

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I: Kurzbericht

Verbundprojekt:	„KMU-innovativ - CEFSCHE - Chromerzfreie Schiebersande für die Clean Steel Technologie“
Förderprogramm:	KMU-innovativ: Materialforschung (ProMat_KMU) im Themenfeld „Nachhaltiger Umgang mit Rohstoffen und Materialien“
Förderkennzeichen:	03XP0512B
Aktenzeichen	KUYD03755521
Durchgeführt von:	Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. Rheinstraße 58, 56203 Höhr-Grenzhausen
Projektlaufzeit:	01.01.2023 - 31.12.2024
Projektleiter:	Dr. Christian Dannert

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03XP0512B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung trägt der Autor.

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung chromerzfreier Schiebersande für den Einsatz bei der Stahlherstellung, um die Anzahl nicht-metallischer Einschlüsse im erstarrten Stahl zu verringern und so die Produktqualität für Hochleistungsanwendungen zu verbessern. Dabei sollten zwei Innovationen verwirklicht werden: Erstens sollte die Funktion des bislang verwendeten Chromerzes durch unkritische Komponenten ersetzt werden, und zweitens sollten dafür sekundäre Rohstoffe genutzt werden, um primäre Ressourcen zu schonen.

2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der Stand der Technik umfasste chromerzhaltige Schiebersande, deren Einschlüsse im Stahl problematisch für die Produktqualität sind. Im Projekt wurde an bestehende Verfahren zur Analyse von Sinter-, Infiltrations- und Rieselverhalten angeknüpft. Ein neues Laborverfahren zur gezielten Untersuchung der Verunreinigung von Stahl durch Schiebersande sollte etabliert werden. Marktanalysen ergaben, dass es bislang keine vergleichbaren, optimierten chromerzfreien Produkte gibt.

3. den Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben gliederte sich in fünf Arbeitspakete. Zunächst wurden Mindestanforderungen für die Performance neuer Schiebersande definiert (AP 1), anschließend ein Vorhersagemodell für die Wechselwirkung von Stahl und Schiebersand entwickelt, um Substitutionskomponenten zu selektieren (AP 2). Darauf wurden ein Laborverfahren zur gezielten Bildung nicht-metallischer Einschlüsse im Stahl durch eine Wechselwirkung von Schiebersand und Stahl und eine anschließende Einschlussanalyse entwickelt (AP 3). In AP 4 wurden innovative chromerzfreie Schiebersandprototypen für die Clean Steel Technologie entwickelt, die abschließend in AP 5 in Betriebsversuchen getestet wurden.

4. die wesentlichen Ergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens CEFSCH wurden durch die Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. (FGF) wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse erzielt, insbesondere in den Bereichen Definition von Mindestanforderungen, Entwicklung eines Vorhersagemodells, Etablierung eines Verfahrens zur Reinheitsgradbestimmung sowie der analytischen Begleitung der Prototypenentwicklung und Betriebsversuche. Zunächst wurden die Mindestanforderungen für die Performance von Schiebersande festgelegt. Auf Basis experimenteller Untersuchungen zum Sinterverhalten und zur Infiltration mit flüssigem Stahl konnten eine gute Rieselfähigkeit (~ 25 s), ein Quarzanteil von ca. 25 Gew.-% sowie ein mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert ($\sim 8,63 \times 10^{-4}$ m/s) als Zielgrößen definiert werden.

Es wurde ein thermochemisches Vorhersagemodell entwickelt, das die Wechselwirkungen von Schiebersandkomponenten mit Stahl simuliert und bei der Vorauswahl geeigneter Ersatzstoffe unterstützte. Zur Bewertung des Reinheitsgrades im Stahl wurden ein modifiziertes Laborverfahren zur gezielten Verunreinigung von Stahl durch Schiebersande und anschließende Untersuchung des Reinheitsgrades in Kooperation mit voestalpine erfolgreich unter realen Betriebsbedingungen etabliert. Dabei wurden mit Schiebersand befüllte Handlanzen direkt in Stahlgießpfannen im Stahlwerk eingesetzt und die daraus erzeugten Stahlproben mittels Rasterelektronenmikroskopie analysiert. Der Einsatz von acht chromerzfreien Schiebersandprototypen wurde begleitet, von denen drei Varianten (V1, V5, V8) die zuvor definierten Anforderungen erfüllten. FGF analysierte diese Prototypen detailliert hinsichtlich ihres thermischen und mikrostrukturellen Verhaltens, auf dessen Basis Optimierungszyklen vorgenommen werden konnten. Anschließend konnte ein von der Weerulin GmbH neu entwickelter innovativer Schiebersandprototyp in Betriebsversuchen getestet werden und bietet nun die Grundlage für die Entwicklung eines wirtschaftlich verwertbaren und technologisch stabilen Produktes als Alternative zu chromerzhaltigen Schiebersanden.

5. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Das Projekt wurde im Verbund mit der **Weerulin GmbH** durchgeführt. Die Zusammenarbeit erfolgte arbeitsteilig und ergänzte sich in der Entwicklung, Erprobung und Bewertung der Prototypen. übernahm im Rahmen des Verbundprojekts die industrielle Entwicklung der chromerzfreien Schiebersande sowie die Durchführung der Betriebsversuche.

Zusätzlich wurde im Rahmen des Projekts mit dem Stahlerzeuger **voestalpine** zusammengearbeitet, um die Laboruntersuchungen zur Bildung nicht-metallischer Einschlüsse praxisnäher zu gestalten. Das ursprünglich im Labor vorgesehene Verfahren zur Wechselwirkung zwischen Schiebersand und flüssigem Stahl wurde in enger Abstimmung mit voestalpine modifiziert: Statt unter Laborbedingungen wurden mit Schiebersand befüllte Handlanzen direkt bei voestalpine in Betriebsversuchen in Stahlgießpfannen eingesetzt. Diese Vorgehensweise ermöglichte eine realitätsnahe Reproduktion des industriellen Prozesses. Die so erzeugten Stahlproben wurden anschließend rasterelektronenmikroskopisch untersucht. Die auf diesem Wege alternativ entwickelte Methode erwies sich als zuverlässig und leistungsfähig und lieferte belastbare Ergebnisse zur gezielten Erfassung der durch Schiebersand verursachten Verunreinigungen im Stahl.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II: Eingehende Darstellung

Verbundprojekt:	„KMU-innovativ - CEFSCH - Chromerzfreie Schiebersande für die Clean Steel Technologie“
Förderprogramm:	KMU-innovativ: Materialforschung (ProMat_KMU) im Themenfeld „Nachhaltiger Umgang mit Rohstoffen und Materialien“
Förderkennzeichen:	03XP0512B
Aktenzeichen	KUYD03755521
Durchgeführt von:	Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. Rheinstraße 58, 56203 Höhr-Grenzhausen
Projektlaufzeit:	01.01.2023 - 31.12.2024
Projektleiter:	Dr. Christian Dannert

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03XP0512B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung trägt der Autor.

Inhalt

1. Ergebnisse des Projekts.....	3
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	10
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	11
4. Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	11
5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen.....	11
6. Veröffentlichung der Ergebnisse.....	12

1. Ergebnisse des Projekts

Das Ziel des F&E-Projektes „CEFSCH – Chromerzfreie Schiebersande für die Clean Steel Technologie“ war die Entwicklung von Schiebersanden ohne Chromerz, um nicht-metallische Einschlüsse im Stahl deutlich zu verringern und so die Qualität für Hochleistungsanwendungen zu verbessern. Schiebersand spielt bei der kontrollierten Entleerung der Stahlgießpfanne eine zentrale Rolle. In die ca. 800 °C heiße Stahlgießpfanne werden 90 bis 180 kg Schiebersand bei geschlossenem Schieber eingefüllt. Er besteht typischerweise aus Chromerz, Quarz und <1 Gew.-% Kohlenstoff; weitere Komponenten wie Zirkon oder Feldspäte können enthalten sein. Der Sand füllt den Gießkanal und bildet einen Hügel am Pfannenboden. Nach dem Einfüllen in die heiße Stahlgießpfanne beginnt der Sand zu versintern, was ihn stabilisiert, aber bei übermäßiger Versinterung das spätere Öffnen des Schiebers behindern kann. Beim Befüllen mit flüssigem Stahl (1750 °C abfallend auf 1550 °C) versintert der Sand weiter; der flüssige Stahl darf dabei nicht in den Ausgusskanal eindringen. Die Sinterschicht im Schiebersand muss dabei so beschaffen sein, dass sie unter ferrostatischem Druck (~3 bar) aufbricht, wenn der Schieber geöffnet wird (Selbstöffnen des Bodenausgusses).

