

# NEUE ENERGIEN 2020

## Endbericht für Publizierung

### Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

### Programmabwicklung:

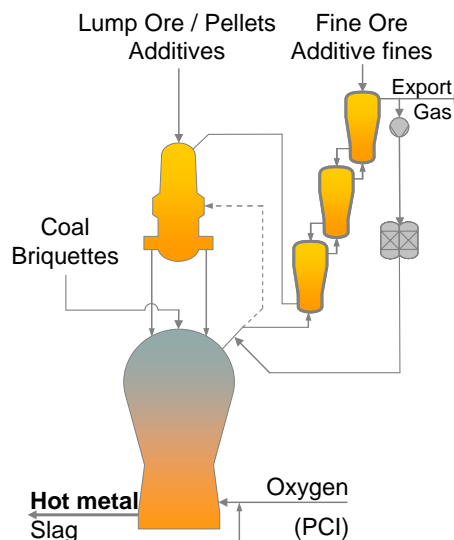
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

## Projektdaten

<b>Kurztitel</b>	FINEX®-CO <sub>2</sub> Reduktion	
<b>Langtitel</b>	FINEX® - Nachhaltige Reduktion von CO <sub>2</sub> und Energieverbrauch bei der Roheisen Herstellung	
<b>Projektnummer</b>	825459	
<b>Programm/Programmlinie</b>	<b>Neue Energien 2020</b> <b>3. Ausschreibung</b>	
<b>Antragsteller</b>	SIMENS VAI Metals Technologies GmbH Dr. Jan Friedemann PLAUL	
<b>Projektpartner</b>	-	
<b>Projektstart u. - Dauer</b>	Projektstart: 01.11.2009	Dauer: 36 Monate
<b>Berichtszeitraum</b>	von 01.11.2011 bis 31.10.2012	
<p><b>Synopsis:</b> FINEX® ist das erste Feinerz-Schmelzreduktionsverfahren, das industrielle Reife erreicht hat. Gegenüber der herkömmlichen Hochofenroute kommt das Verfahren ohne Sinteranlage und Kokerei aus bei gleichzeitiger Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Zielsetzung ist die Entwicklung einer neuen Anlagengeneration von FINEX® mit minimalen Investitionskosten, optimierten Verbrauchszahlen und bestmöglicher Verfügbarkeit und weiter reduzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen von mehr als 20%. Des Weiteren bietet FINEX® die Möglichkeit CO<sub>2</sub> zu sequestrieren.</p>		

# 1 Einleitung

FINEX<sup>®</sup> ist das erste Feinerz-Schmelzreduktionsverfahren, das industrielle Reife erreicht hat. Gegenüber der Hochofenroute kommt das Verfahren ohne Sinteranlage und Kokerei aus bei gleichzeitiger Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Zielsetzung ist die Entwicklung einer neuen Anlagengeneration von FINEX<sup>®</sup> mit optimierten Verbrauchszahlen und reduzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Des Weiteren bietet FINEX<sup>®</sup> großtechnisch die Möglichkeit CO<sub>2</sub> aus dem Prozessgas zu sequestrieren.



**Abbildung 1:** FINEX<sup>®</sup> Prozess

## Aufgabenstellung

Das FINEX<sup>®</sup> Verfahren stellt derzeit die einzige großtechnische Alternative zur Umwelt- und Ressourcen schonenden Herstellung von Roheisen zum Hochofen dar. Auf dem Weg zur großtechnischen Realisierung und zum Anlagenbetrieb zeichnet sich ein hohes Maß an weiterem Entwicklungspotential ab.

Ausgehend von diesem Status bietet das FINEX<sup>®</sup> Verfahren ein hohes Potential an verfahrenstechnischen Verbesserungen, um Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit des Verfahrens zu erhöhen. Um dieses Ziel zu erreichen, sollen in verschiedenen Anlagenteilen moderne und innovative Technologien entwickelt werden und zum Einsatz kommen. Durch die durchgeführten F&E Tätigkeiten soll die Wettbewerbsfähigkeit des FINEX<sup>®</sup> Verfahrens gegenüber herkömmlicher Roheisenherstellungstechnologien weiter verbessert werden.

## Schwerpunkte des Projektes

Schwerpunkte des Projektes waren Untersuchungen zur Implementierung einer zweiten Reaktorkaskade mit Kompaktierung (TRINEX<sup>®</sup>) zur Produktion von LRI (Low Reduced Iron), dessen Einsatz im Hochofen eine Leistungssteigerung bewirkt. Des Weiteren die Installation eines Wirbelschicht-Versuchsstandes zur Durchführung von Reduktionsversuchen unter ähnlichen Bedingungen zur Großanlage, Untersuchungen zum pneumatischen Erztransport, Feinerz-Granulation zu Mikropellets, der trockenen DRI Kühlung, Stickstoffeinsparung und CO<sub>2</sub> Sequestrierung. Nachfolgend werden die einzelnen Punkte näher beschrieben.

## Einordnung in das Programm

Die Roheisenherstellung ist eine der Energie- und emissionsintensivsten Sparte der Grundstoff-Industrie. Mit der FINEX® Technologie an sich ist bereits der Grundstein für eine umweltschonendere Roheisenherstellung gelegt. Ein wesentlicher Aspekt für den marktwirtschaftlichen Erfolg der FINEX® Technologie sind hierbei die Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit, die im steigenden Maße die Investitionsentscheidungen in der Stahlindustrie bestimmt. Durch das vorliegende Forschungsprogramm soll dieser Vorteil der FINEX® Technologie gegenüber der konventionellen Hochofenroute weiter gestärkt werden. Trotz der bereits erreichten Erfolge hat FINEX® weiterhin großes Potential für weitere Verbesserungen.

## Verwendete Methoden

Basierend auf Erfahrung aus dem Anlagenbetrieb der bestehenden FINEX® Anlagen (F2000 Demonstrationsanlage und FINEX®1.5M Anlage) und detailliertem Wissen über den Anlagenaufbau und Prozessführung lassen sich Potentiale für technische Verbesserungen des Prozesses erkennen. Diese Verbesserungen wurden in Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Emissionssenkung und Energieeffizienz technisch realisiert.

Im Zuge der Evaluierungsphasen wurde folgende Methodik angewandt:

- Mathematische und thermodynamische Modellbildung der neuen Teilaggregate
- Implementierung in bestehende Gesamt-Anlagen-Modelle zur Berechnung von Massen- und Energiebilanzen
- Berechnung der Massen- und Energiebilanzen mittels iterativer numerischer Lösungsverfahren
- Datenanalyse der Massen- und Energiebilanzen und theoretische Darstellung der Auswirkungen auf den Gesamtprozess
- Wirtschaftlichkeitsanalyse
- Realisierung von Test-Teilaggregaten in Großanlagen bzw. Errichtung von alleinstehenden Pilotanlagen, Laborversuche
- Testbetrieb der Teilaggregate bzw. Pilotanlagen, Evaluierung des Einflusses auf das Gesamtanlagenkonzept in der Realität
- Multivariate Analyse der Daten aus dem Betrieb
- Schlussfolgerungen und Know-How Sicherung
  - Modellrevision
  - Publikationen und Patente
  - Bestätigung oder Verwerfen des Konzeptes
  - Gegebenenfalls Aufnahme in das Gesamtanlagenkonzept

## Aufbau der Arbeit

Das Projekt wurde in sieben Teilprojekte unterteilt, die zeitgleich abgearbeitet wurden. Da ein Großteil der Arbeitspakete auch praktische Untersuchungen an der Großanlage in Korea

beinhalteten, war eine ständige Abstimmung mit dem Entwicklungspartner Posco nötig, um den sicheren Betrieb der Großanlage zu gewährleisten beziehungsweise Modifikationen an der bestehenden Anlage durchzuführen. Folgende Teilprojekte wurden bearbeitet:

