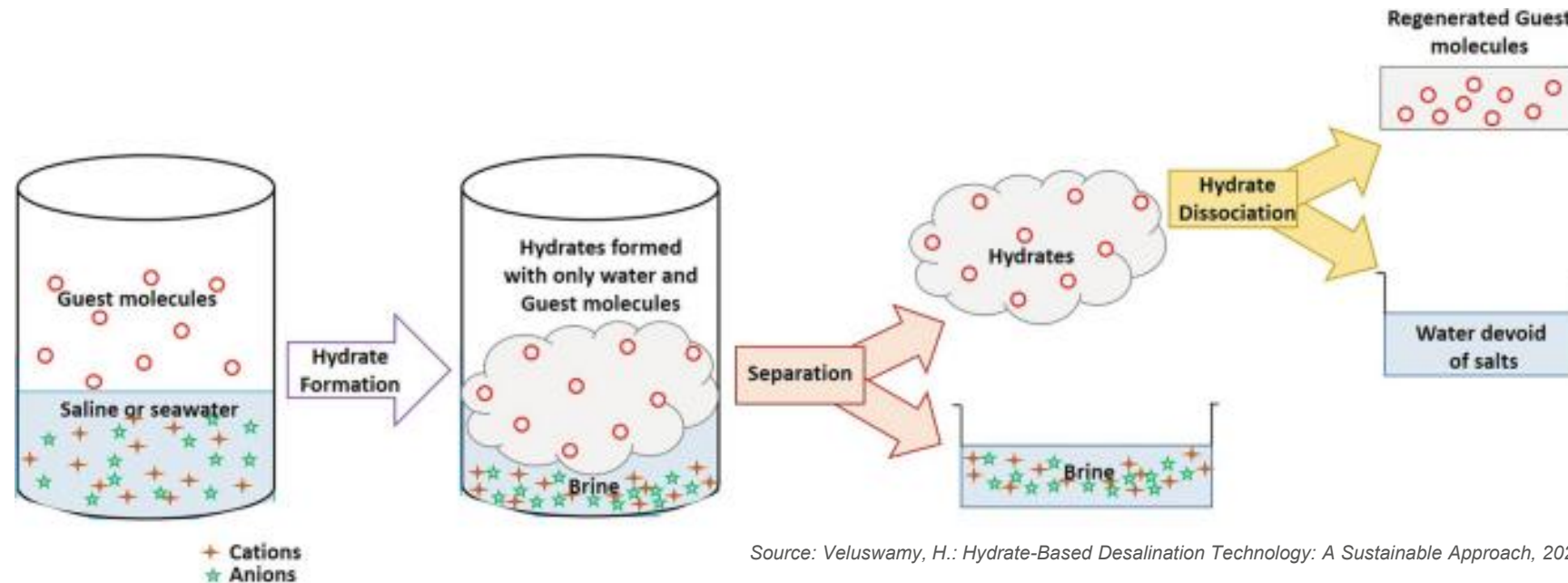
Resultierender Bedarf:

- **CO₂-Abscheidungstechnologien**
- **Wasserrückgewinnung und Konzentrat Handling**

Technologie	Beschreibung	Betriebsbed.	CO ₂ -Qualität (%)	Regeneration	Energieverbrauch (kWh/tCO ₂)	Kosten (€/t)
Ad-/Absorption	Feste Sorbenzien (z.B. Aktivkohle, MOFs) Flüssige Sorbenzien (z.B. Amine MEA)	1-10 bar 20-120 °C	90-99	Vakuum, Thermische Regeneration	416-1667	30-100
Ch. Looping	Metalloxide zur O ₂ -Transfer	1 bar 600-1200 °C	> 99	Oxidation und Reduktion von Metallen	417-833	40-70
Membran	Auftrennung von CO ₂	2-50 bar 20-100 °C	80-98	Spülprozess	278-833	20-60
Kyrogene Kühlung	Verflüssigung von CO ₂	5-30 bar -150 bis -50 °C	> 99	Destillation	555-1389	50-20
Gashydrat	CO ₂ -haltige kristalline Strukturen	Ziel: 1-2 bar 0-20 °C	99	Dissoziation von CO ₂ und Wasser (drucklos und RT)	361-1305	40-70

