

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

30/06/2020

Enhanced Energy Efficient Iron- and Steel Production

E³-SteP

Projektnummer: 858801

Energieforschungsprogramm - 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	3. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01.01.2017
Projektende	31.03.2020
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	39 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Primetals Technologies Austria GmbH Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Eisen- und Stahlmetallurgie ENRAG GmbH
AnsprechpartnerIn	DI Bernhard Hiebl
Postadresse	Turmstraße 44. 4031 Linz
Telefon	+43 732 6592 2558
Fax	
E-mail	bernhard.hiebl@primetals.com
Website	www.primetals.com

Enhanced Energy Efficient Iron- and Steel Production

E³-SteP

AutorInnen:

Bernhard Hiebl (PTAT)

Daniel Spreitzer (MUL)

Roland Eisl (ENRAG)

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung.....	5
2.1	Aufgabenstellung.....	5
2.1.1	Problemstellung und Bedarf für das Vorhaben.....	5
2.1.2	Ziele.....	8
2.2	Einordnung in das Programm	10
3	Inhaltliche Darstellung.....	11
3.1	Arbeitspaket 1: Projektmanagement und Kommunikation	11
3.2	Arbeitspaket 2: Vorausgehende Laborversuche.....	12
3.3	Arbeitspaket 3: Gaswirtschaft	12
3.4	Arbeitspaket 4: Energieeffizienz.....	13
3.5	Arbeitspaket 5: Rohstoffeffizienz – Einfluss auf Energieeffizienz.....	14
3.6	Arbeitspaket 6: Verifizierung der Simulationen und Modelle.....	14
3.7	Arbeitspaket 7: Dissemination.....	15
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	15
4.1	Ergebnisse der einzelnen Projektziele	15
4.2	Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete.....	18
4.2.1	Arbeitspaket 1: Projektmanagement und Kommunikation	18
4.2.2	Arbeitspaket 2: Vorausgehende Laborversuche.....	18
4.2.3	Arbeitspaket 3: Gaswirtschaft	19
4.2.4	Arbeitspaket 4: Energieeffizienz.....	21
4.2.5	Arbeitspaket 5: Rohstoffeffizienz - Einfluss auf Energieeffizienz	27
4.2.6	Arbeitspaket 6: Verifizierung der Simulationen und Modelle.....	32
4.2.7	Arbeitspaket 7: Dissemination.....	37
5	Ausblick und Empfehlungen.....	37
6	Literaturverzeichnis.....	37
7	Anhang	38
8	Kontaktdaten.....	39

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

2.1.1 Problemstellung und Bedarf für das Vorhaben

Der größte Teil der Stahlproduktion aus Eisenerzen basiert auf aufbereiteten Erzkonzentraten. Dabei können aus dem sehr feinen Pulver (0-100µm) im nachfolgenden Prozess unerwünschte Bestandteile durch Aufbereitungsschritte entfernt werden (Abbildung 1 zeigt die klassischen Erzeugungsrouten). Um aber diese Erzpulver zu Eisen und in weiterer Folge zu Stahl zu machen muss bis dato das Pulver vor der Reduktion agglomeriert werden. Diese Agglomerationschritte (Pelletierung, Sinterung) sind nicht nur energieintensiv (1-1,5GJ pro Tonne Stahl) und verursachen erhebliche Emissionen (ca. 500mg/Nm³ NO_x bzw. SO_x (vor RG-Reinigung – falls vorhanden), ca. 180kg CO₂ pro t Sinter), sie bedingen auch die Zugabe von Zuschlagstoffen welche ihre Aufgabe bereits nach der Agglomeration erfüllt haben, aber erst nach hohem Energieeinsatz in Form von flüssiger Schlacke vom Roheisen (bzw. Rohstahl) getrennt werden. Zusätzlich muss bei der Aufbereitung der Erze aufgrund der nachfolgenden Agglomerationschritte (für die nachfolgende Eisen- / Stahlerzeugung) auf thermische Trennprozesse verzichtet werden.

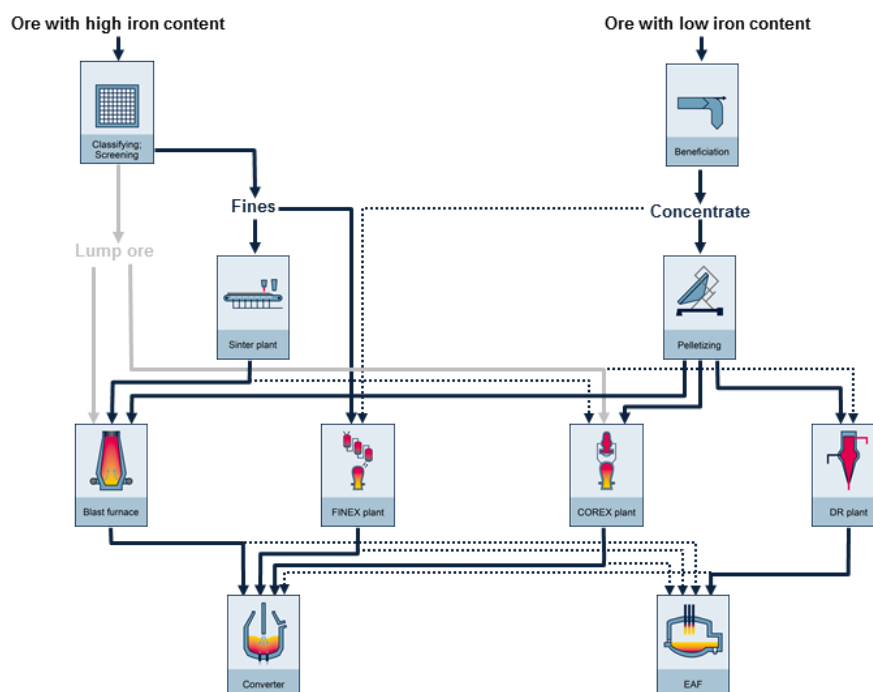


Abbildung 1: Klassische Routen zur Stahlerzeugung

Die Projektpartner haben Produktionstechnologien entwickelt, welche die Prozessschritte vom Eisenerz bis zum Rohstahl deutlich vereinfachen. In vergangenen und anderen

Energieforschungsprogramm - 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

laufenden Forschungs- und Entwicklungsprojekten hierzu standen fast ausschließlich die Produktionsprozesse im Vordergrund.

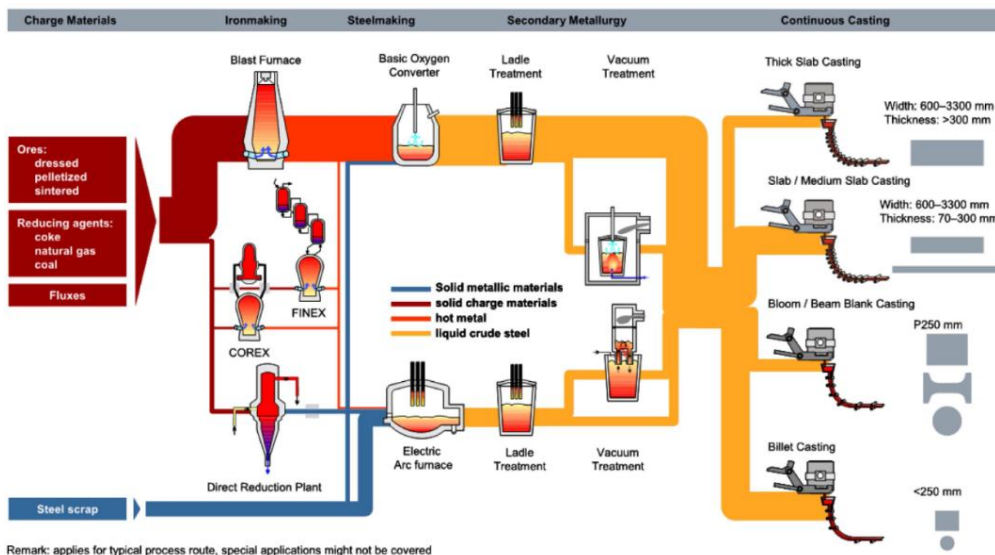


Abbildung 2: Mengenaufteilung auf einzelne Technologierouten

Wie Abbildung 2 zeigt, wird immer noch der größte Teil der weltweiten Stahlproduktion über die klassische (und energie- sowie CO2 intensivste) Hochofenroute produziert. Andere Verfahren stellen bis dato nur einen kleinen Anteil dar.

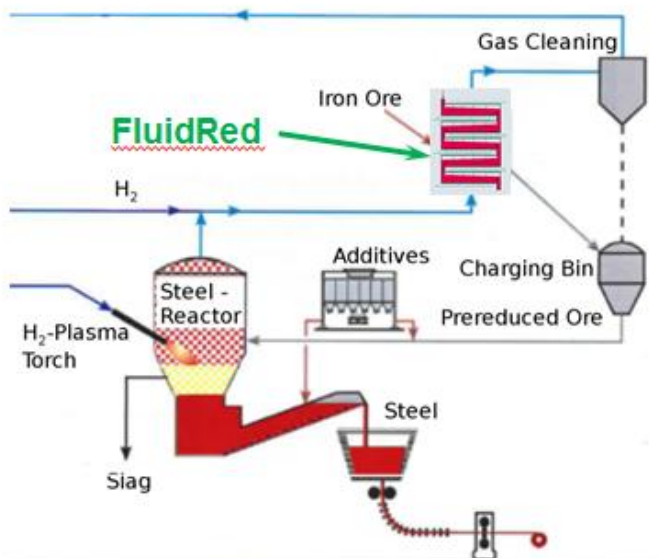


Abbildung 3: Neue SuSteel / FluidRed Route

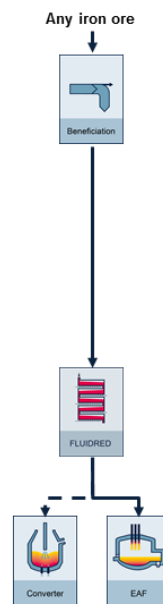


Abbildung 4: Neue FluidRed Route

Die neuen Verfahrensrouten, führend entwickelt von den Konsortialpartnern von E³-SteP, weisen neben diversen produktionstechnischen Vorteilen auch starke Vorteile im Hinblick auf Energie- und Ressourceneffizienz auf. Die Schemata der beiden Prozessrouten sind in

Abbildung 3 und in Abbildung 4 dargestellt. Alleine durch den Entfall der Agglomeration von Eisenerzen kann bereits ca. 10% an Primärenergieeinsatz eingespart werden. Zusätzlich ist der FluidRed Prozess ca. 10% effizienter in der Gasausnutzung als bestehende Reduktionsprozesse. Weiters kann in Kombination mit SuSteel (Abbildung 3) noch zusätzliches Energie- und Ressourceneffizienz-Potential gehoben werden. Hier insbesondere durch die energetische Verschaltung der beiden Teilaggregate sowie durch die geringeren Verluste durch geringere Schlackenmengen. Sowohl FluidRed als auch SuSteel werden im Hinblick auf die Prozessführung derzeit innerhalb der Projektpartner weiterentwickelt. Schwerpunkte des Projektes.

Im gegenständlichen E³-SteP Projekt sollen daher folgende wissenschaftlichen/technischen Fragestellungen untersucht werden:

1. *Welche Auswirkungen sich durch die neuen Produktionsprozesse auf die Energie- und Ressourceneffizienz der Prozesskette (Eisenerz zu Stahl) ergeben.*

Durch den Wegfall des Schrittes der Agglomeration (Pelletierung bzw. Sinterung) ergibt sich ein erster, eindeutig quantifizierbarer Einsparungseffekt (Energieeinsatz, Emissionen, Ressourceneinsatz). Zusätzliche Einsparungen ergeben sich jedoch noch aus einer geänderten, effizienteren Aufbereitungsroute, durch bessere Möglichkeiten von Schadstoffhandling im Prozess (z.B.: Schwefelentfernung) sowie durch Erhöhung der Ressourceneffizienz im Gesamtprozess (Verringerung der Schlackemenge, Verringerung des Anteils an Wüstit (FeO) in der Schlacke, etc.).

Fragestellung: Wie hoch sind die Energie- und Ressourceneinsparungen durch eine verbesserte (angepasste) Materialaufbereitung im Detail?

2. *Wie groß die Energieeinsparungen im Einzelnen und im Gesamten sein werden.*

Durch E³-SteP sollen die einzelnen Einsparungspotentiale quantifiziert und im Hinblick auf den Gesamtprozess bewertet werden. Nur durch die integrierte Betrachtung von Gesamtprozessen kann der tatsächlich, im industriellen Einsatz erzielbare, Einsparungseffekt dargestellt werden.

Fragestellung: Wie hoch sind die Energie- und Ressourceneinsparungen sowie Emissionsverminderungen durch die neue Prozesskette im Detail?

3. *Wie sich eine verstärkte Integration von erneuerbaren Energieträgern (Wasserstoff durch Elektrolyse) in die neuen Produktionsprozesse umsetzen lässt.*

Die Eisen- und Stahlindustrie ist als einer der großen Energieverbraucher und CO₂ Emittent im Besonderen gefordert durch neue Ansätze mit dem Ausbau der erneuerbaren Energieträger Schritt zu halten sowie den CO₂ Ausstoß zu senken. Dies ist mit bestehenden Routen schwierig. Die neuen Produktionsprozesse FluidRed und SuSteel sind dagegen jedenfalls grundsätzlich dazu in der Lage auf Basis von Wasserstoff zu arbeiten. Die Integration der Wasserstoff Erzeugung in den Produktionsprozess ist jedoch bis dato nicht vollständig gelöst. Für die Zeit der Transformation hin zu CO₂ freier

Energie- und Produkterzeugung ist es notwendig, dass die eingesetzten Produktionsprozesse hier flexibel genug sind, damit der Anteil an regenerativ erzeugtem Wasserstoff schrittweise (bis zu 100%) erhöht werden kann.

