

## Zwei Schritte zu Zero Waste

Henning Schliephake, Tim Rekersdrees, Tobias Zehn, Bernd Dettmer und Dirk Mudersbach

1.	Zero Waste – Innerbetriebliches Recycling als Beitrag zur Ressourceneffizienz und Schonung von Primärrohstoffen.....	129
2.	Schritt EINS: Stabilisierung der SEKS .....	129
2.1.	Kristallchemische Stabilisierung des $C_2S$ .....	131
2.2.	Physikalische Stabilisierung des $C_2S$ .....	132
3.	Schritt ZWEI: Wiedereinsatz der SEKS als Kalkersatz im Elektrolichtbogenofenprozess.....	134
4.	Zusammenfassung .....	136
5.	Literatur .....	136

Stahlwerkstoffe sind durch ihre relative Kostenposition, ihre Robustheit aber auch Anwendungsvielfalt nach wie vor von größter volkswirtschaftlicher Relevanz, sei es im Bereich Infrastruktur oder in den Bereichen Mobilität, Transport und Energie. Dies wird u.a. auch an der aktuell weltweiten Stahlerzeugung von etwa 1,6 Milliarden Tonnen pro Jahr deutlich. Wobei nicht nur in aufstrebenden, sondern auch in entwickelten Volkswirtschaften der Werkstoff Stahl eine Zentrale Rolle einnimmt. 166 Millionen Tonnen Stahl werden pro Jahr in Europa hergestellt – etwa 25 Prozent davon in Deutschland [1, 6, 12].

Unabhängig von der Herstellroute – Hochofen/Konverter oder Elektrolichtbogenofen/Pfannenmetallurgie – bedingen die technischen und physikalisch notwendigen Prozesse bei der Stahlherstellung eine parallele, weltweite Produktion von insgesamt etwa 700 Millionen Tonnen Schlacke der verschiedensten Arten [4]. Diese Schlacken können produkttechnisch weitgehend als industrielle oder technische Gesteine und Bindemittel bezeichnet werden und sind eine unabdingbare Voraussetzung für die Stahlherstellung – keine Stahlproduktion ohne Schlacke. Auf Deutschland bezogen bedeutet dies, dass im Jahr 2013 bei einer Elektrostahlerzeugung von 13,46 Millionen Tonnen zeitgleich auch insgesamt 1,72 Millionen Tonnen Elektroofenschlacke produziert wurde [5, 12].

Bei der Elektrostahlherstellung von un- und niedriglegierten Edelbaustählen können die produzierten Schlacken weiter unterteilt werden nach Schlacken aus dem Elektrolichtbogenofenprozess und aus der Sekundärmetallurgie. Die Schlacke aus dem Elektrolichtbogenofen (ELO) wird EOS (Elektroofenschlacke) genannt und wird unter

oxidierenden Bedingungen beim Einschmelzen der Schrotte gebildet. Die EOS ist sowohl für die metallurgische Arbeit als auch für die Energieeffizienz des Prozesses unentbehrlich. Die EOS ist eine Schlacke im System der Hauptkomponenten  $\text{FeO} - \text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO}$ . Die Schlacke aus den sekundärmetallurgischen Prozessen hat einen entscheidenden Einfluss auf die spätere Qualität des Stahles und wird individuell auf die jeweilige Stahlgüten eingestellt. Die SEKS (Sekundärmetallurgische Schlacke) bildet sich unter reduzierenden Bedingungen und basiert im Wesentlichen auf dem System  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ .

Parameter	Einheit	Elektrolichtbogen- ofenschlacke EOS	Sekundärmetal- lurgische Schlacke SEKS
$\text{Fe}_n$	%	30 - 43	< 3
CaO	%	25 - 35	30 - 60
$\text{SiO}_2$	%	8 - 18	5 - 18
$\text{Al}_2\text{O}_3$	%	3 - 10	20 - 40
MgO	%	3 - 9	4 - 14
MnO	%	4 - 7	< 2
$\text{P}_2\text{O}_5$	%	0,3 - 0,6	< 0,2
Produktion p.a. bei 900.000 t Rohstahl flüssig	t	120.000	22.000

Tabelle 1:

Übersicht von Stahlwerkschlacken mit ihren typischen chemischen Zusammensetzung und deren Produktionsmengen bei 900.000 Tonnen Rohstahlflüssig p.a.

