

GREENSTEEL – ohne verlässliche Abgasmessung geht es nicht.

Zusammenfassung

GreenSteel ist nicht nur eine genaue Zielzusammensetzung des Stahls, sondern auch ein möglichst emissionsarmes Abgas und möglichst wenig Energieeintrag, um die Zielzusammensetzung zu erreichen. Also braucht es genaue Kenntnis der zeitlichen Abläufe und deren Optimierung. Dafür braucht es Messstellen, die verlässliche, reproduzierbare Daten liefern und ein Algorithmus der die Daten verarbeiten und die Variablen schnell anpassen kann.

Es ist bekannt, dass es im traditionellen Ofen und in den bekannten Schachtofenkonzepten sehr schwierig, wenn nicht unmöglich ist, ofennahe Informationen zu erhalten und wenn, dann sind die Daten von vielen, ständig wechselnden Konditionen beeinflusst und liefern daher keine für die Steuerung verwertbaren Daten.

Es braucht also ein Ofenkonzept, in welchem das Abgas ofennah erfasst und mittels Steuerung der dem Brennraum des Ofens zufließenden Medien beeinflusst werden kann. Diese Abgasmessung darf nicht verfälscht sein. Ähnlich wie bei effizienten Heizanlagen ist die Zuluft eine der Regelgrößen. Hier lässt sich mit einer effizienten Steuerung **sehr viel Energie einsparen**.

Das Abgasnutzungssystem von **eco-e tech** – das **CORE**-Ofenkonzept und das Zweikammerschrottvorwärmesystem **ECOFEEDE**R – ist die konsequente Antwort auf die Forderung nach **Net Zero** oder '**GreenSteel**', denn nur wenn die drei Voraussetzungen: klare Abgrenzung der Ofenatmosphäre, Messstellen, die verlässliche Daten liefern und eine schnelle und zuverlässige Regelung der Energien und der Zuluft gegeben sind, ist das Ziel erreichbar. Die Brenner sind einsatzoptimiert, auch mit fossilen Energieträgern kann das Ziel der Klimaneutralität kurzfristig und kostengünstig realisierbar werden. Der Effekt: aktive Schrottvorheizung im Ofen (heisses Gas fließt durch den Schrott und nicht den Elektroden entlang), kürzere Einschmelzzeiten, weniger Staub im Abgas und eine optimierte Abgasnutzung im ECOFEEDER dank einer **Abgasmessung, die verlässliche Daten liefert** (keine Fremdeinflüsse, wenig Staub und keine Strömungsveränderungen). Das schadstofffreie und staubarme Restgas steht dank der nahezu konstanten Temperatur für einen breiten Einsatz offen (wie z.B. Dampferzeugung, DRI Vorheizung, Wärmetauscher, etc.).

Das einzigartige Abgasnutzungssystem **eco-e tech** ermöglicht die Herstellung von **GreenSteel** und bringt **massive Kosteneinsparungen**.

Fazit: Abgaskontrolle = weniger Energie (massive Produktionskostenreduktion) = weniger CO₂ (weniger Umweltkosten) = Klimaneutralität = GreenSteel

Wir beraten Sie gerne. Glück auf!

April 2022, Roland V. Müller, eco-e AG

Automation – Im Abgas liegt die Information

Die Klimaneutralität oder besser noch die 0%CO₂ Emission 'Net Zero' kommt nicht automatisch und von selbst – es braucht einiges, um die Elektrostahlherstellung auf 0% CO₂ Ausstoss zu trimmen – vor allem aber braucht es Informationsquellen und ein funktionierendes Informationssystem. Kohlenstoff (C) und Eisen (Fe) leben in einer Symbiose, was sich auf mannigfaltige Art und Weise zeigt. Das Zusammenspiel zwischen Eisen, Kohlenstoff und Sauerstoff ist für den Stahl wichtig und wo wird der Stahl hergestellt – ja, im Ofen, also ist es wichtig, dass die Ofenatmosphäre stimmt, denn ohne Kohlenstoff und Sauerstoff gibt es kein Kohlenmonooxyd (CO), keinen Schlackenschäum und keine Badbewegung. Um das in Echtzeit und effizient zu kontrollieren und zu steuern, brauchen es Informationen über eben diese Atmosphäre.