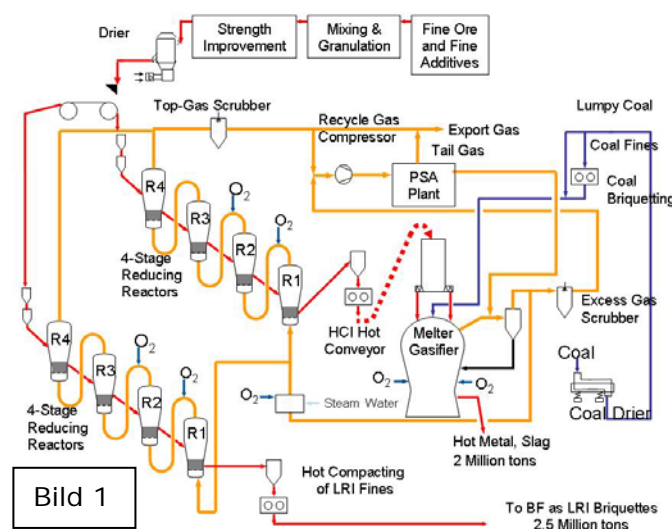
1. TRINEX® – Nutzung des Exportgases in einer parallelen Wirbelschicht
2. Wirbelschicht Versuchsanlage im Technikumsmaßstab
3. Pneumatischer Erztransport
4. Feinerz-Granulation von Mikropellets für den Einsatz in der FINEX® Wirbelschicht
5. Trockene DRI Kühlung zum Austrag aus der Wirbelschicht
6. Stickstoffreduktion und Substitution beim FINEX® Verfahren
7. CO<sub>2</sub>-Sequestrierung

## 2 Inhaltliche Darstellung

In den folgenden Kapiteln werden die Inhalte und Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete zusammengefasst.

### 2.1 AP1 - TRINEX® – Nutzung des Exportgases in einer parallelen Wirbelschicht

Basierend auf dem jetzigen FINEX® Verfahren soll das bisher zur Verstromung genutzte Exportgas in einer zweiten Wirbelschicht für die Produktion von LRI (Low Reduced Iron) verwendet werden. Durch anschließenden Einsatz von LRI in den Hochofen kann der Energieverbrauch zur Roheisenherstellung deutlich gesenkt werden.



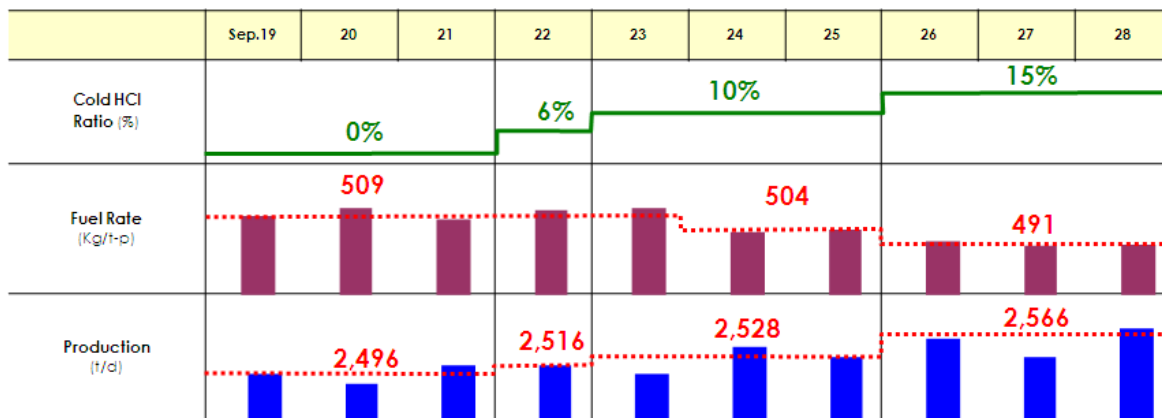
**Abbildung 2:** TRINEX® Konzept

Auf Basis bereits bekannter Verbrauchswerte der Hochofenrute und des FINEX® Verfahrens wurde die mögliche Energieeinsparung für eine integrierte Roheisenherstellung ermittelt (Abbildung 2). Bei einem Einsatz von 100 kg/t Roheisen LRI in den Hochofen ergibt sich theoretisch eine Reduktion von ca. 25 kg/t Roheisen an Koks. Auf Grund dieser vielversprechenden Ergebnisse wurden folgenden Tätigkeiten innerhalb des Projekts durchgeführt:

1. Erstellung eines Basiskonzeptes für den Umbau der FINEX® Demonstrationsanlage in Pohang
2. Erstellung eines Simulationstools für Massen- und Energiebilanzen
3. Versuche mit Cold HCl am Hochofen in Pohang

Nach Erstellung eines Grundkonzeptes wurden auf Basis des Grundkonzeptes ein Simulationstool für die Ermittlung der Massen- und Energiebilanz entwickelt. Hierfür wurde das bestehende FINEX® Bilanzierungsprogramm entsprechend des Flowsheets des Grundkonzeptes für TRINEX® erweitert. Um die Untersuchungen zu konkretisieren wurde die Erweiterung der bestehenden FINEX® Demonstrations-Anlage in Korea mit einer zweiten Wirbelschicht untersucht und ein Basiskonzept erstellt. Bei intensiver Analyse der vorherrschenden Situation konnten zwei mögliche Anlagenkonzepte identifiziert werden. Für beide Konzepte ist eine Erweiterung der bestehenden PSA Anlage (Pressure Swing Absorption) notwendig um das im Export Gas enthaltene CO<sub>2</sub> abzutrennen und das CO-reiche Gas dem Prozess wieder zuzuführen. Da beide Konzepte Vor- und Nachteile mit sich bringen, musste eine detaillierte Massen- und Energiebilanz durchgeführt werden, um die jeweiligen Konzepte hinsichtlich ihrer Energieeffizienz und Betriebsparameter miteinander zu vergleichen.

Neben den theoretischen Untersuchungen wurden erste Tests mit LRI am Hochofen 5 in Pohang durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden über einen längeren Zeitraum kleine Mengen an LRI an den bestehenden FINEX® Anlagen ausgeschleust und auf Lager gelegt. Anschließend wurde das LRI am Hochofen 5 schrittweise zugegeben.



**Abbildung 3:** Energieverbräuche und Produktivität bei Einsatz von LRI am Hochofen

Die Ergebnisse zeigen (Abbildung 3), dass durch den Einsatz von LRI der Energieverbrauch am Hochofen bis zu 3,5% gesenkt werden konnte, während die Produktion um 2,8% erhöht werden konnte. Aufgrund der geringen verfügbaren Mengen an LRI konnte der Test nur 8 Tage durchgeführt werden. Laut Aussage der Betreiber wäre eine weitere Optimierung des Kohlenstoffverbrauchs möglich gewesen.

Das vorgeschlagene Konzept ist derzeit unter Evaluierung und eine mögliche Umsetzung wird geprüft.

## 2.2 AP2 - Wirbelschicht Versuchsanlage im Technikumsmaßstab

Zur Durchführung von Reduktionstests im Labormaßstab unter Berücksichtigung großanlagentechnischer FINEX® Bedingungen wurde eine Versuchsanlage an der Montanuniversität Leoben errichtet. Während des Forschungsprojekts wurde das Grundkonzept der Anlage erstellt, die Anlage in Leoben aufgebaut und in Betrieb genommen (Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Energieverbräuche und Produktivität bei Einsatz von LRI am Hochofen

Mit der Versuchsanlage können bei adaptierten Betriebsbedingungen neue Einsatzstoffe vor deren Einsatz in der Großanlage untersucht werden. Damit ermöglicht sich die Untersuchung des Einsatzes von Reststoffen und neuartigen Einsatzstoffen auf deren Verhalten in der FINEX® Großanlage. Neben den standardisierten Rohstoffuntersuchungen, soll die Versuchsanlage auch zur Optimierung von Betriebsparametern genutzt werden. Durch Übertragung der Versuchsergebnisse soll der großtechnische Betrieb hinsichtlich Energieeffizienz und Produktivität verbessert werden.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf dem Vergleich des 3 und 4 Reaktorbetriebs für FINEX® Bedingungen. Zur Durchführung der Labortests wurden Standard Reduktionstests für den Betrieb mit 3 und 4 Reaktoren definiert. Zusätzlich wurde ein Programm für die Variation der Betriebsparameter erstellt, welche auch auf der Demonstrationsanlage in Pohang im industriellen Maßstab durchgeführt wurden.