Quellen: Schwiete, K., Krönert, W., Deckert, K.: Existenzbereiche und Stabilisierung von Hochtemperaturmodifikationen des Dicalciumsilikates

Schliephake, H. et. al.: Aufbau und Prozessführung des Lichtbogenofens unter besonderer Berücksichtigung des Schlackenmanagements, Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle - Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen, Berlin 2014, S.305 - 325

Während Schlacken aus dem Elektrolichtbogenofenprozess heute weitgehend genutzt werden, zeigen die sekundärmetallurgischen Schlacken einige spezifische Eigenschaften, die eine weitere Nutzung erschweren:

- Zerfall in ein feinkörniges Pulver, welches Staubemissionen und Handlingsprobleme verursacht.
- Zusatzten von Sieben bei der weiteren Aufbereitung durch zerfallene SEKS anlagenabhängig möglich.
- Die große spezifische Oberfläche kann zu einer erhöhten Auslaugung von umweltrelevanten Spurenelementen führen, die die weitere Anwendung limitieren können.

Der Zerfall der SEKS ist somit als einer der relevantesten, limitierenden Faktoren für die weitere Verwendung von sekundärmetallurgischen Schlacken anzusehen – egal ob innerbetrieblich oder am Markt. Die Ursache und die Vermeidung des Zerfalls werden im Rahmen des vorliegenden Beitrags diskutiert.

## 1. Zero Waste – Innerbetriebliches Recycling als Beitrag zur Ressourceneffizienz und Schonung von Primärrohstoffen

Dem Grundgedanken der Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung folgend, arbeitet die Stahlindustrie nicht nur an der kontinuierlichen Weiterentwicklung ihrer Prozesse zur Qualitäts- und Produktivitätsverbesserung sondern auch an der Verfolgung des Zero Waste Gedankens. Hierbei dienen insbesondere die vier R's als Orientierung: ReDuce, ReUse, ReCycle, ReThink.

Bei der Georgsmarienhütte GmbH wurden vor diesem Hintergrund die einzelnen Prozessschritte bei der Stahlherstellung erneut durchleuchtet. Ein Ergebnis der ersten Diskussionen war die grundlegende Eignung der SEKS als Kalkersatz im Elektrolichtbogenofenprozess. Diese Eignung resultiert aus der chemischen Zusammensetzung der SEKS mit CaO als einer der Hauptkomponenten, welches auch bei der Schlackenbildung für den Elektrolichtbogenofenprozess erforderlich ist, vgl. Tabelle 1. Aus metallurgischer Sicht ist daher ein internes Recycling der SEKS als ein bereits vorgeschmolzener Schlackenbildner für die EOS vorstellbar. Damit wäre eine Reduzierung von Primärrohstoffen ebenso verbunden wie ein ReUse/ReCycling von Produkten, die während der Stahlherstellung entstehen.

Wie bereits weiter oben diskutiert, zerfällt die SEKS während der Abkühlung in ein feines Pulver, welches schwer zu handhaben ist und eine Staubbelastung durch zusätzliche Handhabungsvorgänge auf dem Werksgelände bedeuten kann. Der ERSTE Schritt für einen gezielten Wiedereinsatz der SEKS im Elektrolichtbogenofenprozess wäre somit den Zerfall zu unterdrücken und eine im kalten Zustand kompakte und handhabbare SEKS zu erzeugen. Der ZWEITE Schritt ist der Wiedereinsatz im Stahlherstellungsprozess. Beide Teilschritte sind auf der Georgsmarienhütte gemeinsam mit dem FEhS-Institut von Entwicklungsprojekten bis hin zu Pilotversuchen mit mehrfacher, einmonatiger Laufzeit untersucht worden und sind Bestandteil des vorliegenden Artikels.

## 2. Schritt EINS: Stabilisierung der SEKS

Wie bereits beschrieben, bestehen die sekundärmetallurgischen Schlacken im Wesentlichen aus  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ . Die aus metallurgischen Gründen benötigte Schlackenzusammensetzung zeigt beim Phasenübergang flüssig – fest und der weiteren Abkühlung fast immer die Bildung der Phase Dicalciumsilikat  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , abgekürzt  $\text{C}_2\text{S}$ . Das  $\text{C}_2\text{S}$  ist durch eine Polymorphie bei der weiteren Abkühlung auch für den Zerfall der SEKS verantwortlich ist. Das Bild 1 stellt u.a. die Phasenumwandlungen des Dicalciumsilikats in Abhängigkeit der Temperatur dar.

