

Sustainable Refractory Recycling: Innovative Solutions for a Circular Economy

Simone F. Neuhold, Alexander Leitner, Florian Feucht, Klaus P. Sedlazeck,
Volker Mörkens, Markus Dargel, Joachim Makowe, Dennis Adamek
and Julio Hernandez

As a global market leader in the refractory industry, RHI Magnesita is known for high quality products, systems and solutions that are indispensable in industrial processes at extremely high temperatures. The company's sustainability strategy focuses on reducing its environmental footprint through innovative technologies and efficient processes, while promoting production efficiency and sustainability. CO₂ emissions are to be reduced by 15 percent by 2025 compared to 2018 levels through extensive measures. An essential part of this is the development and implementation of customized recycling technologies that not only improve the quality of materials, but also significantly increase the efficiency of recycling. In 2023, a recycling rate of 12.6 percent was achieved, a considerable increase of 20 percent compared to the previous year. Additionally, the 10 percent mark was reached three years earlier than planned, yielding a considerable reduction in global CO₂ emissions by a total of 393,000 tons. The newly set target of achieving a recycling rate of 15 percent by 2025, however, requires a holistic revolution in handling refractory secondary raw materials, above all, the automation of the currently manual sorting process. Of particular note here is the technology developed as part of the project ReSoURCE to automate the sorting process based on an artificial intelligence supported multi sensor approach. This innovation, funded by the European Union's HORIZON program (grant agreement number: 101058310), promises a significant increase in recycling rates and thus marks a major contribution to achieving the ambitious sustainability targets.

Nachhaltiges Feuerfestrecycling: Innovative Lösungen für die Kreislaufwirtschaft

Simone F. Neuhold, Alexander Leitner, Florian Feucht, Klaus P. Sedlazeck,
Volker Mörkens, Markus Dargel, Joachim Makowe, Dennis Adamek
und Julio Hernandez

1.	Herausforderungen und Lösungsansätze	116
1.1.	Transparenz durch Ausweisung des CO ₂ -Fußabdrucks auf Produktdatenblättern	116
1.2.	Technische Lösungen für eine nachhaltigere Produktion	118
2.	Projekt ReSoURCE	119
2.1.	Repräsentative Probenahme und Materialcharakterisierung	120
2.2.	Sensortraining	122
2.2.1.	Laser-induzierte Plasmaspektroskopie.....	122
2.2.2.	Hyperspektrale Bildgebung	122
3.	Zusammenfassung.....	125
4.	Quellen.....	125

In der Feuerfestindustrie ist RHI Magnesita als globaler Marktführer bekannt für hochwertige Produkte, Systeme und Lösungsansätze, die in industriellen Prozessen bei extrem hohen Temperaturen unverzichtbar sind. Im Zentrum der Nachhaltigkeitsstrategie des Unternehmens steht das Bestreben, den ökologischen Fußabdruck durch innovative Technologien und effiziente Prozesse zu reduzieren und dabei die Produktionseffizienz sowie die Nachhaltigkeit zu fördern. Die CO₂-Emissionen sollen durch umfangreiche Maßnahmen bis zum Jahr 2025 um 15 Prozent gegenüber dem Stand von 2018 gesenkt werden. Ein essenzieller Bestandteil ist hierbei die Entwicklung und Implementierung maßgeschneiderter Recyclingtechnologien, die nicht nur die Qualität der Materialien verbessern, sondern auch die Effizienz der Wiederverwertung signifikant erhöhen. Besonders hervorzuheben ist dabei die im Rahmen des Projekts ReSoURCE entwickelte Technologie zur Automatisierung des bislang manuellen Sortierprozesses basierend auf der Verknüpfung unterschiedlicher Sensoren mit künstlicher Intelligenz (KI). Diese Innovation, gefördert durch das HORIZON-Programm der Europäischen Union (Fördervereinbarungsnummer: 101058310), verspricht eine erhebliche Steigerung der Recyclingquoten und trägt somit maßgeblich zur Erreichung der ambitionierten Nachhaltigkeitsziele des Unternehmens bei.

1. Herausforderungen und Lösungsansätze

Das tiefere Verständnis der Herausforderung ist der erste Schritt zur Lösungsfindung. Die Herstellung primärer Rohstoffe für die Fertigung von Feuerfestprodukten erfordert ergieintensive Hochtemperaturprozesse von teilweise weit über 2.000 °C. Magnesiumoxid (MgO), ein wesentlicher Bestandteil von Feuerfestprodukten, wird hauptsächlich aus Magnesit (MgCO_3) gewonnen. Bei diesem Prozess wird während der Kalzinierung CO_2 freigesetzt. Diese intrinsischen CO_2 -Emissionen machen einen signifikanten Teil der gesamten CO_2 -Emissionen des Unternehmens aus. Um das Material als feuerfesten Rohstoff nutzen zu können, muss es gesintert oder geschmolzen werden, um die MgO-Kristalle zu vergrößern. Dies gilt auch für andere verwendete Rohstoffe wie Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 oder Cr_2O_3 . Folglich beträgt der durchschnittliche CO_2 -Fußabdruck (engl. carbon footprint of products; CFP) von Feuerfestprodukten im Portfolio 1,75 Tonnen CO_2 /t bei einem Energiebedarf von rund 2.000 kWh/t.