Fragestellung: Wie kann eine integrierte Gasaufbereitung für die kontinuierlichen Produktionsprozesse FluidRed und SuSteel mit regenerativer H₂ Herstellung durch Elektrolyse aussehen um flexibel den Anteil an H₂ schrittweise steigern zu können?

4. *Wie (im Hinblick auf Wasserstoff durch Elektrolyse regenerativen Stroms) diese neuen Produktionsprozesse auch einen nennenswerten Anteil an der Ausbalancierung fluktuierender Stromerzeuger liefern können.*

Bisher steht der kontinuierliche Betrieb von Produktionsanlagen der fluktuierenden Erzeugung von regenerativem Strom gegenüber. Derzeit werden Systeme wie Power-to-Heat angedacht bzw. schon teilweise eingesetzt um hochwertigen Strom in niederwertige Wärme überzuführen und damit die Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch geschlossen zu halten. Die Produktionstechnologien, auf denen der gegenständliche Antrag basiert, ermöglichen es jetzt allerdings hier Überschussstrom in den Produktionsprozess durch kleine Puffer einzubringen und damit diesen Überschussstrom für hochwertige Zwecke wie Stahlerzeugung zu nutzen.

Fragestellung: Wie sieht eine Gasaufbereitung für die kontinuierlichen Produktionsprozesse FluidRed und SuSteel aus um als Regelpuffer für fluktuierende Stromerzeugung arbeiten zu können?

2.1.2 Ziele

Qualitative Ziele dieses Antrags sind die **Steigerung von Energie- und Ressourceneffizienz** sowie die **Senkung des CO₂ Ausstoßes** in der Eisen- und Stahlerzeugung. Basis hierfür sind neu entwickelte Prozessrouten der Forschungspartner. Im Detail können die Ziele des gegenständlichen Forschungsprojektes wie folgt zusammengefasst werden:

Ziel 1: Erhebung / Maximierung Einsparungspotential (Energieeinsatz, Ressourceneinsatz, Emissionen) durch Verzicht auf Agglomeration

Durch den Einsatz der FluidRed Technologie kann auf den Schritt der Eisenerz Agglomeration (Sintern, Pelletieren) verzichtet werden. Zusätzlich kann bei der Aufbereitung des Eisenerzes ohne Rücksicht auf folgende Agglomerations- oder Schmelzreduktionsverfahren das Eisenerz ohne Zugabe von Additiven aufkonzentriert werden. Aus diesen geänderten Rahmenbedingungen ergeben sich weitreichende Energie-Einsparungspotentiale, welche im Rahmen dieses Forschungsprojektes qualitativ dargestellt werden und quantitativ erfasst werden sollen. Im Vergleich zur Hochofenroute fallen durch die neue Route sowohl Agglomeration als auch Koks Erzeugung weg. Die Agglomeration benötigt ca. 10% des Gesamtenergieeinsatzes der Hochofenroute.

Zusätzlich gilt es auch weitere Einsparungspotentiale qualitativ und quantitativ zu bewerten. Diese umfassen insbesondere den Verzicht auf für konventionelle Prozesse notwendige

Zuschlagstoffe. Hierdurch kann sowohl der Ressourceneffizienz als auch die Energieeffizienz gesteigert werden. Hinzu kommt, dass diese Zuschlagstoffe oft Carbonate sind, welche im Zuge des Prozesses gebundenes CO₂ freisetzen. Es wird also auch die Freisetzung von prozessbedingtem CO₂ verringert.

Ziel 2: Ausgehend von den beiden durch die Antragsteller entwickelten Produktionstechnologien für Eisen (FluidRed) bzw. für Stahl (SuSteel) wird in diesem Projekt die energieoptimale Integration beider Technologien erforscht.

FluidRed und SuSteel haben aus prozesstechnischer Sicht beide den Vorteil, dass sie auch in andere Prozessrouten einzeln integriert werden können und mit bekannten Aggregaten (Elektrostahlöfen) gemischt werden können. Im (energie)optimalen Fall werden diese beiden Technologien allerdings kombiniert eingesetzt. Ziel ist die energie- und ressourcenoptimale Integration zu einem Gesamtprozess vom Eisenerz zum Rohstahl mit minimalem Energieeinsatz und CO₂ Ausstoß. Damit einhergehend wird eine Reduktion des Gesamtenergieeinsatzes im Vergleich zu konventionellen Prozessrouten von **20%** angestrebt.

Ziel 3: Optimale Abstufung zwischen FluidRed (Vorreduktion) und SuSteel (Rohstahlerzeugung)

Da FluidRed nicht nur als Vorreduktionsaggregat, sondern auch zu Produktion von DRI (direct reduced iron) mit hohem Metallisierungsgrad (>92%) eingesetzt werden kann und SuSteel umgekehrt auch theoretisch mit kaum reduzierten Erzen arbeiten kann, ist zu untersuchen welche optimalen Kombinationen sich von FluidRed und SuSteel aus Sicht der Energie- und Ressourceneffizienz ergeben. Zusätzlich ist hierzu noch die Wirtschaftlichkeit des Gesamtkonzeptes als Nebenbedingung im Auge zu behalten.

Ziel 4: Übergang in reine H₂ Reduktion: Verwendung von CH₄ als Basis mit Auffettung durch Elektrolyse H₂. Entwicklung der hierfür optimalen Gasaufbereitung.

In Zukunft wird durch die fortschreitende Umstellung unserer Energiesysteme Wasserstoff als Reduktionsmittel an Bedeutung gewinnen. Die Herstellung dieses Wasserstoffs wird auf Basis von Elektrolyse Systemen passieren. Mit FluidRed und SuSteel ist aus der Sicht des Eisenreduktionsprozesses möglich, mit reinem Wasserstoff zu arbeiten. Da die Umstellung unseres Energiesystems ein stetiger Prozess ist, müssen zukünftige Eisen- und Stahlerzeugungsprozesse so gestaltet sein, dass eine schrittweise Erhöhung des Anteils regenerativen Wasserstoffs (bis zu 100%) ohne fundamentale Umbauarbeiten möglich ist. Ziel dieses Forschungsprojektes ist es unter anderem Konzepte zur Integration von Elektrolyse Anlagen in die Gesamtroute zu erarbeiten, und diese Konzepte anhand von Modellen und Simulationen zu testen. Ziel ist weiters eine optimale Ausnutzung der Energieressourcen bei gleichzeitig maximaler Flexibilität im Hinblick auf den Primärenergieträger (CH₄ vs. H₂)

Ziel 5: Gestaltung der Gasaufbereitung und Gasbereitstellung zur energieoptimalen Ausnutzung der vorhandenen Ressourcen.

Die beschriebenen Ansätze bedingen neue Konzepte im Hinblick auf die Bereitstellung der gasförmigen Reduktionsmittel. Ziel ist eine energieoptimale Ausnutzung der Energierohstoffe zur Erzeugung von Eisen und Stahl durch die neue FluidRed / SuSteel Route.

Ziel 6: Minimierung des Ressourceneinsatzes

Mit der optimalen Energieausnutzung einher geht die Schonung von Ressourcen. Durch die neue FluidRed / SuSteel Route können Primärressourcen besser ausgenützt werden und Stahl Schadstoffe einfacher in früheren Prozessschritten entfernt werden (z.B.: Schwefel). Diese Vorteile haben Auswirkungen auf die Gesamtenergiebilanz der Route. Innerhalb dieses Forschungsprojektes werden diese bis dato nicht untersuchten Einsparungspotentiale untersucht und energetisch wie wirtschaftlich bewertet.

2.2 Einordnung in das Programm

Das Projekt E³-SteP behandelte prioritär:

Ausschreibungsschwerpunkt 2 - Energieeffizienz & Energieeinsparungen, im speziellen **TF2/2.1 - Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe** mit dem Projektfokus der Optimierung bestehender und Entwicklung neuer Energie- und ressourceneffizienter Produktionsverfahren und Produkte.

Das Projekt E³-SteP behandelt in absteigender Reihenfolge die folgenden Ausschreibungsziele:

Ziel 1: Beitrag zur Erfüllung der energie-, klima- und technologiepolitischen Vorgaben der österreichischen Bundesregierung. Priorität haben technologische Entwicklungen und Maßnahmen, die maßgeblich dazu beitragen, die Effizienz des Energiesystems zu steigern und den Anteil der erneuerbaren Energien am Energiemix zu erhöhen.

Ziel 3: Aufbau und Absicherung der Technologie -führerschaft bzw. Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Unternehmen und Forschungsinstitute auf dem Gebiet innovativer Energie- und Mobilitätstechnologien. Durch die Stärkung der Technologiekompetenz und Wettbewerbsfähigkeit wird der Wirtschafts- und Innovationsstandort Österreich gestärkt und es ergeben sich neue Möglichkeiten, die internationale Klimaschutzpolitik Österreichs zu unterstützen.

3 Inhaltliche Darstellung

Das Forschungsvorhaben wurde in die 6 Arbeitspakete nach Tabelle 1 unterteilt. Nachfolgend werden die Arbeitspakete des Projektes näher beschrieben.

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete

AP Nr.	AP Titel
1	Projektmanagement und Kommunikation
2	Vorausgehende Laborversuche
3	Gaswirtschaft
4	Energieeffizienz
5	Rohstoffeffizienz - Einfluss auf Energieeffizienz
6	Verifizierung der Simulationen und Modelle
7	Dissemination

3.1 Arbeitspaket 1: Projektmanagement und Kommunikation

Ziele

- Koordination des Projekts, Sicherung der Durchführung nach qualitätsgesicherten Prozessen
- Transparente Dokumentation des Projektfortschrittes und des Berichtswesens
- Finanzcontrolling und Unterstützung der Arbeitspaketleiter zur Erreichung der Projektziele
- Schnittstelle zwischen Fördergeber und Partner des geplanten Konsortiums
- Planung und Durchführung regelmäßiger Fortschrittsmeetings
- Koordination bei der Durchführung von Disseminationsaktivitäten des Konsortiums
- Sicherung der Einhaltung des Förder- und Konsortialvertrags
- Vertretung des Gesamtkonsortiums gegenüber dem Fördergeber
- Erstellen von Verträgen, projektinterner Richtlinien und Überwachung deren Einhaltung

Beschreibung der Inhalte

Der Antragsteller und Konsortialführer Primetals übernahmen die Verantwortung für die Koordination der Projektinhalte und die Kommunikation mit dem Fördergeber. Im Zuge des Projektmanagements wurden der inhaltliche und zeitliche Projektfortschritt unter Rücksichtnahme auf die verfügbaren Ressourcen geplant, überwacht und gesteuert. In regelmäßigen Projektbesprechungen wurden die Projektaktivitäten der einzelnen Projektpartner koordiniert und überwacht. Des Weiteren übernahm das Projektmanagement die Verantwortung über die Projektdokumentation und das Berichtswesen. Dies inkludierte dabei das Reporting der Projektkosten sowie die Darstellung der Projektkosten als Teil des Berichtswesens. Die einzelnen Projektpartner übernahmen Agenden der Projektverwaltung

wie beispielsweise Personaladministration, Beschaffung, Rechnungsprüfungen und Dokumentation der Projektabwicklung.

3.2 Arbeitspaket 2: Vorausgehende Laborversuche

Ziele

- Ermittlung von für die Simulation und Berechnungen notwendiger Eingangsdaten
- Evaluierung des Zeitverhaltens von Feinsteisenerzen in der Wirbelschicht
- Bestimmung von möglichen Prozessparametern für die Reduktion von Feinsteisenerzen in der Wirbelschicht wie Temperatur, Reduktionsgaszusammensetzung

Beschreibung der Inhalte

In diesem Arbeitspaket wurden notwendige Kenntnisse von Feinsteisenerzen unter Labor Bedingungen ermittelt. Diese waren zur Abklärung von Randbedingungen für die Erstellung der Berechnungs- bzw. Simulationstools zur energieeffizienten Prozessauslegung notwendig.

Folgende wichtige Punkte mussten diesbezüglich berücksichtigt werden:

- Abschätzung sinnvoller Versuchsparameter wie Gaszusammensetzung, Temperatur, etc.
- Versuchsdurchführung mit verschiedenen Bedingungen zur Abschätzung möglicher Randbedingungen
- Datenaufzeichnung und -generierung während des Versuches (Messungen der Abgaszusammensetzung, Entnahme von Proben während des Versuches, etc.)
- Messungen der Verweilzeit des Erzes im Kaltversuchsfießaggregat
- Interpretation der Daten und Ableiten von Ergebnissen für eine Festlegung von Randbedingungen des Prozesses hinsichtlich Energie- und Ressourceneffizienz

Mithilfe der Laborversuche wurden notwendige Kenntnisse über mögliche Prozessfahrweisen gewonnen, welche in weiterer Folge zum Start der Berechnungen und Simulationen dienten. Dadurch war die Darstellung eines Reduktionsverfahrens, basierend auf Feinsteisenerzen und Erdgas (in weiterer Folge auch mit erhöhtem Wasserstoffanteil) möglich und es kann die Energiebilanz einer möglichen industriellen Anlage ermittelt und mit bestehenden Prozessen verglichen werden.