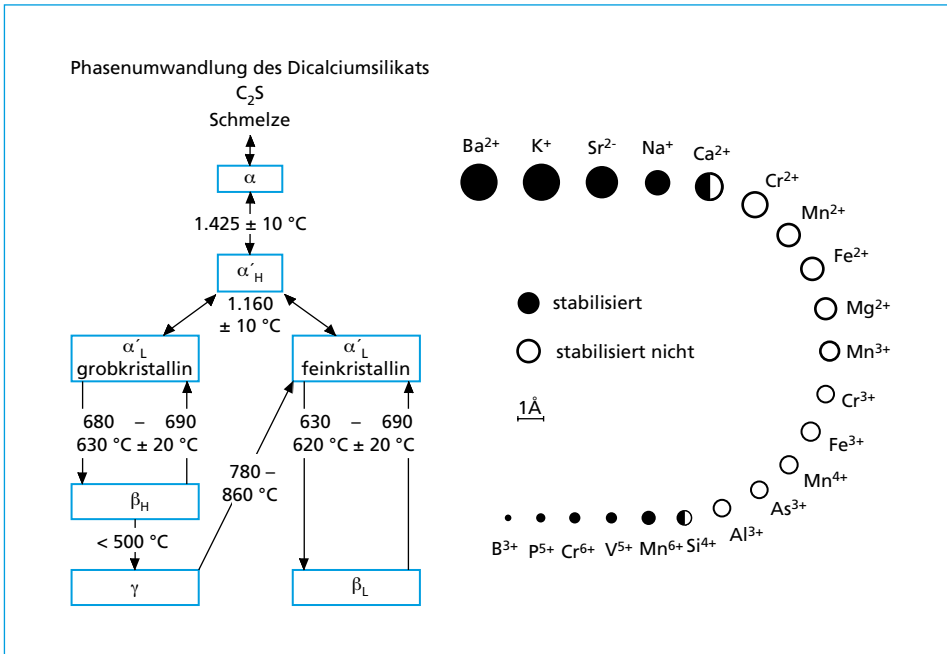


Bild 1: Modifikationswechsel des  $C_2S$  und Einfluss verschiedener Elemente auf die Stabilität des  $\beta$ - $C_2S$

Quellen: Lehmann, H., Niesel, K., Thormann, P.: Die Stabilitätsbereiche der Modifikationen des  $C_2S$ , Tonind. Zeitung 93 (1969) Heft 6, S. 197/209

Schwiete, K., Krönert, W., Deckert, K.: Existenzbereiche und Stabilisierung von Hochtemperaturmodifikationen des Dicalciumsilikates, Zement-Kalk-Gips, Nr. 9 (1968), S. 359 - 366

Elstner, I., Leers, K.-J., Niesel, K.: Untersuchungen zum Dicalciumsilikat-Zerfall von Hüttenschlacken, Tonind.-Ztg. 94 (1970), Nr. 8, S.317 - 331

Aus der Schmelze heraus bildet sich das hexagonale  $\alpha$ - $C_2S$ , welches bis etwa  $1.425 \text{ } ^\circ C$  beständig ist. Bei der weiteren Abkühlung bildet sich unterhalb von  $1.425 \text{ } ^\circ C$  das rhombische  $\alpha'_H$ - $C_2S$ . Das grobkristalline  $\alpha'_L$ - $C_2S$  zeigt eine Phasenumwandlung bei etwa  $650 \text{ } ^\circ C$  von der rhombischen zur monoklinen Kristallstruktur des  $\beta_H$ - $C_2S$ . Diese metastabile Modifikation ist identisch mit dem natürlichen Mineral Larnit. Unterhalb von  $500 \text{ } ^\circ C$  wandelt diese Phase wieder in eine rhombische Kristallstruktur um, die dem Olivintyp entspricht und als  $\gamma$ -Phase oder Calcium-Olivin bezeichnet wird. Diese Umwandlung vom monoklinen  $\beta_H$ - $C_2S$  in das rhombische  $\gamma$ - $C_2S$  ist mit einer Volumenzunahme um etwa elf bis zwölf Prozent verbunden, welches auch an der unterschiedlichen Dichte der einzelnen Phasen ablesbar ist (Tabelle 2). Da mit der Erstarrung der flüssigen Schlacke die Verteilung des  $C_2S$  als homogen in der festen Phase angesehen werden kann und feste Schlacken eine ausgeprägte Spröbruchneigung besitzt, verursacht dieser Volumensprung als Folge der auftretenden inneren Spannungen eine Zerstörung des Kornverbundes noch während der Abkühlung. Eine fast vollständige Zerrieselung der vorher kompakten SEKS ist die Folge mit den bereits diskutierten Nachteilen für Umwelt und Handling.

