

# Der Energie(pr)eisbrecher

'Die Industrie zahlt so viel wie seit einem Jahrzehnt nicht mehr!' oder 'die Energie belastet den Haushalt immer stärker!' solche und ähnliche Schlagzeilen sind immer öfter zu lesen.

Es scheint sicher zu sein, dass die Energiepreise immer weiter steigen werden – ja, die Energie wird es wert, sparsam mit ihr umzugehen. Hand aufs Herz, bis noch vor kurzem hatte die Energie einen symbolischen Preis, wenn man bedenkt, wie einfach und billig es doch ist und war, mal schnell den Schalter umzulegen und gedankenlos das Licht brennen zu lassen, ob man es braucht oder nicht. Ok, das Licht ist ein Alias. Wir sind umgeben von energiefressenden Annehmlichkeiten, z.B. im Auto gibt es zahllose Motoren, die mal schnell den Spiegel einklappen oder die Hecktüre öffnen, Dinge, die wir genau so gut händisch machen könnten, aber Komfort muss sein!

Gut, im Stahlwerk wird die Energie in einem grösseren Massstab genutzt, aber nicht weniger verschwenderisch, wie mir scheint. Wie weit muss der Energiepreis steigen, bis die Schmerzgrenze erreicht ist, oder kommt die Drohung zur Schliessung der Arbeitsstätten, die ja ein Politikum darstellen noch vor der Schmerzgrenze?

Schmerzgrenze, was soll das und wo ist sie? Nun, die Schmerzgrenze scheint bei vielen Stahlwerken sehr nahe am aktuellen Energiepreis zu sein, oder sie ist bereits erreicht, den die Stimmen, die von Betriebsschliessungen reden, werden immer lauter. Droht der Stahlindustrie in Europa mit ihren 8% der Weltstahlproduktion das Aus?

Nun, das muss nicht sein, denn wir haben einen Vorschlag wie man die Schmerzgrenze und damit eine drohende Schliessung der Arbeitsstätten verhindern könnte.

Wir sind uns doch einig, dass die Gesamtenergie um Flüssigstahl ohne Energierückführung herzustellen irgendwo zwischen 680 und 800kWh/t liegt und dabei der Anteil elektrischer Energie zwischen 300 und 600kWh/t liegt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 / Energie Aufwand [kWh/t<sub>FS</sub>]

<b>Rohmaterial</b>	<b>Flüssigeisen / Schrott</b>	<b>Schrott (100%)</b>	<b>Eisenschwamm / Schrott</b>	<b>DRI / HBI / Schrott</b>
<b>Energie</b>				
Elektrische Energie	180 -300	320 -520	325 - 400	470 -600
Chemischen Energie*)	200 - 320	280 – 480	350 - 420	200 - 330
Vorleistung **)	300	-	-	-
Gesamtaufwand	680 -800			

\*) Fossile Energieträger (Gas (LPG, NG), Kohle)

\*\* ) Mitgebrachte Enthalpie

Die in Tabelle 1 aufgelisteten Werte sind Bereichswerte die aus verschiedenen Quellen stammen.

Ich hoffe, dass wir uns auch einig sind, dass die Energierückführung einen positiven Effekt hat, sofern sie eingesetzt wird. Mit Energierückführung meinen wir jede Art von Einrichtung oder Anlage, die dazu dient, einen Teil der aufgewendeten aber nicht im

Endprodukt verbleibenden Energie zu übertragen oder umzuwandeln, so dass diese Energie für den Prozess zur Verfügung steht oder vom Prozess losgelöst, weiterverwendet werden kann. Das umfasst die Rohmaterialvorheizung, die Heissgasverwendung in mechanischen Anlagen (Gasturbinen, ORC (Organic Rankine Cycle), etc.), die Übertragung der thermischen Energie auf ein anderes Medium (Luffterhitzer, Dampferzeuger, Salzwasserspeicher, Wassererhitzer für Fernheizungen, etc.) und anderes mehr. Diese Energierückführung hat je nach Art der Anlage und Übertragung einen Wirkungsgrad von 10% bis maximal 70%. Auch sind nicht alle Arten der Energierückführung in jedem Temperaturbereich anwendbar (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2 / Temperaturbereich bei Energierückführung

Anlage \ Temperaturband	1400 - 1000°C	1000 - 700°C	700 - 500°C	500 - 300°C	300 - 100°C	< 100°C
Rohmaterialvorheizung						
Schrott	■					
DRI/HBI			■			
Luffterhitzer			■			
Gasturbinen ohne Verdichter		■				
Dampferzeuger			■			
Dampfturbinen			■			
HT ORC				■		
Salzwasserspeicher				■		
LT ORC					■	
Heisswassererzeuger					■	