Das Ziel war, das Chromerz im Schiebersand durch sekundäre Rohstoffe aus der Feuerfestindustrie zu ersetzen. Das reduziert den Einsatz importierten Chromerzes, vermeidet lange Transportwege und ermöglicht eine nachhaltigere Rohstoffnutzung durch in Deutschland verfügbare Materialien.

AP 1: Bestimmung der Mindestanforderungen

Die bestimmungsgemäße Funktion der Schiebersande (Selbstöffnen des Bodenausgusses der Stahlwerkspfannen) im Einsatz wird durch drei Eigenschaften bestimmt: Grad der Versinterung der Schiebersande unter Temperatureinfluss (Sinterverhalten), Grad der

Infiltration der Schiebersande durch Stahlschmelze (Infiltrationsverhalten) und Art des Herausrieselns der Schiebersande beim Öffnen des Schiebers (Rieselfähigkeit).

Das Sinterverhalten konnte im Labor mit einer Kombination aus der Methode des monotonen Heizens (MMH) und Sinterversuchen bei verschiedenen Temperaturen mit anschließender mineralogischer und textueller Untersuchung der versinterten Proben mittels REM analysiert werden. Um das Infiltrationsverhalten von flüssigem Stahl in Schiebersande im Labor zu untersuchen, wurden von FGF Infiltrationstests entwickelt, bei denen Schiebersand in einem keramischen Tiegel zusammen mit Stahl aufgeheizt wird, bis der Stahl schmilzt und mehr oder weniger in den Schiebersand infiltriert (Tiegeltest). Die Bestimmung der Rieselfähigkeit im Labor erfolgt mit Hilfe einer neu entwickelten Methode, die an die Untersuchung von Bodenproben angelehnt ist und die Auslaufzeit des Materials aus einem Trichter unter definierten Bedingungen misst. Damit steht grundsätzlich ein umfassender Ansatz zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Schiebersanden bereit, der im Projekt zur Absicherung der Neuentwicklungen eingesetzt wurde.

Die Performance der neuen Schiebersande muss mindestens denen von Schiebersanden nach dem Stand der Technik entsprechen. Es wurden als Referenz hierfür vier Schiebersande nach dem Stand der Technik, bestehend aus einem variierenden Gehalt an Chromerz und Quarz und einem gleichbleibenden Kohlenstoffgehalt von 0,25 Gew.-% Flammruß, ausgewählt und untersucht. Der Chromerzgehalt lag zwischen 60 und 85 Gew.-%.

Die Untersuchungen des Sinterverhaltens der vier Schiebersande nach dem Stand der Technik mit der Methode des monotonen Heizens (MMH) mit anschließenden rasterelektronischenmikroskopischen Untersuchungen der Proben zur Bestimmung der Temperaturen, bei denen Sinterreaktionen ablaufen, zeigten ähnliche Ergebnisse für alle untersuchten Schiebersande. Der Bereich zwischen 1000 und 1150 °C ist gekennzeichnet von einem Anstieg der Temperaturleitfähigkeit. Bei höheren Temperaturen spiegelt sich die Bildung erster Sinterbrücken durch eine Zunahme der Temperaturleitfähigkeit wider und die Bildung einer ersten Schmelze im Gefüge bei Temperaturen um 1400 °C durch eine weitere Zunahme der Temperaturleitfähigkeit. Grundsätzlich ist die Zunahme der Temperaturleitfähigkeit größer, je mehr Quarz in der Probe ist. Dies deckt sich auch mit den mikroskopischen Untersuchungen, da in den quarzreichen Proben mehr Schmelze entstanden ist, da Quarz als Schmelzbildner fungiert.

Bereits makroskopisch ist erkennbar, dass mit zunehmendem Quarzgehalt der Schiebersande (also entsprechend abnehmendem Chromerzgehalt) die Schwindung des Schiebersandes zunimmt, der Schiebersand also stärker versintert. Die anschließenden rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen der Proben zeigen die Umwandlung von Quarz zu Cristobalit, die Bildung einer silikatischen Schmelze und eine Veränderung der Zusammensetzung des Chromerzes. Die Chromerzkristalle verarmen im Randbereich an Mg, Fe und Na. Diese Elemente gehen in die silikatische Schmelze über. Der absolute

Schmelzgehalt des Schiebersandes lässt sich anhand der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen nicht quantifizieren, da mit dieser Methode einzelne Bereiche im Mikrometerbereich untersucht werden und damit kein Rückschluss auf die Gesamtprobe gezogen werden kann. Es ist jedoch qualitativ erkennbar, dass der Gehalt erstarrter Schmelze mit zunehmenden Quarzgehalt des Schieber-sandes zunimmt.