3.3 Arbeitspaket 3: Gaswirtschaft

Ziele

- Technische Entwicklung einer integrierten Gasaufbereitung für variablen Einsatz von regenerativ erzeugtem Wasserstoff
- Entwickelte Simulationsmodelle und -rechnungen

- Entwicklung von Lösungen zur Umsetzung von zukünftigen Netzregelleistungen (Power2Steel -P2S) für den Ausgleich von stochastischen Erzeugungskapazitäten

Beschreibung der Inhalte

Sowohl die Gasaufbereitung für E³SteP als auch für SuSteel wurden durch geeignete Tools in Modellen und Simulationen dargestellt. Durch die Verbindung der Simulationsmodelle mit den Modellen der Produktionsprozesse konnte die Interaktion der Teilaggregate untersucht werden. In die Gasaufbereitung wird im Zuge des Projektes eine H₂ Erzeugungseinheit (durch Elektrolyse) integriert. Sowohl die verwendete Elektrolyse Technologie an sich als auch die Integration in den Prozess waren Teile der F&E Arbeiten in diesem Projekt.

Es wurde erforscht wie eine energie- und ressourceneffiziente Gaswirtschaft aussehen kann, damit der Anteil an regenerativem H₂ im Prozess schrittweise erhöht werden kann, ohne die Gesamtanlage fundamental umzubauen. Es musste durch die hier durchgeführten Forschungsarbeiten ein Technologiepfad entstehen, der einen effizienten Anlagenbetrieb auf Basis von Erdgas, von Mischungen aus Erdgas und regenerativem H₂ und auf Basis von reinem H₂ ermöglicht.

Auf Basis der erarbeiteten Grundlagenarbeiten wurde untersucht wie die zukünftigen Stahlerzeugungsrouten Netzregelleistungen übernehmen können (P2S – Power to Steel)

3.4 Arbeitspaket 4: Energieeffizienz

Ziele

- Modell des Produktionsprozesses zur Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Energie- und Ressourceneffizienz sowie die spezifische CO₂ Freisetzung
- Erhebung der theoretischen Energieeinsparungspotentiale
- Bewertung im Hinblick auf Rückwirkungen auf den Produktionsprozess

Beschreibung der Inhalte

Durch die neuen Erzeugungsrouten von DRI und Rohstahl können die Prozesse der Stahlerzeugung deutlich effizienter gestaltet werden als dies auf Basis der heute gebräuchlichen Routen der Fall ist. Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurden diese Einsparungen auf Basis von Modellen und Simulationen erstmals quantifiziert.

Neben dem Wegfall der Agglomerationsstufe gibt es weitere prozessbedingte Potentiale, die bis dato noch nicht untersucht wurden. Die Steigerung der Energieeffizienz und die Verringerung des spezifischen CO₂ Ausstoßes kann immer nur unter der Randbedingung des einwandfreien Funktionierens der Produktionsprozesse an sich funktionieren. Daher wurden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Steigerung der Energieeffizienz aufbauend auf bereits entwickelten Simulationstools zur Darstellung der Produktion durchgeführt.

Die Analyse des Produktionsablaufs zeigt die Einsparungspotentiale. Durch die Erweiterung der Produktionssimulationstools konnten die entwickelten Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung direkt auf ihre theoretische Einsetzbarkeit hin getestet werden.

3.5 Arbeitspaket 5: Rohstoffeffizienz – Einfluss auf Energieeffizienz

Ziele

- Vergleich unterschiedlicher Verfahrenskonzepte hinsichtlich Rohstoffeffizienz. Darstellung der Ressourcenverluste und damit einhergehend Energieverluste.
- Evaluierung der Möglichkeit eines „zero-iron-loss“ Prozesses zur Rohstahlerzeugung
- Erstellung eines Konzeptes inkl. Massenströme
- Evaluierung der möglichen Vorteile (in Bezug auf Ressourcen- und Energieeffizienz) des Einsatzes von Feinsteisenerzen ohne Agglomerationsaggregat über die gesamte Prozesskette

Beschreibung der Inhalte

Im Arbeitspaket 5 sollte die Auswirkung des Einsatzes von Feinsteisenerz hinsichtlich Rohstoff- und Energieeffizienz aufgezeigt werden. Neben der wissenschaftlichen Evaluierung war auch die technologische Betrachtung der Durchführbarkeit von Bedeutung. Folgende Punkte mussten dabei berücksichtigt werden:

- Vorteile im Benefication Prozess des Feinsterzes hinsichtlich der Möglichkeit der Abtrennung von unerwünschten Begleitsubstanzen wie Schwefel oder Phosphor
- Evaluierung der Dust-Generation im Reduktionsprozess aufgrund von sehr feinen Partikeln im Erzkonzentrat; Möglichkeiten der Rückführung in den Reduktionsprozess
- Produktion von nahezu kohlenstofffreien DRI aufgrund der nichtvorhandenen Aufkohlung während des Prozesses (□ Änderung des Energieverbrauchs des EAF)
- Auswirkung des geringen Kohlenstoffgehaltes des DRI auf nachfolgende Schmelzaggregate (Elektrolichtbogenofen - EAF)
- Konzepte zum direkten Einsatz des produzierten DRI ohne Agglomeration in den EAF
- Konzepte zur Minimierung des Eisenverlustes während der gesamten Prozesskette (zero-iron-loss- Konzept)

Mithilfe der Studie von einschlägiger Fachliteratur und der Optimierung der Prozessführung in Bezug auf den Einsatz von Feinsteisenerzen sollte eine energie- und ressourcenoptimale Prozesskette aufgezeigt werden. Dabei wurden speziell die Vorteile der Verwendung von Feinsteisenerz dargestellt.

3.6 Arbeitspaket 6: Verifizierung der Simulationen und Modelle

Ziele

- Durchführung von praktischen Versuchen im Labormaßstab unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Arbeitspakete 3, 4 und 5
- Variation der praktischen Versuche unter verschiedenen Rahmenbedingungen
- Validierung bzw. Anpassung der Simulationsergebnisse anhand der Ergebnisse aus den praktischen Versuchen

- Rekursive Optimierung der Laborversuchseinrichtung und des Simulationsmodells

Beschreibung der Inhalte

In diesem Arbeitspaket wurden die Ergebnisse der Arbeitspakete 3, 4 und 5 in praktischen Versuchen überprüft und die daraus gewonnenen Erkenntnisse wiederum zur Optimierung des E3-SteP-Gesamtsimulationsmodells herangezogen. Dieser Prozess wurde so lange wiederholt, bis ausreichende Übereinstimmung zwischen den Simulationen und Modelle sowie den Ergebnissen der praktischen Versuche erzielt werden konnte, die exaktes Upscaling und Prognosen für die weiteren Entwicklungsschritte der Technologie garantieren.

Im Konkreten werden dazu im Labormaßstab, so weit wie im Rahmen des Projektes möglich, die Simulationsansprüche reproduziert, wobei die auf der MUL bzw. bei einem externen Institut vorhandenen Versuchseinrichtungen ggfs. dementsprechend modifiziert wurden. Hier ist besonderes Augenmerk auf die Repräsentanz der praktischen Versuche zu legen.

Die aus den praktischen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse dienen wiederum zur Nachjustierung des E3SteP-Gesamtsimulationsmodell bis zur hinlänglichen Übereinstimmung zwischen Versuchen, Simulationen und Modellen bzw. der Feststellung der idealen Prozessbedingungen.

3.7 Arbeitspaket 7: Dissemination

Ziele

- Publikationen in Fachzeitschriften und auf Fachkonferenzen
- Darstellung der Kompetenz der Projektpartner
- Nutzung des Know – Hows für weiterführende Entwicklungen
- Verbreitung der Ergebnisse im Rahmen von Podiumsdiskussionen

Beschreibung der Inhalte

- Das Arbeitspaket diene zur Verbreitung des gewonnenen Know – Hows aus dem Projekt und zur öffentlichen Präsentation der neuen Technologie und ihrer Vorteile
- Vorstellung und Präsentation der Outputs aus dem Projekt bei einem breiten Publikum durch Podiumsdiskussionen
- Vorbereitung weiterer anschließender Aktivitäten

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Ergebnisse der einzelnen Projektziele

- **Ziel 1: Erhebung / Maximierung Einsparungspotential (Energieeinsatz, Ressourceneinsatz, Emissionen) durch Verzicht auf Agglomeration**

Die bisherigen Laborversuche und Berechnungen bestätigen die gute Reduzierbarkeit der Eisenerze in diesem Verfahren, die spezifisch im Kreislauf transportierte Gasmenge pro Tonne Produkt ist um bis zu 50% kleiner als bei bereits am Markt etablierten Verfahren. Das heißt, die Prozessbedingungen liefern eine ausgezeichnete Basis für die Minimierung des Ressourceneinsatzes.

Der absolute spezifische Reduktionsmittelbedarf ($\sim 500 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{t}$ Produkt) ist durch die Reaktionschemie vorgegeben. Das gegenständliche Verfahren bietet jedoch die Möglichkeit, 100 % H_2 aus alternativen Energiequellen zu verwenden, was den CO_2 Ausstoß der Verfahrensrouten vom Rohkonzentrat zum Stahl auf 0 setzt.

Durch das Wegfallen des Agglomerationsprozesses, entfällt der für die Erzeugung des Agglomerats (Pellets oder Sinter) notwendige Einsatz von Additiven und Bindemitteln. Im Vergleich zur Hochofenroute entfällt zusätzlich die gesamte Kokserzeugung. Durch Versuche wurde dies bestätigt.

Im Falle von magnetitischem Erz kann die Oxidationswärme in einer Vorstufe des Reduktionsprozesses in situ genutzt werden.

Zusätzlich hat sich im Laufe des Projektes gezeigt, dass davon auszugehen ist, dass nahezu 100% des Einsatzstoffes (Eisenoxid) in Produkt übergeführt wird und somit die Feststoffverluste in der gesamten Route minimiert werden.

- **Ziel 2: Ausgehend von den beiden durch die Antragsteller entwickelten Produktionstechnologien für Eisen (FluidRed) bzw. für Stahl (SuSteel) wird in diesem Projekt die energieoptimale Integration beider Technologien erforscht.**

FluidRed ist durch die Verfahrensweise des kontinuierlichen Kreuzstromes in der Lage, jeden „gewünschten“ Vorreduktionsgrad bereitzustellen.

Aktuell verfügbare Forschungsergebnisse bei SuSteel zeigen, dass im Falle der Kopplung zwischen SuSteel zur Stahlherstellung und FluidRed eine Vorreduktion von 30 % Reduktionsgrad die energie- und stoffoptimierte Variante darstellt.

Durch den extrem guten Stoffübergang, vor allem zu Beginn der Reduktion im Fluidred Aggregat ergeben sich aus den Berechnungen sehr kurze Verweilzeiten und dadurch ein geringer Platzbedarf für die Wirbelschicht, damit einhergehend sind die transportierten Gasmengen gering und die Energieeffizienz hoch.

Im Gegenzug kann bei Susteel die FeO-Menge und damit die Eisenverluste in der Schlacke während des Einschmelzens deutlich minimiert werden.

Dies ergibt für eine auf Basis erneuerbaren Energien einer CO_2 freien Routenführung vom Eisenoxid bis zum Rohstahl einen Gesamtenergieverbrauch inkl. Wasserstoffverbrauch von ca. 17 GJ/t Rohstahl. Dies ergibt im Vergleich zur weltweiten Energieverbrauch von ca. 19 GJ/t Stahl eine deutliche Einsparung von ca. 10%. Geht man von konventionellen, am Markt verfügbaren Technologien aus und integriert die herkömmlichen Routen, weisen diese auf Basis der Reduktion mittels reinem H_2 , soweit technologisch möglich, und Einschmelzen mittels elektrischer Energie einen Gesamtenergieverbrauch (Inkl. H_2 Erzeugung mittels Elektrolyse) von zumindest 22 GJ/t

Rohstahl auf. Damit ergibt sich eine Einsparung des Gesamtenergieeinsatzes von zumindest 23%.

- **Ziel 3: Optimale Abstufung zwischen FluidRed (Vorreduktion) und SuSteel (Rohstahlerzeugung)**

Die derzeit, oben beschriebene; optimale Abstufung zwischen Fluidred und SuSteel bez. Minimierung der Gesamtenergie- und Ressourceneinsatz liegt bei 30% Reduktion via Fluidred und 70% via SuSteel.

In den nächsten Jahren soll mittels zweier in Bau befindlichen Versuchsanlagen am Standort der voestalpine Donawitz die optimale Abstufung weiter untersucht und im Pilotmaßstab nachgewiesen werden.

- **Ziel 4: Übergang in reine H₂ Reduktion: Verwendung von CH₄ als Basis mit „Auffettung“ durch Elektrolyse H₂. Entwicklung der hierfür optimalen Gasaufbereitung.**

Durch die Prozessführung bei Fluidred, die einen optimalen Kreuzstrom zwischen Feststoff und Gas darstellt, kann H₂ aus erneuerbaren Energien beliebig zwischen 0 und 100% eingespeist werden.

Dieser Wasserstoff könnte per Elektrolyse, die mittels temporären in Stahlwerken auftretenden Stromkapazitäten betrieben wird, bereitgestellt werden, was die Wirtschaftlichkeit der Gesamtgasproduktion auch in den nächsten Jahren nicht verschlechtern würde.