› Gashydrat: Betriebsbedingung hängt von der Wirkung des Additivs ab

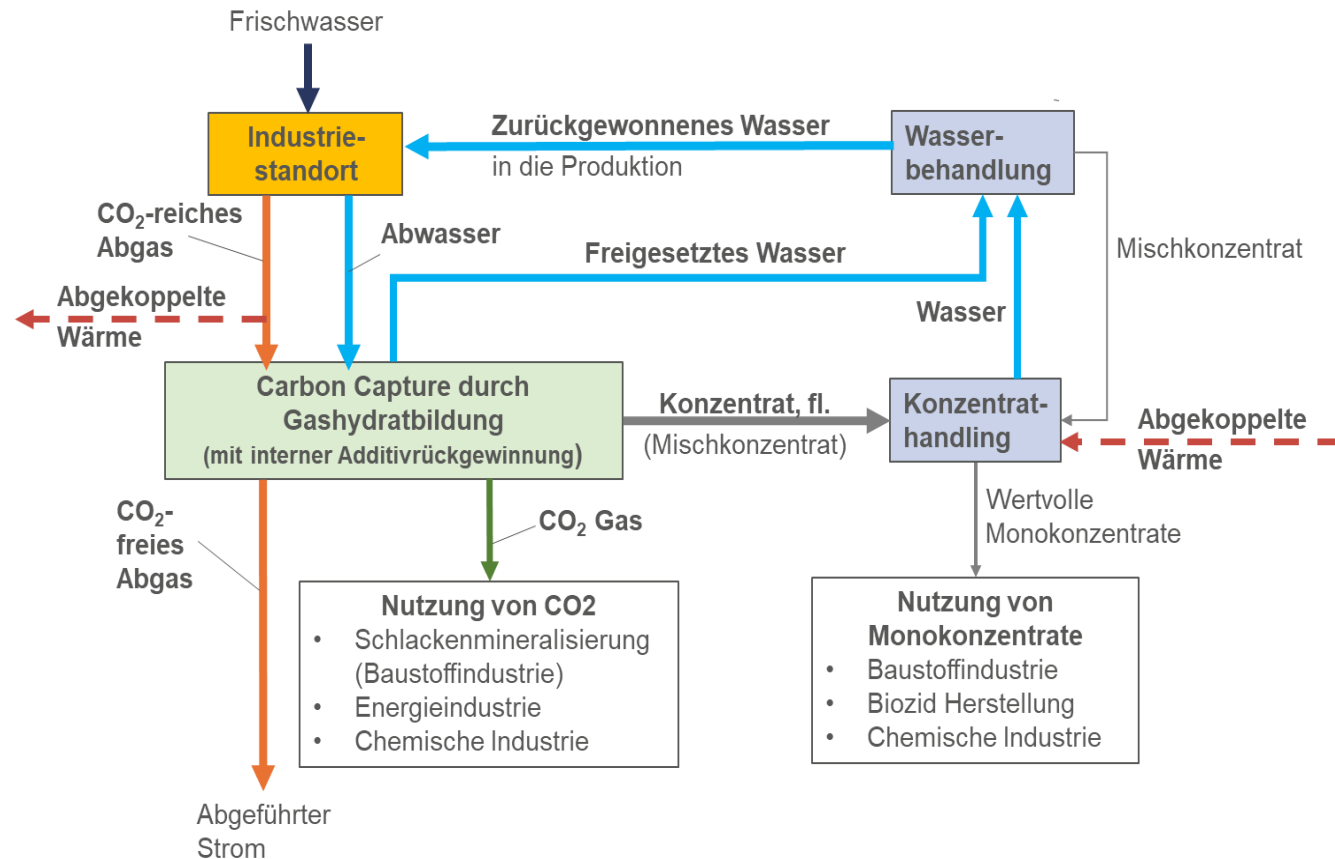
Funktionsprinzip der Gashydratbildung und –Dissoziation



Source: Veluswamy, H.: Hydrate-Based Desalination Technology: A Sustainable Approach, 2022

- › **Hydratbildung:** Selektive Einlagerung von CO_2 in Wasserstrukturen bei gleichzeitigem Rückhalt von Salzen, Verunreinigungen und Additiven
- › **Hydratdissoziation:** Auflösung der Hydrate zur Freisetzung von CO_2 und Gewinnung von entsalztem Wasser
- › **Einflussfaktoren:** Abwasserzusammensetzung, Feststoffe und Additiven beeinflussen die Prozesseffizienz

Forschungsantrag HyCarbWater: Ansatz zur CO₂-Abscheidung und Wasserrecycling



HyCarbWater Ansatz

IMT: Hydratbildung / BFI: Wasser- und Konzentrat-Behandlung

- › CCUS über **Gashydratbildung** unter moderaten Bedingungen (1-2 bar, bis zu 20 °C)
- › Nutzung von **Abwasser und interne Additivrückgewinnung**
- › Behandlung von Mischkonzentrat zur Gewinnung von Monokonzentrat
- › Hydrat-Dissoziation liefert 99% reines CO₂ und nahezu entsalztes Wasser
- › Koppelbare Abwärme zur Effizienzsteigerung der Konzentrat Behandlung
- › Anwendung in der Energie- und Stahlindustrie

Kontakt: Susanna Wan

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf
Telefon +49 98492-325 · Fax +49 211 98492-202
E-Mail susanna.wan@bfi.de · www.bfi.de

E-Mail susanna.wan@bfi.de · www.bfi.de
Telefon +49 98492-325 · Fax +49 211 98492-202
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH
Kontakt: Susanna Wan

Kontakt: Martin Hubrich

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf
Telefon +49 98492-343 · Fax +49 211 98492-202
E-Mail martin.hubrich@bfi.de · www.bfi.de

E-Mail martin.hubrich@bfi.de · www.bfi.de
Telefon +49 98492-343 · Fax +49 211 98492-202
Sohnstraße 69 · 40237 Düsseldorf
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH
Kontakt: Martin Hubrich