

Ergänzende Umweltförderung

HYFOR FLUIDRED HOT BENCH SCALE PLANT

Projektbericht

erstellt am

26/09/2022

**Abschließender Bericht zu Förderungsantrag
B963289, Ergänzende Umweltförderung -
Energieforschung, Smart Cities – zu
Klimafondprojekt 858801**

Projektnummer: B963289

Ausschreibung	Ergänzende Umweltförderung - Energieforschung
ProjektnehmerIn (Institution)	Primetals Technologie Austria GmbH (PTAT) voestalpine Stahl GmbH (VAS)
AnsprechpartnerIn	DI Bernhard Hiebl
Postadresse	Turmstraße 44, 4031 Linz
Telefon	+43 732 6592 73948
Fax	
E-mail	bernhard.hiebl@primetals.com
Website	www.primetals.com

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Zielsetzung	4
2	Beschreibung des Standorts und der errichteten Pilotanlage	6
3	Beschreibung der Versuche	10
3.1	Entwicklungsschritte	10
3.2	Erkenntnisse aus den Versuchskampagnen an der Pilot - Anlage	10
3.3	Versuchsdurchführung/Energieverbräuche spezifisch an der Pilot Anlage	15
4	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	18

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Prozessroute von HYFOR vs. einer Direktreduktionsanlage mit Pelletierung	5
Abbildung 2 - Lageplan der Pilotanlage	7
Abbildung 3 - Gesamtansicht der Anlage – Bild 1	7
Abbildung 4 – Gesamtansicht der Anlage – Bild 2	8
Abbildung 5 – Inbetriebnahme-Mannschaft vor der Anlage	8
Abbildung 6 – Detailansicht der Anlage	9
Abbildung 7 – Detailansicht der Anlage	9
Abbildung 8 - Versuchsentwicklung beginnend mit ersten Cold Static Fluidization Tests bis hin zu Hot Continuous Reduction Tests	10
Abbildung 9 - Aufbau der Staubmessung im Zyklonabgas	12
Abbildung 10 - Aufbau der Staubmessung im Reaktorabgas	15
Abbildung 11- schematische Prozessdarstellung samt Positionierung der im Zuge der Tests weiterentwickelten Equipments	17
Abbildung 12 – Bedienwarte der Anlage	17
Abbildung 13 – Übersicht der wichtigsten Ergebnisse	18
Abbildung 14 - Vereinfachter Flowchart eines Prototyps im industriellen Maßstab	19

1 Hintergrund und Zielsetzung

Die energieintensive Produktion von Eisen und Stahl erfolgt weltweit größtenteils noch immer über die sogenannte Hochofenroute. Dabei weist diese Route einen prozessbedingt erhöhten Energieverbrauch im Vergleich zu neueren Technologien auf sowie auch einen hohen CO₂-Ausstoß durch den Einsatz von Kohle bzw. Koks. Eine Gezeitenwende in Richtung schrittweiser Dekarbonisierung der Eisen- und Stahlerzeugungstechnologien durch den vermehrten Einsatz von alternativen Verfahren, wie zum Beispiel die Direktreduktion, wird unumgänglich. Im Hinblick auf Klimawandel, CO₂-Vermeidung und die Verschwendung von Primärressourcen ist es notwendig, sich diesen Themen umfassend zu widmen und an dieser Stelle bereits in einem frühen Entwicklungsstadium der Prozesstechnologien intensiv Forschung und Entwicklung zu betreiben.

Im Zuge von diversen vorangegangenen und laufenden Entwicklungsprojekten, insbesondere im Klimafonds-Vorhaben E³-SteP, wurden durch den Antragsteller grundlegende Erkenntnisse zu einer neuen Produktionsroute gewonnen. Diese setzt sich zum Ziel, den Einsatz von Primärenergie um 20% sowie den CO₂-Ausstoß um bis zu 100% zu senken. Es handelt sich dabei um eine wasserstoff-basierte Technologie als Alternative zur konventionellen Hochofenroute: Feineisenerz wird hier direkt von der Aufbereitung ohne weiteren Agglomerationsschritt, wie Pelletieren oder Sintern, in einem Wirbelschichtreaktor zu DRI (Direct Reduced Iron) reduziert. Dabei wird statt Kohle Wasserstoff bzw. hoch wasserstoffhaltiges Reduktionsgas zur Reduktion von Eisenerz eingesetzt, was zu einer erheblichen Senkung der CO₂-Emissionen führt.