Ziel der Laboruntersuchungen war es, durch Variation der Betriebsparameter den Reduktionsgrad für den Betrieb mit nur 3 Reaktoren zu optimieren. Durch die 3 Reaktoren Fahrweise ergeben sich erhebliche Einsparung bei den Investitionskosten als auch bei dem Energieverbrauch. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch Optimierung der Prozessführung ähnliche Reduktionsgrade bei der 3 im Vergleich zur 4 Reaktoren Fahrweise zu erreichen sind. Der Einfluss der Reaktortemperatur in R3 für den Endreduktionsgrad ist nur von untergeordneter Bedeutung, wodurch bei der großtechnischen Anwendung eine Fahrweise mit niedrigen Temperaturen im Reaktor 3 zu bevorzugen ist.

Um die gewonnenen Erkenntnisse zu verifizieren, wurden auf der großtechnischen Anlage verschiedene Testkampagnen durchgeführt. Hierbei wurde versucht die Betriebsparameter den Laborversuchen anzupassen. Um einen 3 Reaktorbetrieb durchzuführen, musste die bestehende Anlage um eine By Pass Leitung und zusätzliche Sauerstoff Brenner im Reaktor 2 erweitert werden (Abbildung 5).



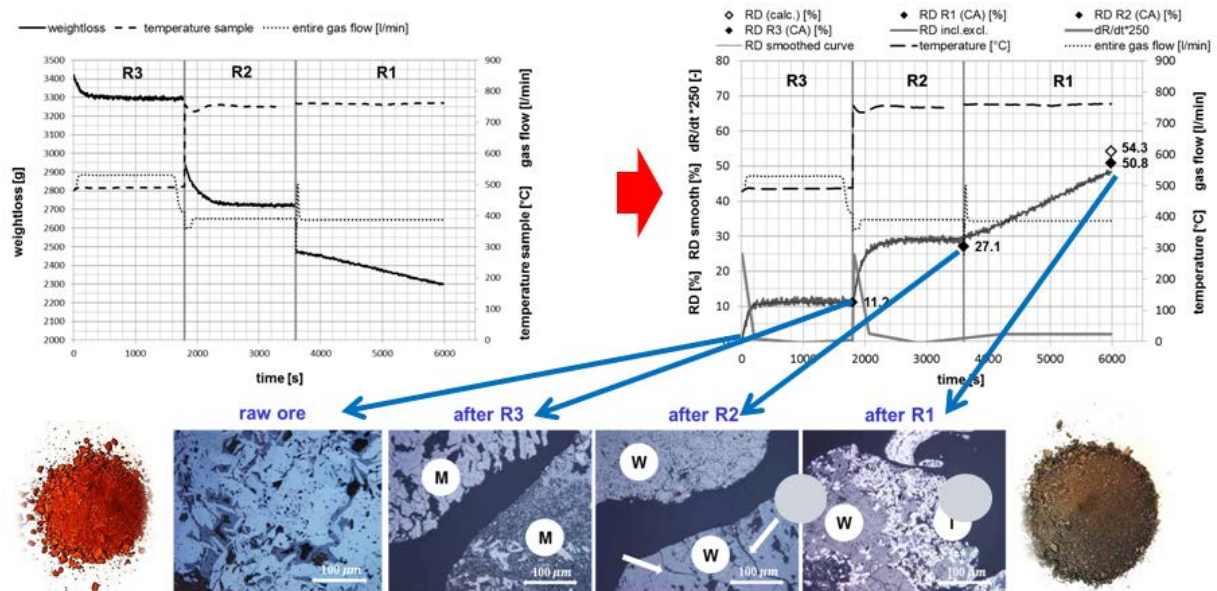
**Abbildung 5:** Umbau der Finex Anlage für einen Betrieb mit 3 Reaktoren

Die Tests auf der industriellen Anlage zeigten die vorhergesagten Ergebnisse. Der Reduktionsgrad des Eisenerzes während des 3 Reaktoren Betriebs lag etwas unter dem des 4 Reaktoren Betriebs, was allerdings den lokalen Bedingungen geschuldet ist. Wie auch bei den Labortests fielen die Schlammverluste und damit die Rohstoffverluste niedriger aus. Zusätzlich konnte eine Verbesserung des Brikettierbetriebs festgestellt werden. Der Einfluss der Reaktor 3 Temperatur auf den Reduktionsgrad war ebenfalls gering. Positiv wirkte sich auch ein erhöhte Wasserstoffgenerierung im Reaktor 3 aus (Wassergas Shift Reaktion), die eine Verbesserung des Anlagenbetriebs mit sich bringt. Für die Installation einer neuen Anlage mit 3 Reaktoren ergeben sich zusätzliche Energieeinsparungen durch den Wegfall des vierten Reaktorgefäßes (weniger Wärmeverlust, Stickstoffeinsparung) sowie der geringeren Bauhöhe, wodurch der Energiebedarf für die Erzchargierung erniedrigt wird.

Parallel zu den großtechnischen Tests wurden weitere Untersuchungen an der 160mm Retorte in Leoben durchgeführt, um weitere Parametervariationen zu testen. Um ein besseres Verständnis für die Vorgänge in den einzelnen Reaktoren zu bekommen, wurde die 160mm Retorte während des 3. Forschungsjahr mit einem Probennahmesystem ausgestattet, welches es erlaubt während des laufenden Versuchs Materialproben aus der Wirbelschicht zu entnehmen.

Nach erfolgreicher Installation des Probennahmesystems wurden Standard Reduktionsversuche mit verschiedenen Erzsorten durchgeführt. Nach jeder Reduktionsstufe wurden mittels des neuen Systems Proben aus der Wirbelschicht entnommen und anschließend hinsichtlich des Reduktionsgrades und der Morphologie untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen (Abbildung 6) zeigen, dass sich je nach Erztyp signifikante Unterschiede bei der Reduzierbarkeit ergeben. Besonders schlechte Reduktionseigenschaften weist

hierbei Magnetit auf, da er auf Grund der Morphologie eine sehr dichte Struktur aufweist, die die Diffusion des Reduktionsgases behindert. Hämatitische und limonitische Erze weisen hingegen eine sehr gute Reduzierbarkeit auf. Neben der Bestimmung der Reduzierbarkeit kann mit der bestehenden Versuchsanordnung auch das Zerfallsverhalten der Erze bestimmt werden, welches maßgeblich für die Materialverluste im industriellen Prozess verantwortlich ist.



**Abbildung 6:** Untersuchung von Erzen bei unterschiedlichen Reduktionsstufen

Als Ergebnis der Untersuchungen wurde beschlossen zukünftige Anlagen nur noch mit 3 Reaktoren zu bauen, um die Investitionskosten zu verringern und den Energieverbrauch der Anlage zu senken.

