

# Recycling von Feuerfeststeinen

Henning Knapp, Hermann Wotruba und Sven Connemann

1.	Grundlagen Feuerfeststeine.....	317
2.	Herausforderungen für das Recycling von Feuerfeststeinen.....	319
3.	Versuchsarbeiten .....	321
4.	Demonstrator .....	322
5.	Herausforderungen.....	324
6.	Fazit.....	325
7.	Literatur .....	326

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Anwendbarkeit der Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) für das Recycling von Feuerfeststeinen. Gebrauchte Feuerfeststeine beinhalten ein großes Wertschöpfungspotential und sind daher von großem Interesse für die Recyclingindustrie. Ausgewählte Ergebnisse der Versuche im Labor werden ebenso vorgestellt wie Erfahrungen im Betrieb des eigens entwickelten Demonstrators in industrieller Umgebung. Die präsentierten Versuchsergebnisse wurden im Rahmen des EU-geförderten Forschungsprojektes REFRASORT erzielt.

## 1. Grundlagen Feuerfeststeine

Feuerfeststeine sind feste keramische Erzeugnisse, die für eine Einsatztemperatur über 1.500 °C geeignet sind. Bei diesen Temperaturen müssen die Feuerfeststeine ihre Form und ihre mechanische Stabilität beibehalten und dürfen erst nach definierten Zeiträumen Verschleißerscheinungen zeigen. Feuerfeststeine werden in einer Vielzahl von industriellen Hochtemperaturprozessen eingesetzt. Der größte Verbraucher von Feuerfeststeinen ist die Stahlindustrie, gefolgt von der Zement- und der Glasindustrie. [2]

In 2013 wurden in Europa etwa 3,8 Millionen Tonnen Feuerfesterzeugnisse hergestellt, das entspricht in etwa 10 Prozent der weltweiten Produktion. Verglichen mit anderen mineralischen Rohstoffen ist die Produktion von 3,8 Millionen Tonnen eher gering, allerdings entspricht sie einem Verkaufswert von 3,1 Milliarden EUR. Damit liegt der Wert von Feuerfeststeinen im Durchschnitt bei über 800 EUR/t. [5]

Bei der Herstellung von Feuerfeststeinen kommt eine Vielzahl von mineralischen Rohstoffen zum Einsatz (Tabelle 1). Je nach Anwendungsgebiet und Einsatzort im Ofen werden diese Rohstoffe in unterschiedlicher Weise kombiniert. Alle Rohstoffe müssen hohe Qualitätsanforderungen erfüllen und können daher nur aus wenigen Lagerstätten in ausreichender Qualität gewonnen werden.

Rohstoff	Formel	Schmelzpunkt °C	Hauptquelle
Quarz	SiO <sub>2</sub>	1.720	Global
Schamotte	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.100	Global
Aluminiumsilikat	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.350	China
Aluminiumoxid	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.050	Synthetisch
Zirkonoxid	ZrO <sub>2</sub>	2.715	Südafrika
Zirkon	ZrSiO <sub>4</sub>	1.775	Australien
Chromit	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2.265	Südafrika
Spinell	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2.135	Synthetisch
Magnesit	MgO	2.820	China
Sinter Dolomit	CaO + MgO	2.370	Europa/Global
Graphit	C	3.600	China

Tabelle 1:

Grundstoffe zur Herstellung von Feuerfeststeinen und ihre Hauptförderländer

Quelle: Guéguen, E.; Hartenstein, J.; Fricke-Begemann, C.: Raw material challenges in refractory application. In: Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. 2014

Die begrenzte Verfügbarkeit und die ungleiche geografische Verteilung führt bei einigen Rohstoffen zu einer erheblichen Importabhängigkeit der Hersteller. Vor allem China dominiert die Produktionen von einigen wichtigen Grundstoffen zur Herstellung von Feuerfeststeinen. Bild 1 zeigt die geographische Verteilung der Produktionskapazitäten von einigen Rohstoffen für die Herstellung von Feuerfeststeinen sowie den Anteil Chinas an der Produktion.

