

# Eisenpulververbrennung in einer Kohlebrennkammer

R. Mehmood<sup>1\*</sup>, Q. Fradet<sup>1</sup>, S. Grusla<sup>2</sup>, T. Zschunke<sup>2</sup>, U. Riedel<sup>1</sup>

\*r.mehmood@dlr.de

<sup>1</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für CO<sub>2</sub>-arme Industrieprozesse, Äußere Oybiner Straße 14/16, 02763 Zittau, Deutschland

<sup>2</sup> Hochschule Zittau/Görlitz, Institut für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung und Messtechnik, Theodor-Körner-Allee 8, 02763 Zittau, Deutschland

## Kurzfassung

Eine der größten Herausforderungen der Modernisierung der Energieversorgung ist die Notwendigkeit großtechnischer saisonaler Energiespeicher. Erneuerbare Energie muss in einer Form verfügbar sein, in der industrierelevante Kapazitäten über längere Zeiträume hinweg gespeichert werden können. Hier können metallische Energieträger (eng. „Metal Fuels“) eine bedeutsame Rolle spielen. Bei diesem Konzept wird Energie durch die Verbrennung von Metallpulver freigesetzt. Um die Klimaneutralität zu gewährleisten, kann grüne Energie für die Rückreduktion der dadurch entstehenden Metalloxide verwendet werden. Forschung und Industrie untersuchen die Möglichkeit, Kraftwerke zur Eisenverbrennung in Betrieb zu nehmen; auch wir möchten uns diesem Ansatz widmen, und zwar durch die Umrüstung von Kohlekraftwerken.

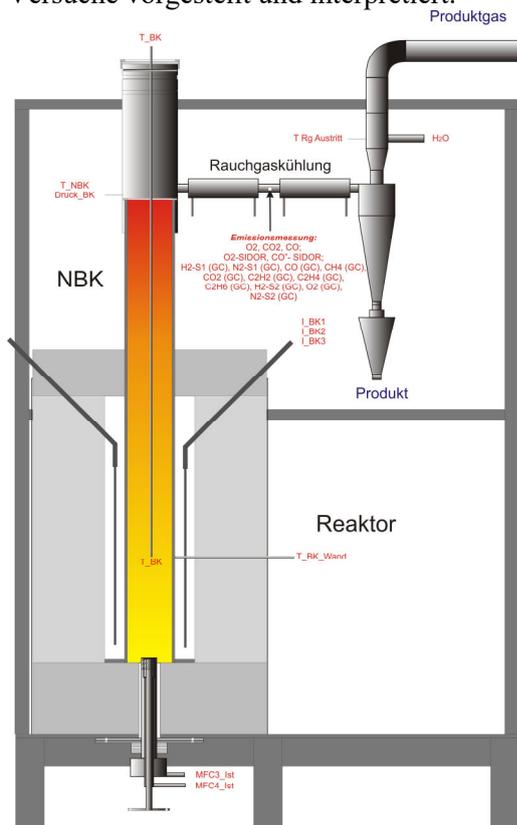
Ziel der Arbeit ist es, erste empirische Hinweise auf das Flammenverhalten zu erhalten. Wesentliche Frage ist dabei die nach der Stabilisierung der Flamme unter variierten Betriebsbedingungen. Zu diesem Zweck nutzen wir die für die Untersuchung der Braunkohlestaubverbrennung konzipierte Versuchsbrennkammer MB1500, mit einer Brennstoffwärmeleistung von bis zu 15 kW, die hiermit einen neuen Einsatzfall als „Zittau Iron Combustion Chamber“ (ZIICC) bekommt. Die ZIICC ist eine aufwärts ausgerichtete Mikrobrennkammer, die das feuerungstechnische Verhalten industrieller Brennkammern nachbildet. Zunächst wird die Machbarkeit der Eisenpulververbrennung gezeigt, indem Eisenpulver erst zu Braunkohlestaub beigemischt und anschließend in reiner Form verbrannt wird, um eine selbsterhaltende Flamme zu generieren. Hier werden wir auf die beobachteten Unterschiede zwischen Braunkohlestaubfeuerung und Eisenpulververbrennung eingehen. Danach wird der Sauerstoffgehalt im Abgas, genauer gesagt der damit verbundene Zufuhr-Massenstrom des Eisenpulvers, variiert, wodurch primär verfahrens- und betriebstechnische Daten generiert wurden. Das Phänomen des Fouling, das bisher nur in vertikal ausgerichteten Eisenbrennern beobachtet wurde, wird untersucht und mögliche Erklärungen hierfür werden geliefert. Des Weiteren wird das Zündverhalten zweier Eisenpulver verglichen. Alle diese Punkte sind wichtig, um vertikal ausgerichtete Brenner, wie sie in Kohlekraftwerken zu finden sind, erfolgreich umzurüsten.