### 2.3 AP3 - Pneumatischer Erztransport

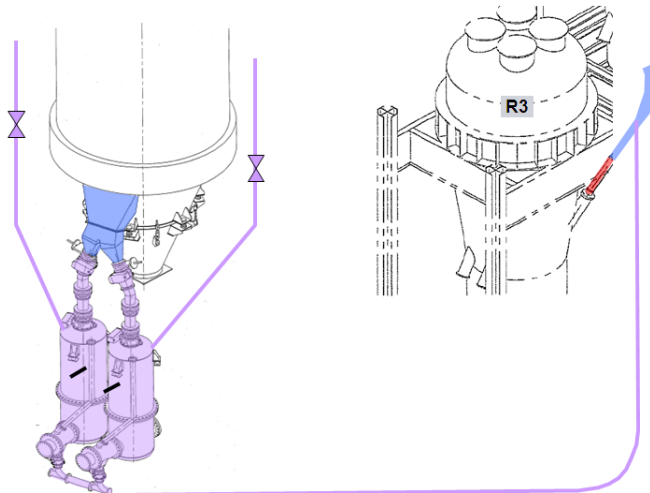
Anstatt des derzeit beim FINEX® Prozess implementierten Erztrockners und Förderband-Transports von Feinerz zu den Wirbelschichtreaktoren wird eine pneumatische Nasschargierung des Erzes mit Prozessgas angestrebt. Durch die Einsparung des Erztrockners, welcher mit einer Erdgasfeuerung (oder Kokerei Gas) betrieben wird und dem Einsatz von Prozessgas zur Förderung, kommt es zur erheblichen Reduktion von Investmentkosten, dem Verbrauch von fossilen Energieträgern und elektrischer Energie, was wiederum den Ausstoß von CO<sub>2</sub> verringert. Der bestehende Förderbandtransport verringert zusätzlich auch die Verfügbarkeit der Anlage, wodurch die Anzahl an Wartungsstillständen erhöht wird. Da jeder Stillstand zu erhöhten Energieverbräuchen während des Nieder- und Hochfahrens führt, kann der Gesamtenergieverbrauch durch die geringere Anzahl an Stillständen reduziert werden. Um das Konzept zu testen wurde eine großtechnische Versuchsanlage errichtet (Abbildung 7).

Für den Betrieb der Testanlage wurden verschiedenen Phasen definiert:

- Ersatz Förderbandtransport durch pneumatische Förderung



- N<sub>2</sub> als Treibgas
- Prozessgas als Treibgas
- Umstellung von getrocknetem Fördergut auf Nasschargierung



**Abbildung 7:** Schema der Testanlage zur pneumatischen Erzförderung

Nach Erstellung des Konzeptes wurde eine Testanlage mit einer Kapazität von 100 t/h errichtet.

An den bestehenden Oxid Bin 2 der FINEX® Demonstrationsanlage wurden zwei Feinerz Sendegefäße mit Dosierschnecken installiert (Bild 11). Diese Gefäße werden wechselweise mit Erz gefüllt, mit Stickstoff unter Druck gesetzt und anschließend über die Dosierschnecken entleert. Das Erz wird mittels einer Leitung pneumatisch in den 3. Reaktor der Demonstrationsanlage chargiert. Hierzu wurde eine spezielle „Drop Chamber“ entwickelt, über die das Erz in die Wirbelschicht gelangt. Nachdem das Sendegefäß entleert ist, schaltet das System auf das bereits gefüllte zweite Gefäß um.

In einer ersten Phase wurde die Anlage mit Stickstoff betrieben, um ihre Funktionsfähigkeit und Sicherheit zu testen. In der zweiten Stufe wurde die Anlage mit rezirkulierten Reduktionsgas betrieben, welches von der bestehenden PSA Anlage zur Verfügung gestellt wird.

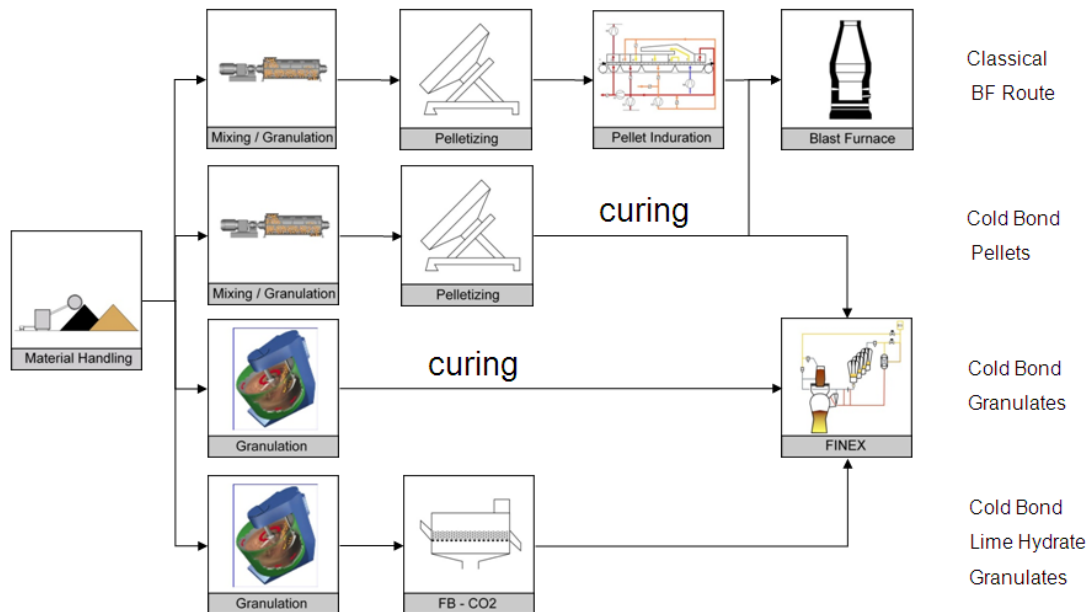
Nach Erstellung des Grundkonzeptes wurde eine ausführliche Sicherheitsstudie durchgeführt, da das Betreiben mit Prozessgas hohe Sicherheitsanforderungen stellt. Entsprechend der Ergebnisse wurde das Konzept modifiziert. Anschließend wurde das Engineering der Testanlage durchgeführt. Wesentliche Bestandteile waren: Funktionsbeschreibung, Einplanung und Konstruktionszeichnungen, Instrumentierung, Erstellung der Betriebs- und Wartungsanleitung und Programmierung des Level 1 Systems. Während der ersten Tests mit Stickstoff konnte die Funktionstüchtigkeit der Anlage gezeigt werden. In einer weiteren Optimierungsphase wurde die Anlagenkapazität schrittweise auf 100 t/h gesteigert bei gleichzeitiger Absenkung der Fördergasmenge von 4200 Nm<sup>3</sup>/h auf 3500 Nm<sup>3</sup>/h. Die technischen Anlagenprobleme konnten weitestgehend gelöst werden. Nach der Umrüstung auf Betrieb mit Prozess Gas wurde eine weitere Versuchskampagne gefahren.

Da sich die neue Entwicklung der pneumatischen Erzförderung während der durchgeführten Testkampagnen bewährt hat, wurde die Entscheidung getroffen für die nächste Generation

von FINEX® Anlagen dieses System zu verwenden. Nach erfolgreichem Abschluss der Anlagentests wurden die gewonnenen Ergebnisse auf eine großtechnische Anlage übertragen. Die aus den Tests bekannten Probleme flossen hierbei in das Engineering der Großanlage ein. Wesentliche Vorteile des neuen Systems gegenüber dem alten Chargierkonzept bestehen in der niedrigen Bauhöhe (ca. 50% von der ursprünglichen Höhe), wodurch im Betrieb die Energiekosten signifikant gesenkt werden können. Desweiteren wird durch die neue Bauweise ca. 30% der gesamten Stahlkonstruktion eingespart. Für eine FINEX® Anlage mit 2 Millionen Jahrestonnen Produktionsleistung werden zwei pneumatische Chargierlinien installiert, die unabhängig voneinander Erz in den Wirbelschichtreaktor chargieren können. Als Fördermedium kann sowohl Stickstoff als auch vorgewärmtes Prozessgas verwendet werden, welches durch die Recycle Gas Kompressoren der PSA Anlage zur Verfügung gestellt wird. Durch den Einsatz von Prozessgas wird die Gesamtmenge an Stickstoff im Gassystem verringert, wodurch es zu prozessbedingten Primärenergieeinsparungen (Kohleverbrauch) kommt.