Für die Infiltrationstests mit flüssigem Stahl wurden vier Schiebersande nach dem Stand der Technik mit zwei Stählen unterschiedlicher Zusammensetzung untersucht. Dazu wurde ein gängiger einfacher Werkzeugstahl (Stahl 1) und ein hoch mit Mangan legierter Spezialstahl (Stahl 2) ausgewählt, um die Bandbreite der Stahlerzeugung abzudecken. Insbesondere bei der Herstellung des hochlegierten Spezialstahls treten häufig Fehler aufgrund von Einschlüssen auf. Eine definierte Menge Schiebersand wurde in einen keramischen Tiegel, gefertigt aus einem Korundstein (> 99 Gew.-% Korund) gefüllt. Darauf wurde eine Platte mit einer definierte Menge Stahl gegeben. Der so präparierte Tiegel wurde in einem Ofen unter Argon Atmosphäre auf 1600 °C aufgeheizt und nach einer Haltezeit von 2 Stunden wieder abgekühlt.

Die Ergebnisse zeigen einen Einfluss des Quarzgehaltes auf den Grad der Infiltration und unterschiedliche Grade der Infiltration durch die beiden Stahlqualitäten. Auch erkennt man bereits makroskopisch Unterschiede im Kontaktbereich zwischen Stahl und Schiebersand, der mehr oder weniger scharf abgegrenzt ist und teilweise eine Infiltration des Stahls in den Schiebersand aufweist. Das Tiegelmateriale, welches in diesem Versuch den Lochstein (Bodenausguss) der Stahlgießpfanne repräsentiert, zeigt in den Experimenten mit hoch mit Mangan legiertem Spezialstahl eine stärkere Verfärbung als in den Experimenten mit dem einfachen Werkzeugstahl. Daraus folgt, dass das Tiegelmateriale in den Experimenten mit Manganstahl stärker infiltriert wurde. Durch die mikroskopischen Untersuchungen konnten diese Ergebnisse gefestigt werden. Im Kontaktbereich zwischen Stahl und Schiebersand hat sich eine silikatische Schmelzphase gebildet, die Komponenten aus dem Schiebersand und dem Stahl enthält. Diese Schmelzphase ist in den Tiegel infiltriert und hat dort Aluminium aus dem Tiegelmateriale aufgenommen. Einige Millimeter unterhalb des Stahl-Schiebersand Kontaktes ist der Schiebersand wenig versintert. Daraus lässt sich ableiten, dass der unversinterte Schiebersand beim Öffnen des Schiebers der Stahlgieß-pfanne planmäßig herausgerieselt wäre.

Die unterschiedlichen Infiltrationsneigungen des flüssigen Stahls in die Schiebersande, je nach Zusammensetzung der Schiebersande und der Stähle, konnten klar erkannt werden. Im Kontaktbereich von Stahl zu Schiebersand hat sich eine Schmelze gebildet, die verhindert, dass der Stahl ungehindert in den Schiebersand infiltrieren kann. Im unteren Bereich ist der Schiebersand weniger stark versintert und es kann angenommen werden, dass er in diesem Bereich rieselfähig bleibt.

Die Rieselfähigkeit der Schiebersande nach dem Stand der Technik wurde vom Projektpartner Weerulin bestimmt (siehe entsprechenden Sachbericht von Fa. Weerulin).