Es gibt drei Voraussetzungen für eine erfolgreiche Steuerung der Ofenatmosphäre:

1. Klare Abgrenzung der Ofenatmosphäre
2. Messtellen, die verlässliche und reproduzierbare Daten liefern
3. Eine schnelle und zuverlässige Regelung der dem Ofen zufließenden, gasförmigen und festen Medien (Zuluft, Sauerstoff, Brennstoff (Wasserstoff, Kohlenwasserstoffverbindungen, Kohle)) und der Energie

Klare Abgrenzung der Ofenatmosphäre.

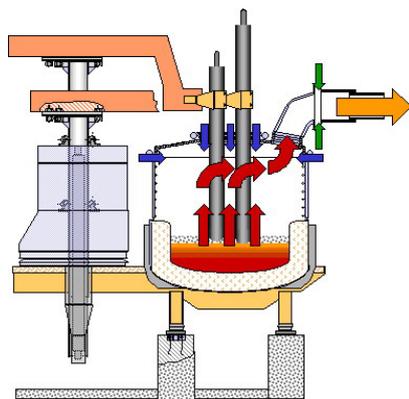


Bild 1 / Konvektion im Ofen

Wo Kohle verbrennt, entsteht CO₂. Wenn wir so wenig CO₂ wie möglich aus dem System austossen wollen, dann müssen wir die ungewollten CO₂-Quellen ausschalten und wie wunderbar, wir können damit auch noch viel Geld sparen. Eine ungewollte CO₂ Quelle ist der Elektrodenabbrand. Das heisse Gas, das den Elektroden entlang hochsteigt (Konvektion (Bild 1)), heizt diese zusätzlich auf und der Sauerstoff verbrennt den Kohlenstoff an der Peripherie der Elektroden. Dadurch wird nicht nur der Kohlenstoff abgebrannt (siehe Bild 2), was kostentreibend ist, sondern auch Sauerstoff verbrannt, der eigentlich für die Schaumslagge gedacht war. Somit fehlt der Sauerstoff zur Bildung von CO mit dem eingeblasenen Kohlenstoff und die Schmelze nimmt den Kohlenstoff auf, der später beim Veredeln (Refining) wieder ausgebrannt (frischen) wird. Also doppelte CO₂ Produktion anstatt Reduktion!

Der in Bild 1 dargestellte Luftstrom ist demnach nicht sehr 'clever'.

Das heisse Gas, das den Elektroden entlang hochsteigt (Konvektion (Bild 1)), heizt diese zusätzlich auf und der Sauerstoff verbrennt den Kohlenstoff an der Peripherie der Elektroden. Dadurch wird nicht nur der Kohlenstoff abgebrannt (siehe Bild 2), was kostentreibend ist, sondern auch Sauerstoff verbrannt, der eigentlich für die Schaumslagge gedacht war. Somit fehlt der Sauerstoff zur Bildung von CO mit dem eingeblasenen Kohlenstoff und die Schmelze nimmt den Kohlenstoff auf, der später beim Veredeln (Refining) wieder ausgebrannt (frischen) wird. Also doppelte CO₂ Produktion anstatt Reduktion!



Bild 2 / Seitlicher Abbrand der Elektroden

Ich möchte Ihnen einen 'cleveren' Luftstrom vorstellen (Bild 3).

Der 'Core'-Ofen bildet eine klare Abgrenzung der Ofenatmosphäre. Der Luftstrom wird von den Elektroden weggeführt und fließt über der Schlacke zum Abgaskanal. Dabei wird der Schrott zusätzlich aufgeheizt, was die Einschmelzzeit verkürzt. Das Zusammenspiel zwischen Vorheiz- und Schmelzzeit kann mit der Zuluft gesteuert werden. Das Abgas wird ohne CO₂ des Abbrands der Elektroden und ohne Einfluss von Falschluff gemessen.