## Einführung

Da der von der deutschen Bundesregierung geplante Termin für den Kohleausstieg näher und näher rückt, beschäftigt sich die Forschung damit, was mit außer Betrieb gehenden Kohlekraftwerken passieren soll. Damit die Infrastruktur möglichst erhalten bleibt, wäre eine Option, die Brennkammer solcher Kraftwerke von Kohle auf einen anderen Brennstoff umzurüsten. Hier gibt es einige CO<sub>2</sub>-neutrale Möglichkeiten, die überwiegend auf verschiedene Formen Biomasse zurückzuführen sind. Eine Alternative stellen metallische Energieträger („Metal Fuels“) dar. Diese basieren auf der Idee, Energie durch Verbrennung von Metallen freizusetzen und anschließend die daraus entstandenen Metalloxide mittels regenerativ bereitgestellter Energie zu reduzieren, um Energie wieder darin zu speichern. Die Forschung in diesem Bereich fokussiert sich auf Eisen, das sich als zuverlässiger Energieträger erwiesen hat. Einige Gründe hierfür sind die vergleichsweise niedrigen Verbrennungstemperaturen von Eisen, geringe NO<sub>x</sub> Emissionen der Verbrennung sowie weniger Nanopartikelbildung im Vergleich zu anderen metallischen Energieträgern. Die Reduktion von Eisenoxiden wird bereits stark im Kontext der Stahlherstellung untersucht, wo Eisenerz zunächst zu Roheisen reduziert und anschließend zu Stahl verarbeitet wird. Dahingegen gibt es Forschungsbedarf bei der Eisenverbrennung, um den Energiefreisetzungsschritt besser zu verstehen.

Zunächst wurden einzelne brennende Partikel genauer angeschaut. Durch die Zündung von Eisenpartikeln mittels fokussierten Lasern wurde unter anderem festgestellt, dass Partikel bei Temperaturen zwischen 1030 K und 1130 K anzünden und dass größere Partikel eine höhere Zündwahrscheinlichkeit besitzen [1]. Die Untersuchung mittels tomografischer Methoden [2] machte die Phasenübergänge von Eisen und Eisenoxid während der Verbrennung, und damit verbundene Phänomene wie Porenbildung und die Entstehung von Mischphasen, sichtbar. Auch laminare Eisenflammen wurden bereits in einer Vielzahl von Konfigurationen untersucht. Die Verbrennung von Eisen unter verminderter Schwerkraft [3] zeigt, dass im Gegensatz zu herkömmlichen Brennstoffen Eisen bei der Verbrennung auch diskrete Flammen aufweisen kann. Solche Flammen zeichnen sich durch die Notwendigkeit einer minimalen Flammentemperatur für deren Ausbreitung aus. Eisenflammen in einem laminaren Bunsenbrenner [4] zeigen eine Flammgeschwindigkeit, die kaum vom Äquivalenzverhältnis des Luft-Brennstoff-Gemisches abhängt, wie es bei Flammen anderer Brennstoffe der Fall ist.