1.1. Transparenz durch Ausweisung des CO_2 -Fußabdrucks auf Produktdatenblättern

Die Notwendigkeit von Transparenz beim Thema Nachhaltigkeit in industriellen Praktiken ist unbestritten. Durch die Integration von CFP-Daten in technischen Datenblättern werden nicht nur umweltbewusste Lösungen für die Kunden geliefert, sondern der innovative Ansatz bietet eine umfassende und quantifizierbare Messung der CO_2 -Emissionen, die mit der Herstellung, Nutzung und dem Lebensende der feuerfesten Produkte verbunden sind. Indem solche Informationen bereitgestellt werden, können Kunden informierte Entscheidungen treffen und die Umweltauswirkungen ihrer Auswahl berücksichtigen.

Die Einbeziehung des CFP in technische Datenblätter bietet somit mehrere Vorteile. Erstens ermöglicht es Kunden, ihre Beschaffungsstrategien mit ihren Nachhaltigkeitszielen in Einklang zu bringen und fördert eine umweltfreundlichere Lieferkette. Mit genauen und zugänglichen Informationen können Kunden die CO_2 -Emissionen verschiedener feuerfester Produkte bewerten und umweltbewusste Entscheidungen treffen. Zweitens zeigt diese transparente Offenlegung von Kohlenstoffemissionen das Engagement des Unternehmens, seinen eigenen ökologischen Fußabdruck zu reduzieren. Durch das proaktive Messen und Berichten von CO_2 -Emissionen wird somit eine Kultur der Verantwortlichkeit und kontinuierlichen Verbesserung gefördert.

Die Anwendung der international anerkannten ISO-Norm 14067 [4] als Bemessungsgrundlage des CFP in den technischen Datenblättern unterstreicht das Engagement für genaue, verlässliche Umweltdaten und eine methodische, transparente Vorgehensweise bei der Bewertung der Umweltauswirkungen der Produkte. Darüber hinaus ermöglicht ein genormtes Verfahren, den CFP der Produkte auf eine vergleichbare und nachvollziehbare Weise zu kommunizieren und hilft Bereiche mit hohem Emissionsreduktionspotenzial zu identifizieren.

ANKRAL RC		ANKRAL RC-LC	
Allgemeine Angaben			
Klassifikation	Magnesia-Spinell Erzeugnis Typ MSP80 ISO 10081-2	Klassifikation	Magnesia-Spinell Erzeugnis Typ MSP80 ISO 10081-2
wesentliche Rohstoffe	Schmelzspinell, Sintermagnesia hochwert	wesentliche Rohstoffe	Schmelzspinell, Sintermagnesia hochwert
Bindungsart	keramisch	Bindungsart	keramisch
Steintyp	gebrannt	Steintyp	gebrannt
zu verwendender Mörtel	ANKERFIX CRP	zu verwendender Mörtel	ANKERFIX CRP
Umweltindikatoren			
CO _{2e} -Fußabdruck	2,331 t CO _{2e} /t prod. ISO 14067	CO _{2e} -Fußabdruck	1,667 t CO _{2e} /t prod. ISO 14067
Der Carbon Footprint des Produkts (CFP) wurde nach den Grundsätzen der ISO 14067 berechnet.		Der Carbon Footprint des Produkts (CFP) wurde nach den Grundsätzen der ISO 14067 berechnet.	
Chemische Analyse			
MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	
86,6 %	10,5 %	0,7 %	
Bestimmung an gegläuhter Substanz (1.025 °C / 1.877 °F)			
Umweltindikatoren			
Bestimmung an gegläuhter Substanz (1.025 °C / 1.877 °F) nach ISO 12667			
Chemische Analyse	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
MgO	10,5 %	0,7 %	1,2 %
86,6 %			0,6 %

Bild 1: Beispiel eines technischen Produktdatenblatts für ANKRAL RC (Standardprodukt) und ANKRAL RC-LC (mit erhöhtem Recyclinganteil); der Vergleich zeigt direkt den geringeren CO₂-Fußabdruck von 1,667 Tonnen CO₂ gegenüber 2,331 Tonnen CO₂ durch Verwendung eines Produktes mit erhöhtem Recyclinggehalt

1.2. Technische Lösungen für eine nachhaltigere Produktion

Um die angestrebte Reduktion der CO₂-Emissionen von 15 Prozent bis 2025 zu ermöglichen, wird stark in Maßnahmen wie die Steigerung der Energieeffizienz, die Nutzung umweltfreundlicherer Energiequellen und den vermehrten Einsatz von Recyclingmaterialien investiert.