Als Beispiel hierfür wurde eine Gasanlage zur Produktion des Reduktionsmittels H₂ auf Basis Erdgas – siehe Beschreibung AP 3 – ausgelegt. Dieses System ist im Bereich 1:2 regelbar, d.h. es bietet jederzeit die Möglichkeit, regenerativen Wasserstoff in beliebigen Teilen bis zu 50 % einzuspeisen und somit den Erdgasverbrauch zu halbieren. Es hat sich gezeigt, dass bei weiterer Erhöhung des regenerativen H₂ Anteils aus anlagentechnischer und wirtschaftlicher Sicht eine direkte Erhöhung auf 100% anzustreben ist, um nicht zwei verschiedene Gaserzeugungssysteme betreiben zu müssen.

- **Ziel 5: Gestaltung und Gasbereitstellung zur energieoptimalen Ausnutzung der vorhandenen Ressourcen.**

Der Gesamtressourceneinsatz setzt sich im westlichen aus Energie für Erzeugung des Reduktionsmittels (Elektrolyse) und Wärme für den Prozess zusammen.

Aufgrund der geringeren Feststoffeinsatzes pro Tonne Rohstahl verringert sich der Netto-Bedarf an Reduktionsmittel um ca. 5-10%.

Weiters hat sich gezeigt, dass bei optimierter Prozessführung auch der Wärmebedarf verringert werden kann. Dies gelingt durch intelligente Kopplung der beiden Prozessstufen Vorwärmung und Reduktion.

Zusätzlich ergeben sich durch die im Verhältnis zu anderen Verfahren geringere, im Kreislauf transportierte spezifische Gasmengen automatisch kleinere und damit ressourcenschonendere Aggregate wie Kompressoren, Filter, Wäscher, Heater usw. Dies gilt sowohl für die Prozessschritte Vorwärmung (im Vergleich zur Pelletierung) als auch Reduktion (im Vergleich zum Schachtverfahren).

- **Ziel 6: Minimierung des Ressourceneinsatzes**

Es hat sich durch Versuche und Berechnungen bestätigt, dass im Vergleich zu anderen Verfahren der Einsatz an Rohstoff/t Produkt ca. 10 % geringer ist, da Bindemittel und Additive (im Vergleich zum Pelletierprozess) wegfallen.

Außerdem werden alle anfallenden Stäube bzw. feinen Feststoffe bei Fluidred direkt in den Prozess rückgeführt, dies ist bei Schachtverfahren nur über den Umweg einer erneuten Pelletierung oder Brikettierung möglich.

Bei Fluidred wird die Entfernung des Schwefels und anderer Schadstoffe in der Vorwärmung durchgeführt. Dies gelingt durch den Umstand der geringen Korngröße und der verringerten Gasmenge im Kreislauf deutlich effizienter als in der Pelletieranlage. Dies betrifft, wie sich im Projekt gezeigt hat, den Ressourcen- und Energieeinsatz und den Abscheidegrad.

4.2 Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete

4.2.1 Arbeitspaket 1: Projektmanagement und Kommunikation

Durchführung von professionellem Projektmanagement: Koordination der Arbeitspakete, Terminplanung, Besprechungen, Dokumentation, Berichtswesen, Patentantrag, Präsentationen

4.2.2 Arbeitspaket 2: Vorausgehende Laborversuche

Unter Nutzung eines bereits bestehenden Aggregats wurden kontinuierliche Fließtests mit auf Konzentratfeinheit gemahlener Hämatit durchgeführt.

Diese Kaltversuche wurden zur Ermittlung des Fließ – und Austragsverhaltens des Feinerzes im Fließbett unter „FluidRed – Bedingungen“ durchgeführt.

Das Aggregat wurde mit einem im Zuge dieses Projekts neu entwickelten Düsenboden ausgerüstet.



Abbildung 5 – Versuchsvorrichtung MUL plus HMI-Bild

4.2.3 Arbeitspaket 3: Gaswirtschaft

Mit Hilfe von Simulationsrechnungen wurde die Steigerung der Energie- und Ressourcen Effizienz im Hinblick auf die Gaswirtschaft untersucht.

- **Routenvergleich und Integration zukünftiger Netzregelleistungen (stochastische Erzeugungskapazitäten)**

Es wurden nur Vergleiche mit am Markt befindlichen Routen zur Stahlerzeugung, die grundsätzlich auch in der Lage sind, in Zukunft CO₂ - frei Stahl zu produzieren, durchgeführt. Dies ist für die Hochofenroute nicht möglich.

Neben den Erläuterungen zum Make-up Gas und zur Gaswirtschaft der Fluidred-Anlage ist für die Entwicklung einer neuen Technologie auch ein Routenvergleich mit bestehenden Verfahrensrouten als Benchmark von Bedeutung.

Für diesen Routenvergleich wurden folgende Verfahrensrouten gewählt:

1. Pelletieranlage – Midrex DR (MX) mit Erdgas – Elektroofen (EAF), „MX1_5C“; Benchmark; 1,5% C im HDRI (hot direct reduced iron) zum EAF
2. Pelletieranlage – Midrex DR mit H₂ – Elektroofen, „MX0C“; Midrex-Entwicklung; 0% C im HDRI zum EAF
3. Fluidred (FR) mit H₂ – Elektroofen, „FR0C“; PTAT-Entwicklung; 0% C im HDRI zum EAF

Zur Durchführung von Prozesssimulationen, welche sowohl Massen- und Energiebilanzen beinhalten, wurde seitens PTAT ein Simulationsprogramm m-Simtop entwickelt.

Hinsichtlich Gaswirtschaft können die wesentlichen Merkmale wie folgt zusammengefasst werden:

1. **Verfahrensroute: Pelletieranlage – Midrex DR mit Erdgas – Elektroofen:**

Die Pelletieranlage beinhaltet nach der Aufbereitung und Pelletierung einen sogenannten Brennofen, welcher bei der Erdgasvariante mit Erdgas befeuert wird. Ein interne

Abwärmenutzung stellt sicher, dass das gebildete Rauchgas mit möglichst niedriger Temperatur emittiert wird.

Die Midrexanlage beinhaltet einen sogenannten Prozessgaskreislauf. Hier wird - durch Abwärme vorgewärmtes - Erdgas mit rückgeführtem Topgas dem CO₂ Reformer zugeführt, wobei das sich bildende Reduktionsgas auch erhitzt wird. Nach der Reduktionsarbeit im Schacht wird das Topgas in einem Wäscher zur Kondensation von Wasser gekühlt und wieder rückgeführt. Ein Teilstrom dieses Topgases wird ausgeschleust und mit Erdgas zur Befeuerung des Reformers verwendet.

Das im Elektroofen gebildete EAF Gas wird vollständig nachverbrannt und einer Abwärmenutzung (z.B. Wärmetauscher für Dampferzeugung) zugeführt.

Aufgrund der Verfahrenstechnik dieser Route ist eine Integration von Netzregelleistung nicht möglich.

2. Verfahrensrouten: Pelletieranlage – Midrex DR mit H₂ – Elektroofen:

Die Gaswirtschaft dieser Verfahrensrouten ist vergleichbar zur vorher beschriebenen Routen mit dem wesentlichen Unterschied, dass anstelle von Erdgas Wasserstoff an der Anlagengrenze zugeführt wird und der CO₂ Reformer mit einem Reduktionsgaserhitzer ersetzt wird.

Aufgrund der Verfahrenstechnik dieser Routen begrenzt sich die Integration von Netzregelleistung auf die Erzeugung bzw. Speicherung von H₂ für die Reduktion.

3. Verfahrensrouten: Fluidred mit H₂ – Elektroofen:

Die Gaswirtschaft dieser Verfahrensrouten ist dadurch gekennzeichnet, dass Wasserstoff an der Anlagengrenze für die Reduktion zur Verfügung steht. Nach der – abhängig von der Rohstoffqualität – erforderlichen Erzaufbereitung (vergleichbar zur Pelletieranlage) wird das Feinerz einer mehrstufigen oxidierenden Erwärmung in einer Zyklonkaskade zugeführt. Im Falle von Magnetit wird noch ein Oxidationsschritt nachgeschaltet. In weiterer Folge wird das Feinerz der Reduktion in einem Fließbett zugeführt.

Der Energiehaushalt dieser erläuterten Verfahrensrouten wird im nachfolgenden Kapitel AP4 beschrieben und bewertet.

Bei dieser Routen kann die Integration von Netzregelleistung für die Produktion bzw. Speicherung des Reduktionsmittels H₂ und für Einbringen und Speicherung von sensibler Wärme im Aufheizprozess genutzt werden.

4.2.4 Arbeitspaket 4: Energieeffizienz

- **Modell des Produktionsprozesses (DRI + EAF) mittels „m-Simtop“**

Allgemeines zum Programm

In den letzten Jahren hat Primetals Technologies GmbH eine umfassende metallurgische Modellbibliothek entwickelt – mittlerweile „m.simtop“ genannt. Die Modellbibliothek deckt alle verfahrenstechnischen und metallurgischen Aggregate samt Nebenanlagen zur Durchführung von Prozess-Simulationen ab. Dahingehend können verschiedene Varianten der Stahlherstellungs-Verfahren modellhaft abgebildet werden, in diesem Fall oben (siehe Kap. -) erwähnte Routen:

Die Modellbibliothek findet in einer gleichungs-orientierten Prozess-Simulationssoftware Anwendung, was eine flexible Modellierung von integrierten Hüttenwerken inklusive der Rohmaterialversorgung, Gasnetzwerke und Recycles für jeden gewünschten Detaillierungsgrad ermöglicht. Weitere Anlagen-Modelle können jederzeit in die Modellbibliothek aufgenommen werden. Derzeit stehen 250 Modelle zur Verfügung, inklusive aller nötigen thermodynamischen Daten und Routinen wie z.B. Gibbs-Minimierung

- **Energieoptimale Integration Fluidred / SuSteel**

Die energieoptimale Integration Fluidred / SuSteel bedeutet das Zusammenschalten der Vorreduktion (Fluidred) mit der direkten H₂-basierten Rohstahlerzeugung (SuSteel) ob der Prämisse der maximalen Energieeffizienz.

Ziel ist es daher, den Abgasstrom aus der Stahlerzeugung zur Vorwärmung bzw. zur Vorreduktion im Vorreduktionsaggregat zu verwenden. Durch sich verändernde Vorreduktionsgrade ändern sich in weiterer Folge die Gasausnutzung und der Gesamtenergiebedarf der Stahlerzeugungsanlage. Unter Ziel 3 werden daher zwei Fälle präsentiert, welche den Effekt unterschiedlicher Vorreduktionsgrade auf die Gasausnutzung sowie auf den Gesamtenergieverbrauch in Kombination aufzeigen. Dabei handelt es sich um Vorreduktionsgrade von 30 bzw. 50%. Detailliertere Berechnungen sind erst in weiterer Folge anhand von ermittelten Versuchsdaten der noch in Bau befindlichen Versuchsanlage für Su-Steel möglich.

Folgende zwei Fälle unterschiedlicher Vorreduktionsgrade werden dargestellt und der Effekt auf den Gesamtenergieverbrauch sowie Gesamtwasserstoffverbrauch pro Tonne Stahl aufgezeigt. Das verwendete Modell basiert auf rein thermodynamischen Berechnungen, wobei durch Berücksichtigung von Wärmetauschern der Gesamtenergieverbrauch optimiert wurde. Prinzipiell besteht das Model aus den beiden Kernaggregaten (SuSteel-HPSR zur Erschmelzung und Endreduktion sowie FluidRed zur Vorreduktion), wobei der Abgasstrom aus dem SuSteel-Aggregat, geführt über einen Verdampfungskühler und einen Gas-Gas Wärmetauscher, in weiterer Folge zur Vorreduktion verwendet wird. Das Abgas der Vorreduktion wird einem weiteren Gas-Gas Wärmetauscher zugeführt um eine optimale Wärmerückgewinnung zu gewährleisten. Anschließend wird das Abgas über einen Wasserabscheider sowie

Kondensator geführt um den während des Reduktionsprozesses gebildeten Wasserdampf aus dem Gas zu entfernen, bevor es dem Prozess wieder zugeführt und mit Gas aufgefrischt werden kann.