Turbulente Eisenflammen wurden bisher überwiegend in abwärts gerichteten Konfigurationen untersucht. Das „Metal Cyclonic Combustor“ (MC<sup>2</sup>) der TU Eindhoven wurde entwickelt, um selbsterhaltende Eisenflammen zu erzeugen [5]. Ferner wurde anhand dieses Brenners erfolgreich gezeigt, wie NO<sub>x</sub>- und Nanopartikelbildung bei Eisenflammen verhindert werden können [6]. Untersuchungen von Eisen-Methan-Flammen in dem 47 kW<sub>th</sub> Laborbrenner der TU Darmstadt deuten auf die Effekte der präferenzbegünstigte Konzentrationen („preferential concentration“) von Eisen hin [7]. In Kanada wurden erste Eisenflammen im umgerüsteten Brenner fossiler Energieträger erzeugt, indem eine Hilfsflamme aus Methan zunächst erzeugt und anschließend langsam zurückgefahren wurde. [8]. Die Ergebnisse, die hier präsentiert werden, sind gemäß dem Kenntnisstand der Autoren die ersten eines Bodenbrenners, der eine aufwärts gerichtete Flamme erzeugt. Zunächst werden die verwendeten Materialien und Methoden dargestellt, beginnend mit dem „Zittau Iron Combustion Chamber“ (ZIICC), der Anlage, in der die Versuche durchgeführt wurden. Danach werden die Ergebnisse sämtlicher Versuche vorgestellt und interpretiert.



### Technische Daten:

#### Abmessungen (Höhen ab Brenneraustritt):

Innendurchmesser:	124 mm
Höhe Brennkammer:	750 mm
Höhe Nachbrennkammer:	570 mm
Höhe Brennkammer bis Querzug:	1.320 mm
Höhe gesamt:	1.720 mm

Thermische Leistung:	5 -15 kW
Leerrohrgeschwindigkeit:	~ 1,00 m/s
Gasverweilzeit:	~ 1,50 s

Verbrennungstemperatur regelbar:	800 – 1.500 °C
Temperatur Nachbrennkammer regelbar:	800 – 1.100 °C

**Abbildung 1.** (links) Aufbau des ZIICC. Es werden sämtliche Messsensoren sowie Produkt- und Gasauslass gezeigt. (rechts) Einige technische Daten, insbesondere Abmessungen und Betriebsparameter des ZIICC.

## Materialien und Methoden

Abbildung 1 zeigt den Aufbau des ZIICC. Mit einer Gesamthöhe von 1720 mm ist dieser als Bodenbrenner mit einer vertikalen Luftströmung nach oben konzipiert. Der Brennstoff, hier Eisenpulver, wird von unten nach oben pneumatisch durch das Brennrohr zum Hauptauslass gefördert. Ebenso hat das Brennrohr einen Sekundärauslass für Luft. Die Brennkammer (BK), mit einem Innendurchmesser von 124 mm und einer Höhe von 750 mm, besteht aus Stahl und ist mit einer elektrischen Heizung ausgestattet. Temperaturmessensoren befinden sich mittig sowie an der Wand. Die Nachbrennkammer (NBK) weist eine Höhe von 570 mm auf. In ihr befinden sich sowohl ein Temperaturmessensor als auch ein Drucksensor, beides an der Wand. Sie hat ein Austrittsrohr für entstehende Rauchgase (RG Austritt) sowie festes Produkt, in welchem beide gekühlt werden. In diesem Rohr befinden sich die Emissionsmesssysteme (MRU-Gasanalyzesystem, FTIR DX4000, Rosemount-SICK-Gasanalytoren). Anschließend folgt ein Zyklonabscheider, um die Rauchgase vom festen Produkt zu trennen. Der Auslass für die Rauchgase beinhaltet einen Temperaturmessensensor sowie die Messung des H<sub>2</sub>O-Gehalts. In der Brennkammer befinden sich Temperaturmessensoren mittig, sowie an der Außenwand. In der Nachbrennkammer befinden sich sowohl eine Temperaturmessung als auch eine Druckmessung. Die Emissionsmessung befindet sich in der Rauchgaskühlung. Hinter dem Zyklonabscheider befinden sich eine Temperaturmessung sowie eine H<sub>2</sub>O-Messung im Auslass des Produktgases.