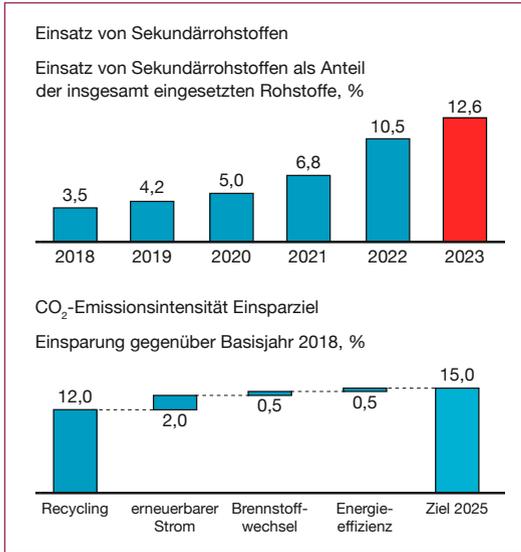


Bild 2:

Entwicklung der Recyclingrate von 2018 bis 2023

Den größten Einflussfaktor zur Erreichung dieses Ziels stellt dabei das breit angelegte Recyclingprogramm dar. Während in der Vergangenheit Recycling hauptsächlich als Strategie zur Kostensenkung betrachtet wurde, werden nun zusätzliche Vorteile für die Gesellschaft in den Vordergrund gerückt. Einer der Hauptvorteile des Recyclings ist die Abwesenheit von intrinsischem CO₂ in den Kreislaufmaterialien. Die Wiederverwendung von einer Tonne recyceltem feuerfestem Material ermöglicht es rund 1,5 Tonnen CO₂ einzusparen.

Weitere Vorteile umfassen die

- Schonung natürlicher Ressourcen und Verlängerung der Lebensdauer von Minen,
- Verbesserung der Rohstoffresilienz und Verringerung der Abhängigkeit von importierten Materialien,
- Reduktion des Energiebedarfs und
- Verringerung der Deponierung und damit verbundene Kosten.

Das Recycling von Feuerfestprodukten birgt allerdings auch Herausforderungen. Die aus Kundenaggregaten extrahierten verbrauchten Feuerfeststoffe enthalten in der Regel eine vielfältige Mischung verschiedener Produkte mit unterschiedlichen chemischen

Zusammensetzungen. Die Empfindlichkeit von Feuerfestmaterialien gegenüber Verunreinigungen kann die Qualität des recycelten Produkts erheblich beeinflussen. Auch das relativ kleine Volumen der Ausbruchsmengen aus einzelnen Aggregaten, das von einigen Tonnen bis zu einigen hundert Tonnen reicht, erfordert Flexibilität und eine gründliche Qualitätskontrolle entlang der Recyclingprozesskette. Darüber hinaus ist zu beachten, dass durchschnittlich 50 Prozent des Feuerfestprodukts im Kundenprozess verbraucht werden, was den insgesamt verfügbaren Sekundärrohstoff einschränkt.

Die somit notwendigen Investitionen in Initiativen zur Steigerung der Recyclingraten durch innovative Technologien, optimierte Sammel-, Sortier- und Lagerprozesse spiegeln sich auch in der Recyclingquote wider. Im Jahr 2023 wurde eine Quote von 12,6 Prozent erreicht, eine beachtliche Steigerung um 20 Prozent gegenüber dem Vorjahr. Zusätzlich wurde die 10 Prozent Marke drei Jahre früher als geplant erreicht (Bild 2). Zudem führten die gesetzten Maßnahmen zu einer beträchtlichen Reduktion der globalen CO₂-Emissionen um insgesamt 393.000 Tonnen. Das neu gesetzte Ziel eine Recyclingquote von 15 Prozent bis zum Jahr 2025 zu erreichen, erfordert jedoch eine Revolution im ganzheitlichen Umgang mit feuerfesten Sekundärrohstoffen, allem voran die Automatisierung der bislang manuellen Sortierung.