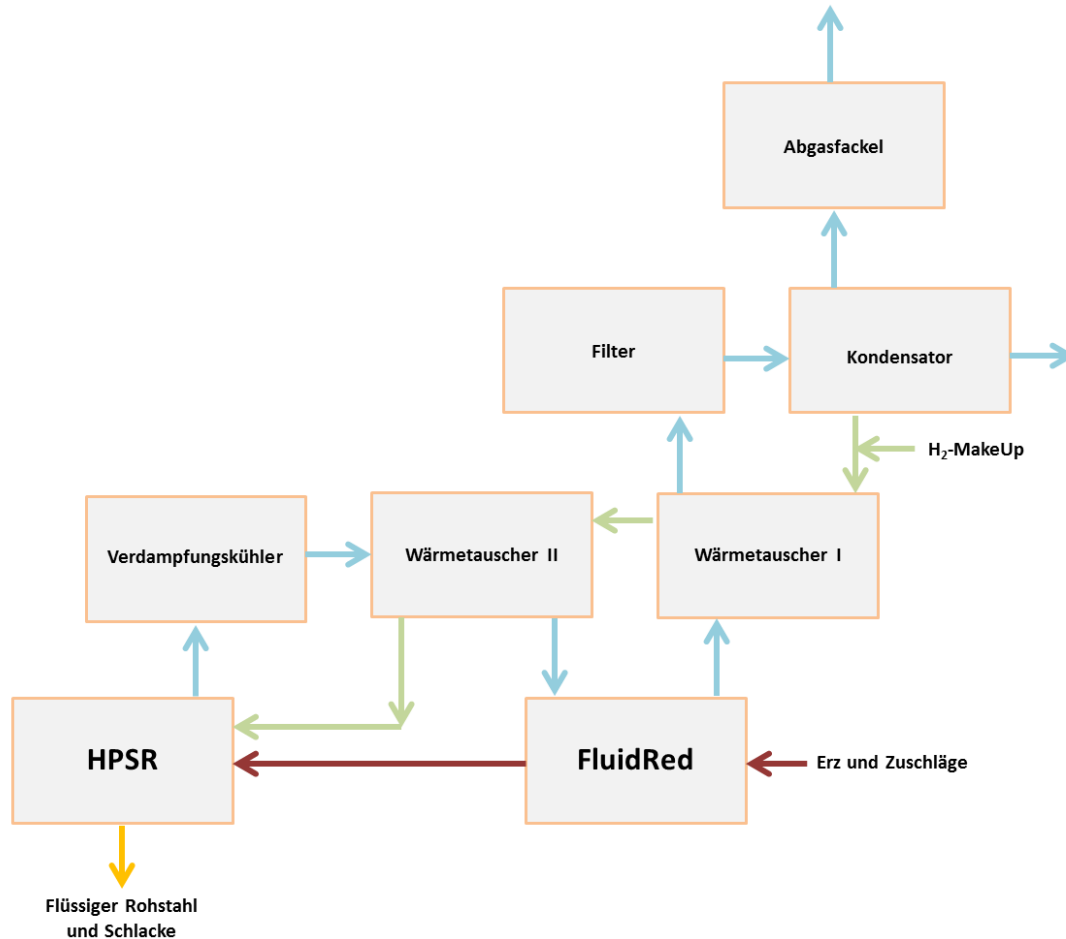


Abbildung 6: Schematischer Überblick Berechnungsmodell Kopplung SuSteel (HPSR)-FluidRed

Es wurden zwei schematische Fälle mit unterschiedlichen Vorreduktionsgraden untersucht und dessen Auswirkung auf den Gesamtenergiebedarf sowie den Wasserstoffverbrauch dargestellt. Dabei handelt es sich um Vorreduktionsgrade von 30 bzw. 50 % Reduktionsgrad.

Das Berechnungsmodell basiert auf der Basis einer jährlichen Produktion von ca. 500,000 t Rohstahl pro Jahr. Folgende Annahmen wurden in der Berechnung getroffen:

- Elektrischer Wirkungsgrad von 90 %
- Verluste durch Kühlung im Rohstahlerzeugungsaggregat: 7.5 %
- 30 % der Wärmemenge des Abgases gehen durch Kühlung verloren
- Keine Verdichtung des Gases berücksichtigt

Fazit

Aus den ersten Berechnungsergebnissen zeigt sich, dass im Falle der Kopplung zwischen SuSteel zur Stahlherstellung und FluidRed zur Vorreduktion, eine Vorreduktion bis ca. 30 % Reduktionsgrad als sinnvoll erscheint. Dies resultiert aus den Werten des Gesamtenergieverbrauches sowie des Wasserstoffverbrauches. Höhere Vorreduktionsgrade erfordern eine Gaszusammensetzung im Vorreduktionsaggregat welche sich im Eisenstabilitätsfeld befindet, wodurch entsprechend hohe Wasserstoffmengen im Gas erforderlich werden. Diese können nur durch entsprechend hohe Frischgasmengen bereitgestellt werden. Da das Berechnungsmodell auf diversen Annahmen sowie einer rein thermodynamischen Berechnung beruht, sollen die Ergebnisse nur als Abschätzung dienen. Basierend auf Versuchsergebnissen von der noch im Bau befindlichen SuSteel-Anlage kann das Modell weiter verifiziert werden und dadurch die Aussagekraft der Berechnungsergebnisse deutlich verbessert werden.

- Erhebung der theoretischen Energieeinsparungspotentiale

Oxidation und Vorwärmung:

Es hat sich gezeigt, dass die Gestaltung der Materialvorwärmung einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamteffizienz der Technologie hat. Die Vorwärmung des zu reduzierenden Erzes ist notwendig, um die Anlagentechnologie der Reduktionsstufe möglichst einfach zu halten.

Auf Basis der durchgeführten Literaturstudie und der Grundlagenentwicklung hat sich auch gezeigt, dass eine Zyklonkaskade hierzu am besten geeignet ist. Der Vorteil des hohen Wärmeübergangs ist hier kombiniert mit Gegenstrom Betrieb und Robustheit. Hinzu kommt noch ein weiterer spezifischer Aspekt, welcher sich aus den bisherigen Arbeiten ergeben hat. Um magnetitische Erze effizient reduzieren zu können, hat es sich als vorteilhaft erwiesen, wenn diese im Zuge der Aufwärmung zu Hämatit oxidiert werden. Dieser Vorgang schafft durch die Massenzunahme Brüche in der Kristallstruktur und ermöglicht es somit dem Reduktionsgas bei der Reduktion, innerhalb der porösen Erzstruktur nahezu den ganzen Sauerstoff zu erreichen.

Die Anforderungen an das verfahrenstechnische Aggregat zur Vorwärmung und Oxidation sind:

- Skalierbarkeit bis min. einer Million Tonnen Erz pro Jahr
- Einfachheit und Robustheit.
- Hohe Energieeffizienz – Nutzung der Wärme aus exothermer Oxidation bei Magnetit
- Ausreichend Sauerstoff im heißen Gas zur Oxidation bei Magnetit
- Ausreichend Aufenthaltszeit in der heißen sauerstoffreichen Atmosphäre

Eine Vortrocknung des Erzes vor der Vorwärmung und Oxidation mit Abwärme mit niedriger Temperatur führt zu einer weiteren Verbesserung der Energieeffizienz.

Reduktion:

Der nachgeschaltete Reduktionsprozess ist gaseitig von der Vorwärmung und Oxidation entkoppelt. Entscheidend ist hier die möglichst hohe Temperatur des Feinerzes beim Eintritt in die Reduktionszone speziell bei Wasserstoff als Reduktionsmittel, da die Reduktion endotherm verläuft.

Wie im Arbeitspaket AP3 bereits gezeigt wird, haben sich Reduktionstemperaturen über 650 °C als vorteilhaft erwiesen.

Folgende weitere im AP3 gezeigten Verfahrensschritte sind hinsichtlich Energieeffizienz von großer Bedeutung:

- Das aus der Reduktionszone der Wirbelschicht austretende sogenannte Topgas wird einem Wärmetauscher zugeführt, welche die fühlbare Wärme des Topgases abführt und zur Vorwärmung des Reduktionsgases nutzt. Die Abkühlung ist erforderlich, um in weiterer Folge das aus der Reduktion gebildete Wasser durch Kondensation aus dem Prozess abzuführen.
- Nach dem Wärmetauscher wird das Gas einer Trockenentstaubung zugeführt, um den aus der Wirbelschicht ausgetragenen Feinkornanteil trocken abscheiden und dem Prozess wieder rückführen zu können.
- In weiterer Folge wird das bei der Reduktion gebildete Wasser durch Kühlung mit Prozesswasser dem Gaskreislauf entzogen. Um hier die Abwärmeverluste gering zu halten, ist die Effizienz des vorgeschalteten Wärmetauschers wesentlich.
- Nach Zumischung des sogenannten „Make-up“ Gases wird das Gas bevorzugt mit dem Wärmetauscher vorgewärmt und in weiterer Folge einem „Heater“ zur Erzielung der gewünschten Reduktionstemperatur zugeführt.
- Die Verschaltung der Wärmeträger in der Gaswirtschaft ist von entscheidender Bedeutung, um die Abwärmeverluste gering zu halten und eine hohe Energieeffizienz zu erzielen.

- **Bewertung im Hinblick auf Rückwirkungen auf den Produktionsprozess**

Zur Bewertung der Energieeffizienz ist es erforderlich, die Technologie mit einer Verfahrensrouten zu vergleichen, welche einerseits vergleichbare Einsatzstoffe bzw. Produkte hat und andererseits am Markt großtechnisch etabliert ist. Diese Verfahrensrouten wurde im vorigen Kapitel AP3: Gaswirtschaft bereits beschrieben und setzt sich aus einer Pelletieranlage, einem Midrex-Reduktionsverfahren auf Basis Erdgas und einem Elektroofen zusammen. Diese Verfahrensrouten wird somit im Folgenden zum Benchmark für die Fluidredanlage herangezogen, wobei bei der Verfahrensrouten mit Fluidred ebenfalls der nachgeschaltete Elektroofen berücksichtigt ist, um das gleiche Produkt zu erhalten.

Nachdem bei der etablierten Verfahrensrouten – auf Erdgas basierend – ebenfalls die Möglichkeit besteht, in Zukunft anstelle Erdgas Wasserstoff an der Anlagengrenze zu übernehmen und die Technologie entsprechend mit Wasserstoff zu betreiben, wird diese Verfahrensrouten ebenfalls zum Vergleich herangezogen.

Energieverbrauch der Verfahrensrouten:

Wie im AP3, beschrieben, wurden die drei definierten Verfahrensrouten mit dem von PTAT entwickeltem Simulationsprogramm mSimtop gerechnet und die Massen- und Energiebilanzen in Form eines Fließbildes sind als Beilage in diesem Bericht enthalten. Die wesentlichen für den Vergleich relevanten Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

Benötigte Energiemenge pro Verfahrensschritt	Route 1 MX1_5C	Route 2 MX0C	Route 3 FR0C
Einheit	[GJ/t Stahl]	[GJ/t Stahl]	[GJ/t Stahl]
Pelletierung mit magnetit. Erz	0,59	0,57	-
Direktreduktionsanlage	9,67	8,93	-
Zyklonstufe Fluidred (Vorwärmung & Oxidation)	-	-	0,90
Fluidred Wirbelschicht (bez. auf H ₂ und CH ₄ Heater)	-	-	6,52
Elektroofen, EAF	2,48	2,82	2,93
Summe	12,74	12,32	10,35

Tabelle 2: Energieverbrauch der Verfahrensrouten

Folgende Hinweise und Bemerkungen sind die Angaben betreffend in der Tabelle zu berücksichtigen:

- Die Energiemengen basieren auf den eingesetzten Energieträgern in Form von Erdgas, Wasserstoff oder Kohlenstoffträger, wie diese an den Anlagengrenze definiert sind.
- Energiemengen zur Erzeugung der eingesetzten Energieträger aus Primärenergie (z.B. Wasserstoff aus Strom durch Elektrolyse) sind nicht berücksichtigt.
- Elektrischer Strom zum Antrieb von Maschinen und für sonstige Verbraucher ist bei der Pelletieranlage, Midrex-Anlage und bei der Fluidredanlage nicht berücksichtigt (dient nicht für die Wärmezufuhr). Diese Energiemenge ist in der Größenordnung von 0,2 bis 0,4 GJ/t Produkt.
- Nur beim Elektroofen ist die Energiemenge in Form von elektrischem Strom berücksichtigt, da diese der Wärmezufuhr im Elektroofen dient.
- Die unterschiedlichen Energiemengen für den Elektroofen ergeben sich einerseits aus dem unterschiedlichen Kohlenstoffgehalt und andererseits aus der unterschiedlichen DRI Temperatur.

Energieeinsparungsmöglichkeiten

Für die Bewertung der Verfahrensrouten Fluidred inklusive des Elektroofens ist zu

beachten, dass einige Maßnahmen zur Energieeinsparung bereits umgesetzt sind. Somit ist der sich daraus ergebende energetische Vorteil in den oben angeführten Energiemengen schon berücksichtigt. Diese Maßnahmen sind im Wesentlichen:

- Entfall der Pelletierung mit dem Zwischenschritt der Abkühlung der Pellets, welche dann im kalten Zustand in den Reduktionsschacht gefördert werden.
- In der Zyklonkaskade wird das zur Vorwärmung und Oxidation verwendete „Rauchgas“ im Gegenstrom zum Feinerz geführt. Somit wird die Wärme optimal aus dem Gas ausgekoppelt.
- Das aus der ersten Zyklonstufe austretende Gas wird vor der Abfuhr in die Atmosphäre einem Wärmetauscher zur Vorwärmung von Verbrennungsluft zugeführt.
- Das Offgas aus dem Fluidred Reduktionsreaktor wird vor der Entstaubung einem Wärmetauscher zugeführt, womit ein Teil der Wärme zur Vorwärmung des Reduktionsgases übertragen wird.
- Das Abgas aus dem Heater für das Reduktionsgas wird ebenfalls zur Vorwärmung der Verbrennungsluft herangezogen.
- Das Produkt der Fluidred-Anlage wird in heißem Zustand dem Elektroofen zugeführt, um dort die fühlbare Wärme zu nutzen

Im Zuge einer Realisierung dieser Verfahrensrouten stehen noch weitere Energieträger zur Verfügung, deren mögliche Verwendung innerhalb der Route noch einer Lösung zugeführt werden muss. Diese sind:

- Abwärme im Abgas des Elektroofens. Dabei handelt es sich um eine Wärmemenge in der Größenordnung von ca. 0,86 GJ/t Stahl. Die Schwierigkeit bei der direkten Verwendung der Wärme dieses Gases (chemisch und fühlbar) besteht darin, dass es im heißen Zustand drucklos ist – kann somit nicht verdichtet werden – und der Anfall dieses EAF Gases ist nicht kontinuierlich, sondern unterliegt einem Zyklus entsprechend der sogenannten tap-to-tap Zeit im EAF. Die Nutzung dieser Abwärmemenge (8% des Gesamtenergieverbrauchs) kann bei Fluidred für die Trocknung und Vorwärmung des Einsatzstoffes genutzt werden, weil das heiße Erz vor der Reduktion zwischengespeichert werden kann.
- Restliche Abwärmen aus der Vorwärmung oder aus dem Reduktionsgas-Heater können zur Vortrocknung des Feinerzes herangezogen werden, um das physikalisch vorliegende Wasser vor der Erwärmung bei niedriger Temperatur abzuführen.