Es wurden zwei Sorten von Eisenpulver für diesen Versuch verwendet, die im weiteren Verlauf Pulver  $\alpha$  und Pulver  $\beta$  genannt werden. Pulver  $\alpha$  stammt vom Händler „Metallpulver24“ (Artikel p10-02977) und soll eine Reinheit von  $> 98 \%$  sowie einen mittleren Durchmesser von  $< 30 \mu\text{m}$  besitzen. Bei Pulver  $\beta$  handelt es sich um ein Eisenpulver der Fa. Carl Roth (Artikel 3718). Diese besitzt eine Reinheit von  $\geq 99,5 \%$  gemäß Herstellerangaben und einen mittleren Durchmesser von  $\sim 10 \mu\text{m}$ . Beide Pulversorten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1.** Zusammenfassung der Eigenschaften der beiden verwendeten Pulver. Es handelt sich hier um Herstellerangaben.

Pulver	Händler	Artikelbezeichnung	Reinheit	Mittlerer Durchmesser
$\alpha$	Metallpulver24	p10-02977	$> 98 \%$	$< 30 \mu\text{m}$
$\beta$	Carl Roth	3718	$\geq 99,5 \%$	$10 \mu\text{m}$

## Ergebnisse und Diskussion

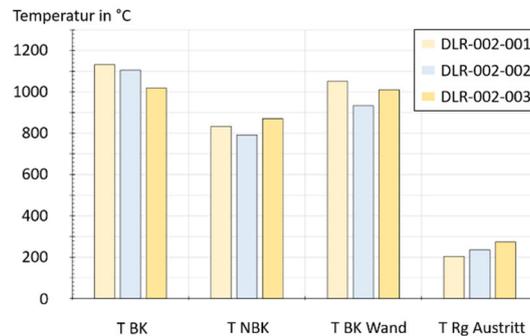
In der ersten Versuchsreihe (DLR-001) wurde die Machbarkeit der Eisenpulververbrennung untersucht, zunächst mit einem Gemisch aus 25 % Pulver  $\alpha$  und 75 % Braunkohle. Nachdem es zu einer Verbrennung dieser Mischung gekommen ist, wurde versucht, reines Pulver zu verbrennen. Hier kam es zu einer Eisenstaubverbrennung mit selbsterhaltender Flamme; die Wärmefreisetzung war ausreichend, die Brennkammerheizung außer Betrieb zu lassen. Somit wurde die Machbarkeit der reinen Eisenpulververbrennung gezeigt. Fast alle weiteren Versuchsreihen wurden mit diesem Pulver durchgeführt; Ausnahmen werden gekennzeichnet.

In der zweiten Versuchsreihe (DLR-002) wurde durch die Änderung des hinzugefügten Eisenmassenstroms der Sauerstoffgehalt im Abgas variiert, wie in Tabelle 2 gezeigt.

**Tabelle 2.** Betriebsparameter der drei Versuche innerhalb der Versuchsreihe DLR-002. Hier wurde die Variation des Sauerstoffgehaltes im Abgas untersucht.

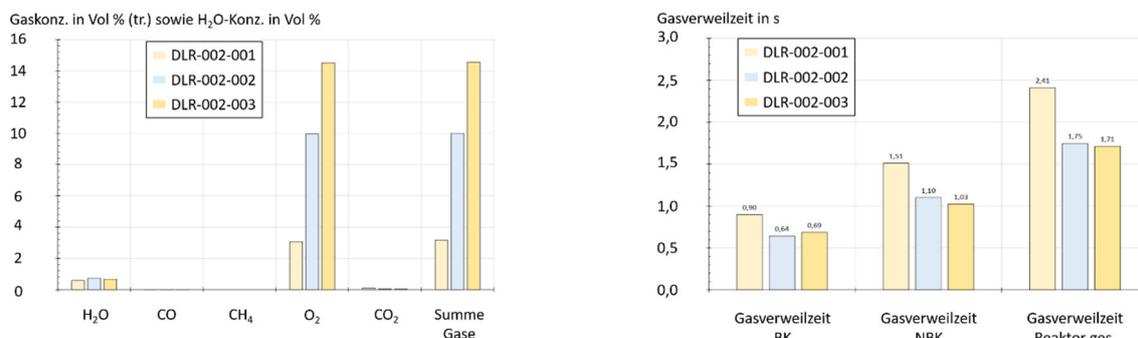
Versuch	T BK in °C	T NBK in °C	Vol% O <sub>2</sub> im Abgas	Volumenstrom Luft in NI/h	Massenstrom Fe in kg/h
DLR-002-001	1000	800	2,73	4048	4,65
DLR-002-002	1000	800	10	5765	1,92
DLR-002-003	1000	800	15	5764	1,28