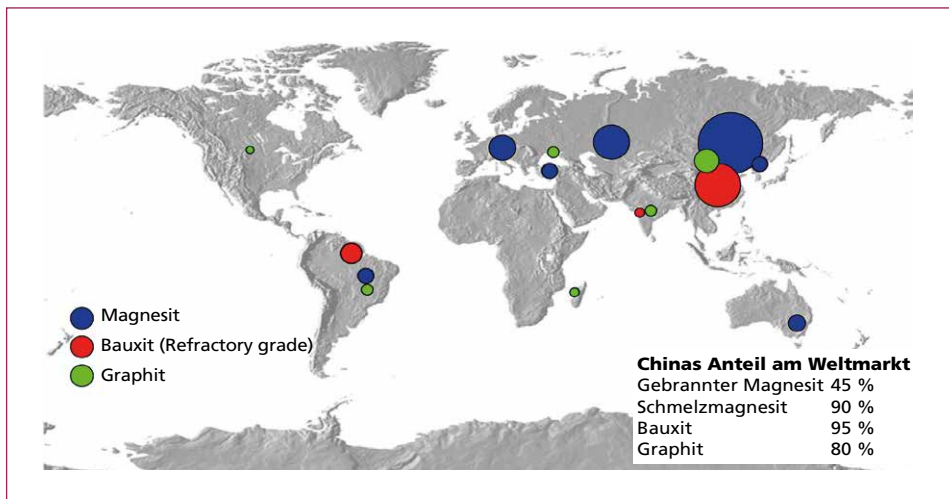


Bild 1: Verteilung der Produktion einiger Rohstoffe für die Herstellung von Feuerfeststeinen

Quelle: Volckaert, A.; Deal, A.: PRE Annual Report 2014. Brüssel, 2014

Eine Möglichkeit die Importabhängigkeit der Hersteller zu reduzieren ist das Recycling von Feuerfeststeinen. Gleichzeitig ermöglicht es eine Wertschöpfung aus einem Abfallstrom und die Vermeidung von Entsorgungskosten. Der hohe Preis pro Tonne und die Abhängigkeit von Rohstoffimporten sind zwei wichtige Gründe das Recycling von Feuerfeststeinen in Europa voranzutreiben.

## 2. Herausforderungen für das Recycling von Feuerfeststeinen

Während des Einsatzes im Ofen wird ein Teil eines jeden Feuerfeststeins verbraucht. Der größere Teil bleibt aber intakt und wird am Ende der Lebensdauer aus dem Ofen herausgebrochen. Die herausgebrochenen Steine entsprechen in ihrer jeweiligen Zusammensetzung den Qualitätsanforderungen, befinden sich aber meist in einem großen Haufen aus vielen verschiedenen Feuerfeststeinen sowie Verunreinigungen wie Stahl oder Schlacke (Bild 2). Eine direkte Wiederverwendung ist daher nicht möglich.



Bild 2:

Feuerfeststeine nach ihrem Einsatz in der Stahlindustrie

Die Hauptherausforderung für das Recycling besteht daher in der möglichst sortenreinen Trennung der verschiedenen Feuerfeststeine. Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, bestehen Feuerfeststeine aus einer Vielzahl verschiedener Rohstoffe. Die in der Stahlindustrie eingesetzten Feuerfeststeine können in drei Grundgruppen eingeteilt werden, nämlich doloma-, magnesia- und aluminabasierte Feuerfeststeine.

Dolomabasierte Feuerfeststeinen bestehen hauptsächlich aus dem Mineral Dolomit und weisen daher hohe MgO- und CaO-Gehalte auf. Sie werden mit und ohne organischen Kohlenstoff als Bindemittel produziert. Gebrannter Magnesit ist der Hauptbestandteil von magnesiabasierten Feuerfeststeinen, die daher fast ausschließlich aus MgO bestehen. Auch hier kann organischer Kohlenstoff als Bindemittel eingesetzt werden, teilweise mit Aluminium als zusätzliches Antioxidationsmittel. Aluminabasierte Feuerfeststeine bestehen meist aus einer Mischung von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{SiO}_2$ , die sich je nach Typ in ihrem Verhältnis von Al zu Si unterscheiden. Tabelle 2 zeigt die acht wichtigsten Feuerfeststeine aus der Stahlindustrie und ihre Zusammensetzung.