2. Projekt ReSoURCE

Ziel des Projekts ReSoURCE (Refractory Sorting Using Revolutionizing Classification Equipment) ist die Transformation der manuellen Sortierung von Feuerfestmaterialien in eine automatische Sortierung, basierend auf der Verknüpfung unterschiedlicher Sensoren mit künstlicher Intelligenz (KI) (Bild 3). Die Komplexität des Recyclings aufgrund der Vielfalt an Produkten und Rohstoffen macht die Kombination aus 3D-Kamera, laserinduzierter Plasmaspektroskopie (engl. laser induced breakdown spectroscopy; LIBS) und hyperspektraler Bildgebung (engl. hyperspectral imaging; HSI) notwendig. Somit werden unterschiedliche materialspezifische Informationen gesammelt, welche nicht nur intrinsische produktspezifische Eigenschaften für die Klassifizierung berücksichtigen, sondern auch Rückschlüsse auf Veränderungen der Oberfläche oder Infiltrationen (Verunreinigungen) im Produkt durch den Hochtemperaturprozess beim Kunden zulassen.

Die Automatisierung und Digitalisierung des Recyclingprozesses steigert einerseits die Produktivität und macht Recyclingrohstoffe aus ökonomischer Sicht attraktiver, andererseits wird dadurch auch sichergestellt, dass erhöhte Qualitätsanforderungen erreicht und kontinuierlich überwacht werden. Des Weiteren wird die Verfügbarkeit sekundärer Rohstoffe gesteigert, da ein breiteres Korngrößenspektrum sortiert werden kann und bestehende Sortierklassen enger spezifiziert oder erweitert werden können. Dies wird durch die Verwendung zusätzlicher Klassifizierungsmerkmale ermöglicht, welche zukünftig neben optischen auch chemische und weitere materialspezifische Eigenschaften umfassen.



Bild 3: Darstellung der geplanten automatischen sensorgestützten Sortieranlage

2.1. Repräsentative Probenahme und Materialcharakterisierung

Wie in Kapitel 1 beschrieben, liegen die Hauptherausforderungen beim Feuerfestrecycling in der unterschiedlichen Verfügbarkeit und der Heterogenität des Ausbruchmaterials. Um die Ausgangsmaterialien mit dem größten Vorteil für das Recycling zu ermitteln, wurden im Projekt neben der Verfügbarkeit sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte basierend auf internen Daten, Literaturrecherchen [3, 5, 6], Umfragen bei Kunden und ersten Ergebnissen aus Umweltbilanz- und Wirtschaftlichkeitsanalysen ermittelt und beurteilt. Somit liegt der Fokus im Projekt auf Ausbruchmaterial aus der Zement- und Stahlindustrie, welche einerseits zu den Hauptkonsumenten zählen (etwa 60 Prozent Marktanteil) und andererseits das höchste Potential zur Einsparung von CO₂-Emissionen aufweist.

Weltweit fallen jährlich etwa 28 Millionen Tonnen an sekundärem Feuerfestmaterial an, wovon knapp 16,8 Millionen Tonnen der Stahl- und Zementindustrie zugeordnet werden können [3]. Auch der CFP der beiden Industrien kann durch ein verbessertes Recycling wesentlich reduziert werden. In beiden Industrien dominieren MgO-basierte Produkte. Durch die Substitution von MgCO₃ als Primärrohstoff können 1,1 Tonnen CO₂ pro Tonne gewonnenem MgO, allein durch die Vermeidung des intrinsisch gespeicherten Kohlendioxids, eingespart werden. Zusätzlich bedingen die hohen Temperaturen und aggressiven Bedingungen in der Stahlerzeugung große MgO-Kristalle, welche unter anderem durch Schmelzen der Rohstoffe erzielt wird und bis zu 3.000 kWh pro Tonne geschmolzenem MgO verbraucht.

Einen weiteren wichtigen Aspekt im Projekt stellt die repräsentative Probenahme des Ausbruchmaterials dar, da nur so eine gesicherte Datengrundlage für das Anlernen der Sensoren und repräsentative Rückstellproben für die Tests der Anlage generiert werden können [2]. Neben chemischen und mineralogischen Eigenschaften des Ausgangsmaterials lieferte die Probenahme wertvolle Aufschlüsse über die Probenbeschaffenheit z.B. Abmessungen, Gewicht, Anteile unterschiedlicher Produkte sowie Fremdstoffe. Die Ermittlung dieser Kennwerte, wurde für Designüberlegungen in Hinblick auf z.B. Kapazitäten der Roboterarme und vorgeschaltete Aufbereitungsschritte genutzt. Die ganzheitliche Charakterisierung des verfügbaren Ausgangsmaterials wurde somit sichergestellt.

Die repräsentative Probenahme wurde an vier unterschiedlichen Ausgangsmaterialien (zwei aus der Stahlindustrie und zwei aus der Zementindustrie) durchgeführt, wobei je nach Probenbeschaffenheit, lokalen Gegebenheiten und Zugänglichkeit, Anweisungen in Anlehnung an ÖNORM S2127 [1] erarbeitet wurden. Für alle beprobten Materialien war vorab das Zustellungskonzept, also die Anzahl und Mengenverhältnisse unterschiedlicher Produkte bekannt. Für Fraktionen > 80 mm wurde an drei Kundenmaterialien die manuelle Beprobung mittels Raster an zuvor vereinzelt Haufwerken getestet. Ein Kundenmaterial wurde im laufenden Prozess nach vorab definierten Intervallen der Durchsatzmenge direkt vom Förderband beprobt. Proben der Fraktionen < 80 mm wurden in definierten Zeitintervallen während der Siebung entnommen.