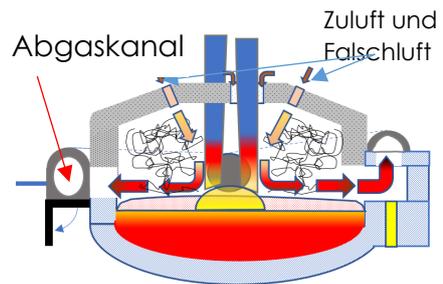


Bild 3 / Core-Ofen

Fazit: Im traditionellen Ofen mit 4. Loch oder Einkammerschrottvorheizung herrscht keine klare Abgrenzung der Ofenatmosphäre (Falschluff aus allen Richtungen). Im CORE-Ofen herrscht eine klare Abgrenzung der Ofenatmosphäre (steuerbare Zuluft und Falschluff von oben)

Messstellen die Daten liefern, die verlässlich und reproduzierbar sind.



Bild 4 / Lindarc Abgasmessung

Im traditionellen Strahlungs-Konvektionsofen ist die Messstelle direkt nach dem Übergang in das Abgassystem, also dort wo das Abgas mit Frischluft vermischt wird. Je nach Anordnung und Abgasdynamik (Verwirbelungen, Abrisskanten, Positionierung der Muffe, Verstaubung der Laseroptik, etc.) kann die Messung stark variieren, also ist sie nicht verlässlich und nicht reproduzierbar. Es ist zwar interessant gewisse Informationen bezüglich CO, (CO₂ und O₂ in Abhängigkeit) und H₂ zu bekommen, aber auswertbare Steuerungsinformation für die Zuluft

sind so nicht zu erhalten.

Aber der Reihe nach. Das Einschmelzen von Schrott macht im Elektrolichtbogenofen (LBO) viel Lärm. Dieser Lärm, ähnlich dem Donner im Gewitter, ist das Produkt der explosionsartigen Volumenvergrößerung der den Lichtbogen umgebenden Luft. Durch diese Dynamik wird die direkte Umgebung erschüttert und es wird viel Staub aufgewirbelt. Diese Staubpartikel werden durch die herrschende Konvektion (Luftfluss auf Grund der Thermik (Bild 2)) hoch transportiert und von der Hallenabsaugung abgesogen. Bild 5 zeigt das Staubaufkommen in der Kaltbohrphase. Weil der Lichtbogen und die dazugehörige Heisszone anfänglich weit über der Schlackentüre liegt, werden die Staubpartikel nicht über die Ofenabsaugung (Primärabsaugung) abgesogen. Der Luftfluss geht teilweise von der Schlackentüre direkt in den Schacht resp. zum 4. Loch (siehe Bild 6).



Bild 5 / Kaltbohrphase

Im Lichtbogenofen wird die elektrische Energie in thermische Energie umgewandelt, die hauptsächlich als Strahlung übertragen wird. Dadurch wird das umliegende

Material punktuell so stark erhitzt, dass sogar eine Sublimation des Eisens stattfinden kann. Die hohe Energiedichte bildet ein Plasma, in dem der Schrott schmilzt. Durch die grosse Hitze wird 'kalte' Luft angesogen und aufgeheizt. Dadurch entsteht eine Konvektion, d.h. die heisse Luft fliesst den Elektroden entlang nach oben. Zusammen mit der Strahlung des heissen Schrotts werden die Elektroden seitlich abgebrannt.