Zusätzlich können aufgrund von weiteren Verbesserungen entlang der Prozessroute (von der Aufbereitung des Erzes bis zum fertigen Produkt) der Energiebedarf und CO₂-Ausstoß weiter reduziert werden:

- Wegfall der Eisenerzagglomeration: Für konventionelle Routen ist eine Agglomeration (z.B. Sintern, Pelletieren) als energieintensiver Aufbereitungsschritt notwendig. Dieser entfällt durch den direkten Einsatz des Feineisenerzes in der Wirbelschicht. (**Error! Reference source not found.**)
- Herstellung des Reduktionsmittels auf Basis grünem Strom und effiziente Nutzung des Reduktionsmittels im Prozess
- Aufheizen des Reduktionsgases mittels elektrischem Heater/Integration von regenerativem Wasserstoff in den Gesamtprozess
- Anpassung der Energiesysteme an die Energiesysteme der Zukunft („Power to Steel“ als hochwertige Alternative zu „Power to Heat“, wo hochwertiger Strom nur in niederwertige Wärme überführt werden kann.)

Bei Erreichung dieser Ziele kann die Gesamtenergieeffizienz der Produktionsroute um 20% gesteigert werden (auf Basis des aktuellen Standes der Technik). Zusätzlich sinkt der Schlupf

an Primärressourcen deutlich, was wiederum den Einsatz von Energieträgern verringert. Damit stellt das Projekt FluidRed, aufbauend auf die Entwicklungsprojekte der Produktionsprozesse an sich, ein Kernelement im Entwicklungspfad für eine nachhaltige und energieeffiziente Eisen- und Stahlproduktion dar.

Nach vielversprechenden Kalt- und Heißversuchen im Labormaßstab soll nun zur weiteren Untersuchung der Thematik sowie zur Verifizierung und Optimierung der erzielten Ergebnisse eine Versuchsanlage am Standort der voestalpine Stahl Donawitz GmbH errichtet werden. Die geplanten Versuche sollen eine tiefere Einsicht in den Prozess geben und sind ein weiterer notwendiger Schritt in Richtung Scale-up für eine industrielle Anlage.

Die Errichtung dieser kontinuierlichen Versuchsanlage ist ein Folgeprojekt der von Primetals Technologies Austria GmbH (PTAT) im Rahmen eines dreijährigen (2017-2019), vom Klimafond geförderten Forschungsprojektes durchgeführten Entwicklung einer neuen, auf Wasserstoff und Feinerzen basierenden, Direktreduktionstechnologie.

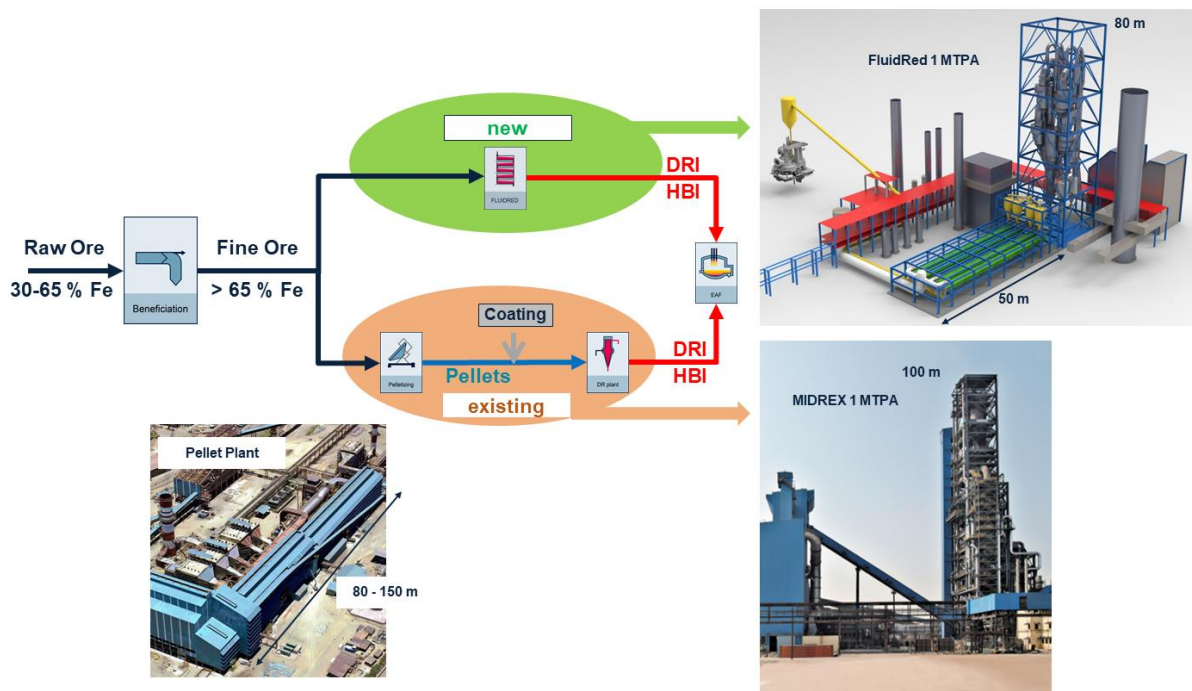


Abbildung 1 - Prozessroute von HYFOR vs. einer Direktreduktionsanlage mit Pelletierung