Beim Lichtbogenofen ist die Energierückführung in drei Bereichen vorstellbar: im Bereich Ofenabgas, im Bereich Ofenkühlung und im Bereich Schlacke. Das Ofenabgas hat prozessbedingt eine stark schwankende Temperatur im Bereich von 200-1800°C, das Kühlmittel der Ofenkühlung ist im Normalfall Wasser, auf Grund der Dampfbildung wird der Temperaturbereich zwischen 60 und 45°C gehalten. Die Schlacke ist grundsätzlich flüssiger Stein, die Energie der Schlacke ist aus verschiedenen Gründen noch nicht sinnvoll rückführbar.

## 1 RÜCKFÜHRUNG OFENABGAS

Das nachfolgende Bild zeigt die Abgastemperatur eines normalen Lichtbogenofens mit einer 3-Korb-Strategie ohne Energierückführung. Die Abgastemperaturen schwanken von ca. 150°C bis nahezu 1800°C vom Beladen des 1. Korbes bis zum Abstich. Die Messung wurde am 4. Loch vor Vermischung mit Umgebungsluft aufgenommen.

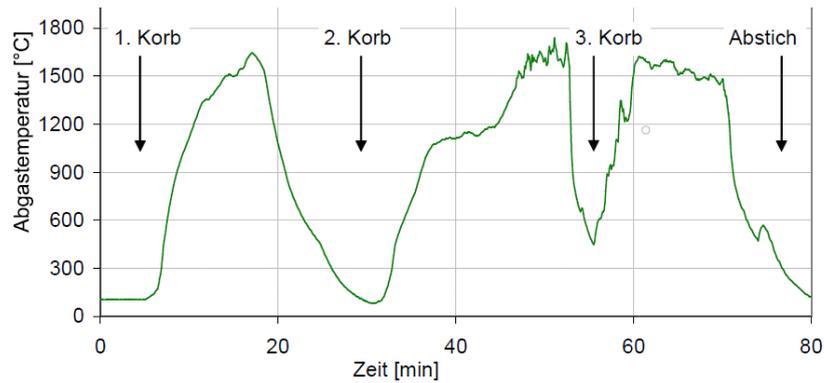


Abbildung 1 / Abgastemperaturen

Die Abgastemperaturen in einem typischen Schachtofen (Einkammersystem) gemessen am oberen Schachtausgang sind ausgeglichener, sie starten wohl auf demselben Niveau, steigen weniger hoch (1050°C), fallen beim Beladen des Schachtes mit kaltem Schrott auf ca. 700°C und steigen wiederum auf ca. 1000°C. Beim Feinen sinken dann die Abgastemperaturen wieder auf etwa den Initialwert zurück.

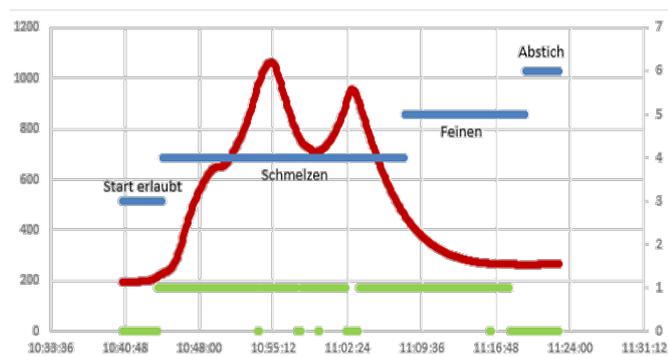


Abbildung 2 / Abgastemperaturen im Schachtofen

Übereinander gelagert sieht das so aus: Die Abgastemperaturen und die Schmelzzeiten sind angeglichen. Nun fällt auf, dass bei ähnlichem Schrotteinsatz pro Korb (40t Schrott) im Schachtofen Energie aus dem Abgas auf den Schrott übertragen wurde. Dies ist keine neue Erkenntnis, aber sie führt uns zum nächsten Schritt.