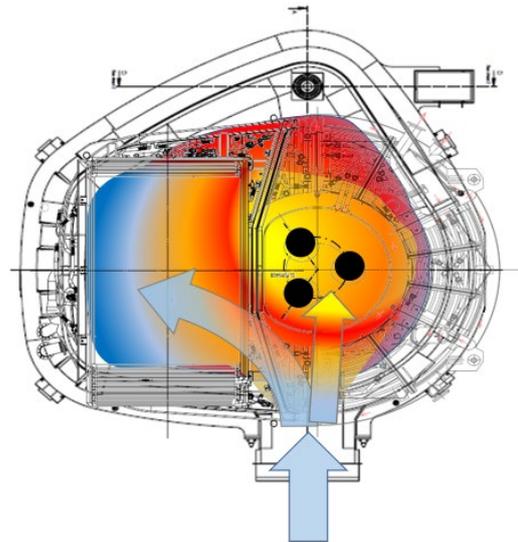


Bild 6 / Luftstrom im Schachtofen bei offener, resp. undichter Schlackentüre

Im heissen Ofen ändert sich der Luftfluss nicht wesentlich, bei offener oder teiloffener Schlackentür wird ein Teil der Kaltluft in die Ofenabsaugung gesogen und der andere Teil fliesst zum Plasma, was weder den Einschmelzprozess fördert noch der Schrottvorheizung dienlich ist. Das heisse Gas fliesst den Elektroden entlang in Richtung Ofendeckel, heizt die Kühlpaneele und entweicht schlussendlich über das 4. Loch oder den Schacht ins Abgassystem (siehe Bild 7 links).

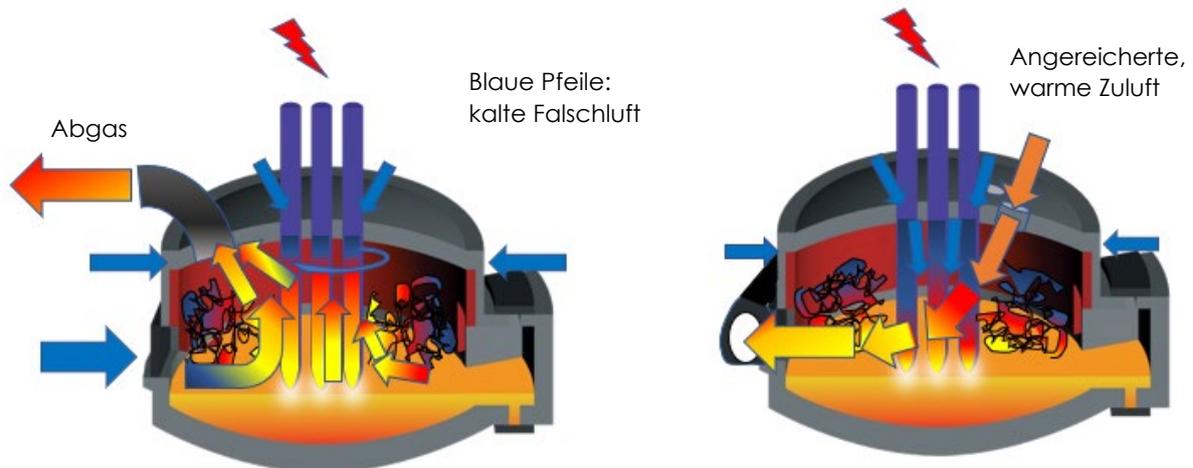


Bild 7 / Abgasbewegung im traditionellen Ofen und im CORE-Ofen

Wie bereits erwähnt ist im traditionellen Lichtbogenofen (4. Loch) und bei den herkömmlichen Schachtofenkonzepten eine ofennahe Echtzeitmessung des Abgases unmöglich.

Im traditionellen Ofen wird die Messung nach dem 4. Loch und erst nach Vermischung mit Umgebungsluft möglich, dadurch wird das Resultat durch sich ständig verändernde Strömungsverhältnisse beeinflusst.

Im Schachtofen ist eine Messung erst im oberen Schachtbereich möglich. Da dort aber auch die Nachverbrennung von CO in CO₂ stattfindet, ist das Resultat weder zuverlässig noch für Steuerungszwecke verwendbar.