Abbildung 2 zeigt die Temperatur diverser Teile der Brennkammer. Die Temperatur in der Brennkammer war stets am höchsten, und die der Wand war etwas höher als die in der Nachbrennkammer. Dies suggeriert, dass die Wärmefreisetzung und somit die Reaktion hauptsächlich in der Brennkammer stattgefunden haben, allerdings gab es einen starken Enthalpietransport durch die Nachbrennkammer. Die Temperatur am Austritt des Rauchgases lag stets bei 200 °C bis 300 °C trotz der eingeschalteten Kühlung, was auch auf diesen Enthalpiestrom zurückzuführen ist. Die Ursache des Enthalpiestroms wird unten weiter diskutiert.



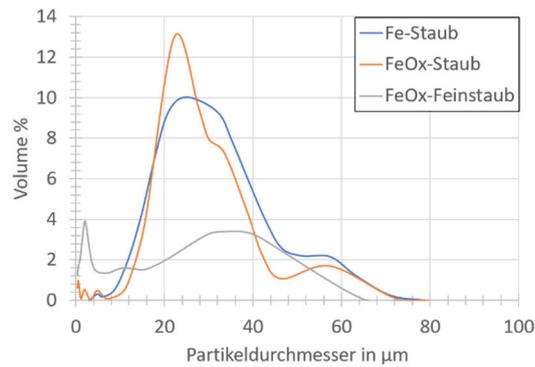
**Abbildung 2.** Zeitgemittelte Temperaturen an verschiedenen Stellen des ZIICC unter Variation des Sauerstoffgehalts.

Abbildung 3 zeigt links die Gaskonzentrationen diverser Abgase, die am Rauchgasaustritt gemessen wurden, und rechts die Gasverweilzeiten bei jedem Versuch, sowohl in der Brennkammer und Nachbrennkammer, als auch im gesamten Reaktor. Die Konzentrationen von CO sowie CO<sub>2</sub> könnten auf die Messgrenzen des Apparates zurückzuführen sein, oder auf Kohlereste in der Brennkammer, die mit verbrannt wurden. Es war eine kleine Menge Wasserdampf vorhanden, was vermutlich auf die Restfeuchte des Eisenpulvers sowie die Luftfeuchte zurückzuführen ist. Die Temperatur der Brennkammer ist mit steigendem Restsauerstoffgehalt gestiegen, während die Temperaturen in der Nachbrennkammer sowie an der Brennkammerwand ein Minimum bei 10 Vol% O<sub>2</sub> aufgewiesen haben. Dies lag daran, dass bei den Versuchen DLR-002-001 und DLR-002-003 die elektrische Heizung des Reaktors eingeschaltet war. Aufgrund des geringeren Luftvolumenstroms im Versuch DLR-002-001 waren die Gasverweilzeiten für diesen Versuch größer als für die Versuche DLR-002-002 und DLR-002-003.



**Abbildung 3.** (links) Zeitgemittelte Gaskonzentrationen diverser Abgasspezies unter Variation des Sauerstoffgehaltes, gemessen am Rauchgasaustritt. (rechts) Verweilzeiten der Gasphase, sowohl in der Brennkammer und Nachbrennkammer als auch insgesamt, unter Variation des Sauerstoffgehaltes.