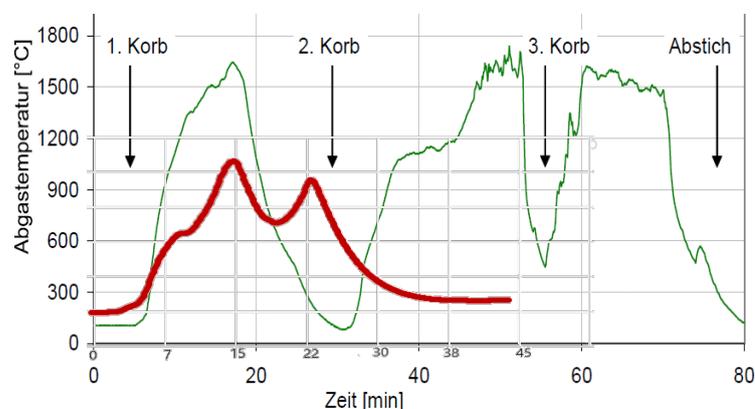


Abbildung 3 / Überlagerung der Abgaskurven (Gradient: grün = 2K/sec | rot = 1.5K/sec)

Unter der Annahme, dass das Integral unter der Abgaskurve vom Moment des Anstiegs der Temperaturkurve bis zum Maximum äquivalent zur Abgasenergie ist, dann würde beim Schachtofen ca. die Hälfte der Abgasenergie in den Schrott übergegangen sein. Das Abgas mit der Restenergie wird dann an die Umgebung abgegeben, resp. muss dann noch nachbehandelt werden.

Im Zweikammersystem wird die Restenergie zusammen mit der zugeführten Energie zur Verbrennung der Kohlenwasserstoffe aus den aufgebrochenen Chlorverbindungen in die zweite Kammer geführt und dient nochmals, wenn auch in kleinerem Mass der Schrottvorheizung.

Die Abgastemperatur, die den Ofen ohne Energierückführung verlässt, hat eine Temperatur von ca. 1500°C, die Abgastemperatur nach der Schrottvorwärmung im Einkammersystem beträgt ca. 1000°C, und die Abgastemperatur im Zweikammersystem beträgt ca. 600°C. Demzufolge kann auch direkt auf die Gesamtenergie geschlossen werden, nämlich 680kWh/t<sub>FS</sub> für den Ofen ohne Energierückführung, ca. 600 kWh/t<sub>FS</sub> für das Einkammersystem (alle Arten von Schachttöfen) ohne Abgasnachbehandlung und ca. 550kWh/t<sub>FS</sub> für das Zweikammersystem von eco-e inklusive Abgasnachbehandlung.

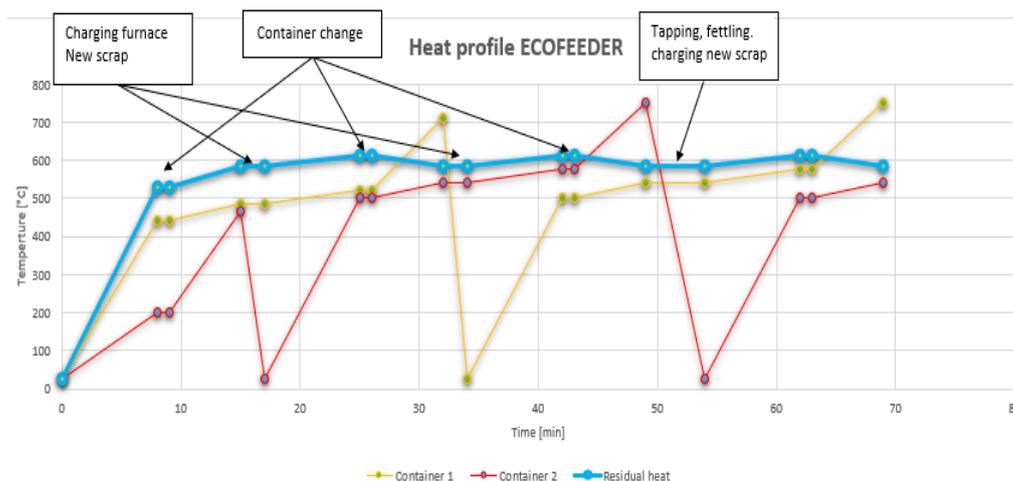


Abbildung 4 / Temperaturprofil ECOFEEDER

Wenn wir jetzt das Temperatursegment betrachten, sehen wir, dass das Restabgas beim Zweikammersystem eine ideale Temperatur für die Weiternutzung hat, nämlich ca. 600°C. Es stehen also mehrere Wege offen, z.B. der Weg über die DRI/HBI Vorheizung gefolgt von einer Hochtemperatur-ORC Anlage, oder die Dampferzeugung für Dampfturbinen und Heisswassererzeugung für Fernheizungsanlagen, usw.