Anders im CORE-Ofen: Die von oben eingeleitete Deckelluft wird durch eine Öffnung im Torus des Core-Ofen abgesaugt. Dadurch wird die Konvektion verhindert. Der Zuluftring ist in mehrere Sektoren eingeteilt, die so gesteuert werden, dass die Luft nicht direkt in den Torus gesogen wird, sondern dass der nächste Weg über den heissesten Bereich im Ofen führt. Die Strömung zieht die noch 'kühle' Luft durch das 'Bohrloch' den Elektroden entlang zum Lichtbogen (Bild 8). Die im oberen Bereich des Ofens eintretende Kaltluft (Deckelrand und Elektrodenöffnungen) wird mit der Zuluft vermischt und fließt auch zum Plasma hin. Das Abgas, das an dieser Stelle sehr heiss ist, wird durch den über der Schlacke liegenden Schrott gezogen und heizt diesen zusätzlich auf, respektive bringt den Schrott zum Schmelzen. Das Staubgemisch, das im Bereich des Plasmas aufgewirbelt wird, setzt sich an die teigige Oberfläche des schmelzenden Schrotts. Die Brenner, resp. die Brennerlanzenkombinationen werden je nach Sektor zugeschaltet und unterstützen dabei die Luftströmung. Die schwereren Staubpartikel fallen auf Grund der Turbulenzen, die im Schrott entstehen, auf die Schlacke und von dort ins Metallbad. In der Flachbadphase bedeckt die Schaum Schlacke den Lichtbogen. Hier wird weniger Staub aufgewirbelt und das im Plasma entstehende FeO bleibt in der Schlacke, resp. kann durch die Reduktion mit der Kohle als Eisen in die Schmelze zurückgehen. Der Elektrodenabbrand, der beim CORE-Ofen bedeutend kleiner ist, ist für die Abgasmessung nicht von Belang.

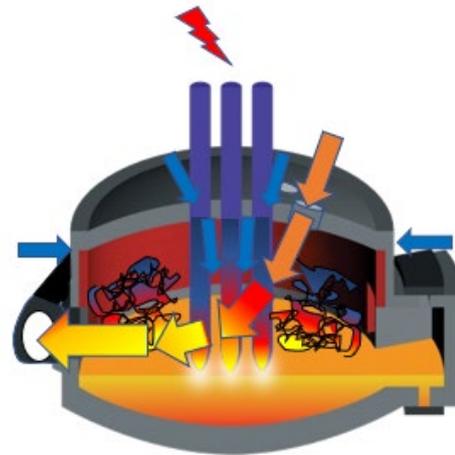


Bild 8 / Erzwungene Strömung

Fazit: Die Messstellen im traditionellen Ofen mit 4. Loch ist für eine aktive Beeinflussung der Ofenatmosphäre ungeeignet. Die erste mögliche Messstelle im Schachtofen ist für Steuerungszwecke des Ofens ebenfalls ungeeignet, da sie von stark wechselnden Verhältnissen, z.B. der Nachverbrennung beeinflusst. Im CORE-Ofen ist die erste mögliche Messstelle an einem geschützten Ort im Abgaskanal, die weder dem Staub ausgesetzt noch im Bereich der Nachverbrennung ist. Er herrschen dort zudem strömungstechnisch stabile Verhältnisse. **Für die Minimierung der Emissionen, resp. die Herstellung von klimaneutralem Stahl oder eben 'GreenSteel' ist jedoch eine zuverlässige und korrekte Abgasmessung Voraussetzung.**

In meinem letzten Artikel 'Ofenabgas – Gewinn oder Verlust' habe ich auf das Potential des Abgases hingewiesen und aufgezeigt, wie dem Abgas optimal Energie entzogen werden kann. Diese Optimierung beinhaltet den Umbau des bestehenden Ofens zu einem CORE-Ofen, ein kostengünstiger Aufwand, den Anbau eines ECOFEEDERS (Zweikammerschrottvorheizung von eco-e) und eventuell einer kontinuierlichen DRI-Zuführung, sowie eine umfassende Abgasüberwachung und Zuluftsteuerung. Anders als beim Einkammersystem, wo das Abgas weder chemisch (Zusammensetzung) noch physikalisch (Temperatur und Druck) ofennah und umfassend überwacht werden kann, ist beim Zweikammersystem diese Überwachung permanent und in sauberen Bereichen möglich.