Tabelle 2: Die acht wichtigsten Feuerfeststeine und ihre Zusammensetzung

Haupttyp	Typ	Zusammensetzung
Magnesiabasiert	Gebrannter Magnesit (FM)	Viel MgO, kein C, kaum CaO
	Magnesia-Carbon mit Antioxidationsmittel (MCA)	Viel MgO, 5-15 % C, kaum CaO, Antioxidationsmittel Al
	Magnesia-Carbon ohne Antioxidationsmittel (MC)	Viel MgO, 5-15 % C, kaum CaO
Dolomabasiert	Gebrannter Dolomit (FD)	Viel MgO, viel CaO, kein C
	Doloma-Carbon (DC)	Viel MgO, viel CaO, 5-15 % C
Aluminabasiert	Gebrannter Bauxit (FB)	Viel Al, Al/Si~8/1, kein C
	Gebrannter Andalusit (FA)	Viel Al, Al/Si~2/1, kein C
	Gebrannter Chamotte (FC)	Viel Al, Al/Si~1/1, kein C

Quelle: Connemann, S.; Fricke-Begemann, C.; Horckmans, L.; Ducastel, A.; Bouillot, F.; Knapp, H.; Makowe, J.; Stark, A.: Automated LIBS-based classification for spent refractories from the steel industry for high-value recycling. In: Wotruba, H.; Pretz, T. (Eds.): Sensor-Based Sorting & Control. Aachen, 2016

Die genannten acht Typen von Feuerfeststeinen zu trennen war die Aufgabenstellung für das Forschungsprojekt REFRASORT. Für die Sortierung von einzelnen Feuerfeststeinen im Korngrößenbereich von 60 bis 300 mm eignet sich die sensorgestützte Sortierung. Voraussetzung für den Einsatz der sensorgestützten Sortierung ist die Verfügbarkeit eines geeigneten Sensors, oder einer Kombination verschiedener Sensoren, der in der Lage ist in kurzer Zeit die zu trennenden Fraktionen zu identifizieren.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde die Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) als potentielle Sensortechnologie untersucht. Bei LIBS wird ein Laser durch mehrere Linsen auf eine kleine Fläche auf der Oberfläche der Probe fokussiert (Bild 3). Dadurch werden lokal hohe Energiedichten erreicht, die ausreichen um auf der Oberfläche ein Plasma aus dem Festkörpermateriale zu erzeugen. Die mit dem Plasma verbundene Lichtemission wird spektral untersucht und erlaubt die quantitative Bestimmung der elementaren Zusammensetzung der Probe. Eine einzelne Messung dauert nur einige Millisekunden und qualifiziert LIBS damit für die Anwendung in der

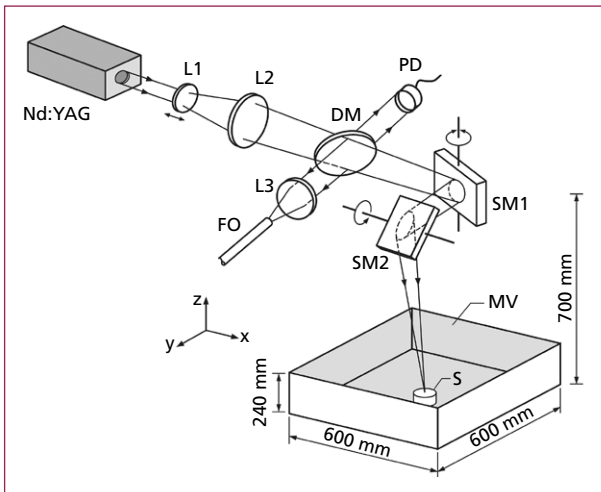


Bild 3:

Aufbau der optischen Komponenten eines 3D-scannenden LIBS-Systems

Quelle: Werheit, P., Fricke-Begemann, C., Gesing, M., Noll, R.: Fast single piece identification with a 3D scanning LIBS for aluminium cast and wrought alloys recycling. In: Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 26(11), 2011, S. 2166–2174

sensorgestützten Sortierung. Allerdings betrifft die Analyse nur den Messfleck ( $< 1 \text{ mm}^2$ ) und ist nicht notwendigerweise repräsentativ für die gesamte Probe. Durch wiederholte Messungen an verschiedenen Stellen der Probe wird die Aussagekraft der Analyse erhöht.