Die unterschiedlichen Ansätze wurden durch chemische Analysen und manuelle Sortierung im Labor evaluiert und mit Informationen des Zustellungskonzepts, sowie Vergleichswerten aus der Handsortierung im Recyclingcenter abgeglichen. Dabei zeigte sich, dass die Repräsentativität der Proben gegeben ist und somit gesicherte Rückstellproben gezogen werden konnten. Allerdings wurde auch der enorme logistische und zeitliche Aufwand einer repräsentativen Probenahme im laufenden operativen Geschäft ersichtlich. Der Mehrwert an Informationen nicht nur bezüglich der Materialbeschaffenheit, sondern auch in Bezug auf die Heterogenität des angelieferten Materials überwiegt diesen Mehraufwand im Projekt jedoch deutlich. Unter anderem zeigte der Abgleich mit den Zustellungskonzepten, dass die Heterogenität des Ausgangsmaterial teilweise höher ist als angenommen, dies kann sowohl logistische Gründe beim Kunden (Verfügbarkeit, Lagerung, usw.) als auch unvorhersehbare Einflüsse bei Zwischenlagerung, Transport usw. haben. Eine korrekte Einschätzung der Heterogenität stellt ebenfalls einen sehr wichtigen Aspekt für die Zusammenstellung von Sortierkonzepten in der zukünftig automatisierten Sortieranlage dar.

Um die Sensoren für die automatisierte Anlage bestmöglich anzulernen, wurden von gesicherten Proben gebrauchter Feuerfeststeine der unterschiedlichen Sortierklassen unter anderem Querschnitte angefertigt, um so einerseits Zonierungen der Verunreinigungen im Stein abzubilden und andererseits mögliche Adhäsionen an den Steinoberflächen zu erkennen. Dies ist essenziell für das spätere Sortierergebnis, denn sowohl die Materialzusammensetzung als auch die Beschaffenheit kann innerhalb eines Steines stark variieren. Zum Beispiel unterscheidet sich die Heißseite, also die dem Ofen zugewandte Steinseite von der Kaltseite, die dem Ofen abgewandte Steinseite durch mögliche Infiltrationen oder unterschiedliche Anhaftungen an der Oberfläche. Um destruktive und nicht destruktive Methoden kombinieren zu können, wurden mehrere Querschnitte eines Steins gefertigt und einerseits chemisch und mineralogisch mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES), Kohlenstoff-Schwefel-Bestimmung (LECO), Titration, Röntgendiffraktometrie (engl. X-ray diffraction; XRD) und Rasterelektronenmikroskopie (REM) untersucht. Andererseits wurden auch mikro-Röntgenfluoreszenzanalysen (μ RFA), HSI und LIBS an Steinschnitten des gleichen Steins durchgeführt. Somit konnten unterschiedliche Datensätze einer Vielzahl an Bewertungsmethoden verglichen und wertvolle Probendetails unterschiedlich abgebildet werden.

2.2. Sensortraining

2.2.1. Laser-induzierte Plasmaspektroskopie

Für die schnelle und präzise Beurteilung von Recyclingmaterialien basierend auf deren elementaren Eigenschaften kommt in der automatisierten Sortieranlage LIBS zum Einsatz. Hierzu wird ein Hochleistungslaser auf die Probe fokussiert, wodurch lokal eine kleine Menge des Materials verdampft und angeregt wird. Das resultierende Plasma emittiert Strahlung, die charakteristisch für die enthaltenen chemischen Elemente ist und mithilfe eines Spektrometers analysiert wird. Dadurch werden Informationen zur chemischen Zusammensetzung des Materials gewonnen. Im Rahmen des Projekts werden die Laserquelle adaptiert, die Pulsmodulation verbessert und das Spektrometer sowie die Optik des Strahlengangs weiterentwickelt. Diese Maßnahmen führen zu höheren Intensitäten auf dem Detektor und somit zu einer gesteigerten Sensitivität.