Bei der näheren Betrachtung fällt auf, dass der relevante Temperaturbereich, der über einen Zerfall oder Nicht-Zerfall des  $C_2S$  entscheidet, bereits bei Temperaturen um  $1.160\text{ }^\circ\text{C}$  liegt (Bild 1). Zur Vermeidung des Dicalciumsilikatzerfalls, also zur Stabilisierung einer Hochtemperaturmodifikation des  $C_2S$  außerhalb ihres thermodynamischen Existenzbereiches und damit der Vermeidung der Umwandlung des  $C_2S$  in die bei Raumtemperatur allein beständige  $\gamma$ -Modifikation bestehen zwei aus der Literatur bekannte Möglichkeiten [2, 3, 7, 11]:

- Stabilisierung der  $\beta_H$ - $C_2S$  Modifikation durch chemische Zusätze, die die Umwandlung zum  $\gamma$ - $C_2S$  thermodynamisch unvorteilhaft werden lassen.
- Stabilisierung der  $\beta_L$ - $C_2S$  Modifikation durch eine schnelle Abkühlung bis etwa  $1.000\text{ }^\circ\text{C}$ . Die schnelle Abkühlung unterstützt eine feinkristalline Struktur bereits der Hochtemperaturmodifikation, die dann mittels einer geringen Korngröße und thermischer Spannungen weiterer ggf. glasig erstarrter Anteile der SEKS die Umwandlung zum  $\gamma$ - $C_2S$  aus thermodynamischer Sicht unvorteilhaft werden lassen.

Tabelle 2: Übersicht von Kenngrößen einzelner  $C_2S$  Modifikationen

Modifikation	Kristallstruktur	Dichte $\text{g/cm}^3$
$\alpha$ - $C_2S$	Hexagonal	3,04
$\alpha'$ - $C_2S$	Rhombisch	3,31
$\beta$ - $C_2S$	Monoklin	3,31
$\gamma$ - $C_2S$	Rhombisch	2,97

nach: Schwiete, K., Krönert, W., Deckert, K.: Existenzbereiche und Stabilisierung von Hochtemperaturmodifikationen des Dicalciumsilikates

## 2.1. Kristallchemische Stabilisierung des $C_2S$

Die Zugabe von insbesondere Bor und Phosphor zur Vermeidung der Zerfallsreaktion sekundärmetallurgischer Schlacken ist in der Literatur bekannt [2, 3, 7, 11]. Der Einbau dieser Elemente in die Kristallstruktur des  $C_2S$  führt zu einer Reduzierung der wirksamen Gitterenergie oberhalb des Umwandlungspunktes von der  $\beta_H$ - $C_2S$  zur  $\gamma$ - $C_2S$  Phase. In der Folge wird die treibende Kraft für die Umwandlung reduziert und über die kombinierte Wirkung mit einer gehemmten Reaktionskinetik die  $\beta_H$ - $C_2S$  Modifikation bis Raumtemperatur stabilisiert. Ein Zerfall der SEKS bei der Abkühlung kann auf diese Weise unterdrückt werden. Für die Stabilisierung zerfallsverdächtiger Schlacken reichen meist Gehalte in der Größenordnung von 1 Ma.-%  $B_2O_3$  bzw.  $P_2O_5$  aus [9]. Bei dieser Art der Stabilisierung handelt es sich wegen der geringen Zugabemengen nicht um eine *Verdünnung* im klassischen Sinne, da eine wesentliche Veränderung der Schlackenzusammensetzung durch hohe Zugabemengen an Oxiden unterbleibt. Diese geringen Mengen an Oxiden werden vielmehr stochastisch verteilt in das Kristallgitter des  $C_2S$  eingebaut. Nach einer Theorie von A. Dietzel und L. Tscheischvili kann die stabilisierende Wirkung der meisten in Frage kommenden Verbindungen damit erklären werden, dass Kationen von größerem Ionenradius als  $Ca^{2+}$  und Anionenkomplexe mit geringerer Raumfüllung als die der  $(SiO_4)^{4-}$ -Gruppe in fester Lösung im  $C_2S$  die Umwandlung in die  $\beta$ -Modifikation verhindern können, vgl. auch Bild 1.

Obwohl die Stabilisierung von SEKS durch Bor und Phosphor in der Literatur eine bekannte und effiziente Methode ist, ist deren Umsetzung im Tagesgeschäft der Stahlherstellung eine Herausforderung. Für eine erfolgreiche Stabilisierung ist eine homogene Verteilung des Bors oder des Phosphors in der noch schmelzflüssigen Schlacke zwingend erforderlich. Dies wiederum bedingt einige betrieblich nicht einhaltbare Rahmenbedingungen. Mögliche Problempunkte könnten z.B. sein:

- Viskosität der SEKS zu hoch bzw. Temperatur zu niedrig, was eine Durchmischung behindert,
- betriebliche Verzögerungen führen zu bereits teilweise erstarrter SEKS,
- Zugabe der Stabilisatoren nicht effektiv, da Kapselung durch einfrierende Schlacke und damit Ausbildung einer Sperrschicht.