#### **2.4 AP4 - Feinerz-Granulation von Mikropellets für den Einsatz in der FINEX® Wirbelschicht**

Auf Grund von speziellen Eigenschaften verschließen sich beachtliche Teile der weltweiten Erzvorkommen vor einem direkten Einsatz ohne vorherige aufwendige Aufbereitung. Durch die Entwicklung eines energieoptimierten Pelletierverfahrens sollen diese Erze für das FINEX® Verfahren nutzbar werden. In Abbildung 8 ist die typische Verfahrensrouten der Pelletierung für den Einsatz im Hochofen im Vergleich zur kalten Mikrogranulierung dargestellt. Ziel ist es Mikropellets für den direkten Einsatz in der Wirbelschicht herzustellen, deren Festigkeit durch Härtung mittels der vorhandenen Prozesswärme erreicht werden soll. Gleichzeitig sollen anfallende Schlammengen durch diesen Prozessschritt dem FINEX® Verfahren direkt wieder zugeführt werden. Dies würde die Flexibilität bei der Rohstoffauswahl erhöhen, interne Reststoffverwertung ermöglichen und eine weitere Steigerung der Energieeffizienz des FINEX® Verfahrens bedeuten.



**Abbildung 8:** Routen der Pelletierung / Granulierung

Zunächst wurden verschiedene Konzepte zur Herstellung von Mikropellets bzw. Granulate untersucht. Nach ausführlicher Literaturrecherche und Patentanalyse wurden verschiedene Konzepte identifiziert und ein Versuchsplan erstellt. Parallel hierzu wurde ein Wirtschaftlichkeitsrechnungsmodell erstellt, um die verschiedenen Konzepte miteinander vergleichen zu können. Die Berechnungen ergeben, dass ein wesentlicher Kostenblock bei der Pelletierung die notwendige Energie für die Aufbereitung des Erzes, sowie für das anschließende Brennen ist. Je nach Erzqualität liegt der Energieanteil bei bis zu 60 % der Gesamtkosten. Daher wurde der Schwerpunkt auf die Erzeugung eines Mikrogranulats gelegt, welches bei niedriger Temperatur seine Einsatzhärte erlangt.

Hierzu wurden verschiedene Binderkonzepte festgelegt und anschließend im Labor Granulate hergestellt (Abbildung 9). Die erzeugten Granulate wurden anschließend zur Montan Universität Leoben geschickt für weitere Untersuchungen. Ziel der Untersuchungen war, es das Fluidisierungsverhalten der Granulate, bzw. Pellets unter Wirbelschichtbedingungen zu testen. Neben der Korngrößenverteilung wurden die Granulate hinsichtlich ihrer Kaltfestigkeit, Warmfestigkeit, dem Fluidisierungsverhalten und dem Reduktionsverhalten untersucht. Um aufwendige Versuche auf der 160mm Retorte zu begrenzen, wurden an einer Druck TGA unter realen FINEX® Bedingungen erste Voruntersuchungen durchgeführt.



**Abbildung 9:** Laborgranulate mit verschiedenen Bindersystemen

Parallel zu den Laboruntersuchungen wurden auch theoretische Berechnungen durchgeführt, um den Einfluss solcher Granulate auf den FINEX® Prozess zu untersuchen. Die Wärme- und Massenbilanzrechnungen zeigen, dass durch den Einsatz von Granulaten (Magnetit Konzentrate) der Kohleverbrauch um bis zu 30 kg/t Roheisen gesenkt werden kann. Grund hierfür sind in erster Linie der hohe Eisengehalt der Granulate und die daraus verminderte Schlackenmenge während der Produktion.

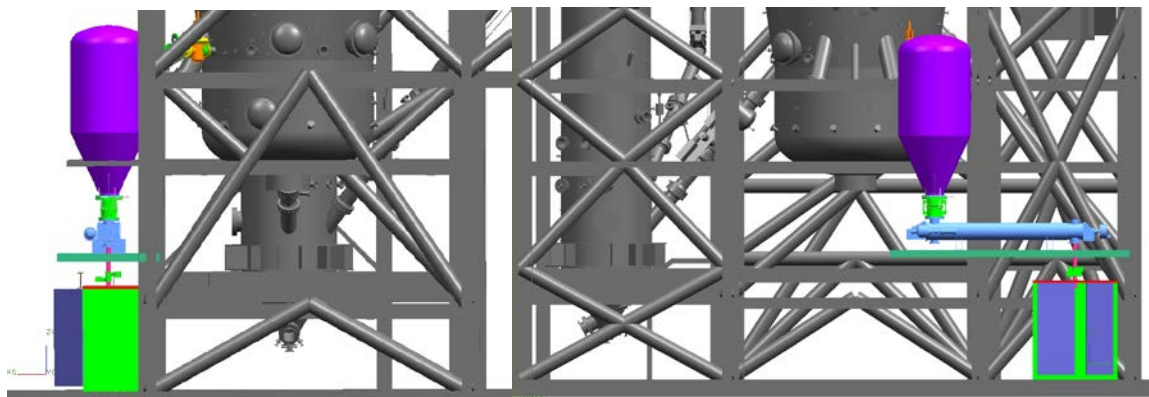
Im Rahmen der Forschungstätigkeiten konnte ein Bindersystem entwickelt werden, welches unter FINEX® Prozessbedingungen reduziert werden kann, ohne dabei zu zerfallen. In einem nächsten Schritt soll ein großtechnisches Verfahren entwickelt werden.

## **2.5 AP5 - Trockene DRI Kühlung zum Austrag aus der Wirbelschicht**

DRI (Direct Reduced Iron) stellt ein Zwischenprodukt des FINEX® Verfahrens zwischen Reaktorkaskade und Brikettierung dar. Für das An- und Abfahren der Anlage und in speziellen Betriebssituationen wird die Reaktorkaskade spontan entleert und das DRI in einem Behälter mit Wasser abgekühlt. Das bestehende Kühlsystem ist geprägt durch einen hohen Wasserverbrauch und damit verbundenen Energieverbrauch, der von Nachteil für den Prozess ist. Des Weiteren muss der abgeführte Schlamm einer aufwendigen Nachbehandlung zugeführt werden. Durch die Modifikation des bestehenden Systems zu einer trockenen Kühlung kann eine signifikante Menge an Prozesswasser eingespart werden. Dies entlastet in weiterer Folge die Wasseraufbereitung, reduziert damit den Einsatz von Chemikalien (Flockungsmittel) und elektrischer Energie (Pumpen). Das abgekühlte DRI soll anschließend dem Prozess direkt wieder zugeführt werden, wodurch der spezifische Einsatz an Rohstoffen entsprechend verringert werden kann.

Ziel der Forschungsaktivitäten war es ein Grundkonzept zu erstellen, eine Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsstudie durchzuführen, Engineering für eine Testanlage zu erstellen, sowie diese an der bestehenden FINEX® Anlage zu errichten, um anschließend alle notwendigen Parameter für eine großtechnische Umsetzung zu ermitteln.

Abbildung 10 zeigt den Versuchsaufbau an der industriellen FINEX® Anlage. Das heiße DRI (ca. 750 °C) wird hierbei zunächst in einen separates Gefäß entleert. Anschließend wird es mittels einer speziellen Kühlschnecke ausgetragen und auf eine Temperatur von ca. 80 °C abgekühlt. Besonderes Augenmerk wurde auf den Verschleißschutz der Schnecke gelegt, da aus bestehenden Anlagen die hohe Abrasion des zu fördernden Mediums bekannt war. Insbesondere im Einlaufbereich und an den Enden der Schneckenwendeln wurde daher ein spezieller Verschleißschutz aufgeschweißt.



**Abbildung 10:** Testanlage zur trockenen DRI Kühlung

Während der Inbetriebnahme kam es zu verschiedenen Problemen, die allerdings weitgehend gelöst werden konnten. Während verschiedener Testläufe wurden Betriebsparameter aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die indirekte Kühlung bei der nominalen Kapazität (2t/h) das heiße Material von 750°C auf ca. 80°C abgekühlt werden kann, was in guter Übereinstimmung mit den theoretischen Berechnungen lag.