Alle vier Schiebersande nach dem Stand der Technik zeigten ein gutes Sinterverhalten, ein geringes Maß an Infiltration des Stahls in den Schiebersand (besonders in Verbindung mit dem gängigen einfachen Werkzeugstahl) und eine gute Rieselfähigkeit. Bei allen Schiebersanden nach dem Stand der Technik hat sich im Kontaktbereich zwischen Stahl und Schiebersand eine silikatische Schmelze gebildet. Der Schiebersand mit großem Abstand zum Stahl ist wenig versintert. Es haben sich vereinzelt Sinterhalse gebildet, es liegt jedoch keine durchgängige Schmelzbildung vor. Grundsätzlich nehmen die Schmelzbildung und der Grad an Infiltration mit steigendem Quarzanteil (und damit mit abnehmenden Chromerzgehalt) zu, wobei sich ein Quarzanteil zu Chromerz von einem Viertel zu 3 Vierteln als besonders vorteilhaft in Bezug auf Schmelzbildung und Infiltrationsneigung ergeben hat. Die Schiebersande nach dem Stand der Technik haben alle eine gute Rieselzeit von ca. 25 s für einen 100 ml Trichter und eine geringe Infiltrationsneigung des unversinterten Schiebersandes (siehe entsprechenden Sachbericht von Fa. Weerulin).

Die Mindestanforderungen, die ein Schiebersand nach dem Stand der Technik haben muss, wurden festgelegt wie folgt:

1. Gute Rieselfähigkeit mit einer durchschnittlichen Rieselzeit von ca. 25 s für einen 100 ml Trichter,
2. Geringe Infiltrationsneigung des unversinterten Schiebersandes von einem durchschnittlichen Durchlässigkeitsbeiwert von $8,63 \cdot 10^{-4}$ m/s,
3. im Kontaktbereich von Schiebersand zu Stahl hat sich eine Schmelze gebildet, die bei der Abkühlung erstarrt ist,
4. der Schiebersand mit großem Abstand zum Stahl ist wenig versintert. Es haben sich vereinzelt Sinterhalse gebildet, es liegt jedoch keine durchgängige Schmelzbildung vor.
5. ein Quarzanteil von ca. 25 % wird für das Sinterverhalten und das Infiltrationsverhalten von versintertem Schiebersand als optimal identifiziert und für die Schiebersandentwicklung in AP 4 vorgesehen.

AP 2: Entwicklung eines Vorhersagemodells für die Wechselwirkung von Stahl und Schiebersand zur Vorselektion von Substitutionskomponenten

Ein thermochemisches Vorhersagemodell wurde entwickelt, das die Wechselwirkungen zwischen Schiebersand unterschiedlicher Zusammensetzungen und zwei Stahlqualitäten (einfacher Werkzeugstahl und hoch manganlegierter Spezialstahl) beschreibt. Ziel

war es, geeignete Substitutionskomponenten für Chromerz zu identifizieren, um leistungsfähige, chromerzfreie Schiebersande für die Clean Steel Technologie zu entwickeln.

Mit Hilfe der thermochemischen Software FactSage wurde ein Modell zur Simulation der Oxidphasenbildung bei Temperaturen zwischen 1400 und 1700 °C unter reduzierenden Bedingungen erstellt. Es erlaubt die Berechnung des Schmelzphasenanteils als Indikator für das Versinterungs- und Infiltrationsverhalten von Schiebersand in Kontakt mit Stahl. Ein hoher Anteil an Schmelzphase deutet auf eine ungünstige Performance des Schiebersandes hin.

Als Zielwerte wurden auf Basis bestehender Schiebersande und der Modellrechnungen ein Schmelzphasenanteil von ca. 45–55 Gew.-% bei reinem Schiebersand und 60–70 Gew.-% bei Kontakt zu Stahl (bei 1600–1700 °C) definiert. Diese Zielbereiche dienten der Bewertung potenzieller Ersatzstoffe.

Die Modellrechnungen stimmten hinsichtlich der Tendenzen mit den praktischen Ergebnissen aus Tiegeltests und Sinterversuchen überein. Zwar können absolute Werte aufgrund kinetischer Einschränkungen und limitierter Kontaktflächen in der Praxis nicht direkt abgebildet werden, dennoch liefert das Modell verlässliche Vorhersagen zur Eignung von Ersatzstoffen.

Sieben marktgängige Rezyklate wurden auf ihre Eignung als Ersatzstoff für Chromerz überprüft. Drei wurden aufgrund hoher (>90 Gew.-%) bzw. zu geringer (<20 Gew.-%) berechneter Schmelzphasenanteile ausgeschlossen. Zwei Rezyklate in der Fraktion 0-1 mm (AndalusitR und Dolomit) erfüllten die Zielkriterien und wurden als potenzielle Ersatzstoffe identifiziert. Zusätzlich wurden zwölf primäre, handelsübliche Feuerfestmaterialien modellgestützt untersucht. Fünf davon erfüllten die Anforderungen des Zielbereichs der Schmelzphase und wurden als besonders geeignet identifiziert: Andalusit, Mulcoa45, Mulcoa60, Mullit, Zirkon.