Vor dem Hintergrund einer innerbetrieblichen Wiederverwendung als vorgeschmolzener Schlackenbildner für den Elektrolichtbogenofen besitzt die kristallchemische Stabilisierung der SEKS jedoch einen weiteren entscheidenden Nachteil. Die in der SEKS vorhandenen Anteile Bor würden beim Einsatz als Kalkersatz im ELO-Prozess wieder in das Stahlbad übergehen und dabei eine deutliche Beeinflussung der Stahlqualität und auch der Stahleigenschaften bedeuten. Eine kristallchemische Stabilisierung sekundärmetallurgischer Schlacken mag zur Reduktion von Staubemissionen eine gewisse Relevanz besitzen, nicht jedoch im Sinne des internen Recycling.

## 2.2. Physikalische Stabilisierung des $C_2S$

Im Gegensatz zur chemischen Stabilisierung kommt es bei der physikalischen Stabilisierung nicht zur Zugabe von weiteren Elementen und/oder Oxiden zu einer flüssigen SEKS, sondern es wird über eine schnelle Abkühlung die Ausbildung eines feinkristallinen Gefüges angestrebt, um den  $C_2S$  Zerfall zu unterdrücken, vgl. Abschnitt 2. Während einerseits die Probleme des Einbringens, Verteilen und Auflörens eines Stabilisators sich bei der physikalischen Stabilisierung gar nicht erst stellen, gilt es bei der schnellen Abkühlung jedoch gegen die schlechte thermische Leitfähigkeit von kalksilikatischen Schlacken zu arbeiten. D.h. die schlechte Wärmeleitfähigkeit sorgt dafür, dass häufig nur die äußerste Schicht der SEKS einer schnellen Abkühlung folgen kann, bevor es zu einem Wärmestau im Inneren der äußerlich erstarrten Schlacke kommt und eine physikalische Stabilisierung nicht über den gesamten Querschnitt erfolgreich durchgeführt werden kann. Bei einer betrieblichen Anwendung dieser Maßnahme im Tonnen-Maßstab besteht daher die Gefahr, dass lediglich an der Oberfläche des Schlackevolumens ein feinkristallines und damit stabiles Gefüge erzeugt wird. Dies verringert zwar den Anteil feinkörnig zerfallenen Materials, eine vollständige Vermeidung des Zerfalls und der damit einher gehenden negativen Begleitumstände ist allerdings schwierig zu erzielen. Die Erzeugung einer vollständig glasigen Struktur ist bei den sehr kalkreichen und mit einer hohen Basizität  $CaO/SiO_2$  versehenen Schlacken aus der Sekundärmetallurgie betrieblich nicht zu realisieren [2].

Auf der Basis dieser theoretischen Zusammenhänge sind in bilateralen Entwicklungsarbeiten zwischen dem FEHS-Institut und der Georgsmarienhütte GmbH sowohl Labor- als auch seriennahe Pilotversuche durchgeführt worden, die die Erzeugung einer bei Raumtemperatur stückigen SEKS zum Ziel hatten. Einerseits zur Reduzierung der Staubemissionen auf dem Werksgelände als auch Andererseits zur Produktion eines handhabbaren, vorgeschmolzenen Schlackenbildners für die interne Wiederverwendung im ELO Prozess.

Laborversuche am FEHS-Institut haben gezeigt, dass in Abhängigkeit der Abkühlgeschwindigkeit unterschiedliche mineralogische Phasen in einer zuvor aufgeschmolzenen und dann mit unterschiedlichen Abkühlbedingungen gekühlten, betrieblichen sekundärmetallurgischen Proben nachweisbar waren. Die mineralogischen Phasen entsprachen den theoretischen Grundlagen und gingen mit einer Stabilisierung oder einem Zerfall der Schlackenproben einher. Konnte eine kritische Abkühlgeschwindigkeit überschritten werden, so zeigte die Probe im Anschluss kein  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  Peak in der röntgendiffraktometrischen Untersuchung und korrespondierend dazu auch keine Zerfallsreaktion der SEKS (Tabelle 3).

Tabelle 3: Mineralogische Phasen an Laborproben in Abhängigkeit der Abkühlgeschwindigkeit

Abkühlrate	Amorphe Anteile	$\beta\text{-C}_2\text{S}$	$\gamma\text{-C}_2\text{S}$	Mayenite ( $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ )	Schlackenbild
Niedrig		X	X	X	Pulver
Hoch	X	X		X	Stückig



Bild 2: Stabilisierungsplatte während der operativen Pilottests im Stahlwerk Georgsmarienhütte

Der Transfer der Laborversuche auf einen großseriennahen Pilotmaßstab erfolgte im Stahlwerk mittels einer großen Fläche, die ein vergleichsweise hohes Oberfläche/Volumen-Verhältnis der SEKS ermöglichen sollte. Erste Versuche mit dünnen Schlackenschichten im konventionellen Schlackenbeet mit erstarrter Schlacke im Untergrund führten dabei nicht zum Erfolg. Die betreffenden sekundärmetallurgischen Schlacken zeigten alle eine Zerfallsreaktion. Eine genauere messtechnische Analyse dieser Versuche zeigte, dass die Wärmeabfuhr in den

*Schlackeboden* zu gering ist und offensichtlich eine kritische Abkühlgeschwindigkeit nicht überschritten werden konnte. Zur Verbesserung des Wärmeübergangs und des Wärmetransportes wurden in einem zweiten Schritt Metallplatten (Bild 2) verwendet, die als Wärmesenke dienen sollten.