Abbildung 4 zeigt Korngrößenverteilungen (KGVs), sowohl vom Ausgangsstoff als auch vom gesammelten Reaktionsprodukt. Es wird beobachtet, dass die KGVs sich wenig unterscheiden, was darauf zurückzuführen ist, dass das Eisenpulver während der Reaktion überwiegend im kondensierten Zustand geblieben ist. Dies ist von Vorteil für eine zyklische Reaktionsführung. Zusätzlich wird die KGV des sich an der Sichtscheibe der Brennkammer lagernden Produkts gezeigt. Hier sind zwei Peaks zu sehen: eine bei ca. 35 µm, die mit den Peaks der anderen beiden KGVs übereinstimmt, und eine bei ca. 2 µm. Hier geht es vermutlich um durch Mikroexplosionen gebildete Feinanteile.



**Abbildung 4.** Korngrößenverteilungen zur Versuchsreihe DLR-002: des Ausgangspulvers („Fe-Staub“, blau), des Reaktionsproduktes, das hinter dem Zyklon gesammelt wurde („FeOx-Staub“, orange), sowie des Feinstaubes, das sich an der Sichtscheibe der Brennkammer lagerte („FeOx-Feinstaub“, grau).

Diese Feianteile wurden nicht in der Produktanalyse beobachtet, obwohl sie sich in der Brennkammer wahrscheinlich in allen drei Raumrichtungen verbreitet haben; es kann nicht ausgeschlossen werden, dass sie im Rauchgas enthalten waren. Dies würde auch die hohen Temperaturen in der Nachbrennkammer und vor allem im Rauchgas begründen. Abbildung 5 zeigt Aufnahmen des Eisenpulvers, sowohl im Ausgangszustand (c) als auch nach der Verbrennung im Versuch DLR-002-002 (a) und Versuch DLR-002-003 (b), die durch Rasterelektronenmikroskopie (REM) entstanden sind. Es wird beobachtet, dass das Pulver vor der Verbrennung irreguläre Formen aufgewiesen hat, während es nach der Verbrennung kugelförmig wurde. Grund hierfür ist das Schmelzen des Partikels während des Verbrennungsvorgangs. Alle Aufnahmen zeigen ähnliche Mengen kleiner Partikel trotz unterschiedlicher Versuchsbedingungen, was zeigt, dass der Restsauerstoffgehalt keinen Einfluss auf die Bildung dieser Partikel hatte. Bei diesen Partikeln handelt es sich vermutlich um dieselben, die das 2 µm Peak verursacht haben in Abbildung 4(c). Bei der Aufnahme zum Versuch DLR-002-002, mit 10 Vol % O<sub>2</sub>, wurde eine lamellare Struktur auf der Eisenoberfläche beobachtet, während bei 15 Vol % O<sub>2</sub> weist die Eisenoberfläche eine fadenförmige Oberfläche mit Bereichen, die unterschiedlich orientiert sind, auf.