Für die Modellrechnungen neuer Rezepturen wurde ein Mischungsverhältnis von 25 % Quarz und 75 % Ersatzstoff verwendet. Dieses Verhältnis zeigte in den Berechnungen die besten Übereinstimmungen mit den Zielbereichen und wurde für die weitere Entwicklung empfohlen.

Das zentrale Entwicklungsziel - die Erstellung eines zuverlässigen Vorhersagemodells zur Bewertung der Wechselwirkung von Schiebersand und Stahl - wurde vollständig erreicht. Darüber hinaus konnten auf Basis des Modells zwei geeignete sekundäre und fünf geeignete primäre Substitutionsrohstoffe für Chromerz identifiziert werden. Damit ist die Grundlage für die Entwicklung leistungsfähiger, chromerzfreier Schiebersande geschaffen, die einen Beitrag zur Clean Steel Technologie leisten können.

AP 3: Entwicklung eines Laborverfahrens zur Untersuchung der Bildung nicht-metallischer Einschlüsse im Stahl

Im Rahmen des Projekts wurde ein ursprünglich für das Labor geplante Verfahren zur gezielten Herbeiführung von Wechselwirkungen zwischen Schiebersand und Stahl entscheidend weiterentwickelt und erfolgreich im Stahlwerk umgesetzt. Das primäre Ziel bestand darin, die Auswirkungen verschiedener Schiebersande auf die Bildung nicht-metallischer Einschlüsse im Stahl systematisch zu untersuchen und quantifizierbar zu machen.

Statt der geplanten Laborversuche mit kleinen Stahlmengen wurde das Verfahren modifiziert und direkt im Stahlwerk bei Fa. voestalpine durchgeführt. Dabei kamen spezielle Handlanzen aus feuerfestem Material zum Einsatz, die mit 15 g Schiebersand befüllt wurden. Diese wurden im Stahlwerk in der Stahlgießpfanne in den flüssigen Stahl eingetaucht, wodurch eine kontrollierte Wechselwirkung zwischen Stahl und Schiebersand erzeugt wurde. Das daraus resultierende Stahlprobenmaterial wurde in der Folge raster-elektronenmikroskopisch (REM-EDX) untersucht.

Die Durchführung unter realen Betriebsbedingungen ermöglichte eine praxisnahe Simulation des industriellen Prozesses und führte zu deutlich belastbareren Ergebnissen als dies unter Laborbedingungen möglich gewesen wäre. Besonders die geringe Stahlmenge im Labormaßstab stellte sich als limitierender Faktor für aussagekräftige Analysen heraus, was durch die Umstellung auf Betriebsversuche erfolgreich kompensiert wurde.

Zur Bewertung der Stahlreinheit wurde eine Lollipopprobe mit definierter Messfläche von 46,86 mm² auf der gefrästen Stirnfläche analysiert. Die Methodik erlaubt die Detektion nicht-metallischer Einschlüsse ab einer Größe von 1,5 µm bei hoher Auflösung (254-fache Vergrößerung) und langen Messzeiten (bis zu 12 Stunden pro Probe). Eine Vergleichsprobe ohne Schiebersand diente als Referenz zur quantitativen Bewertung des Einflusses des jeweiligen Schiebersandes.

Das entwickelte Verfahren wurde zunächst an Schiebersanden nach dem Stand der Technik erprobt, deren Eigenschaften bereits aus früheren Arbeitspaketen bekannt waren. Diese Tests bildeten die Referenzbasis für die spätere Bewertung neu entwickelter chromerzfreier Schiebersande in Folge.

Die Ergebnisse des Arbeitspaketes übertrafen in der methodischen Qualität und Anwendbarkeit die ursprünglichen Erwartungen. Die entwickelten Verfahren und Ergebnisse liefern eine solide Basis für die Bewertung und Weiterentwicklung von Schiebersanden im Hinblick auf Clean-Steel-Anforderungen.