Die durchgeführten Versuchsserien in operativen Pilotmaßstab ergaben, dass ein zeitnahe Abkippen der SEKS nach Gießende eine wichtige Prozessgröße ist, da die Schlacke zu diesem Zeitpunkt noch eine höhere Temperatur besitzt und damit



Bild 3: Exemplarisches Beispiel einer im Serienmaßstab mit beschleunigter Abkühlung stabilisierten sekundärmetallurgischen Schlacke

dünnflüssiger ist und noch keine – oder nur geringe – bereits erstarrte Anteile (Deckel) gebildet hat. Weiter hat die Einstellung von dünnen Schlackenschichten bei ansonsten ähnlichen Verhältnissen einen entscheidenden Einfluss auf eine erfolgreiche Stabilisierung der sekundärmetallurgischen Schlacken, vgl. auch Abschnitt 2.2. Mit aufeinander abgestimmter Technologie von Stabilisierungsfläche, Abkipp- und anschließendem Abräumvorgang der Platte sowie Handling der SEKS, konnten Stabilisierungsraten von  $\geq 80$  Prozent erreicht werden. D.h. über

achtzig Prozent der im Prozess der Georgsmarienhütte GmbH beschleunigt abgekühlten Schlacken zeigten keine oder nur geringe Anteile zerfallener SEKS (Bild 3). Die stabilisierte SEKS wird vom Reststahl befreit und sowohl die nun bei Raumtemperatur stückig vorliegende SEKS als auch der Stahlrest der Gießpfanne können im internen Kreislauf wiederverwendet werden.

### 3. Schritt ZWEI: Wiedereinsatz der SEKS als Kalkersatz im Elektrolichtbogenofenprozess

Die ursprüngliche metallurgische Hauptaufgabe der SEKS – die Entschwefelung des Stahls in der Sekundärmetallurgie – wirkt beim internen Recycling als Nachteil. Dieser in der SEKS überwiegend als CaS gebundene Schwefelanteil wird damit beim internen Recycling wieder dem System im ELO zur Verfügung gestellt. Aufgrund der z.B. in [10] und [8] beschriebenen Zusammenhänge führen die metallurgischen Prozesse im Elektrolichtbogenofen dann dazu, dass elementarer Schwefel in das Stahlbad übergeht und es zu einer Erhöhung der mittleren Schwefelabstichgehalte aus dem ELO kommt. Im Gegensatz zu den im Abschnitt 2.1. beschriebenen Verfahren der kristallchemischen Stabilisierung mit Bor wird das Element Schwefel jedoch von einer Vielzahl der Stahlanwender explizit zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften (Zerspanung) gewollt. Ein Recycling in Abhängigkeit der zu produzierenden Stahlgüte kann erfolgen.

Bei rein mengenmäßiger Betrachtung muss eine Mehrmenge an SEKS im Vergleich zu reinem Kalk eingesetzt werden, da SEKS nicht zu hundert Prozent aus CaO besteht. Da es sich aber um eine vorgeschmolzene Schlacke handelt und gleichzeitig andere Größen den Stromverbrauch deutlich dominieren, z.B. Stückigkeit des Schrottes, ist bei der Betrachtung des normierten Stromverbrauchs kein signifikanter Einfluss der Menge SEKS als Kalkersatz nachweisbar Bild 4. Parallel konnte auch nachgewiesen werden, dass es zu keiner systematisch negativen Beeinflussung der Entphosphorungskapazität einer u.a. mit stabilisierter SEKS gebildeten EOS während des Elektrolichtbogenofenprozesses kommt Bild 5.