Schnelle und zuverlässige Regelung der Energien und der dem Ofen zufließenden gasförmigen und festen Medien.

Die dritte Bedingung, eine schnelle und zuverlässige Regelung der dem Ofen zufließenden, gasförmigen und festen Medien (Zuluft, Sauerstoff, Brennstoff (Wasserstoff, Kohlenwasserstoffverbindungen und Kohle) kann im traditionellen Ofen auch nicht ohne weiteres gewährleistet werden. Bei gut schliessenden Schlackentürkonstruktionen kann die Zuluft weitestgehend unterbunden aber nicht gesteuert werden. Es bleiben also nur die Brennstoffe und der Sauerstoff. Die Steuerung der Ofenatmosphäre mit Brennstoff und Sauerstoff ist komplex, zudem verfälscht die im oberen Bereich des Ofens eintretende Kaltluft (Deckelrand und Elektrodenöffnungen), die direkt in das 4. Loch, resp. den Schacht eingesaugt wird, das Resultat. Bei der Konvektion wird das heisse Abgas und die kalte Falschluff vermischt.

Im Gegensatz zum traditionellen Ofen ist die Abgasmessung beim CORE-Ofen an einem Ort platziert, an dem keine Beeinflussung von Aussen möglich ist, wo kein übermässiges Staubaufkommen herrscht und die aerodynamischen Einflüsse kontrolliert werden können. Die Abgasmessung (Qualität und Quantität des Abgases) ist reproduzierbar und kann demzufolge für die Steuerung der Zuluft, des Sauerstoffgehalts in der Zuluft, den Brenneinsatz und die Lanzentätigkeit verwendet werden. **Der CORE-Ofen eignet sich ideal für die Kontrolle der Ofenatmosphäre und damit der CO₂ Emission. Der Core-Ofen ist daher das am besten geeignete Aggregat für die Produktion von 'GreenSteel'.ⁱⁱ**

Dank den Informationen von den Analysegeräten und den Sonden für Temperatur und Druck weiss der Algorithmus, wann und wieviel CO, CO₂ und H₂ im Abgas ist und welche Parameter über die Steuerung geändert werden müssen, um das Abgas für die Schrottvorheizung im Ofen und nach dem Ofen zu optimieren. Diese Information ist exakt und reproduzierbar.

Eco-e tech verbindet den CORE-Ofen mit der Zweikammerschrottvorheizung, dem ECOFEEDER. Im ECOFEEDER fliesst das Abgas nochmals horizontal durch den Schrott, wobei sich auf Grund der massiven Volumenvergrösserung (Abgasrohr zum Schrottbehälter) eine natürliche Konvektion im Gefäss einstellt. Vor dem Eintritt in die Brennerkammer wird die Zusammensetzung, die Temperatur und der Druck im Abgas wieder gemessen. Dabei kann die Nachverbrennung CO → CO₂ und die Verbrennung der Verunreinigungen verfolgt und kontrolliert werden. Je nach Zustand und Zusammensetzung des Abgases werden die Nachbrenner eingesetzt. Im nachfolgenden Vorheizbehälter wird dann die Energie entsprechend den Gesetzen der Wärmeübertragung an den bereits vorgewärmten Schrott weitergegeben.