Mit den gewonnenen Daten konnte die Dimensionierung und die Auslegung der Schnecken für die geplante 2 Millionen Tonnen Anlage durchgeführt werden. Für das großtechnische Projekt sind zwei DDQ Gefäße vorgesehen. Damit ist sichergestellt, dass der gesamte Inhalt der Wirbelschicht Reaktoren während Normalbetrieb in die DDQ Gefäße chargiert werden kann. Um ausreichend schnelles Leeren bei einer Produkttemperatur von 80°C zu gewährleisten, müssen zwei Kühlschnecken in Serie geschaltet werden. Dadurch wird eine komplette Entleerung der Reaktoren und DDQ Gefäße in weniger als 24 Stunden möglich.

Mit der entwickelten Testanlage und den durchgeführten Testkampagnen konnte das geplante Anlagenkonzept zufriedenstellend verifiziert werden. Durch die großtechnische Adaption für zukünftige FINEX® Anlagen könne erhebliche Einsparung bei Energie- und Medienverbrauch erreicht werden. Desweiteren können erhebliche Mengen an Rohstoffen eingespart und eine aufwendige Schlammwirtschaft vermieden werden. Zukünftiger Optimierungsbedarf liegt allerdings noch im „Material Handling“ des abgekühlten Materials und einer direkten Zuführung in den FINEX® Prozess.

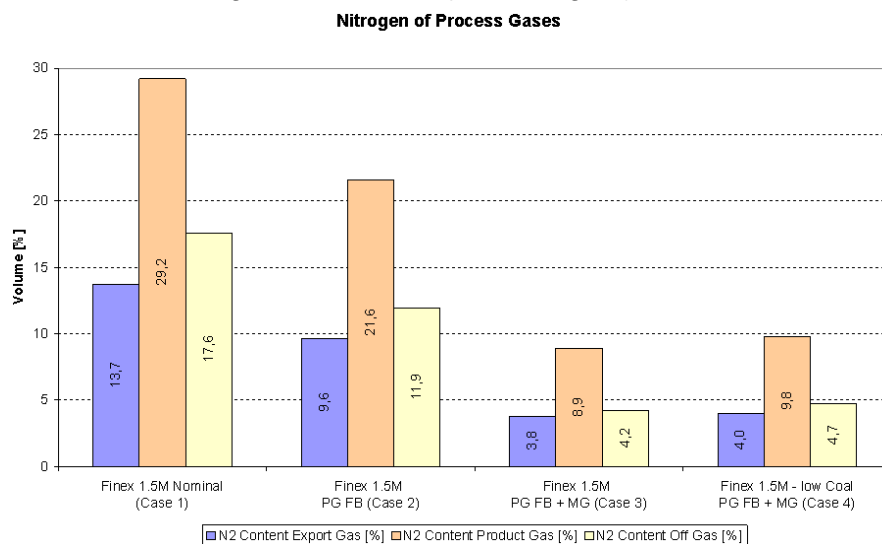
## 2.6 AP6 - Stickstoffreduktion und Substitution beim FINEX® Verfahren

Für bestehende FINEX® Anlagen werden für die Prozessführung erhebliche Mengen an Stickstoff für verschiedenartige Anwendungen benötigt (z.B. Chargiersystem, Staubbrenner, Sauerstoffbrenner, Pulverized Coal Injection, etc.). Durch eine Verringerung des Stickstoff-Verbrauchs bzw. einer Substitution durch Prozessgas im gesamten FINEX®-Prozess wird Energie in der Luftzerlegungsanlage eingespart. Desweiteren verringert sich dadurch der Anteil an Inertgas im Prozess, was wiederum zu einem niedrigeren Energieverbrauch bei den Prozessgas Verdichtern führt. Dadurch kommt es zur weiteren Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen und Einsparung an primären Energieträgern. Durch die Prozessgasrückführung

über eine PSA-Anlage (Pressure Swing Adsorption) kommt es darüber hinaus zu einer Anreicherung von N<sub>2</sub> im Prozessgas, wodurch das Reduktionsverhalten verschlechtert und damit die Produktivität und die Energieeffizienz des FINEX<sup>®</sup> Prozesses verschlechtert wird. Zunächst lag der Schwerpunkt der Tätigkeiten auf der Entwicklung eines Grundkonzeptes und der Erstellung und Durchführung von Massen- und Energiebilanzen. Hierzu wurde das bestehende Massenbilanzprogramm adaptiert und verschiedene Fälle berechnet, bei denen Stickstoff durch Produktgas der PSA Anlage ersetzt wurde. Im Grundkonzept wurden zunächst verschiedene Verbraucher definiert und mögliche Substitution des Stickstoffes untersucht. Während Stickstoff sich nachteilig auf die Energiebilanz des Gesamtprozesses auswirkt, hat er den Vorteil, dass er auf Grund seiner inerten Eigenschaften überall problemlos als Spülgas eingesetzt werden kann. Verwendet man hingegen z.B. Produktgas der PSA Anlage als Spülgas, kann es lokal zu Metal Dusting oder zur Boudouard Reaktion kommen, die ebenfalls den Prozess negativ beeinflussen können. Des Weiteren ergeben sich wesentlich höhere Sicherheitsanforderungen, die im Engineeringprozess berücksichtigt werden müssen.

Anschließend wurde rechnerisch zunächst im Reaktorbereich ca. 14.000 Nm<sup>3</sup>/h Stickstoff an vordefinierten Stellen durch Produktgas ersetzt. In einer weiteren Rechnung wurden ca. 10.000 Nm<sup>3</sup>/h Stickstoff im Einschmelzvergaserbereich substituiert. Durch die Substitution ergeben sich Veränderungen in der Energiebilanz und den Prozessparameter. In einer vierten Rechnung wurden die vordefinierten Prozessparameter wieder angepasst. Dies geschah im Wesentlichen durch Absenkung der Kohlenstoffmenge und der PSA Kapazität, wodurch sich die mögliche Einsparung bei Energie ergibt.

Bei Anwendung aller technisch machbaren Optionen kann der Stickstoffgehalt im Exportgas von derzeit 13,7% auf 4% abgesenkt werden (Abbildung 11).



**Abbildung 11:** Absenkung des Stickstoffgehalts im Export Gas

Daraus ergeben sich zahlreiche Veränderungen der Designparameter für eine Neuanlage. Die bestehende Reaktorgröße kann durch die Einsparung an Stickstoff um ca. 11 % verringert werden. Neben Einsparungen bei den Investitionskosten ergibt sich auch eine

Verminderung des Kohleverbrauchs um ca. 4 %, was einer Einsparung von 27 kg Kohle pro Tonne Roheisen gleichkommt.

Im letzten Forschungsjahr wurde ein großtechnisches Konzept für den Ersatz von Stickstoff auf der bestehenden FINEX® 1.5M Anlage in Pohang erarbeitet. Zunächst wurden alle Verbraucher auf der Anlage identifiziert und ein Auswahl der möglichen Stellen durchgeführt, an denen Stickstoff durch Produktgas der PSA Anlage ersetzt werden kann.

Die Ergebnisse der Forschungstätigkeiten zeigen, dass durch den Ersatz von Stickstoff signifikante Einsparungen des Kohleverbrauchs möglich sind. Bei einer Anlage mit 1 Millionen Jahrestonnen ergeben sich maximale Einsparungen des Kohleverbrauchs von ca. 40.000 t was eine CO<sub>2</sub>-Emissionsmenge von ca. 120.000 t pro Jahr entspricht. Für bestehende Anlagen ist eine Umrüstung auf ein Produktgassystem machbar und mit relativ kleinem Aufwand möglich. Für Neuanlagen ergeben sich weitere Vorteile durch die Verringerung der Gesamtgröße der Wirbelschichtreaktoren.

## 2.7 AP7 - CO<sub>2</sub>-Sequestrierung

Als Stand der Technik wird im FINEX® Prozess CO<sub>2</sub> Adsorption zur Gasnachbehandlung und anschließenden teilweisen Rückführung des Prozessgases verwendet (PSA Anlage). Durch die bestehende Exportgasaufbereitung und Rückführung konnte der Kohleverbrauch um mehr als 100 kg/t Roheisen vermindert werden. In diesem Prozessschritt entsteht unter anderem ein mit CO<sub>2</sub> angereicherter Gasstrom. Es sollen Verfahrensvarianten untersucht werden, welche die wirtschaftliche Herstellung eines hochreinen CO<sub>2</sub> Stroms für die Verwendung in der chemischen-, Getränkeindustrie oder etwa der Schweißtechnik ermöglichen.