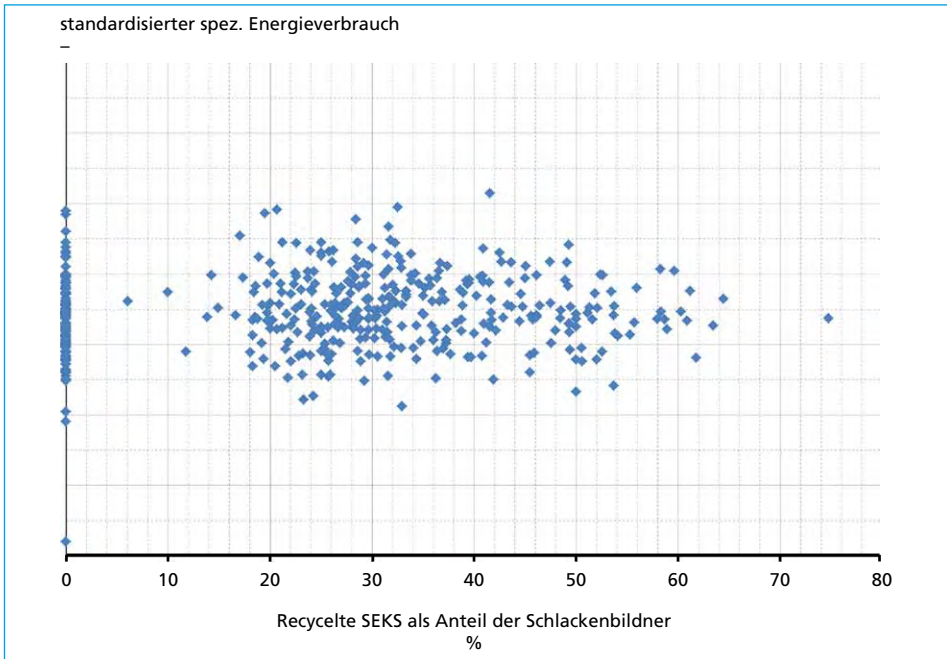


Bild 4: Standardisierter spezifischer Energieverbrauch im Elektrolichtbogenofenprozess in Abhängigkeit des Anteils recycelter SEKS

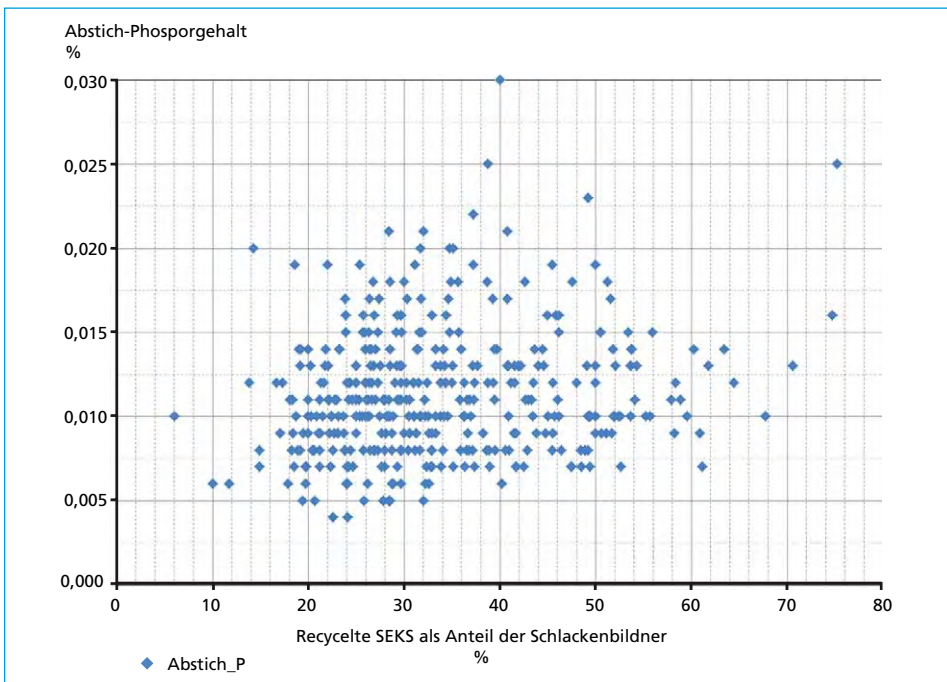


Bild 5: Beobachtete Phosphorgehalte beim Abstich aus dem Elektrolichtbogenofen in Abhängigkeit des Anteils recycelter SEKS

## 4. Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel diskutiert den Zero Waste Gedanken am Beispiel der Stahlindustrie und im Speziellen an der innerbetrieblichen Wiederverwendung von sekundärmetallurgischen Schlacken als Kalkersatz für die EOS bei der Primärstahlerzeugung.

Anfangen von der chemischen Zusammensetzung sekundärmetallurgischer Schlacken über die theoretischen Grundlagen der Dicalciumsilikatstabilisierung bis hin zum Transfer von Laborversuchen auf den großseriennahen Pilotmaßstab werden die Chancen und Risiken des internen Recyclings der SEKS diskutiert. Hierbei zeigt die physikalische Stabilisierung des  $C_2S$  durch eine beschleunigte Abkühlung deutlich mehr Chancen als die chemische Stabilisierung. Dies liegt im Wesentlichen an der guten Wiederverwendbarkeit der physikalisch stabilisierten SEKS als Kalkersatz im Elektrolichtbogenofenprozess, da es nicht zu einer Kontamination mit unerwünschten Elementen wie z.B. Bor kommt, die die späteren Anwendungseigenschaften des Stahls negativ beeinflussen können.