Fazit: Der traditionelle Ofen und die bekannten Schachtofenvarianten sind für die Steuerung der Ofenatmosphäre nicht geeignet. Eco-e tech, die Kombination von CORE und ECOFEEDER erlaubt eine zuverlässige Messung der Ofenabgase in unmittelbarer Nähe des Ofens bis zum Kamin. Damit ist es möglich die Emissionen mittels Steuerung durch Anpassung der Variablen in den einzelnen Bereichen zu minimieren. Die Nutzung der Abgasenergie im und nach dem Ofen ist so maximal und die Belastung der Umwelt mit Abwärme und Schadstoffen minimal. Die Restwärme, steht vollumfänglich für eine Weiternutzung zur Verfügung. Das Restgas hat eine nahezu konstante Temperatur ist schadstofffrei und zu fast staubfrei.

Damit sind die Voraussetzungen für 'GreenSteel' gegeben.

Hier eine Zusammenstellung der Vorteile des eco-e tech Konzepts (CORE & ECOFEEDER), aufgeteilt in 5 Gruppen:

1. **Direkte Energiesparmassnahmen**
 - a. Hohe Vorheiztemperatur des Schrotts bis ca. 750°C (-130kWh/t_{FS})
 - b. Bessere Abgasführung im Ofen = Schrottvorheizung im Ofen und bessere Nutzung der Lichtbogenenergie (-50kWh/t_{FS})
 - c. Integrierte Verbrennung der Schadstoffe (z.B. Dioxin und Furan) und Nutzung der Nachbrennenergie
 - d. Integrierte Nutzung der Nachverbrennung CO→CO₂
 - e. Integrierte Ofenluftvorheizung (~300°C) (-15kWh/t_{FS})
 - f. Nutzbares Restgas mit konstanter Temperatur (~600°C) (Wärmetauscher, ORC-Prozess, Verdampfer, DRI-Vorheizung, Energiespeicherung, etc.)
2. **Direkte und indirekte Minderung der CO₂ Emissionen**
 - a. Bessere Brennernutzung, dadurch weniger Brenner im Einsatz
 - b. Angereicherte Ofenluft mit Vorheizung (~300°C), dadurch weniger NO_x
 - c. Optimales Abgasmanagement durch Automation
 - d. Kleinerer Materialverbrauch (Schlackenbildner/Ausmauerung)
3. **Metallurgische Vorteile**
 - a. Nutzwertanalyse und Optimierung (DRI / Schrott)
 - b. Kontinuierliche und diskontinuierliche Produktion möglich
 - c. Chargenneutrale Vorheizung (keine Vermischung von Schrottqualitäten)
 - d. Keine Schrottdome im Ofen, d.h. weniger Bären
 - e. Weniger Elektrodenbrüche
 - f. DRI-Vorheizung und kontinuierliche DRI-Zufuhr möglich
4. **Unterhaltungsvorteile und Flexibilitätsgewinn**
 - a. Heisspeicherung des vorgeheizten Schrotts möglich
 - b. Besserer Zugang auf dem Ofendeckel (DRI-Zufuhr) und zu den Elektroden
 - c. Produktion während Unterhalt / Reparatur möglich
 - d. Keine Verschleissteile an exponierten Positionen
5. **Kommerzielle Vorteile**
 - a. Kürzere Schmelzzeiten
 - b. Kleinerer Elektrodenverbrauch (weniger Seitenabbrand)
 - c. Weniger Filterstaub, da Staub im Ofen, resp. im Schrott verbleibt
 - d. Weniger mechanischer Verschleiss bei der Ausmauerung
 - e. Kleinere Ofenkühlleistung (dank interner Schrottvorheizung und besserer Ausbildung der Schaumslagge)

Weniger Umweltbelastung (CO₂, Schadstoffe, Schlackenbilder, Ofenausmauerung, NO_x, etc.), **weniger Kosten** (Energie, Elektroden, Brennstoffe (NG, H₂, Kohle), Unterhalt) **und ein flexibleres Ofenmanagement dank Automation.**

April 2022, Roland V. Müller, eco-e AG

ⁱ ,Ofenabgas – kosten- oder Sparpotential?', www.eco-eag.com/Deutsch/Download, eco-e AG 2022

ⁱⁱ ,GreenSteel – Der Weg in die Zukunft.', www.eco-eag.com/Deutsch/download, eco-e AG 2022