### 3. Versuchsarbeiten

Ziel der Versuchsarbeiten war es, die Anwendbarkeit von LIBS für die Unterscheidung der acht wichtigsten Feuerfeststeine zu evaluieren. Dazu wurden je drei Bohrkern aus jedem der acht Typen von Feuerfeststeinen entnommen und mit LIBS untersucht. Jeder Bohrkern wurde zehn Mal mit LIBS gemessen um eine räumliche Mittelung zu erzielen. Bild 4 zeigt einen der Bohrkern aus Magnesia-Carbon im Moment einer LIBS-Messung.



Bild 4: Bohrkern aus Feuerfeststein mit Plasma während der LIBS-Messung

Quelle: Knapp, H.; Horckmans, L.; Ducastel, A.; Bouillot, F.; Connemann, S.; Fricke-Begemann, C.; Makowe, J.; Stark, A.: Sensor-Based Sorting of spent Refractory Bricks. XXVII International Mineral Processing Congress, 11.–15.09.2016 Quebec, Canada, 2016

Aus den aufgenommenen LIBS-Spektren wurden bestimmte Bereiche ausgewählt, die dafür bekannt sind, dass sie mit Elementen wie Ca, Mg oder Al korrelieren. Die Streuungen, die sich aus den Mehrfachmessungen ergeben, wurden bestimmt und zur Berechnung der Standardabweichung für jeden Typ von Feuerfeststeinen genutzt. Unter der Annahme einer Gauß-Verteilung lässt sich die Wahrscheinlichkeit der korrekten Identifikation für jede der acht Feuerfeststeinklassen gegenüber den anderen sieben bestimmen. Tabelle 3 zeigt die verschiedenen Wahrscheinlichkeiten für alle acht Klassen an Feuerfeststeinen. Da eine symmetrische Verteilung (Gauß-Verteilung) angenommen wurde und die Grenze zur Unterscheidung der Klassen an den Ort gelegt wurde an denen sich die Gauß-Verteilungen der Klassen schneiden ist die Tabelle entlang ihrer Hauptdiagonalen symmetrisch. Die somit redundante obere, rechte Hälfte ist ausgegraut.

Die Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Identifikation liegt zwischen den drei Haupttypen immer bei 99,9 Prozent. Innerhalb eines Haupttyps ist die Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Identifikation geringer, aber in allen Fällen über 90 Prozent. In den Labortests konnte somit gezeigt werden, dass die LIBS-Technologie grundsätzlich in der Lage ist mindestens die drei Haupttypen, wahrscheinlich aber auch die acht wichtigsten Feuerfeststeine zuverlässig zu unterscheiden.

Tabelle 3: Wahrscheinlichkeit der korrekten Identifikation der acht Klassen von Feuerfeststeinen

Feuerfeststein Typ	MC	MCA	FM	FD	DC	FB	FA	FC
MC		97,9 %	96,0 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %
MCA	97,9 %		98,1 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %
FM	96,0 %	98,1 %		99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %
FD	99,9 %	99,9 %	99,9 %		94,3 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %
DC	99,9 %	99,9 %	99,9 %	94,3 %		99,9 %	99,9 %	99,9 %
FB	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %		99,0 %	93,6 %
FA	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,0 %		92,0 %
FC	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %	93,6 %	92,0 %	

Im Vergleich zu den Laborversuchen, ist bei der Anwendung in einer industriellen Anlage mit zahlreichen Faktoren zu rechnen, die die LIBS-Messungen erschweren. So können sich die Feuerfeststeine während ihres Einsatzes im Hochofen oberflächlich verändern, Verunreinigungen wie Staub oder Schlacke können die Messung verfälschen und Umgebungseinflüsse wie Vibrationen und Temperatur die Messung zusätzlich beeinflussen. Daher war es notwendig die Anwendbarkeit der LIBS-Technologie für die Sortierung von Feuerfeststeinen auch unter industriellen Bedingungen zu testen.