Für das effektive Training des LIBS-Systems wurden unterschiedliche Materialien ausgewählt. Zum einen wurden gängige Rohstoffe der Einsatzprodukte sowie die originalen Produkte gemessen. Zum anderen wurden gebrauchte Querschnitte von Steinen mit glatter Oberfläche und gebrochenes Material, welches das zukünftige Aufgabematerial der Sortieranlage widerspiegelt, herangezogen. Die Herkunft der gebrauchten Steine sowie die chemische und mineralogische Zusammensetzung in unterschiedlichen Zonen der gebrauchten Steine war dabei genau bekannt (Kapitel 2.1.). Die umfangreichen Probensätze sind nötig, um eventuelle Fehlsignale auszugleichen die z.B. durch die raue Oberfläche, Matrixeffekte, Anhaftungen und Infiltrationen hervorgerufen werden. Basierend auf den Ergebnissen der ersten Messungen werden nun Regionen von Interesse (engl. region of interest; ROI) für die unterschiedlichen Sortierklassen evaluiert und definiert. Im nächsten Schritt werden Gewichtungen und maximale Abweichungen festgelegt. Vorstudien zeigten bereits vielversprechende Ergebnisse, welche nun für die endgültige Implementierung verfeinert werden (Bild 4).

Die zukünftige Sortierung anhand chemischer Informationen ermöglicht eine engere Spezifizierung von Sortierklassen, eine kontinuierliche Qualitätskontrolle und die Erweiterung auf neue Sortierklassen, die basierend auf rein optischen Merkmalen nicht unterscheidbar wären. Ein Nachteil der LIBS-Technologie ist die punktförmige Messung kleiner Volumina. Dieser Nachteil kann durch die Kombination mit hyperspektraler Bildgebung ausgeglichen werden.

2.2.2. Hyperspektrale Bildgebung

Die beiden Kamerasysteme von HySpex, die für die HSI in der Sortieranlage installiert werden, detektieren die Absorption jedes Pixels im Wellenlängenbereich von 400 bis 1.000 nm (engl. visible and near-infrared; VNIR) und 1.000 bis 2.400 nm (engl. short wavelength infrared; SWIR) mit einer räumlichen Auflösung von 1.800 bzw. 384 Pixel. Dadurch wird mittels Linienscan über einen großen Wellenlängenbereich die spektrale Information der Probe gespeichert. Die Absorptionsspektren hängen dabei von materialspezifischen Eigenschaften ab, wie z.B. Bindungsformen und Mineralphasen.