Auf der Basis der durchgeführten Versuchsreihen sind Stabilisierungsraten von siebenzig bis achtzig Prozent als realisierbar anzusehen. Wenngleich Stabilisierungsraten von hundert Prozent nicht erreicht werden konnten, so ist aus rein technischer Sicht eine Stabilisierung und internes Recycling auch im Großserienprozess als teilweise möglich einzustufen. Aus wirtschaftlicher Sicht hingegen bedeutet die Implementierung von weiteren Prozess-, Lager- und Handlungsschritten im Stahlherstellungsprozess Nachteile und damit Marktrisiken. Die innerbetriebliche Logistik wird komplexer, was mit erhöhten Aufwendungen für Arbeitskräfte und Handlungsgütern einhergeht und somit die bereits angespannte Kostenstruktur eines europäischen Stahlwerkes zusätzlich belastet.

Unabhängig davon, werden die Weiterentwicklungen in der Stahlindustrie auch zukünftig in Richtung Energie- und Ressourceneffizienz gehen, da diese nicht nur in monetärer Hinsicht, sondern auch im Sinne der öffentlichen Wahrnehmung des Industriezweiges, als wichtig anzusehen sind.

## 5. Literatur

- [1] Bhattacharjee, D.: Future with steel, 1st ESDAT, 2014, Paris
- [2] Drissen, P.: Abschlussbericht AiF 16456N, Stabilisierung sekundärmetallurgischer Schlacken aus der Qualitätsstahlerzeugung, FEHS - Institut für Baustoff-Forschung e. V., 2012
- [3] Elstner, I., Leers, K.-J., Niesel, K.: Untersuchungen zum Dicalciumsilikat-Zerfall von Hütten-schlacken, Tonind.-Ztg. 94 (1970), Nr. 8, S.317 - 331
- [4] Esfahani, S.; Barati, M.: Current status of heat recovery from granulated slag, 3rd International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing, 2012
- [5] Fachverband Eisenhütten-schlacken e.V., Duisburg
- [6] Kerkhoff, H. J.: Situation and challenges for the steel industry in Europe, 1st ESDAT, 2014, Paris
- [7] Lehmann, H., Niesel, K., Thormann, P.: Die Stabilitätsbereiche der Modifikationen des  $C_2S$ , Tonind. Zeitung 93 (1969) Heft 6, S. 197/209

- [8] Markus H. P. et. al.: Schlackenconditionierung im Elektrolichtbogenofen – Metallurgie und Energieeffizienz –, Schlacken aus der Metallurgie, Band 2, S.105-126, 2012
- [9] Mundersbach, D., Kühn, M.: Stabilisierung von zerfallsverdächtigen Edstahlschlacken AiF-Schlußbericht Nr. 13934N
- [10] Schliephake, H. et. al.: Aufbau und Prozessführung des Lichtbogenofens unter besonderer Berücksichtigung des Schlackenmanagements, Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle - Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen, Berlin 2014, S.305 - 325
- [11] Schwiete, K., Krönert, W., Deckert, K.: Existenzbereiche und Stabilisierung von Hochtemperaturmodifikationen des Dicalciumsilikates, Zement-Kalk-Gips, Nr. 9 (1968), S. 359 - 366
- [12] [www.stahl-online.de](http://www.stahl-online.de)



## Lebenswerte stabil weiterentwickeln

Stahl bewegt und hält zusammen. Unser Stahl findet Einsatz im Automobilbau sowie in der Bauindustrie und bildet in vielen Bereichen die wesentliche Grundlage unseres täglichen Lebens. Die Realisierung einer dauerhaft wirtschaftlichen Produktion und die gleichzeitige Erfüllung von Umweltschutzansprüchen sowie der verantwortungsvolle Umgang mit natürlichen Ressourcen erfordern Weitblick und das Engagement, etwas verändern zu wollen. Ökologisches und ökonomisches Denken und Handeln sind dabei die Basis für eine erfolgreiche Zukunft und die Erhaltung der Lebensgrundlagen für kommende Generationen.

Wir denken weiter. Wir übernehmen Verantwortung für die Zukunft.



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Michael Heußén, Heribert Motz (Hrsg.): **Schlacken aus der Metallurgie, Band 3**  
– Chancen für Wirtschaft und Umwelt –

ISBN 978-3-944310-17-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2014  
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,  
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky  
Erfassung und Layout: Berenice Gellhorn, Ginette Teske, Cordula Müller

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.