#### 4. Demonstrator

Um die Laborergebnisse einen Schritt näher an die Umsetzung in der Industrie zu bringen wurde ein Demonstrator gebaut, der bereits in industrieller Umgebung die Anwendbarkeit von LIBS für die Sortierung von Feuerfeststeinen zeigen sollte. Der Demonstrator ist in der Lage die Zielkorngröße von 60 bis 300 mm zu verarbeiten und wurde dafür ausgelegt, bei optimaler Beschickung bis zu 10 t/h zu sortieren.

Der Demonstrator besteht aus einem Schwingförderer, von dem aus die Teile auf ein erstes Förderband gelangen (Bild 5). Vier pneumatische Schieber bewegen einzelne Steine von dem ersten auf ein zweites Förderband. Zwischen den zwei Förderbändern befindet sich eine Metallplatte, auf der die Steine zum Stehen kommen, falls auf dem zweiten Band aktuell kein Platz für einen weiteren Stein ist. Auf diese Weise ist es möglich, dass die Steine voneinander isoliert werden und auf dem zweiten Förderband mit einem definierten Abstand zueinander aufgereiht sind. Die nachfolgenden Prozesse LIBS-Messung und Trennung müssen somit immer nur einen Feuerfeststein zur gleichen Zeit verarbeiten. Nach der Messung erfolgt die Trennung wieder durch pneumatische Schieber basierend auf den Ergebnissen der LIBS-Messung. Der Aufbau ist so gewählt, dass durch ein Verlängern des zweiten Bandes und Hinzufügen von zusätzlichen Schiebern die Anzahl an erzeugten Produkte fast beliebig erhöht werden kann.

In einer ersten Versuchsreihe wurde der Demonstrator mit einer Mischung aus doloma-, magnesia- und aluminabasierten Feuerfeststeinen beschickt. Daraus wurden zwei Produkte erzeugt, ein dolomabasiertes und ein magnesiabasiertes. Die verbleibende Fraktion bestand somit aus aluminiumbasierten Feuerfeststeinen sowie den Steinen,



die von dem Demonstrator nicht eindeutig identifiziert werden konnten. Bild 6 zeigt die zwei Produkte der ersten Sortierung, die optisch schwer voneinander zu unterscheiden sind.