AP 4: Entwicklung innovativer chromerzfreier Schiebersandprototypen für die Clean Steel Technologie

Im Rahmen der Entwicklung neuer chromerzfreier Schiebersande für die Stahlherstellung bilden die Ergebnisse der vorherigen Arbeitspakete (AP) die Grundlage für das Arbeitspaket 4. In AP 1 wurden die Mindestanforderungen an die Schiebersande festgelegt, welche das Sinterverhalten, das Infiltrationsverhalten und die Rieselfähigkeit umfassen. Diese Anforderungen definierten die Zielparameter, die die neuen Prototypen erfüllen mussten, um, unabhängig vom angestrebten Reinheitsgrad des Stahls, überhaupt als Schiebersand einsatzfähig zu sein.

Aufbauend auf diesen Vorgaben wurde in AP 2 ein Vorhersagemodell entwickelt, um geeignete Substitutionsmaterialien für Chromerz zu identifizieren. Das Modell lieferte wertvolle Informationen darüber, welche Rohstoffe voraussichtlich die gewünschten Eigenschaften besitzen, und ermöglichte eine gezielte Vorauswahl vielversprechender Materialien. Einige Rezyklate wurden in diesem Schritt bereits ausgeschlossen. Zusätzlich zu den vielversprechenden Rezyklaten wurde das Modell zusätzlich für primäre Rohstoffe angewendet.

AP 3 untersuchte die Wechselwirkung zwischen Schiebersand und Stahl hinsichtlich der Bildung nicht-metallischer Einschlüsse. Die Ergebnisse zeigten die Eignung der neu entwickelten Schiebersande hinsichtlich der Bildung nicht-metallischer Einschlüsse und der damit verbundenen Materialeigenschaften. Im AP 4 wurden die, auf Basis der ersten drei APs neu entwickelten Schiebersande getestet. Die in AP 1 definierten Anforderungen und die in AP 2 identifizierten Materialien bildeten die Basis für die Entwicklung und Prüfung neuer Prototypen. Sinterversuche und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen wurden durchgeführt, um das Verhalten der neu entwickelten Schiebersandprototypen zu beurteilen. Drei von acht Prototypen (auf Basis von Kerfalit, Andalusit R59 und Zirkon) zeigten ein vielversprechendes Infiltrations- und Sinterverhalten, vergleichbar mit den Schiebersanden nach dem Stand der Technik, und wurden für weiterführende Untersuchungen ausgewählt.

Insgesamt zielte AP 4 darauf ab, die vielversprechenden Materialien und Methoden aus den vorherigen Arbeitspaketen zu integrieren und zu verfeinern, um letztlich funktionsfähige und leistungsfähige chromerzfreie Schiebersande für die industrielle Anwendung zu entwickeln.

AP 5: Betriebsversuche

Im Rahmen von Arbeitspaket 5 wurden die erfolgversprechendsten Schiebersandprototypen, die zuvor in Arbeitspaket 4 entwickelt und getestet wurden, von Weerulin in

betriebsüblichen Mengen hergestellt und unter realen Bedingungen in Stahlwerken erprobt. Ziel war es, die Praxistauglichkeit der neu entwickelten, chromerzfreien Schiebersandprototypen im industriellen Maßstab zu validieren und ihre Eignung für die Clean Steel Technologie zu bewerten.

Die Herstellung größerer Materialmengen ermöglichte umfassende Betriebsversuche beim Industriepartner voestalpine Linz, die in ihrer Rolle als Anwender des Schiebersandes das Vorhabens unterstützten. In diesen Versuchen wurde insbesondere das selbstständige Öffnen des Pfannenschiebers nach dem Abguss als unmittelbares Maß für die Funktionalität der Schiebersande herangezogen.

Da eine Bewertung des Reinheitsgrades des gewalzten Stahls aufgrund der langen Prozesszeiten zwischen Abguss und Walzen nicht möglich war, wurden direkt beim Abguss Stahlproben entnommen. Diese Proben wurden anschließend mittels rasterelektronenmikroskopischer Analysen sowie Bildverarbeitung hinsichtlich Zusammensetzung, Größe und Anzahl der nicht-metallischen Einschlüsse untersucht. Die Ergebnisse wurden mit den Laboruntersuchungen aus Arbeitspaket 4 abgeglichen, wobei auf eine identische Stahlqualität und den Einsatz desselben Schiebersandes geachtet wurde.