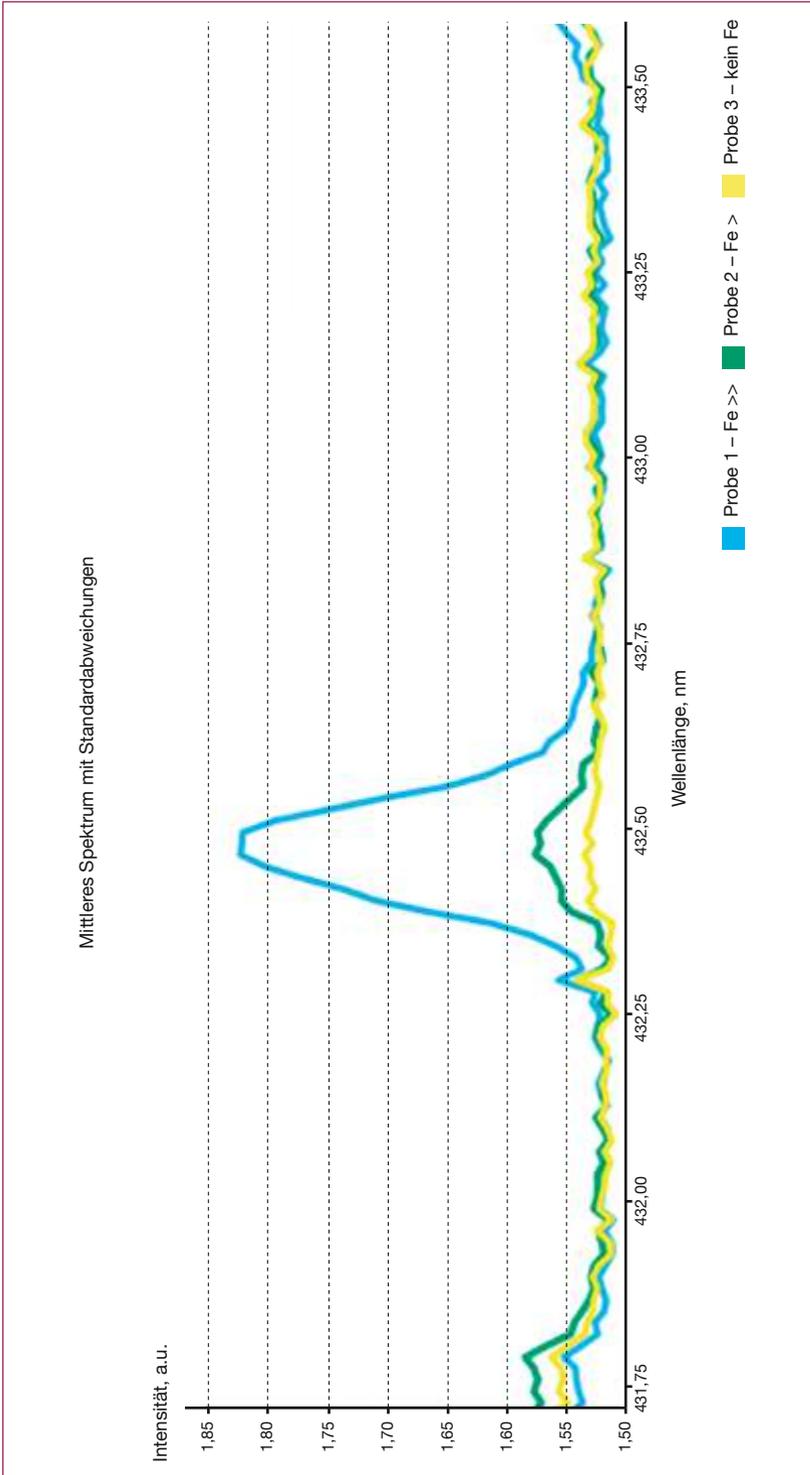


Bild 4: Ausschnitte von LIBS-Spektren in einem für Eisen (Fe) sensitiven Wellenlängenbereich (432 – 433 nm) für Proben mit ansteigendem Fe-Gehalt

Zusätzlich können optische Eigenschaften des Materials genutzt werden z.B. Intensitätsunterschiede aufgrund der Helligkeit unterschiedlicher Rohstoffe. Anhaftungen oder Infiltrationen können mittels HSI detektiert werden, indem die gesamte Oberfläche gescannt wird und Unterschiede in der chemischen oder mineralogischen Zusammensetzung erkannt werden. Die Information der HSI-Kamera kann neben der Klassifizierung zusätzlich als intelligente ROI-Auswahl genutzt werden, um den Laserpuls der LIBS-Einheit auf relevante Zonen zu platzieren.

Da die Information der HSI-Kamera nicht allein auf der chemischen Zusammensetzung beruht, sondern von vielfältigen Faktoren beeinflusst wird (z.B. Bindungsform, Oxidationsstufe, Wassergehalt) wird für die Sortierung ein umfangreicher Datensatz hinterlegt und darauf basierend Modelle trainiert. Hierfür können unterschiedliche Herangehensweisen gewählt werden, unter anderem *minimum wavelength mapping (MWL)* basierend auf dem niedrigsten und dominantesten Absorptionsspek in einem definierten Wellenlängenbereich, Klassifizierungen anhand hinterlegter Rohstoffmerkmale oder *partial least square-discriminant analysis (PLS-DA)* basierend auf der gesamten Probeninformation in jedem Pixel. Auch für die HSI-Messungen wurden Rohstoffe, unbenutzte Produkte und Ausbruchmaterial (Schnitten und Bruchstücke) gemessen. Bild 5 zeigt vielversprechende Unterschiede in den Absorptionsspektren unterschiedlicher Rohstoffe. Eine Sortierung anhand hinterlegter Rohstoffdaten scheint für gewisse Produkte demnach möglich. Weitreichende Modelle basierend auf über 200 gemessenen Bruchstücken in unterschiedlichen Korngrößen pro Sortierklasse sind zurzeit noch in Arbeit. Unter anderem muss der Einfluss von Feuchtigkeit auf die Materialintensität und Absorptionsbanden noch evaluiert werden. Dennoch zeichnet sich bereits jetzt ab, dass die Klassifizierung anhand des gesamten Bruchstücks sowie eine Detektion unterschiedlicher Zonierungen enorme Vorteile für die automatisierte Sortierung darstellt, insbesondere gekoppelt mit LIBS.