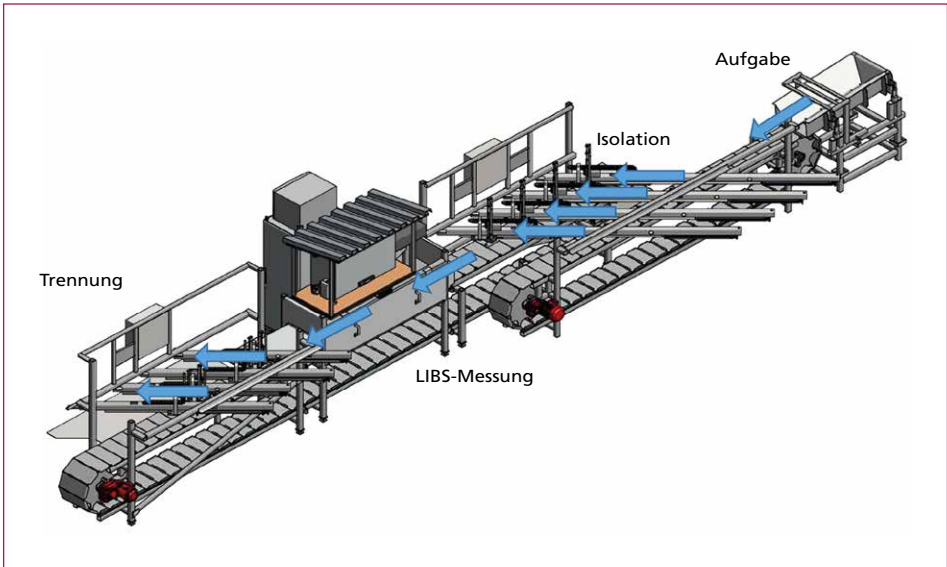


Bild 5: Aufbau des Demonstrators



Bild 6: Zwei Produkte der Sortierung mittels LIBS

Nach einigen Vorversuchen zur Abstimmung der Komponenten und Justierung der Sortieralgorithmen, wurden in einem Großversuch etwa 30 Tonnen ausgebrochene Feuerfeststeine sortiert. Aus den 30 Tonnen wurden jeweils etwa 11 Tonnen gebrannter

Magnesit (FM) und gebrannter Dolomit (FD) sortiert. Die übrigen 8 Tonnen bestanden hauptsächlich aus aluminiumbasierten Feuerfeststeinen und einem kleinen Teil nicht identifizierter Steine. Die resultierenden Fraktionen wurden beprobt, analysiert und durch einen Hersteller von Feuerfeststeinen auf ihre Wiederverwendbarkeit praktisch untersucht. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Analysen sowie die Grenzwerte für die Herstellung von neuen Feuerfeststeinen.

Tabelle 4: Anforderungen und Analyseergebnisse für die sortierten FM und FD Fraktionen

		MgO (min)	CaO (max)	SiO <sub>2</sub> (max)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (max)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (max)	LOI (max)
		Ma-%					
FM	Anforderung	88,0	3,0	3,5	2,0	4,0	5,0
	Analyseergebnis	93,2	2,9	1,2	1,2	1,0	1,3
FD	Anforderung	35,0	60,0	2,5	2,0	2,0	
	Analyseergebnis	37,3	56,9	3,0	1,6	0,8	

LOI-loss on ignition

Im Falle des gebrannten Magnesits (FM) wurden bei allen gemessenen Eigenschaften die dazugehörigen Grenzwerte eingehalten. Lediglich der CaO-Gehalt ist nah am Grenzwert und müsste bei einer industriellen Anwendung genauer überwacht werden. Die Verunreinigungen mit CaO können durch fälschlicherweise zu Magnesit sortierte Dolomitsteine, aber auch durch Anhaftungen wie Schlacke oder Staub in die Fraktion eingetragen werden. Im Falle des gebrannten Dolomits (FD) wurde der Grenzwert für den SiO<sub>2</sub>-Gehalt überschritten. Auch hier könnten falsch sortierte Steine die Ursache für den erhöhten SiO<sub>2</sub>-Gehalt sein, aufgrund des geringen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehaltes erscheinen Verunreinigungen durch Schlacke und Staub jedoch wahrscheinlicher.

Obwohl der Grenzwert für SiO<sub>2</sub> im Falle des gebrannten Dolomits nicht eingehalten wurde, zeigen die Ergebnisse doch, dass es möglich ist aus bereits verwendeten Feuerfeststeinen eine Fraktion auszusortieren, die den Anforderungen an frische Rohstoffe für die Herstellung sehr nahekommt. Die jeweils elf Tonnen gebrannter Magnesit und Dolomit wurden im Rahmen des Forschungsprojektes als Füllstoff mit etwas geringeren Qualitätsanforderungen bei Endanwendern eingesetzt und konnten in diesen Anwendungen die Anforderungen voll erfüllen.

Die gezeigten Ergebnisse des Demonstrators zeigen die grundsätzliche Anwendbarkeit der LIBS-Technologie für die Sortierung von Feuerfeststeinen. Die Erzeugung eines wiedereinsatzbaren Produktes gelang im gezeigten Beispiel für gebrannten Magnesit und gebrannten Dolomit. Bei einigen anderen Feuerfeststeinen waren die Ergebnisse noch nicht in gleicher Weise überzeugend. Besonders die Detektion von organischem Kohlenstoff, aber auch die Erkennung von metallischen Verunreinigungen benötigen noch weiterführende Entwicklungsarbeiten.