Die Überlagerung der Abgastemperaturen (EAF 4. Loch (Abb. 1), EAF mit Schachtofen (Abb.2) und EAF mit einem Zweikammersystem (Abb. 4)) zeigt eindrücklich, dass mit der Schrottvorwärmung durchaus effizient Energie gespart werden kann. Die Restwärme, die nach der Nutzung des Ofenabgases für die Schrottvorwärmung zur

Verfügung steht, ist naturbedingt auf einem hohen Niveau. Diese Restwärme kann dank einem konstanten Temperaturverlauf ideal weitergenutzt werden.

Weiter fällt auf, dass die Restwärme im Abgas dank den zwei Containern keine starken Fluktuationen herkommend vom Beladen des Ofens, respektive der Container aufweist. Das rührt daher, dass das Abgas immer nur den Container mit dem bereits angewärmten Schrott verlässt.

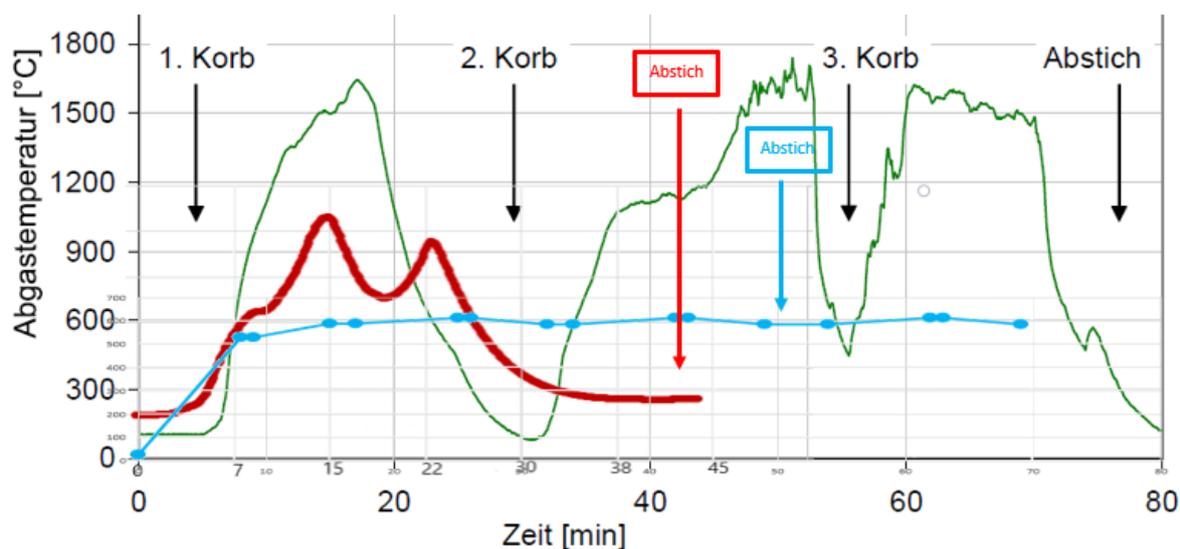


Abbildung 5 / Überlagerung der 3 Prozesse (EAF ohne Energierückgewinnung (grün), Schachtofen (rot), ECOFEEDER (blau))

Die Berechnung der Restwärme und der dazugehörigen Temperaturen basieren auf den bekannten Modellen.

Die Schrottvorwärmtemperatur beträgt 750°C und die Temperatur der Nachverbrennung der Verunreinigungen beträgt 960°C. Daraus ergibt sich eine Restwärme-Energie von ca. 80kWh/t, welche teilweise für die Vorheizung der falschen Ofenluft und zur Erzeugung von elektrischer Energie über eine ORC Turbine genutzt wird. Allfällige Restwärme kann noch zur Gebäudeheizung eingesetzt werden.

Die eingesetzte fossile Energie in Form von Erdgas (NG) kann bei entsprechender Anpassung der Brenner durch Wasserstoff (H<sub>2</sub>) ersetzt werden, so dass die Produktion von CO<sub>2</sub> in diesem Bereich wegfällt.

## 1.1 ZUSAMMENFASSUNG RÜCKFÜHRUNG OFENABGAS

Die Nutzung des Ofenabgases hat physikalische Grenzen, darum wird eine sinnvolle Nutzung nur bis zu einer gewissen Temperatur möglich sein. Das Zweikammersystem nutzt die Abgasenergie sinngemäss dem Einkammersystem und schliesst die Nachbehandlung des Abgases, das mit den Produkten der Verbrennung der Verunreinigungen angereichert wurde in den Vorheizprozess ein. In der nachfolgenden Kammer wird die zusätzlich eingebrachte Energie teilweise auf den bereits vorgeheizten Schrott übertragen. Durch die zweite Kammer entsteht ein Ausgleichssystem, das die prozessbedingten Schwankungen im Abgas ausgleicht.