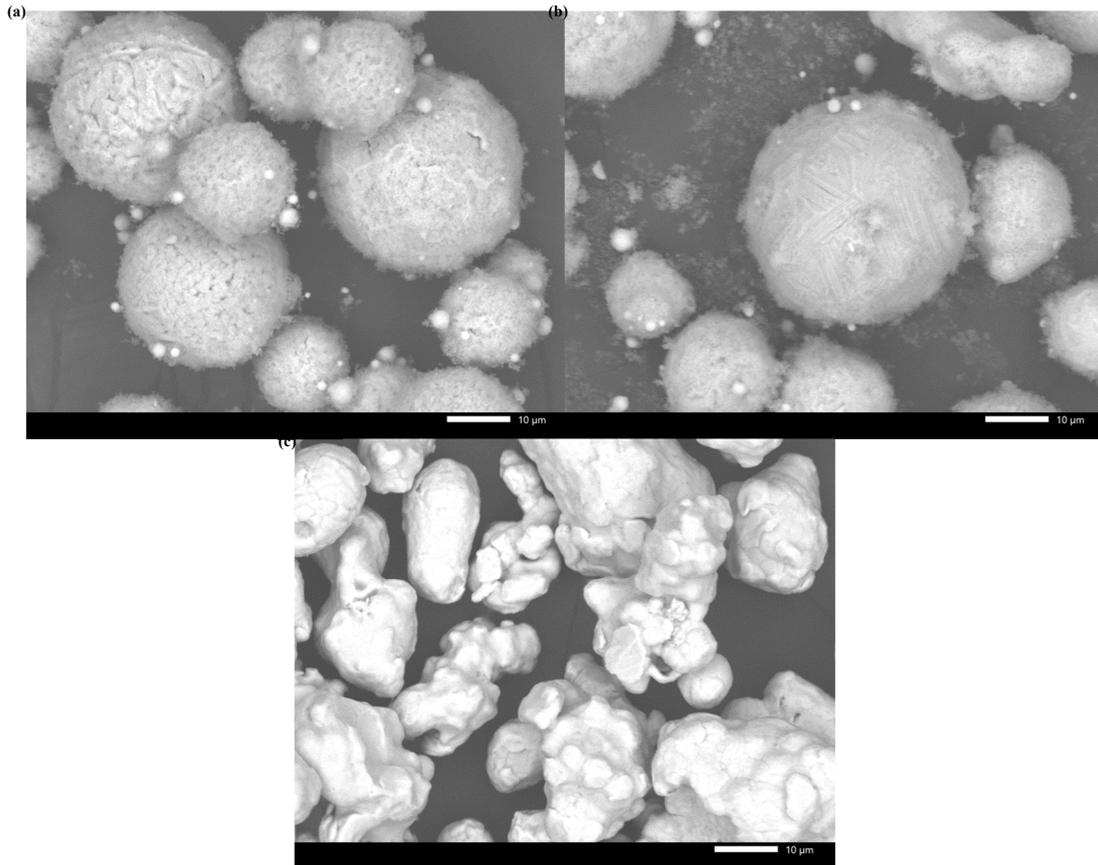
Durch die hohe Dichte des Eisens sind Schwierigkeiten beim pneumatischen Transport des Eisens entstanden. Je nach Versuch sind bis zu 94 % des Pulvers seitlich gestreut und gar nicht hoch gefördert worden; Tabelle 3 zeigt die Details.

**Tabelle 3.** Materialverluste in der Versuchsreihe DLR-002: Zugegebene Brennstoffmassenströme, entnommene Aschemengen und sich daraus ergebende Verluste für jeden Versuch der Versuchsreihe DLR-002.

Versuch	Brennstoffmassenstrom in kg/h	Entstauberzyklon-Aschemenge in kg/h	Anteil Aschemenge von Gesamtbrennstoff
DLR-002-001	4,650	0,287	6,2 %
DLR-002-002	1,920	0,782	40,7 %
DLR-002-003	1,280	0,351	27,4 %

Aufgrund dieser seitlichen Streuung wurde, bevor es mit der dritten Versuchsreihe weiterging, das Zündverhalten von Eisenpulvern mit unterschiedlichen Durchmessern untersucht. Die Zündung von Eisenpulver β, mit einem Durchmesser von 10 µm, passierte sofort nach der Zufuhr von Eisenpulver in die Brennkammer, sodass es rasant zu einer Flamme gekommen ist. Beim Eisenpulver α (mit einem Durchmesser von 30 µm) sind zwar einzelne Partikel schnell zum Glühen gekommen, aber die Flammenbildung dauerte deutlich länger. Es wurden mehrere lokale Zündungen beobachtet, deren Häufigkeit und Flächenanteil vom Reaktorquerschnitt sich mit der Zeit erhöht haben, allerdings verlöschten alle auch schnell. Die erfolgreiche Zündung geschah, als mehrere lokale Zündungen stattgefunden haben, die über den ganzen Reaktorquerschnitt verteilt waren. Diese Sequenz ist in