FINEX® bietet als einzige großtechnisch realisierte metallurgische Anlage die Option einer solchen CO<sub>2</sub>-Sequestrierung mit relativ geringem Aufwand (Abbildung 13).

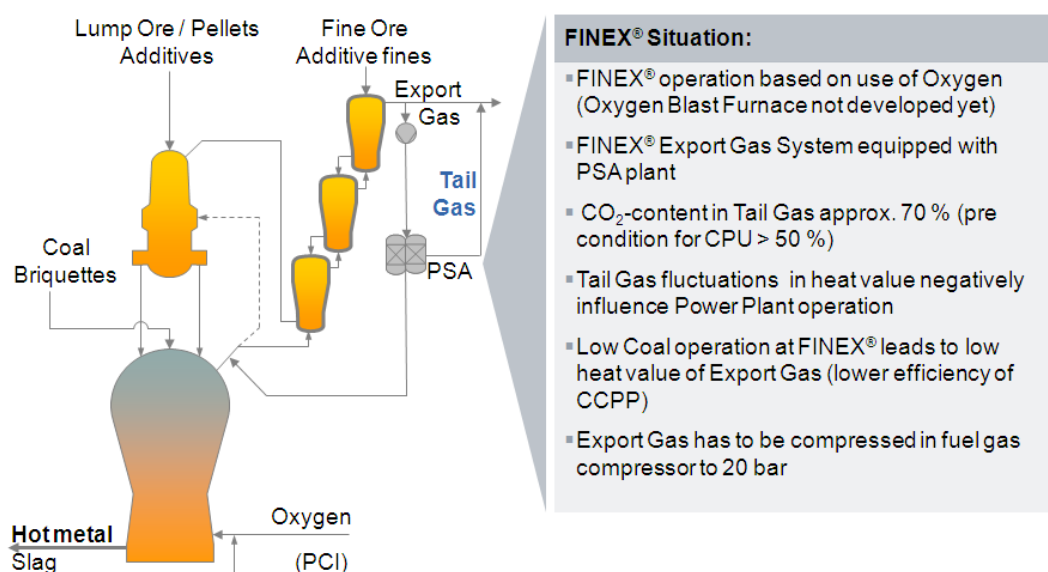


Abbildung 12: CO<sub>2</sub>-Sequestrierung bei FINEX®

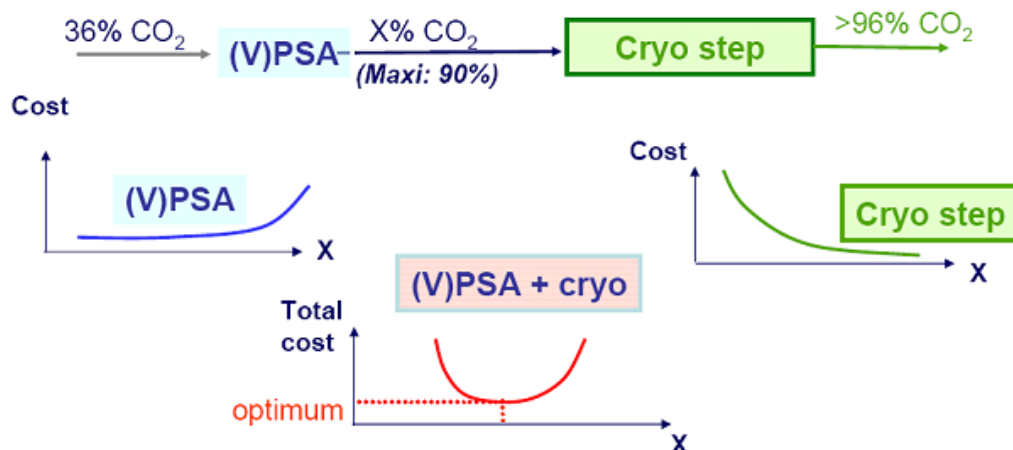
Im Gegensatz zum Hochofen wird die FINEX® Anlage mit reinem Sauerstoff betrieben wodurch der Stickstoffgehalt im Export Gas im Vergleich zum Hochofen sehr gering ist. Für die Verwendung einer PSA Anlage zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> im Prozessgas ist allerdings für den effektiven Betrieb ein niedriger Stickstoffwert Voraussetzung, da neben CO auch ein Großteil an N<sub>2</sub> in das Produktgas abgeschieden wird. Da Stickstoff im Prozess nicht chemisch umgesetzt wird, kommt es durch das rezirkulieren des Prozess Gases über eine PSA Anlage zu einer Anreicherung von Stickstoff, wodurch der Energiebedarf der Gesamtanlage steigt (siehe auch AP). Eine PSA Anlage ist bereits integraler Bestandteil der FINEX® Anlage, um den Kohlenstoffverbrauch zu senken.

Das CO<sub>2</sub> reiche Gas der PSA Anlage (Tail Gas) wird bisher in das Exportgassystem geleitet und in einem weiteren Schritt einem CCPP (Combine Cycle Power Plant) zugeführt. Da die Gasqualität des Tail Gases stark schwankt und negativen Einfluss auf das Kraftwerk hat, wäre eine alternative Verwendung des Tail Gases wünschenswert.

In einer ersten Vorevaluierung wurden verschiedene CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien untersucht. Neben der chemischen und physikalischen CO<sub>2</sub> Adsorption erscheint die kryogenische Destillation als eine der erfolgversprechendsten Varianten (CPU = Compression & Purification Unit). Durch Installation einer solchen CPU Einheit kann die spezifische CO<sub>2</sub> Menge im Exportgas um 37 % auf 801 kg/t Roheisen reduziert werden.

Zu Beginn der Forschungstätigkeiten lag der Schwerpunkt der Tätigkeiten auf der Evaluierung technischer Verfahrensvariation zur CO<sub>2</sub> Abscheidung aus Reduktionsgas und der Erstellung einer Massen- und Energiebilanz mit CO<sub>2</sub> Abscheidung für den FINEX® Prozess.

Für die Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Prozessgasen gibt es sowohl physikalische als auch chemische großtechnisch erprobte Verfahren. In der ersten Phase der Forschungstätigkeiten wurden die Aminwäsche, das PSA (Pressure Swing Adsorption) Verfahren, sowie die kryogenische Abscheidung für ihre Anwendbarkeit im FINEX® Prozess untersucht. Auf Grund verfahrenstechnischer und finanziellen Gründe wurde die kryogenische Abscheidung favorisiert (Abbildung 13).



**Abbildung 13:** Kombination von PSA und kryogener Abscheidung

Alternative Verfahren wie z.B. die Aminwäsche benötigen hohe Mengen an Energie in Form von Wasserdampf, welche beim FINEX® Prozess nicht zur Verfügung stehen. Daher wäre



eine aufwendige Dampferzeugung auf Basis von Brennstoffen notwendig, wohingegen eine PSA Anlage und eine CPU Einheit nur elektrische Energie benötigen.

In einem zweiten Schritt wurde ein Prozessflussbild für die Integration einer CPU Anlage in den bestehenden FINEX<sup>®</sup> Prozess erstellt. Das aus der bestehenden PSA Anlage anfallende Tail Gas wird hierbei einer CPU Anlage zunächst zugeführt und durch Kompressoren verdichtet. Anschließend wird das Gas in einer TSA (Temperatur Swing Adsorption) getrocknet und der Cold Box zugeführt. Nach dem Prinzip der Destillation wird CO<sub>2</sub> von den restlichen Bestandteilen im Gas abgetrennt und als flüssiges CO<sub>2</sub> entnommen. Das Tail Gas der CPU Anlage kann auf Grund des hohen Druckniveaus direkt in der Gasturbine des Kraftwerkes eingesetzt werden.