Die Nutzung des Restgases setzt jedoch voraus, dass dieses möglichst staubfrei und frei von Umweltschadstoffen ist. Das Ofenabgas hat einen hohen Anteil an Fein- und Grobstaub, der bei der Schmelze entsteht. Das Zweikammersystem ist mit seinem grossen Gasgeschwindigkeitsveränderungen (Querschnittsveränderungen) eine natürliche Staubfalle, zudem ist der liegende Schrott für den Gasfluss mit unendlich vielen Verwirbelungen ein aerodynamisches Filter. Der Grobstaub setzt sich im ersten Behälter nach dem Ofen ab und wird nach der Vorheizphase in den Ofen zurückgefördert. Der Feinstaub setzt sich im zweiten Behälter, der als Beruhigungsstrecke angesehen werden kann ab.

## 2 RÜCKFÜHRUNG GEFÄSSKÜHLUNG

---

Die Gefässkühlung beinhaltet, die je nach Bauart des Ofens nicht nur den Oberofen (Pannee) und den Ofendeckel, sondern auch das Verbindungsstück Ofendeckel Nachbrennkammer, resp. den Schacht und die nachführende gekühlte Verrohrung. Diese Bauteile führen je nach Prozessstatus mehr oder weniger Energie im Kühlmedium ab. Die Energieübertragung geschieht meist über Strahlung, sei das vom Lichtbogen oder von der Schlackendecke, resp. Schmelze in der Flachbadphase. Die Energieübertragung durch Kontakt ist eher die Ausnahme. Die restliche Energieübertragung geschieht durch Konvektion, also der Kontakt der Kühlkörper mit dem Abgas. Die Intensitäten sind stark unterschiedlich, so ist die thermische Belastung der Pannee bei ungeschütztem Lichtbogen und die der Finger beim Einkammersystem sehr hoch. Der Übertragungskoeffizient ist bei Strahlung bedeutend höher als bei der Konvektion. Durch geeignete Führung der Zuluft kann die lokale Belastung stark beeinflusst werden (siehe Artikel 'Alles warme Luft?!') was z.B. zu einer starken Minderung des Elektrodenabbrands führen und das Einschmelzen des Schrotts uniformer machen kann, was wiederum zu einer kleineren lokalen Belastung der Pannee führt. Der Aufbau einer Schaumslagge ist in dieser Hinsicht sehr wichtig und muss parallel mit dem Einschmelzprozess einhergehen. Das gebräuchliche Kühlmedium ist Wasser. Wasser birgt jedoch gewisse Gefahren, so darf der Siedepunkt niemals erreicht werden, da auf Grund der damit zusammenhängenden Volumenvergrösserung Explosionsgefahr besteht. Darum eignet sich Wasser nicht für eine effiziente Energierückführung. Um eine effiziente Energierückführung der Gefässkühlung zu bewerkstelligen, muss ein unbrennbares Kühlmedium mit höherem Siedepunkt eingesetzt werden. Dadurch könnte der Durchfluss und das Volumen reduziert werden und mittels ORC Prozess elektrische Energie gewonnen werden. Der damit zusammenhängende Aufwand rechtfertigt einen Umbau kaum. Bei einem Neubau ist diese Alternative jedoch zu betrachten und eventuell zu berücksichtigen.

Das Zweikammersystem basiert auf Wechselbehälter. Flüssigkeitskühlung und die damit zusammenhängenden Zuführungen sind aufwändig und weniger geeignet. Das Zweikammersystem ist deshalb mit Kühlrippen zur Luftkühlung (z.B. die Ofenluft) der Behälteroberflächen ausgerüstet. Hier lassen sich eventuell bis zu 10kWh/t sparen.

### 2.1 ZUSAMMENFASSUNG RÜCKFÜHRUNG GEFÄSSKÜHLUNG

Mit richtiger Frischluftströmung, idealerweise vorgewärmt, und einem besser geeignetem Kühlmedium lassen sich erhebliche Einsparungen erzielen.

### 3 FAZIT

---

Mit geeigneten Massnahmen lässt sich das Energiepreisgespenst bannen oder wenigstens auf Distanz halten. Massnahmen, wie die richtige Luftströmung in den Ofen zu bringen, auch wenn nicht vorgewärmt, bringen bereits beträchtliche Einsparungen.

Wir sollten darüber reden.

Februar 2022, Roland V. Müller