2 Beschreibung des Standorts und der errichteten Pilotanlage

PTAT hat gemeinsam mit voestalpine Stahl Donawitz GmbH (VASD) die Errichtung der Testanlage zur Direktreduktion von Feinerzen mittels Wasserstoff am Werksstandort der VASD realisiert:

Voestalpine Stahl Donawitz GmbH
Kerpelystraße 199
8700 Leoben

Die Pilotanlage setzt sich aus drei Teilen zusammen: aus einer Vorwärm-Oxidationseinheit, einer Gasaufbereitungsanlage und der eigentlichen Reduktionseinheit. In der Vorwärm-Oxidationseinheit wird das Feinerzkonzentrat auf ca. 900 °C erhitzt, im Falle magnetitischem Erzes findet gleichzeitig die Aufoxidation zu Hämatit statt, Schadstoffe wie z.B. Schwefel werden während dieses Prozessschrittes aus dem Erz entfernt.

Anschließend wird das vorgewärmte Erz der Reduktionseinheit zugeführt.

Das Reduktionsgas, 100 % H₂, wird von einem Gaslieferanten bereitgestellt. Eine Trockenentstaubungsanlage vermeidet Emissionen aus den beteiligten Prozessen und ist die Basis für eine vollständige Staubrückführung zur Maximierung der Ausbringung.

Das heiße direktreduzierte Eisen (Hot Direct Reduced Iron – HDRI, heißer Eisenschwamm) verlässt die Reduktionsanlage mit einer Temperatur von ca. 600 °C, bevor es mittels Wasser in einem Produktkühler gequenchet und anschließend aus der Pilotanlage ausgetragen wird.

Für das Kalenderjahr 2023 ist die Installation einer Brikettierpresse geplant, sodass das in der Pilotanlage erzeugte feine DRI direkt zu HBI (Hot Briquetted Iron) verarbeitet werden kann.

Ziel der Pilotanlage ist es, diesen Prozess zu verifizieren und anhand dieser Versuchsanlage die erforderliche Datenbasis zu liefern, um in einem nächsten Entwicklungsschritt die Größe der Anlage auf einen Prototypen im industriellen Maßstab hochskalieren zu können.

Der gewählte Standort liegt im Bereich der Notwasserversorgung Hochofen, zwischen dem Vordernbergerbach und der Böschung nordwestseitig der Straße um den Lurgi Cyclator. Nachfolgende Bilder sollen einen Eindruck über die Anlage geben:

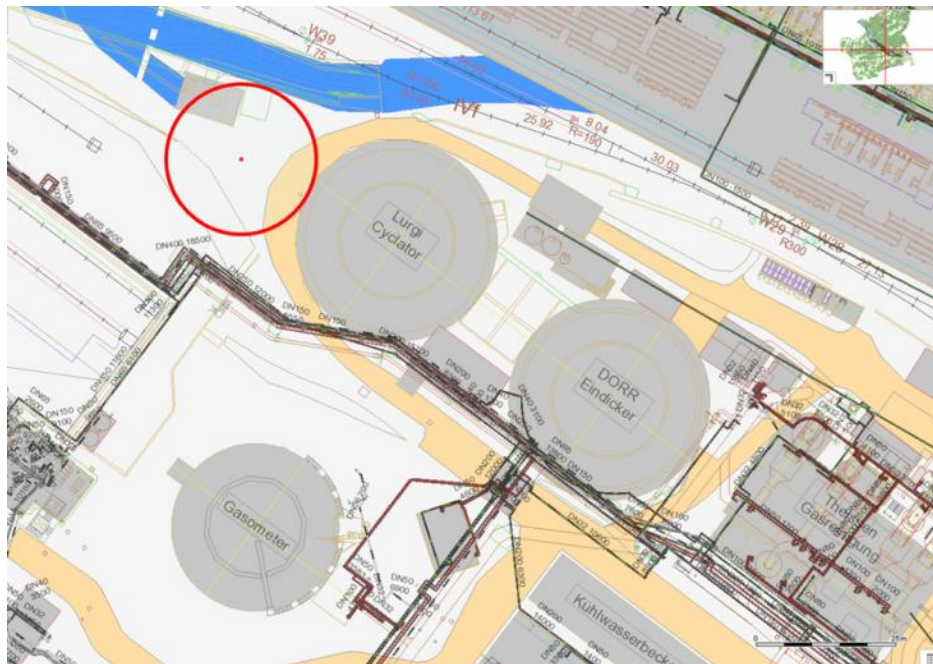


Abbildung 2 - Lageplan der Pilotanlage



Abbildung 3 - Gesamtansicht der Anlage – Bild 1



Abbildung 4 – Gesamtansicht der Anlage – Bild 2



Abbildung 5 – Inbetriebnahme-Mannschaft vor der Anlage



Abbildung 6 – Detailansicht der Anlage



Abbildung 7 – Detailansicht der Anlage

3 Beschreibung der Versuche

3.1 Entwicklungsschritte

Nachfolgende Abbildung soll zeigen, in welchen Schritten sich die Forschungsarbeiten beginnend mit einfachen Fluidisierungsversuchen bis hin zur Pilotanlage entwickelt haben.

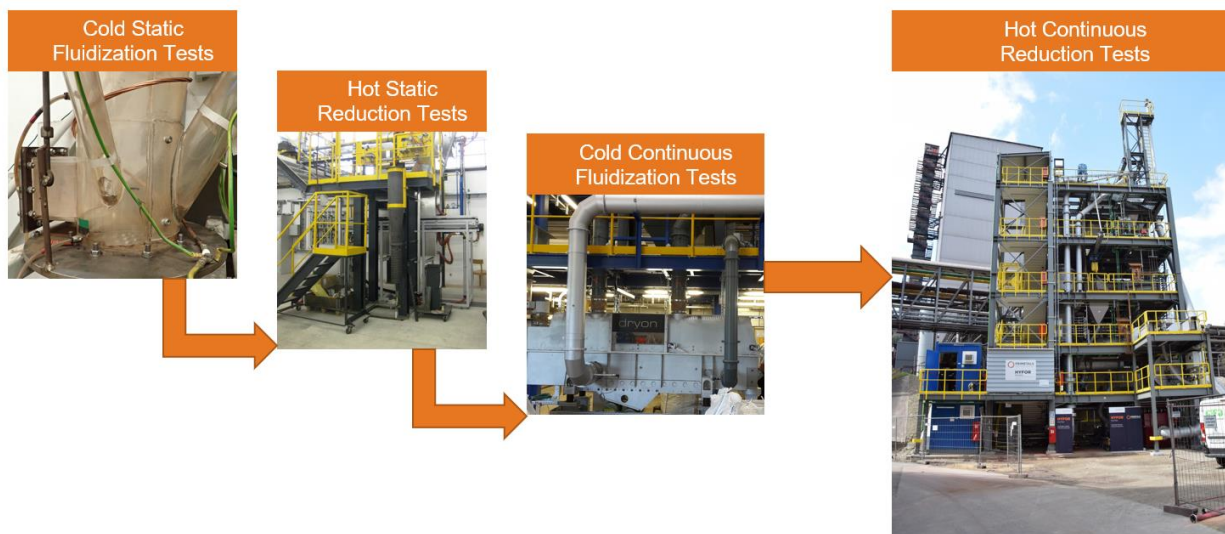


Abbildung 8 - Versuchsentwicklung beginnend mit ersten Cold Static Fluidization Tests bis hin zu Hot Continuous Reduction Tests

3.2 Erkenntnisse aus den Versuchskampagnen an der Pilot - Anlage

Wie oben beschrieben besteht das Verfahren und somit auch die Pilotanlage aus 2 wesentlichen Prozessschritten:

1 Aufheizen/Oxidation des Eisenerz(oxids)

Dieser Prozessschritt wird mittels eines Zyklons, der von einem erdgasbasierten Heißgasgenerator mit Wärme in Form von bis zu 1000 °C heißem Abgas versorgt wird, durchgeführt. Hierbei wird das kalte, trockene Eisenerz direkt aus dem Bunker in den Abgasstrom chargiert und durch den Zyklon geblasen. Im Zyklon wird das Eisenerz erhitzt, nach unten ausgetragen und mittels pneumatischer Förderung wieder in den Bunker chargiert. Das heiße staubbeladene Abgas verlässt den Zyklon nach oben und wird nach einer Abgasreinigung mittels Wäscher an die Umgebung abgegeben.

Folgende wesentliche im Pilot – Maßstab zu prüfende Designelemente bzw. Prozessschritte sind notwendig:

- a) Auslegung des Zyklons hinsichtlich Abscheideverhalten: Aufgrund der bei diesem Prozess zu verwendenden, durch die Aufkonzentrierung ultrafeinen Erzen (getestet wurden bis dato Korngrößenverteilungen von bis zu 60 % < 20 µm) ist es wichtig, dass das Trennkorn so tief wie möglich liegt (für die Auslegung des Zyklons wurde das theoretische Trennkorn mit 7 µm festgelegt), sodass so wenig wie möglich Erzstaub mit dem Abgas verloren geht, was mühsam wieder in den Kreislauf eingebracht werden müsste.
- b) Überprüfung, ob die Verweilzeit im Zyklonkreislauf grundsätzlich hoch genug ist, um die vorgegebenen Prozessschritte zu realisieren. Hierbei sei bemerkt, dass für die Endausbaustufe dieser Technologie, im voll kontinuierlichen industriellen Maßstab, entsprechend der Berechnungen 4 Zykclone in Serie geschaltet werden, um ausreichend Verweilzeit darzustellen. In der Pilotanlage wird dies durch die oben beschriebenen Kreisläufe realisiert.