4.2.5 Arbeitspaket 5: Rohstoffeffizienz - Einfluss auf Energieeffizienz

- Vergleich unterschiedlicher Verfahrenskonzepte hinsichtlich Rohstoffeffizienz. Darstellung der Ressourcenverluste und damit einhergehend Energieverluste.

Aufgrund der Verwendung von sehr feinem Rohstoff als Einsatzstoff für die FluidRed Technologie können einige störende Begleitsubstanzen während eines physikalischen Aufbereitungsschrittes (Magnetscheidung, Flotation, Schwerkraftscheidung) abgetrennt werden, was grundsätzlich energieeffizienter ist als thermische Trennverfahren bzw. die Abtrennung in der Flüssigphase (Rohstahl, Schlacke) bei hohen Temperaturen.

Produktion von nahezu kohlenstofffreien DRI aufgrund der nichtvorhandenen Aufkohlung während des Prozesses (Änderung des Energieverbrauchs des EAF)

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Fahrweise aufgrund der sehr feinen Körnung mit sehr geringen Kohlenstoffanteilen möglich ist. Das Optimum bez. Energieeffizienz wird mithilfe der Versuchsanlage in Donawitz innerhalb der nächsten 3 Jahre untersucht. Grundsätzlich sei angeführt, dass die Kohlenstoffmenge einstellbar ist und auf ein Minimum reduziert werden kann.

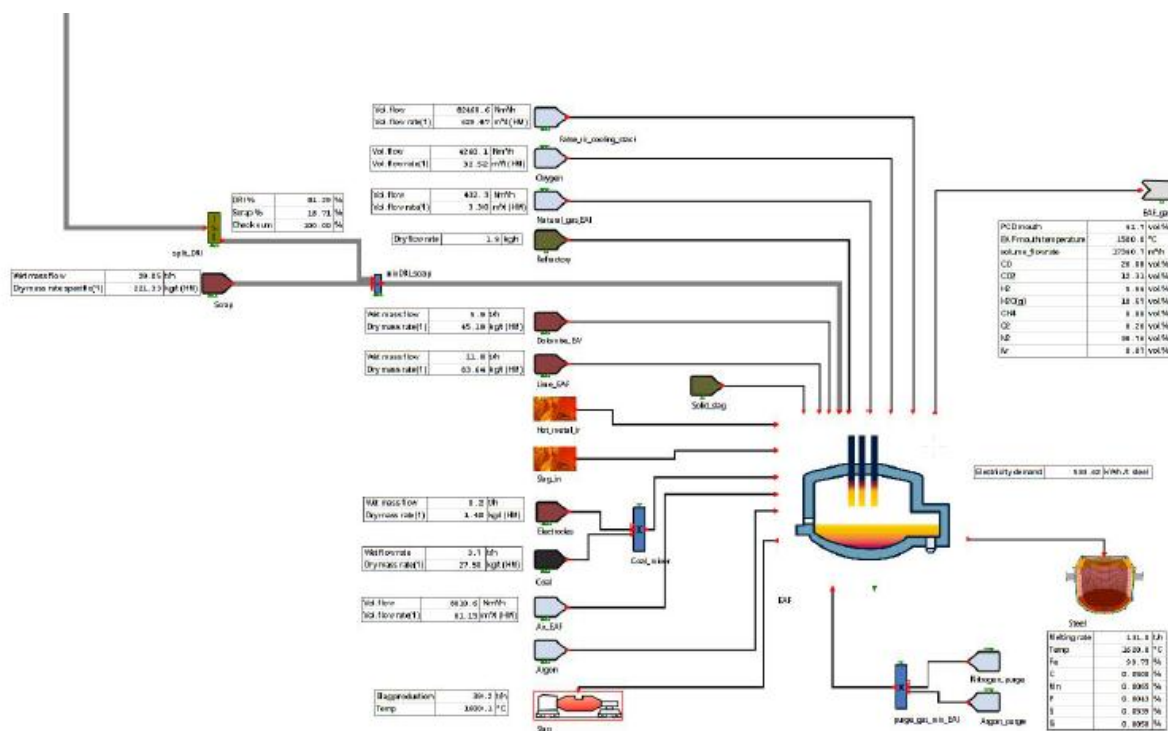


Abbildung 7: Simulationsmodell des Elektrolichtbogenofens, EAF

Die ingenieurmäßigen Berechnungen und Konsultationen mit Spezialisten ergaben, dass sich die einzusetzende elektrische Energie für das Aufschmelzen des Feststoffes im EAF verringern wird, das Aufschmelzverhalten grundsätzlich günstiger ist als bei

herkömmlichen DRI und daher zu erwarten ist, dass die minimal notwendige Kohlenstoffmenge für den Schmelzprozess geringer ausfallen wird.

- **Evaluierung der Möglichkeit eines „zero-iron-loss“ Prozesses zur Rohstahlerzeugung**

Der gesamte Prozess von der Aufgabe des Rohstoffes in die Vorwärmung bis zum Eindüsen des feinen Produkts in den EAF wird pneumatisch geführt. Die wesentlichen Staubverluste ergeben sich über das Abgas aus dem Reduktionsprozess, werden jedoch im Gaskreislauf mittels Tuchfilteranlagen rückgewonnen und können direkt dem Prozess wieder zugeführt werden.

Eine State-of-the-Art Tuchfilteranlage (<5mg Staub/Nm³ Abgas) in Kombination mit der minimierten Gaskreislaufmenge garantiert somit minimale Nettoverluste.

Bei der Verfahrensrouten, welche oftmals weltweit im Einsatz ist, ergeben sich bei der Verwendung von stückigem Material im Schachtofen – im konkreten Fall bei Pellets – Nachteile bei der Reduktionsgeschwindigkeit. Dieser Nachteil wird durch Erhöhung der Reduktionsgastemperatur kompensiert.

Im Unterschied dazu wird bei Fluidred:

- Das Feinerz einer Vorwärmung und Oxidation (bei Magnetit) unterzogen (aber vergleichbar zur Pelletierung bei einer niedrigeren Temperatur) und ohne Abkühlungsschritt im heißen Zustand der Reduktion zugeführt.
- Das Feinerz mit einer großen spezifischen Partikeloberfläche eingesetzt. Dies erhöht die Reduktionsgeschwindigkeit beträchtlich, womit näher am thermodynamischen Gleichgewicht reduziert werden kann.
- Die angeführten Unterschiede erlauben den Betrieb bei niedrigerer Reduktionsgastemperatur.

Bei der Verfahrensrouten, welche großtechnisch oftmals weltweit im Einsatz ist, erfolgt die Agglomeration der Feinerze in der Pelletieranlage, um diese Erze einem Schachtverfahren – dem Midrex Verfahren - zuführen zu können. Hinsichtlich Rohstoffe ergeben sich daraus mehrere Konsequenzen:

- Der Einsatzmischung aus Feinerzen zur Pelletieranlage wird ein Bindemittel zugesetzt, um die erforderliche Pelletsqualität zu erreichen. Dieses Bindemittel ist im Regelfall Bentonit, welches hauptsächlich aus Aluminiumsilikaten besteht.
- In der Stahlindustrie muss aus den Rohstoffen die sogenannte Gangart entfernt werden, um die gewünschten Stahlqualitäten zu erzielen. Dies geschieht an verschiedenen Prozessabschnitten und in der angesprochenen Verfahrensrouten im nachgeschalteten Elektroofen in Form von Schlacke. Diese Schlacke muss für die Prozessführung eine bestimmte Zusammensetzung aufweisen, wobei zwischen basischen und sauren Bestandteilen unterschieden wird. Nachdem Bentonit eine saure Komponente darstellt, muss diese mit zusätzlichen basischen Komponenten – im Wesentlichen Kalkstein oder Dolomit – kompensiert werden.
- Die Pellets, welche dem Schachtofen zugeführt werden, werden in der Regel mit

Kalkmilch beschichtet (coating), um ein Zusammenbacken (sintern) im Reduktionsschacht zu verhindern.

- Im Schachtofen kommt es auf Grund von Feinkorn in den verwendeten Pellets, auf Grund von mechanischem Abrieb beim Handling und im Zuge der Reduktion im Schacht zu Staubverlusten, welche durch die Prozessführung meist im Prozesswasser als Schlamm verloren gehen. Wenn - wie im Regelfall – der Schachtofen nicht bei der Pelletieranlage steht, können diese Schlammverluste dem Prozess nicht mehr rückgeführt werden und müssen einer Entsorgung zugeführt werden.

Im Unterschied dazu ist bei der Fluidred – Technologie:

- kein Zusatz von Bentonit erforderlich
- kein sich daraus ergebender erhöhter Einsatz von basischen Rohstoffen erforderlich
- keine Entsorgung von rohstoffhaltigen Schlämmen erforderlich (Stäube aus Trockenentstaubungen werden dem Prozess rückgeführt)

In Summe ergeben sich daraus **Einsparungen auf der Rohstoffseite bis zu 10%** und in weiterer Folge Energieeinsparungen, da diese Stoffe mechanisch und thermisch nicht verarbeitet werden müssen.

Nach Konsultation mit Spezialisten hat sich auch ergeben, dass ein direkter Einsatz des feinkörnigen, heißen DRIs grundsätzlich energetisch von Vorteil ist. Voraussetzung hierfür ist ein adäquate Chargierung im EAF.

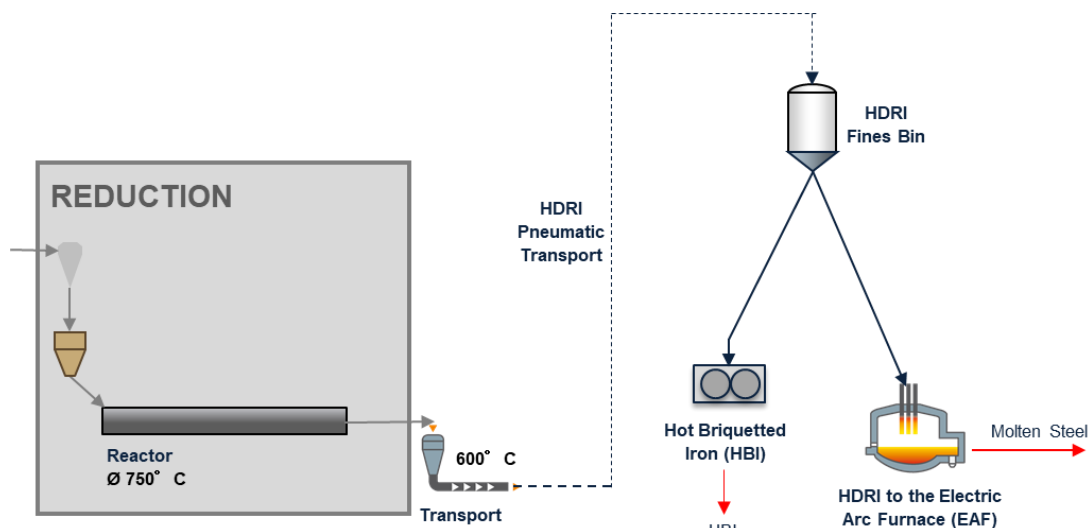


Abbildung 8: Anlagenkonzepte für HYFOR DRI Fines

Im Zuge des FFG Projekts wurde die Machbarkeit der Heißbrikettierung von DRI Fines aus der FluidRed Anlage näher untersucht mit dem Ziel die Anforderung des IMSBC

(International Maritime Solid Bulk Cargoes Code) für DRI zu erfüllen (= Rohdichte > 5 g/cm³).

Laborversuche

In Zusammenarbeit mit der ATNA Industrial Solutions GmbH wurden daher mehrere Versuchsreihen mit DRI Fines geplant und an einer hydraulischen Laborstempelpresse durchgeführt (F_{max.} = 2500 kN).