Auf Grund der wirtschaftlichen Situation kann momentan keine positive Entscheidung für den sofortigen Bau einer solchen Pilotanlage getroffen werden. Es wurde vereinbart, das Konzept für eine kleine Anlage zu detaillieren und eine Investitionskostenabschätzung durchzuführen.

Insgesamt ist festzustellen, dass das FINEX<sup>®</sup> Verfahren von allen großtechnischen Anlagen zur Roheisenherstellung die wirtschaftlich besten Voraussetzungen für eine CO<sub>2</sub>-Sequestrierung bietet. Die wirtschaftlichste Variante ist die Installation einer CPU Einheit in Kombination mit einer PSA Anlage. Auf Grund der politischen Situation ist es allerdings fragwürdig ob sich eine Sequestrierung von CO<sub>2</sub> in natürliche Lagerstätten durchsetzen lässt. Die Substitution von Stickstoff durch CO<sub>2</sub> im FINEX<sup>®</sup> Prozess ist aber durchaus sinnvoll, allerdings können nur Teilströme des erzeugten CO<sub>2</sub> in einer FINEX<sup>®</sup> Anlage verwertet werden.

### **3 Schlussfolgerungen**

Das Projekt konnte inhaltlich und zeitlich nahezu wie geplant durchgeführt werden. Auf Grund der Errichtung von Testanlagen (AP4 und AP5) in Korea beim Kunden Posco war eine hohe Flexibilität erforderlich, da die Anlagen im Verbund mit der industriellen FINEX<sup>®</sup> 1 Anlage am Standort Pohang gebaut wurden. Hierbei musste Rücksicht auf die Produktionsplanung und Stillstandzeiten genommen werden. Ziel des Projekts war es, die gewonnenen Ergebnisse möglichst schnell industriell umsetzen zu können bzw. großtechnische Konzepte zu erstellen. Die durchgeführten Forschungstätigkeiten haben maßgeblich geholfen, dass Siemens VAI einen Auftrag für eine weitere FINEX<sup>®</sup> Anlage mit einer Jahresproduktion von 2 Millionen Tonnen Roheisen erhielt. Zahlreiche Ergebnisse fließen bereits in die neue Anlage ein und führen zu einer Optimierung des Energiebedarfs. Schwierig dürfte sich die Sequestrierung von CO<sub>2</sub> darstellen, obwohl technisch bei FINEX<sup>®</sup> relative einfach umzusetzen, da die politischen Rahmenbedingungen fehlen, um eine solche Technologie großtechnisch anzuwenden.

### **4 Ausblick und Empfehlungen**

Das FINEX<sup>®</sup> Verfahren bietet als noch sehr junges Verfahren zur Roheisenherstellung zahlreiche Möglichkeiten um weitere Optimierungen hinsichtlich des Energieverbrauchs durchzuführen. Die gewonnenen Ergebnisse aus dem abgeschlossenen Forschungsprojekt werden bereits für den Bau neuer Anlagen angewendet. Zukünftige Forschungsaktivitäten

werden weiterhin schwerpunktmäßig bei der weiteren Optimierung des Energieverbrauchs liegen. Zusätzlich wird der Fokus in Zukunft auch auf der Verwertung qualitativ minderwertiger Rohstoffe liegen. Hierzu wurden bereits neue Forschungsaktivitäten im Rahmen des K1-met Programs gestartet.

Das Programm „Neue Energien 2020“ hat maßgeblich zur erfolgreichen Weiterentwicklung der FINEX® Technologie beigetragen.

## 5 Literaturverzeichnis

### Fachzeitschriften:

Thaler, C.; J. Schenk, J. F. Plaul, Bilanzmodell des FINEX-Prozesses ermöglicht die Abschätzung des Gesamtenergieverbrauchs, Stahl und Eisen 131 (2011) 2, 31 – 37.

Thaler, C.; T. Tappeiner, J. Schenk, W. Kepplinger, J. F. Plaul and S. Schuster, Integration of the Blast Furnace Route and the FINEX-Process for Low CO<sub>2</sub> Hot Metal Production, Steel research international 83 (2012), 1-8.

Thaler, C., T. Tappeiner, J. Schenk, W. Kepplinger, J. F. Plaul and S. Schuster, Usage of FINEX® LRI (low reduced iron) in the blast furnace. - in: 2nd International Conference and Exhibition on Clean Technologies in the Steel Industry, (2011), 1–12.

Thaler, C., J. Schenk and J. F. Plaul, Bilanzmodell des FINEX®-Prozesses zur Abschätzung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, DepoTech, Leoben, Austria, (2010), 649-653.

Skorianz, M., H. Mali, J. F. Plaul, J. L. Schenk and C. Thaler, Classification of fine ores regarding their reducibility with tests in a lab scale fluidized bed reactor and petrographical analysis, AISTech, Atlanta, USA, (2012), 531-542.

Skorianz, M., H. Mali, J. L. Schenk, J. F. Plaul, M. B. Hanel and A. Pichler, Mineralogical and structural evolution of iron ore fines reduced in a lab scale fluidized bed reactor, International Congress on the Science and Technology of Ironmaking ICSTI, Rio de Janeiro, Brasil, (2012), 2347-2359.

Skorianz, M., H. Mali, J. L. Schenk, J. F. Plaul, B. Weiss and M. B. Hanel, Evaluation of reducibility of iron ore fines by reduction tests under fluidized bed conditions and petrographical investigations, Asia Steel Conference, Beijing, China, (2012).

### Vorträge auf Konferenzen:

Thaler, C., J. Schenk and J. F. Plaul: Development of a mass and energy balance model of the FINEX® process, K1-MET Scientific Exchange Day, Linz, Austria (2011), March 21st.

Skorianz, M., Classification of fine ores regarding their reducibility with tests in a lab scale fluidized bed reactor and petrographical analysis, VDEh Ausschuss für metallurgische Grundlagen, Leoben, Austria, (2011), July 14th-15th.

Skorianz, M., H. Mali, J. F. Plaul, J. L. Schenk and C. Thaler, Classification of fine ores regarding their reducibility with tests in a lab scale fluidized bed reactor and petrographical analysis, AISTech, Atlanta, USA, (2012), May 7th–10th.

Skorianz, M. and M. Hanel, Development of methods for the evaluation of iron ore reduction behavior for the optimization of ironmaking processes, European Mineral Resources Conference EUMICON, Leoben, Austria, (2012), September 19th–21st.

Skorianz, M., H. Mali, J. L. Schenk, J. F. Plaul, B. Weiss and M. B. Hanel, Evaluation of reducibility of iron ore fines by reduction tests under fluidized bed conditions and petrographical investigations, Asia Steel Conference, Beijing, China, (2012), September 23rd–27th.

Skorianz, M. and M. Hanel, Development of methods for the evaluation of iron ore reduction behavior for the optimization of ironmaking processes, Seminário Técnico Internacional, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, (2012), October 9th–12th.

Skorianz, M., H. Mali, J. L. Schenk, J. F. Plaul, M. B. Hanel and A. Pichler, Mineralogical and structural evolution of iron ore fines reduced in a lab scale fluidized bed reactor, International Congress on the Science and Technology of Ironmaking ICSTI, Rio de Janeiro, Brasil, (2012), October 14th–18th.

#### **Diplomarbeiten:**

Pichler, A., Beitrag zur Entwicklung einer standardisierten Methodik für die Bewertung der Reduktion von Feinerzen, Bachelor Thesis, Montanuniversitaet Leoben, Chair of Metallurgy, (2011).

Pichler, A., Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der morphologischen Veränderung von Feineisenerzen während der Reduktion in einem Wirbelschichtreaktor, Master Thesis, Montanuniversitaet Leoben, Chair of Metallurgy, (2012).

Köplmayr, D., Untersuchung von Bindersystemen zur Agglomeration von Feinsteisenerzen und deren Anwendung in Wirbelschichtprozessen. Master Thesis, Montanuniversitaet Leoben, Chair of Metallurgy, (2012).