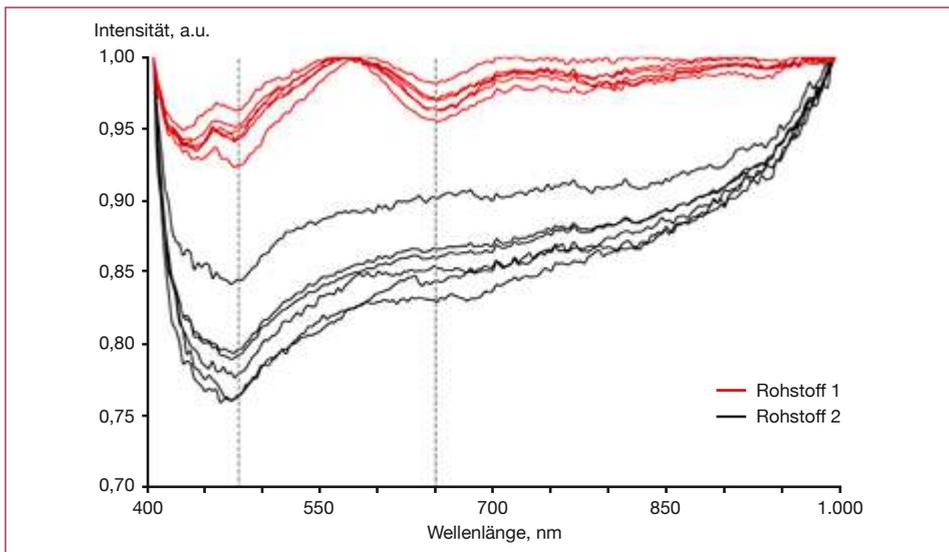


Bild 5: Absorptionsspektren von zwei unterschiedlichen Rohstoffen (rot und schwarz) im Bereich 400 bis 1.000 nm

3. Zusammenfassung

Das Setzen ambitionierter Nachhaltigkeitsziele, die Investition in innovative Technologien und die Förderung von Kooperationen sowie mehr Transparenz, sind richtungsweisend für eine Transformation der Feuerfestindustrie. Nur durch eine Vielfalt an Maßnahmen und ein starkes Engagement für Digitalisierung und Automatisierung können Herausforderungen, die der Klimawandel und der Erhalt der Umwelt mit sich bringen, angegangen werden.

Die Einbeziehung von Informationen zum CO₂-Fußabdruck in technische Datenblätter erhöht die Transparenz und ermöglicht es den Kunden, informierte Entscheidungen zu treffen, die mit ihren Nachhaltigkeitszielen übereinstimmen. Dieses Engagement treibt nicht nur interne Nachhaltigkeitsbemühungen voran, sondern fördert auch Innovationen in der gesamten Branche.

Eine umfassende Recyclingstrategie, unterstützt durch technologische Fortschritte und Kooperationen, zielt darauf ab, die Herausforderungen im Umgang mit diversen verbrauchten Feuerfestmaterialien zu überwinden und die hohe Leistungsfähigkeit der recycelten Materialien zu gewährleisten. Nur so kann das immense Potenzial des Recyclings von Feuerfestmaterialien ausgeschöpft werden, was zu einer Reduzierung von CO₂-Emissionen und zur Maximierung der Ressourcennutzung und somit zur Minimierung des ökologischen Fußabdrucks führt.

Danksagung

Die Autoren danken allen teilnehmenden Projektpartnern für ihren wertvollen Beitrag im Projekt ReSoURCE: LSA – Laser Analytical Systems & Automation GmbH, InnoLas Laser GmbH, NEO – Norsk Elektro Optikk, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Montanuniversität Leoben (Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft und Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung), SINTEF-Applied research, technology and innovation und Technology innovation catalyst CPI und Crowdhelix Limited. Das Projekt wird durch das HORIZON-Programm der Europäischen Union (Fördervereinbarungsnummer: 101058310) gefördert.

4. Quellen

- [1] Austrian Standards International: ÖNORM S 2127: Grundlegende Charakterisierung von Abfallhaufen oder von festen Abfällen aus Behältnissen und Transportfahrzeugen. 2011. www.austrian-standards.at [Zugriff am 15.03.2024].
- [2] Feucht, F.; Sedlazeck, P.; Friedrich, K.; Sattler, T.; Pomberger, R.: At the beginning of Project ReSoURCE. Tagungsband DGAW-Kongress, 2023.
- [3] Horckmans, L.; Nielsen, P.; Dierckx, P.; Ducastel, A.: Recycling of refractory bricks used in basic steelmaking: A review. Resources, Conservation and Recycling, 2019.
- [4] International Organization for Standardization: ISO 14067: Greenhouse gases, Carbon footprint of products, Requirements and guidelines for quantification. 2018. www.iso.org [Zugriff am 15.03.2024].

- [5] Poudyal, L.; Adhikari, K.: Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production. In: Resources, Environment and Sustainability, 2021.
- [6] RHI Magnesita: The driving force of the refractory industry. 2023. www.rhimagnesita.com [Zugriff 15.03.2024].

Ansprechpartnerin



Dr. Simone Neuhold

RHI Magnesita
Research Associate
Pioneer Research
Magnesitstraße 2
8700 Leoben, Österreich
+43 50 213-5389
simone.neuhold@rhimagnesita.com



Deutschlands Online-Magazin
für die Circular Economy

++ Immer online ++ Immer verfügbar ++ Immer aktuell ++



Jetzt 30 Tage kostenfrei testen!
www.320grad.de

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

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,
Helmut Antrekowitsch, Roland Pomberger, Felix Firsbach (Hrsg.):

Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 11

– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-911006-81-1 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

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

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2024
Redaktion: Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Erfassung und Layout: Julia Joschko, Carolin Pawel, Cordula Müller, Roland Richter,
Janin Burbott-Seidel

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.