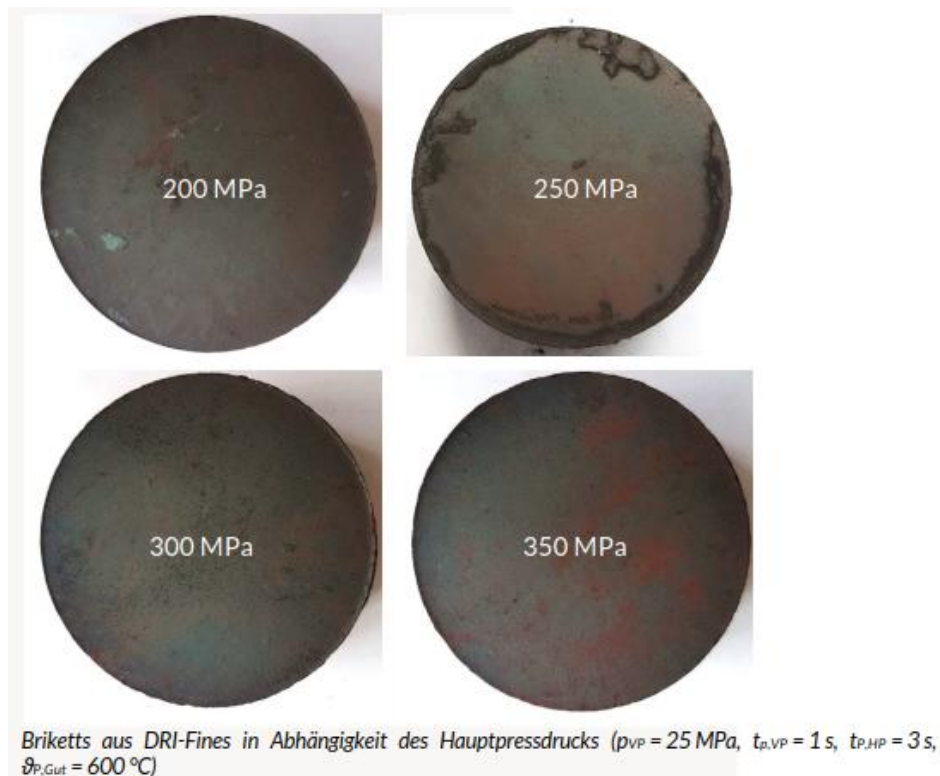


Abbildung 9: Briketts aus DRI Fines

Daraus abgeleitet konnten folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Mit Hilfe eines zweistufigen Brikettierverfahrens können Briketts aus DRI Fines mit hoher Qualität hergestellt werden.
- Die Vorpressung bei 25 MPa führt bereits zu lagestabilen Voragglomeraten, die auch nach dem Ausstoß aus der Pressform einen festen Brikettverband aufweisen.
- Auf die Abriebfestigkeit hat die Variation der Presstemperatur keinen nachweisbaren Einfluss. Sie liegt für beide Presstemperaturen auf einem sehr hohen Niveau. Durch die Beanspruchung kommt es ausschließlich zum Kantenabrieb der Briketts. Die Briketts brechen durch die Beanspruchung nicht.

Energieforschungsprogramm - 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Aufgrund der positiven Ergebnisse der Laborversuche kann daher der Einsatz einer zweistufigen Verdichtung mit einer Stempelpresse als eine möglicher Anlagenkonfiguration zur weiteren Verarbeitung bzw. Passivierung der HYFOR Fines bezeichnet werden.

Weiterführende Versuche mit anderen Einsatzmischungen und die Planung eines Demonstrators auf Basis der Laborversuche sind weitere Schritte bei dieser Entwicklung.

4.2.6 Arbeitspaket 6: Verifizierung der Simulationen und Modelle

Die in diesem Abschnitt angeführte Versuchskampagne diente dem Ziel, die in den AP 3-5 erarbeiteten Modellen zu verifizieren. Mit einer Variation der Versuchsrandbedingungen wurden darüber hinaus verschiedene relevante Szenarien überprüft.

Ziel war es zu beweisen, dass jede Art von Eisenerz in Form von Pellet-Feed mit dieser Technologie verarbeitbar ist.

Anhand dieser Versuchsergebnisse können folgende Erkenntnisse für die Verifizierung der Modelle abgeleitet werden:

- Magnetitische Eisenerze in Form von Pellet-Feed können in einem Wirbelschichtreaktor reduziert werden, Die Parameter für notwendige Verweilzeit, Temperatur, Gasqualität in der Vorwärmstufe wurden daraus abgeleitet.
- Eine Zugabe von MgO als Trennmittel zwischen den einzelnen Partikeln wirkt sich positiv auf die Fluidisierung unter Reduktionsbedingungen in einem Wirbelschichtreaktor aus. Die Umsetzung der MgO Zugabe wurde im Simulationsmodell wurde ebenso realisiert.
- Eine Absenkung der Reduktionstemperatur wirkt sich ebenfalls positiv auf die Fluidisierung unter Reduktionsbedingungen in einem Wirbelschichtreaktor aus und zeigt sowohl bei den Versuchen als auch in der Simulation keinen signifikanten Einbruch der Reaktionskinetik.

- **Beschreibung Modellaufbau/Gesamtmodell - Validierung bzw. Anpassung der Simulationsergebnisse**

Die Gesamtanlagensimulation entwickelt von ENRAG wurde voll dynamisch gestaltet. Das bedeutet, dass alle Teilmodelle (wie beispielsweise Ventile, Behälter, Schieber, etc.) in das Berechnungssystem derart integriert wurden, dass diese zeitaufgelöst (transient) Anlagenzustände errechnen können. Ein wesentlicher Punkt im Hinblick auf den weiteren Entwicklungsprozess sowie auf zukünftige Anlagen im industriellen Prototyp Maßstab ist die Analyse von Anfahr- Abfahr- und Umschaltprozessen. Die in E3SteP von ENRAG entwickelte Gesamtanlagensimulation wurde auf Basis der gewonnen Labordaten verifiziert. Hier geht es insbesondere um die Verifizierung der Reaktionsgeschwindigkeiten von Oxidations- und Reduktionsprozessen. Das Gesamtsimulationstool ist in der Lage sowohl die Oxidation von Magnetiten zur Vorbereitung für den späteren Oxidationsprozess darzustellen als auch die Reduktion von Eisenerzen. Die Darstellung der Oxidationsprozesse ist insbesondere für die Realisierung der Effizienzsteigerung im Hinblick auf Aufheizung und Abkühlung von großen Gas- und Feststoffmengen relevant. Zusätzlich kann bei der Simulation der Oxidationsprozesse die Evolution von Spurenelementen (Schwefel) untersucht werden. Dies ist relevant für die Gesamtanlagensimulation um geeignete Senken (bzw. Reinigungsstufen) für Spezies wie SO₂ im System zur Verfügung zu stellen bzw. diese in der Interaktion mit der Gesamtanlage zu analysieren.

Index ss_{ana}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Solid	Al ₂ O ₃	C	CaO	Fe ₂ O ₃	FeMet	FeO	Fe _{tot}	LOI	MgO	P ₂ O ₅	S	SiO ₂
Species												

Tabelle 3: In der Gesamtsimulation verwendete Spezies im Feststoff

Das Gesamtsimulationsmodell beinhaltet, wie eingangs erwähnt zusätzlich noch die Möglichkeit der Implementation von Verschaltungen mit Ventilen, Gebläsen, Feststoff Speicher (Tanks) und Schiebern. Dies dient zur Simulation von Versuchsanlagen der nächsten Generation sowie von realen Anlagen in Echtzeit (bzw. auch beschleunigte Simulation welche schneller als Echtzeit ist). Diese Simulationen laufen transient und ermöglichen die Darstellung von Befüllungs- und Entleerungsvorgängen sowie von Umschaltvorgängen und die Auswirkungen auf die einzelnen Teile der Anlage.

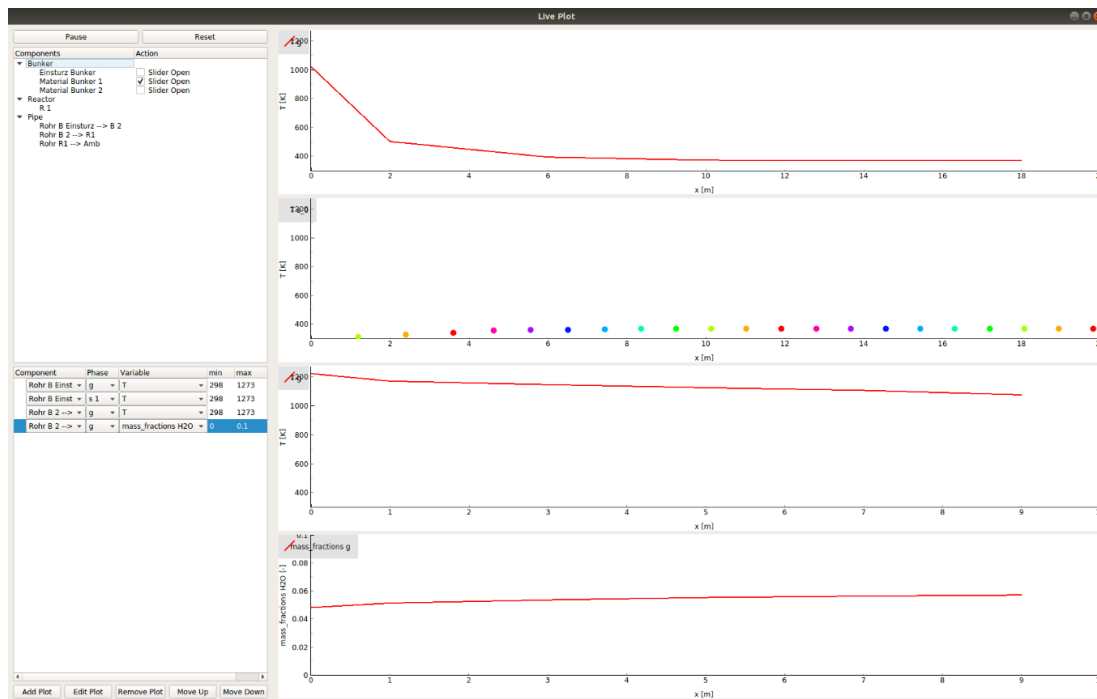


Abbildung 10: Exemplarisches HMI für die Gesamtanlagensimulation

In Abbildung 10 ist ein exemplarisches HMI dargestellt. Es enthält links zwei Auswahlleisten der in Diagrammform darzustellenden Anlagenteile und Prozessparameter. Rechts kann der zeitliche Verlauf der jeweils ausgewählten Prozessparameter angezeigt und beobachtet werden. Damit können auch Änderungen in der Simulationskonfiguration (z.B.: öffnen oder schließen eines Schiebers) direkt auf die Auswirkungen hin beobachtet werden.

Die Kalibrierung und Verifizierung der Simulationsmodelle auf Basis der durchgeführten Laborversuche erfolgte einerseits für die Reaktionsgeschwindigkeiten im Bereich der Aufoxidation von magnetitischem Erz.

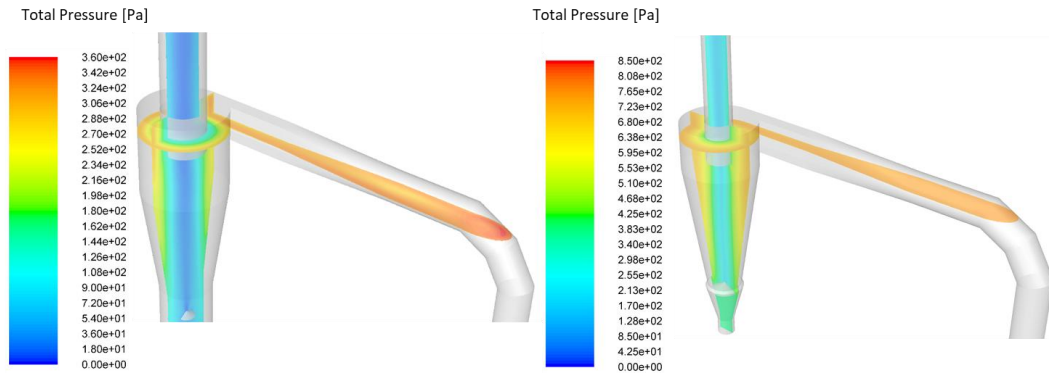


Abbildung 11: Darstellung des Druckverlustes in Erwärmungs-/ Oxidationszyklonen

Die in den Laborversuchen gemessenen kinetischen Oxidationsraten wurden mit Hilfe von dreidimensionalen Simulationen verifiziert und damit eine Basis für die Gesamtanlagensimulation geschaffen. In Abbildung 11 ist ein exemplarisches Ergebnis der Berechnungen dargestellt. Es zeigt den errechneten Druckverlust von zwei verschiedenen Varianten eines Ausschnitts des Oxidations- und Erwärmungsapparats. Die Korrelationen aus den dreidimensionalen Simulationen dienen als Input für die Gesamtanlagensimulation.

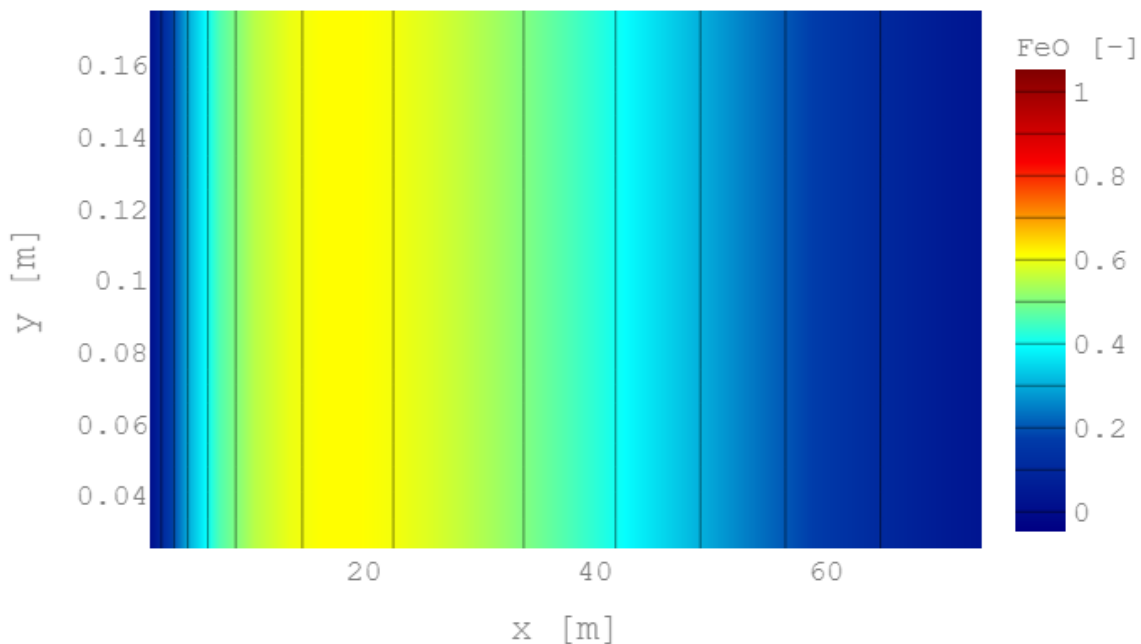


Abbildung 12: Ergebnis des Reduktionsaggregats, Darstellung des FeO Anteils

Die Ergebnisse der Laborversuche zur Reduktion des Eisenerzes dienen als Basis zur Verifizierung der Gesamtanlagensimulation. In Abbildung 12 ist für ein hematitisches Ausgangserz der Verlauf des FeO Anteils im Reduktionsaggregat dargestellt. Dieser steigt im ersten Drittel des Aggregats an. Dies ist der erste Teil der Reduktion. In den

folgenden zwei Drittel sinkt der Anteil langsam ab. Dies ist die finale Reduktionsreaktion zu metallischem Eisen.