## 5. Herausforderungen

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, lassen sich die Feuerfeststeine mit Hilfe des Demonstrators in doloma- und magnesiabasierte Feuerfeststeine unterscheiden. Eine weitere Unterscheidung, beispielsweise in Feuerfeststeine mit und ohne Kohlenstoff



als Bindemittel, ist bisher noch nicht vollständig zufriedenstellend. Dies liegt vor allem daran, dass sich die Feuerfeststeine mit Kohlenstoff als Bindemittel während ihres Einsatzes im Hochofen oberflächlich verändern. Insbesondere die Seite der Feuerfeststeine, die mit flüssigem Stahl oder Schlacke in Kontakt kommt, weist eine Schicht ohne Kohlenstoff als Bindemittel auf (Bild 7).

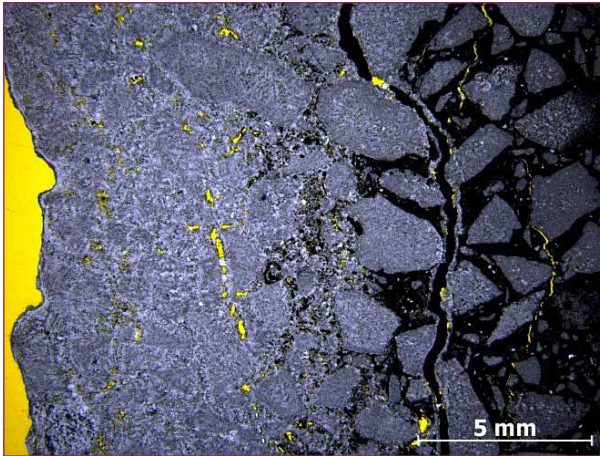


Bild 7:

Dünnschliff eines Feuerfeststeins mit Kohlenstoff als Bindemittel

Quelle: Horckmans, L.; Knapp, H.; Dierckx, P.; Nielsen, P.; Fricke-Begemann, C.; Ducastel, A.; Bouillot, E.; Makowe, J.; Stark, A.: Refrasort: Automated sorting of refractory waste for high value recycling. In: Wotruba, H.; Pretz, T. (Eds.): Sensor-Based Sorting & Control. Aachen, 2016

Auf der rechten Seite des Bildes ist in schwarz das kohlenstoffhaltige Bindemittel zu erkennen, auf der linken Seite ist die Oberfläche des Feuerfeststeins zu sehen, die mit flüssigem Stahl bzw. Schlacke in Kontakt war. Auf der linken Seite ist eine Schicht von mehreren Millimetern Dicke, in der fast kein kohlenstoffhaltiges Bindemittel mehr zu erkennen ist. Die Dicke dieser Schicht variiert stark und ist auf dem gezeigten Beispiel vergleichsweise dick. Da die Eindringtiefe der LIBS-Messung ohne zusätzliche Maßnahmen auf einige 100  $\mu\text{m}$  begrenzt ist kann es passieren, dass kein Kohlenstoff detektiert wird, obwohl es sich um einen Feuerfeststein mit Kohlenstoff als Bindemittel handelt. Eine Anpassung der LIBS-Messung, eine mechanische Vorbehandlung, oder eine ergänzende Sensortechnologie sind mögliche Optionen dieses Detektionsproblem zu lösen.

## 6. Fazit

Die Hersteller von Feuerfeststeinen sind in hohem Maße auf den Import von Rohstoffen zur Herstellung von Feuerfeststeinen angewiesen. Recycling von Feuerfeststeinen bietet die Möglichkeit die Importabhängigkeit zu reduzieren und beinhaltet gleichzeitig ein großes Wertschöpfungspotential. Entscheidend für ein hochwertiges Recycling von Feuerfeststeinen ist die möglichst reine Sortierung in die verschiedenen Typen von Feuerfeststeinen anhand der chemischen Zusammensetzung.

Die LIBS-Technologie liefert quantitative Informationen über die Zusammensetzung der Feuerfeststeine und ermöglicht damit eine schnelle Sortierung. In Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass die LIBS-Technologie grundsätzlich in der Lage ist die wichtigsten acht Typen von Feuerfeststeinen zu unterscheiden.