Ergebnisse/Erkenntnisse:

- ad a) Der errechnete Abscheidegrad konnte übererfüllt werden. Dies konnte durch Messungen im Zyklonabgas sowie durch die Messung der Masseverluste in den Kreisläufen nachgewiesen werden.



Abbildung 9 - Aufbau der Staubmessung im Zyklonabgas

- ad b) Auch hier konnten die Zielvorgaben erreicht werden, spätestens nach dem 3. Durchlauf, welcher im industriellen, vollkontinuierlichen Maßstab dem Austritt aus Zyklon 3 entspricht, erreicht das Erz eine Temperatur von 900 °C.

2 Reduktion des vorgewärmten Eisenerzes im Wirbelschichtreaktor mittels

Wasserstoff

Dieser Verfahrensschritt stellt die wesentliche Neuerung dieser Entwicklung dar. Das feine Eisenerz wird aus dem Bunker direkt in einen horizontalen, kreuzstrombetriebenen Wirbelschichtreaktor chargiert, der von unten über einen speziell entwickelten Düsenboden mit bis zu 750 °C heißem Wasserstoff versorgt wird. Der heiße Wasserstoff fluidisiert das feine Erz, reduziert dabei das Eisenoxid in Schritten zu metallischem Eisen ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$) und transportiert den Feststoff durch den Reaktor, wo er am Ende ausgetragen und mittel pneumatischer Förderung (hier mit vorgewärmten Stickstoff) in den Bunker rücktransportiert wird. Der Füllgrad des Reaktors wird mittels eines Wehrs eingestellt. Das Abgas verlässt den Reaktor nach oben und wird über einen Heißgasfilter und über eine Fackel an die Umgebung abgeführt. Der im Heißgasfilter abgeschiedene Feststoff wird direkt in den Prozess rückgeführt

Folgende wesentliche im Pilot – Maßstab zu prüfende Designelemente bzw. Prozessschritte sind notwendig:

- a) Fluidisierungsverhalten im Reaktor: Für einen ausreichend guten Reaktionsverlauf ist eine vollständige Fluidisierung während der gesamten Reduktionszeit unbedingt notwendig, sodass der Hauptvorteil einer Wirbelschicht, der hohe erzielbare Stoffaustausch, geltend gemacht werden kann
- b) Prüfung des Düsenbodendesigns: der Düsenboden hat einerseits die Aufgabe, das Reduktionsgas im Reaktor gleichmäßig zu verteilen, andererseits den Eintrag von Feststoff bei Stillstand der Wirbelschicht in die Düsenbodenöffnungen und das darunterliegende Gassystem zu verhindern. Dies ist wesentlich, da bei den hohen Temperaturen der Düsenboden verstopfen würde und somit die gleichmäßige Verteilung des Reduktionsgases nicht mehr möglich wäre
- c) Prüfung der Gasausnutzung (der Umsatz von H_2 in H_2O und somit die Geschwindigkeit der Reduktion) und des Temperaturverlaufes (die Eisenerzreduktion mittels Wasserstoff ist im Gesamten endotherm) während der gesamten Reduktionszeit
- d) Austragsverhalten des Feststoffes im Reaktorabgas – Prüfung des Heißgasfilterdesigns
- e) Prüfung der im Pilot Reaktor erreichbaren maximalen Metallisierung im Verhältnis zur notwendigen Verweilzeit und im Vergleich zu den Laborversuchen. Hierbei sei vermerkt, dass der industriellen Anlage 4 Reaktoren in Serie geschaltet werden. Dies wird hier durch - analog zum Vorheizen im Zyklon – mittels Kreisläufen realisiert.