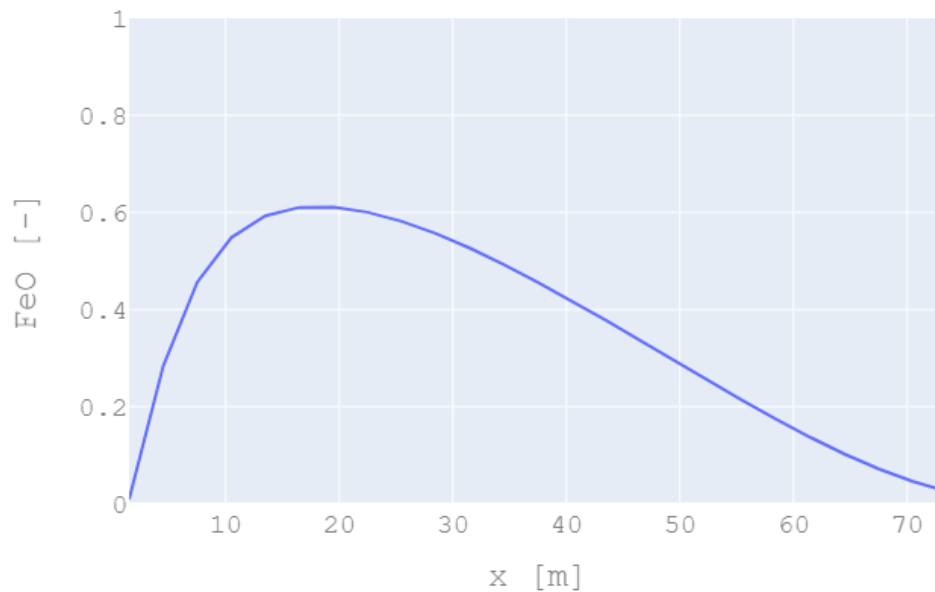


Abbildung 13: Ergebnis des Reduktionsaggregats, Darstellung des FeO Anteils.

Dies ist in Abbildung 13 nochmals als Liniendiagramm über die Gesamtlänge des Reduktionsaggregats dargestellt. Gut zu erkennen ist der nahezu lineare Verlauf der FeO Reduktion. Dies spricht für einen sehr guten Reduktionsfortschritt nahe im Gleichgewicht. Dies entspricht sehr genau dem beobachteten Reduktionsfortschritten in den Laborversuchen.

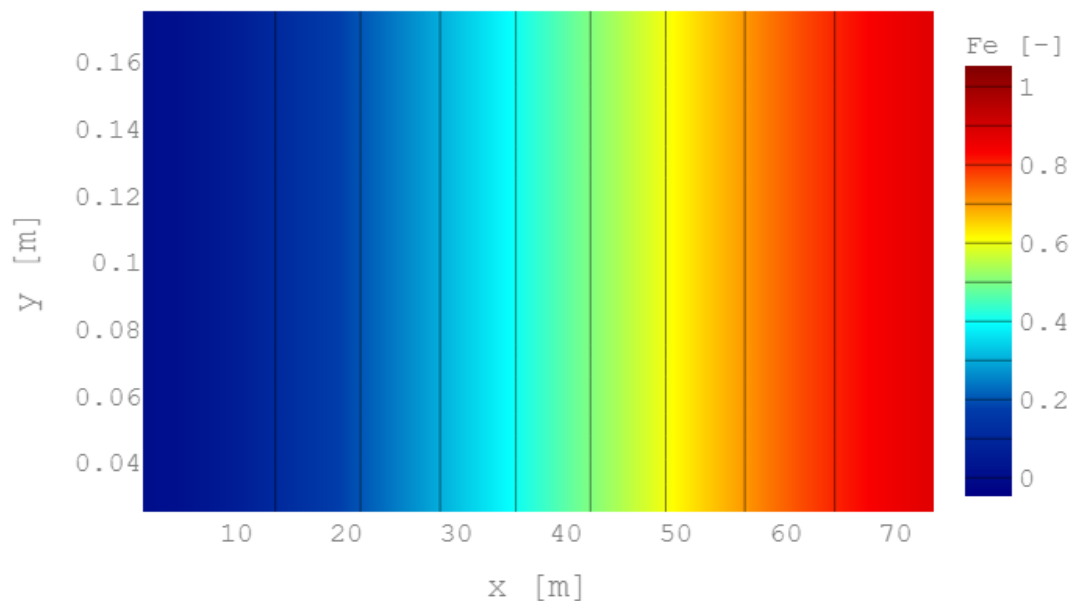


Abbildung 14: Entwicklung des Anteils an metallischem Eisen

Der Anteil an metallischem Eisen entwickelt sich in der Gesamtsimulation ebenfalls entsprechend den Ergebnissen aus den Laborversuchen. Der Verlauf des Anteils an metallischem Eisen ist in Abbildung dargestellt.

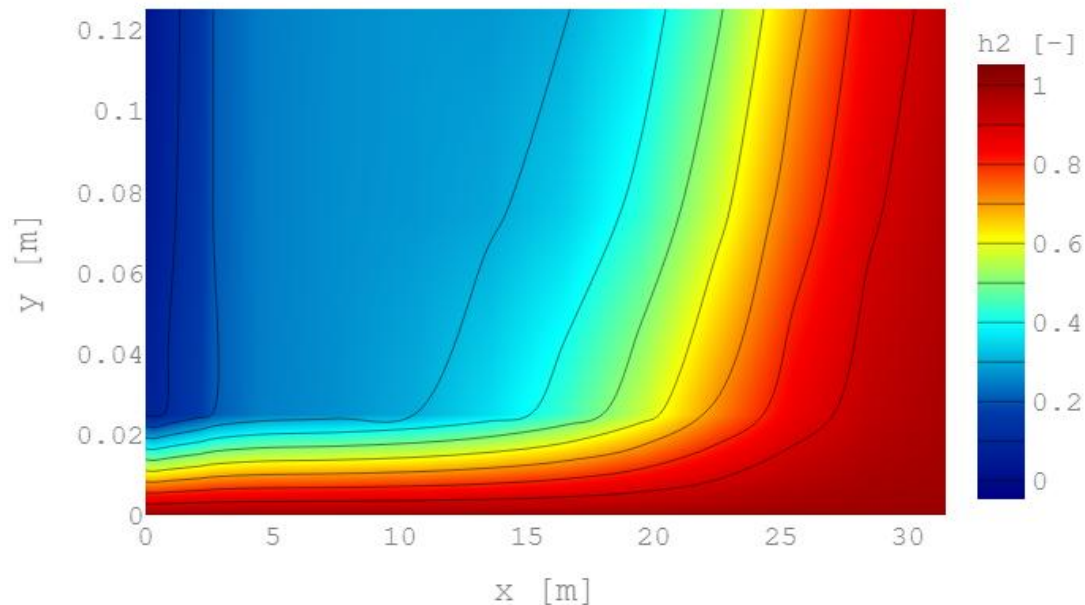


Abbildung 15: Anteil (%vol) Wasserstoff im Gas

Die Evolution der Gasphase wird in der Gesamtanlagensimulation ebenso mitberechnet. In Abbildung 15 ist der berechnete Verlauf der Wasserstoff Konzentration im Reduktionsaggregat in der Solid / Fluid Zone dargestellt. Diese Berechnung ermöglicht eine deutlich genauere und bessere Interpretation der Ergebnisse aus den durchgeführten Laborversuchen.

Zusammenfassend konnte das entwickelte Gesamtanlagensimulationstool auf Basis der zur Verifizierung durchgeführten Laborversuche sehr gut validiert und verifiziert werden. Das Gesamtanlagen Tool ist in der Lage sowohl transiente als auch stationäre Vorgänge in verschiedensten Anlagenkonfigurationen zu berechnen. Es ist damit eine sehr gute Basis für weitere Entwicklungsprojekte auf dem hier untersuchten Gebiet.

4.2.7 Arbeitspaket 7: Dissemination

Folgende **Publikationen** wurden über die Projektlaufzeit veröffentlicht:

- Pressemitteilung: „Primetals Technologies entwickelt bahnbrechende Technologie zur kohlenstofffreien, wasserstoffbasierten Direktreduktion von Eisenerzfeinstoffen“, 26. Juni 2019
- „We go green“ Mitarbeiterzeitung Pioneer 01/2020
https://intranet.primetals.com/organization/key-regions/Austria/Shared%20Documents/PIONEER_Ausgabe%20Feb%202020_Web.pdf
- Article in Metals Magazine “Hyfor – Hydrogen-based fine-ore reduction”
(<https://www.primetals.com/about-us/how-we-innovate/the-future-of-metals>)
- Webpage: A sustainable, carbon-free, safe and intelligent future of metals production
(<https://www.primetals.com/about-us/how-we-innovate/the-future-of-metals>)
- Präsentation “TU the Top, TU Wien”: „Enhanced Energy Efficient Steel Production –E³-SteP“ 28.05.2018
- Präsentation beim BMVIT „Highlights der Energieforschung 2019 – Decarbonisierung in der Industrie“: „Enhanced Energy Efficient Steel Production –E³-SteP“ Oktober 2019

Folgende **Diplomarbeiten und Dissertationen** wurden im Laufe der Projektzeit erstellt:

- Dissertation in Arbeit: "Development of characterization methods for the evaluation of the kinetic behavior and the fluidization of iron ore fines during hydrogen-induced fluidized bed reduction", D. Spreitzer, MUL
- Masterarbeit: Bestimmung der Korrelation zwischen Oxidation und Reduktion von magnetitischem Eisenerzkonzentrat, Oktober 2018, T. Wolfinger; MUL

5 Ausblick und Empfehlungen

Weiterführende F&E-Aktivitäten:

- Die Hot Bench Scale Anlage in Donawitz ist zurzeit im Bau, bei KPC wurde um Förderung angesucht.
- Entwicklung eines Schmelzaggregats zur Erzeugung von Rohstahl aus DRI auf Basis von Schwacherzen.
- Entwicklung einer neuen Brikettiertechnologie.

6 Literaturverzeichnis

Folgende **Publikationen** wurden über die Projektlaufzeit veröffentlicht:

- Pressemitteilung: „Primetals Technologies entwickelt bahnbrechende Technologie zur kohlenstofffreien, wasserstoffbasierten Direktreduktion von Eisenerzfeinstoffen“, 26. Juni 2019

Energieforschungsprogramm - 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- „We go green“ Mitarbeiterzeitung Pioneer 01/2020
https://intranet.primetals.com/organization/key-regions/Austria/Shared%20Documents/PIONEER_Ausgabe%20Feb%202020_Web.pdf
- Article in Metals Magazine “Hyfor – Hydrogen-based fine-ore reduction”
(<https://www.primetals.com/about-us/how-we-innovate/the-future-of-metals>)
- Webpage: A sustainable, carbon-free, safe and intelligent future of metals production
(<https://www.primetals.com/about-us/how-we-innovate/the-future-of-metals>)
- Präsentation “TU the Top, TU Wien”: „Enhanced Energy Efficient Steel Production –E³-SteP“ 28.05.2018
- Präsentation beim BMVIT „Highlights der Energieforschung 2019 – Decarbonisierung in der Industrie“: „Enhanced Energy Efficient Steel Production –E³-SteP“ Oktober 2019
- Folgende Diplomarbeiten und Dissertationen wurden im Laufe der Projektzeit erstellt:
- Dissertation in Arbeit: "Development of characterization methods for the evaluation of the kinetic behavior and the fluidization of iron ore fines during hydrogen-induced fluidized bed reduction", D. Spreitzer, MUL
- Masterarbeit: Bestimmung der Korrelation zwischen Oxidation und Reduktion von magnetischem Eisenerzkonzentrat, Oktober 2018, T. Wolfinger; MUL

7 Anhang

Keine Anhänge

8 Kontaktdaten

Projektleitung

DI Bernhard Hiebl

Primetals Technologies Austria GmbH

Turmstraße 44, 4031 Linz

Telefon: +43 732 6592 2558

E-Mail: bernhard.hiebl@primetals.com

Website: www.primetals.com

Auflistung der weiteren Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen

Dr. DI Roland Eisl

ENRAG GmbH

Industriestraße 18,

4800 Attnang Puchheim

Telefon: +43 7674 21103

E-Mail: roland.eisl@enrag.at

Website: www.enrag.at

DI Daniel Spreitzer

Montanuniversität Leoben

Franz-Josef-Straße 18, A-8700 Leoben

Telefon: +43 3842/402-2202

E-Mail: daniel.spreitzer@unileoben.ac.at

Website: www.metallurgy.ac.at