Die Auswertungen zeigten, dass die getesteten Schiebersande nicht nur ein stabiles Öffnungsverhalten aufwiesen, sondern auch im Hinblick auf die Reinheit des Stahls gute Ergebnisse lieferten. Damit konnte die prinzipielle Einsatztauglichkeit der chromerzfreien Schiebersande unter Produktionsbedingungen bestätigt werden. Gleichzeitig zeigte sich in der Praxis, dass bei einzelnen Prototypen bedarfsorientierte Anpassungen notwendig waren. Diese wurden zeitnah umgesetzt und flossen in eine gezielte Optimierungsschleife ein, in der Arbeitspaket 4 (Labortests) und Arbeitspaket 5 (Betriebserprobung) eng miteinander verzahnt arbeiteten. Insgesamt bestätigte Arbeitspaket 5 die industrielle Anwendbarkeit der neu entwickelten Schiebersandprototypen und zeigte, dass diese eine vielversprechende Alternative zu chromerzhaltigen Produkten darstellen. Die erfolgreiche Kombination aus Labor- und Betriebsversuchen legte den Grundstein für eine künftige industrielle Umsetzung der Schiebersandtechnologie im Sinne der Clean Steel Strategie.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Personalkosten der wissenschaftlichen Mitarbeiter/innen betragen 160.724,07 Euro.

Für Dienstreisen (0846) zum Verbundpartner wurden 338,20 Euro aufgewandt.

Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben (0843) beziehen sich auf Labor-Verbrauchsmaterialien, insbesondere Heiz- und Thermoelemente für Hochtemperaturuntersuchungen der Schiebersandprototypen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die durchgeführten Projektarbeiten waren aus wissenschaftlicher Perspektive notwendig, um belastbare Daten zur Eignung chromerzfreier Schiebersande für die Anwendung in der Clean-Steel-Technologie zu erheben. Die Entwicklung und Verifikation eines Vorhersagemodells zur Wechselwirkung von Schiebersand mit Stahl stellte einen entscheidenden Baustein für die Auswahl neuer Rohstoffe im Austausch für Chromerz zur Entwicklung neuer innovativer Schiebersande dar. Die Arbeiten ermöglichten es, praxisnahe Kriterien für die Materialauswahl in Bezug auf den Reinheitsgrad des Stahls zu definieren und die getesteten Prototypen objektiv zu beurteilen. Die Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Weerulin GmbH war hierbei essenziell, um die wissenschaftlichen Erkenntnisse direkt mit den Anforderungen aus der industriellen Anwendung abzugleichen und so eine Brücke zwischen Forschung und industrieller Umsetzung zu schlagen.

4. Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der voraussichtliche Nutzen der Ergebnisse liegt für FGF primär im wissenschaftlichen Bereich. Durch die Entwicklung neuer validierter Laborprüfverfahren und Vorhersagemodelle wurde eine Grundlage geschaffen, die es erlaubt, zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich feuerfester Werkstoffe effizienter und zielgerichteter durchzuführen. Diese Methoden stehen künftig auch anderen Unternehmen, insbesondere kleinen und mittelständischen Betrieben ohne eigene F&E-Infrastruktur, im Rahmen von Kooperationsprojekten zur Verfügung. Darüber hinaus stärken die Forschungsergebnisse die Position der FGF als Partner für anwendungsnahe Werkstoffforschung im Bereich der Feuerfestindustrie und bieten hohes Potenzial für Anschlussvorhaben mit industriellen Partnern.

5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Im Berichtszeitraum sind keine F&E-Ergebnisse von Seiten Dritter bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

6. Veröffentlichung der Ergebnisse

Die wissenschaftliche Verwertung der Projektergebnisse erfolgt nach Ende der Projektlaufzeit durch Veröffentlichungen in Fachjournalen sowie durch Vorträge auf internationalen Fachkonferenzen wie dem International Colloquium on Refractories (ICR). Ziel ist es, die neuen Erkenntnisse einem breiten Fachpublikum zugänglich zu machen und so auch Impulse für weitere Forschungsvorhaben zu geben. Zudem plant FGF, die entwickelten Prüfmethode in Schulungen und Seminaren für KMU zu vermitteln. Damit wird ein Wissenstransfer ermöglicht, der insbesondere kleinen Unternehmen den Zugang zu neuen Technologien und Messmethoden erleichtert.