Ein weiterer Schritt zur industriellen Umsetzung gelang mit der Installation eines Demonstrators in einer industriellen Umgebung, der in der Lage ist auch Chargen von mehreren 10 Tonnen zu verarbeiten. Auf diese Weise ist es möglich belastbare Aussagen zu erreichbaren Reinheiten und Mengen der sortierten Produkte zu erzeugen. In einem Pilottest mit 30 Tonnen Material konnten jeweils 11 Tonnen gebrannter Magnesit und Dolomit aussortiert werden. Der gebrannte Magnesit erfüllte die Anforderungen an Rohstoffe für die Herstellung von Feuerfeststeinen völlig, der gebrannte Dolomit mit leichten Einschränkungen. Beide Fraktionen konnten erfolgreich in der Industrie wiedereingesetzt werden. Für die Unterscheidung von weiteren Feuerfeststeinen in industrieller Umgebung müssen teilweise noch technologische Herausforderungen bewältigt werden.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes zeigen, dass das Recycling von Feuerfeststeinen auch in hochwertige Anwendungen prinzipiell möglich ist. Für die industrielle Umsetzung sind immer noch einige Herausforderungen zu überwinden und Akzeptanz muss noch erarbeitet werden. Wenn dies gelingt kann mit dem Recycling von Feuerfeststeinen die Importabhängigkeit der Hersteller von Feuerfeststeinen verringert und gleichzeitig die Menge an Reststoffen reduziert werden.

## Danksagung

Das Projekt Refrasort wurde im Rahmen des 7. EU-Forschungsrahmenprogramms für Forschung und technologische Entwicklung finanziell unterstützt (GA No-603809). Alle Konsortialpartner haben entscheidend zum Erfolg des Projektes beigetragen und ihnen gebührt Dank dafür. Die beteiligten Firmen und Forschungseinrichtungen sind VITO (Belgien), Orbix (Belgien), Fraunhofer ILT (Deutschland), LSA (Deutschland), Tritec-Metal (Ungarn) und Magnesita (Deutschland).

## 7. Literatur

- [1] Connemann, S.; Fricke-Begemann, C.; Horckmans, L.; Ducastel, A.; Bouillot, F.; Knapp, H.; Makowe, J.; Stark, A.: Automated LIBS-based classification for spent refractories from the steel industry for high-value recycling. In: Wotruba, H.; Pretz, T. (Eds.): Sensor-Based Sorting & Control. Aachen, 2016
- [2] Guéguen, E.; Hartenstein, J.; Fricke-Begemann, C.: Raw material challenges in refractory application. In: Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. 2014
- [3] Horckmans, L.; Knapp, H.; Dierckx, P.; Nielsen, P.; Fricke-Begemann, C.; Ducastel, A.; Bouillot, F.; Makowe, J.; Stark, A.: Refrasort: Automated sorting of refractory waste for high value recycling. In: Wotruba, H.; Pretz, T. (Eds.): Sensor-Based Sorting & Control. Aachen, 2016
- [4] Knapp, H.; Horckmans, L.; Ducastel, A.; Bouillot, F.; Connemann, S.; Fricke-Begemann, C.; Makowe, J.; Stark, A.: Sensor-Based Sorting of spent Refractory Bricks. XXVII International Mineral Processing Congress, 11.-15.09.2016 Quebec, Canada, 2016
- [5] Volckaert, A.; Deal, A.: PRE Annual Report 2014. Brüssel, 2014
- [6] Werheit, P.; Fricke-Begemann, C.; Gelsing, M.; Noll, R.: Fast single piece identification with a 3D scanning LIBS for aluminium cast and wrought alloys recycling. In: Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 26(11), 2011, S. 2166–2174

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

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,  
Bernd Friedrich, Thomas Pretz, Peter Quicker, Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba (Hrsg.):

**Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 4**

– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-944310-35-0 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2017

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Sandra Peters, Janin Burbott-Seidel, Claudia Naumann-Deppe,  
Anne Kuhlo, Gabi Spiegel, Cordula Müller, Ginette Teske

Druck: Universal Medien 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.