Ergebnisse/Erkenntnisse:

- ad a) Beim Fluidisierungsverhalten im Pilot Reaktor hat sich gezeigt, dass für eine vollständige durchgehende Fluidisierung aufgrund des höheren Füllgrades als in der Laborretorte um ca. 20 % höhere Leerrohrgeschwindigkeiten notwendig sind. Die Fluidisierung wird mittel

Differenzdruckmessstellen, die in verschiedenen Höhen im Reaktor angebracht sind, gemessen

- ad b) Der spezielle Düsenboden hat in der Pilotanlage alle oben genannten Vorgaben erfüllt. Trotzdem wurde in Hinblick auf das Upscaling ein weiteres Düsenbodendesign getestet, auch hier wurden bis dato ausgezeichnete Ergebnisse erzielt.
- ad c) Die Gasausnutzung ist in der Pilotanlage im Verhältnis zur Laborretorte geringer, somit sind die notwendige Verweilzeit bzw. auch die spezifische durch den Reaktor zu führende Gasmenge bei gleicher Metallisierung höher. Der Grund liegt hauptsächlich in der um ca. 50 °C durchschnittlich geringeren Reaktortemperatur über die gesamte Verweilzeit. Im Labor wird die Retorte durchgehend über die Wand beheizt, die durch den endothermen Prozess entstehenden Wärmeverluste kompensiert. In der Pilot Anlage und auch im industriellen Maßstab ist das nicht möglich (hier sind Reaktor und Gasleitungen Druckbehälter). Ein spezifisches Merkmal der Pilot Anlage sind auch die hohen Wärmeverluste über die gesamte Prozessdauer, hervorgerufen durch die großen Oberflächen im Verhältnis zu den transportierten Medien – trotz spezieller isolierender Feuerfestauskleidung. Dieses spezifische Problem wird aber in der industriellen Anlage nicht erwartet.
- ad d) Das Austragsverhalten gestaltet sich so wie erwartet und ist tendenziell geringer als im Labor. Das Abscheideverhalten des Heißgasfilters ist ausgezeichnet. Auch das konnte mit Abgasmessungen nachgewiesen werden.



Abbildung 10 - Aufbau der Staubmessung im Reaktorabgas

ad e) Die maximalen erreichten Metallisierungen lagen bis dato bei bis zu 97 %. Als Benchmark gilt hier aus den Konkurrenzverfahren > 94 %, konnten also übererfüllt werden.

3.3 Versuchsdurchführung/Energieverbräuche spezifisch an der Pilot Anlage

Bis dato wurden **31 Versuchskampagnen an der Pilotanlage durchgeführt**. Eine Kampagne dauert 2 volle Tage, das Vorberieten und Aufheizen der Anlage erfolgt während der ersten 18 Stunden. Der eigentliche Versuch findet an Tag 2 statt.

Designbedingt und gemäß den Eigenschaften einer halbkontinuierlichen Versuchsanlage ergeben sich erhöhte Energieverbräuche durch das Aufheizen, dem Transport des Materials im Kreislauf und wie oben erwähnt durch die erhöhten oberflächenbedingten Wärmeverluste.

Folgende wesentlichen Energie/Medienverbräuche haben sich gezeigt:

Der H₂ Bedarf pro Versuch liegt im Schnitt bei 1300 Nm³, daraus werden ca. 600 kg DRI gewonnen mit einer Metallisierung von >95 %.

Durch die fehlende Rezirkulation des nicht verbrauchten Wasserstoffes in einem internen Gaskreislauf incl. Abkühlung, Kondensation des H₂O und Rekompensation ist der Verbrauch an der Pilotanlage ungleich höher als im kontinuierlichen industriellen Prozess.

Erdgasverbrauch	Aufheizen der Anlage:	1760 Nm ³
	Preheating/Oxidation/Reduktion:	960 Nm ³

Durch den gasseitigen „One through“-Betrieb ist der Erdgasbedarf hoch (abgesehen vom Aufheizen der Anlage). Dies liegt daran, dass in der Pilotanlage alle Gase (N₂ als Transportgas, H₂ als Reduktionsgas) mithilfe der Kombination Heissgasgenerator/Wärmetauscher erhitzt werden. Für eine industrielle Anlage wird der Wärmebedarf rein elektrisch mittels electrical Heater zur Verfügung gestellt. Im Falle der Pilotanlage (teilkontinuierlicher Betrieb) wäre diese Lösung aufgrund der Trägheit von electrical Heater nachteilig gewesen.

Ein weiteres Merkmal der Pilotanlage ist das komplizierte Handling des ultrafeinen Feststoffes in verschiedenen Phasen des Prozesses bezüglich Temperaturen und auch Partikeleigenschaften des Feststoffes. Hier wurde aber auch ein sehr wichtiger Lerneffekt erzielt bezüglich Transportverhalten in den pneumatischen Förderungen und Schleusenequipments aber auch im Lagerverhalten im Bunker. Diese Effekte sind in dieser Stärke im industriellen Maßstab nicht zu erwarten, trotzdem konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die Großteils an der Pilotanlage mittels Umbauten und Adaptationen bereits ausgeführt wurden:

- (1) Redesign of T – piece
- (2) Redesign of Injection to pneumatic transport
- (3) Installation of additional NG heating of transport line
- (4) Installation of Inliners in bins, cyclone und critical ducts
- (5) Installation of an alternative grid

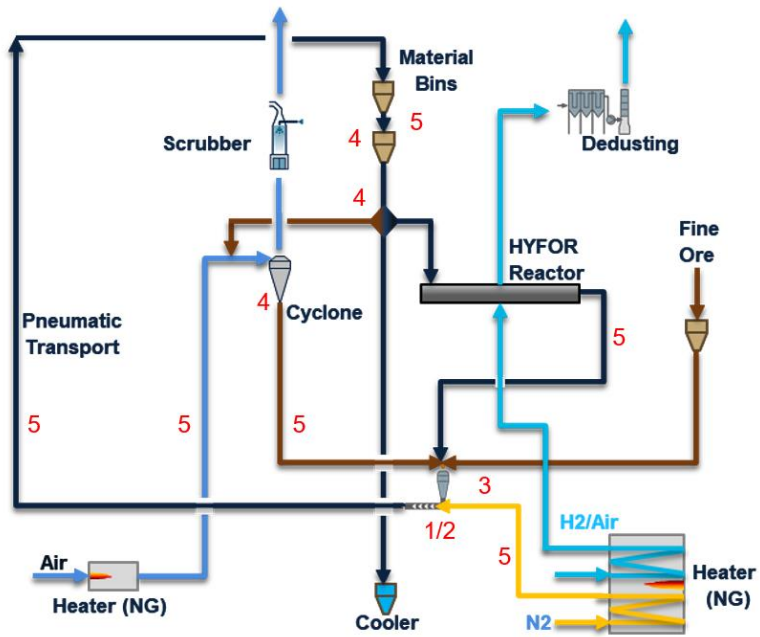


Abbildung 11- schematische Prozessdarstellung samt Positionierung der im Zuge der Tests weiterentwickelten Equipments

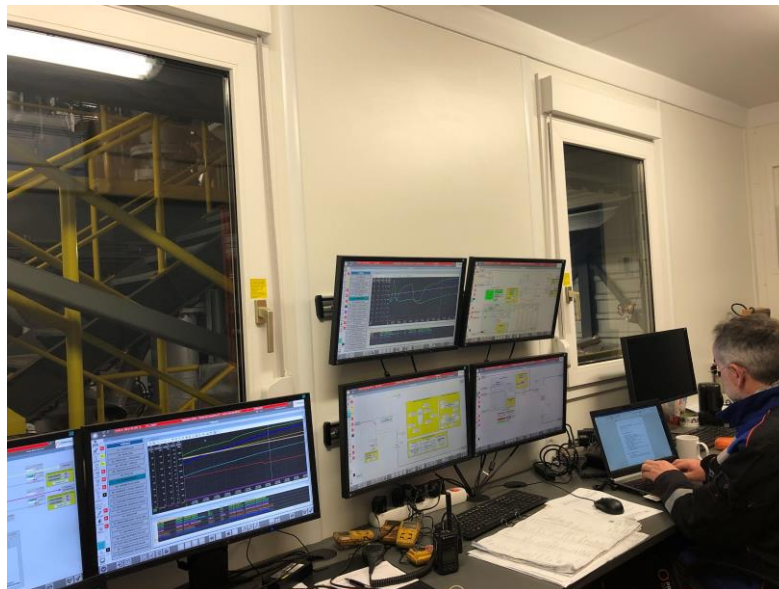


Abbildung 12 – Bedienwarte der Anlage

Zusammengefasst kurz die wesentlichen Ergebnisse:

Maximum achieved Metallization	96 %
Maximum achieved Oxidation after Cyclone	90 %
Maximal achieved Desulphurization	90 %
Particle Size Distribution – Transport-Behaviour	
Lower Limit	60 % < 20 µm
Upper Limit	45 % > 100 µm
Process parameter	
Material temperature before Reduction	max. 800 °C
Reactor temperature during Reduction	600 – 510 °C

➤ **Kinetic Limitation due to lower Reactor temperatures compared to laboratory tests**

Abbildung 13 – Übersicht der wichtigsten Ergebnisse

4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Abgeleitet von den Versuchsergebnissen und allgemeinen Erkenntnissen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- **Verifikation des Basisdesigns der Kerneinheiten für den Prozess**

- **Vorheizen im Zyklon:**

Dies kann als positiv beurteilt werden, sowohl was die Auswahl des Aggregates betrifft als auch die Designparameter. Auf Basis dieser Designparameter und der erzielten Ergebnisse können nun die Zykclone für den industriellen Prozess ausgelegt werden. Berücksichtigt werden muss, dass im Großmaßstab auch die Zykclone – wie der Reaktor - unter Überdruck betrieben werden.

- **Reduktion im Reaktor:**

Das Fluidisierungs- und auch Reduktionsverhalten kann als positiv abgeschlossen betrachtet werden, mit Abstrichen bezüglich Verweilzeit. Hier muss noch detailliert evaluiert werden, wie sich die Verweilzeit im Labor unter gleichen Temperaturbedingungen verhalten würde. Weiters kann auch die mögliche Füllhöhe im Reaktor optimiert werden

- **Wärmeverluste/Transport – Lagerverhalten:**

Aus den Versuchen folgt, dass Hauptaugenmerk auf das Feuerfestkonzept gelegt werden muss. Bezüglich Isolierfähigkeit kann das gewählte Material als positiv bewertet werden. Bezüglich innerer Oberfläche wurden einige Adaptationen durchgeführt, die beim Upscaling unbedingt zu berücksichtigen sind. Bei der Auslegung des Feuerfestkonzeptes muss daher

auf ausreichende Isolierfähigkeit auch unter wasserstoffreichem Gas, höhere Abriebfestigkeit als in der Pilotanlage und auch glatte Oberflächen vor allem bei Übergängen Rücksicht genommen werden.

- Handling Wasserstoff:

Während des Engineerings und Designs der Anlage mussten alle sicherheitsrelevanten und normanalogen Vorgaben berücksichtigt werden. Alle diese Vorgaben – Druckreduktion und Zuleitung des kalten Wasserstoffes zur Anlage, Erhitzen des Wasserstoffes unter 2 bar(ü) im Wärmetauscher, Führung des heißen Wasserstoffes durch die gesamte Ablage, Abfuhr des Wasserstoffes mittels Fackel an die Umgebung – konnten erfüllt werden. Es wurden auch keine Probleme hinsichtlich der Dichtheit der Flansche beobachtet werden.

- Geplante weitere Schritte:

Optimierung der Reduktion im Reaktor: Anpassung der Schütthöhe, Gasgeschwindigkeit und Temperaturführung

Weiteres Testen verschiedener Erzsorten und auch Korngrößenverteilungen, um die Grenzen nach oben und unten bezüglich Korngrößen zu erarbeiten

Implementation einer Brikettierpresse: Testen der Brikettierfähigkeit an einer kontinuierlichen Rollenpresse, Erzeugung einer verkaufbaren Produktqualität (HBI – Hot Briquetted Iron) bzw. eines „Zwischenbriketts“ (HCl – Hot Compacted Iron) für die einfache Weiterverarbeitung in einem darauffolgenden Schmelzaggregat (Electric Arc Furnace für Stahlerzeugung).

- Als Ausblick ein vereinfachtes Flowsheet der kontinuierlichen Anlage:

Serienschaltung Zyklon, Serienschaltung Reaktoren, Aufheizen des Reduktionsgases im elektrischen Heizer, optimierter Reduktionsgaskreislauf incl. Wärmetauscher, Kondensator und Kompressor, Nutzung des Purge Gases aus der Reduktion in der Vorheizkaskade

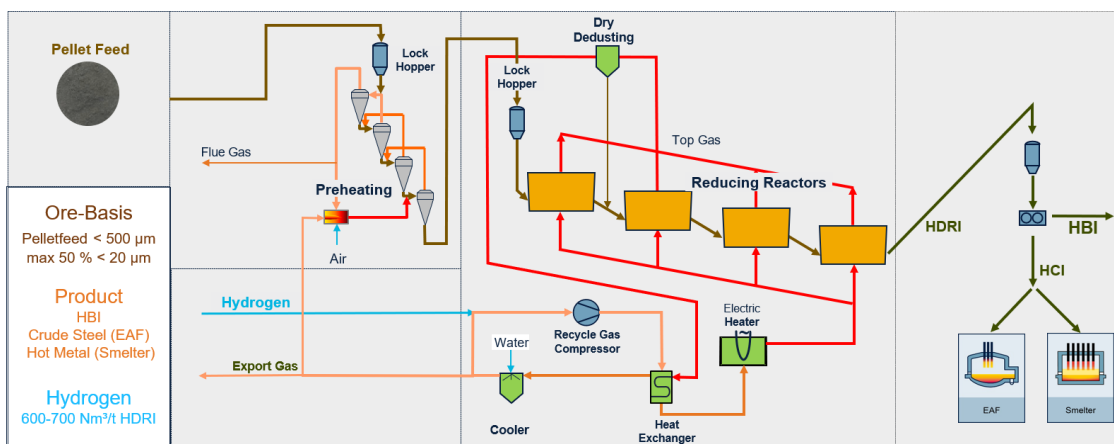


Abbildung 14 - Vereinfachter Flowchart eines Prototyps im industriellen Maßstab