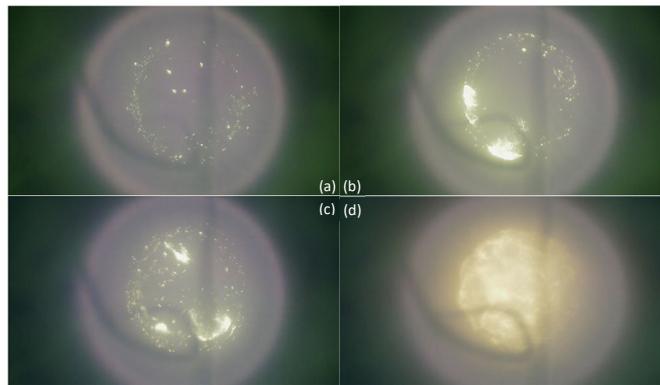
Abbildung 6 dargestellt. Einen Teil der lokalen Zündungen haben auch Mikroexplosionen verursacht, diese sind vermutlich der Grund für die kleinen Partikel, die in Abbildung 4 und 5 zu sehen sind.



**Abbildung 5.** REM-Bilder des Eisenpulvers  $\alpha$  (a) nach dem Versuch DLR-002-002, (b) nach dem Versuch DLR-002-003 sowie (c) vor der Verbrennung. Alle Bilder haben eine gemeinsame Längenskala.

Die Betriebsparameter der weiteren Versuche (DLR-003 ... 006) sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Im Wesentlichen ging es beim Versuch DLR-003 um die Oxidation von Pulver  $\beta$ , mit einem mittleren Durchmesser von 10  $\mu\text{m}$ . Abbildung 7 zeigt den Zündungsvorgang. Die Gesamtheit des Pulvers zündet in einem Schritt; die schnelle Zündung kleiner Partikel widerspricht den Ergebnissen von Ning et al. [1]. Vermutlich überwiegt der kollektive Effekt der Wärmeentwicklung andere Effekte. Allerdings war die Folge dieser schnellen Zündung, dass innerhalb weniger Minuten es zu Schlackenbildung am Brenneraustritt kam, wie in Abbildung 7 gezeigt. Es wird vermutet, dass die hohen Temperaturen in der Brennkammer dafür sorgten, dass das Eisenpulver bereits im Brenner aufwärmte, was die Diffusion an Kontaktstellen begünstigte und somit zu einer Sinterung von Partikeln führte. Ab dem nächsten Versuch wurde wieder Pulver  $\alpha$  verwendet. Die Betriebsparameter dieses Versuchs (DLR-004) sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Auch hier kam es zur Schlackenbildung innerhalb weniger Minuten. Es konnten hier aber Messwerte erfasst werden.

Abbildung 8 zeigt links die Temperaturen, gemessen an drei verschiedenen Stellen in der Brennkammer, und rechts die Verschlackung, die innerhalb von 5 Minuten eingetreten ist. Während die Temperatur in der Nachbrennkammer sowie die des Rauchgases ungefähr konstant blieben, ist die Temperatur in der Brennkammer stark gestiegen. Nach der oben geführten Argumentation würde dies bedeuten, dass kaum Feinanteile in die Nachbrennkammer eingetragen werden. Da es hier zu schneller Schlackenbildung kam, ist eine Möglichkeit, dass die Schlackenbildung am Brenneraustritt durch die Präsenz der Feinanteile begünstigt wird. Numerische und experimentelle Arbeiten haben gezeigt [9-11], dass die Präsenz von Feinanteilen in einer Partikelschüttung die Permeabilität dieser verhindern kann.



**Abbildung 6.** Das Zündverhalten von Pulver  $\alpha$ : (a) Mehrere Partikel glühen, jedoch ist keine Flamme vorhanden. (b) Es finden lokale Zündungen statt, die jedoch schnell ausgelöscht werden. (c) Mehrere lokale Entzündungen passieren gleichzeitig, die insgesamt viel der Reaktorquerschnittsfläche abdecken. (d) Hierdurch kommt es zu einer globalen Zündung und somit zu einer Flamme.

Das Eisenpulver hier war zwar keine Schüttung, allerdings hat hier Sinterung auch eine Rolle gespielt und dieses Verhalten begünstigt. Es gibt Hinweise, dass frisch reduzierte Feineisenpulverpartikel bei 1000 °C schnell Sinterkuchen bilden können [12]; möglicherweise lag hier ein ähnlicher Effekt vor. Bei der Oxidation von Eisenpulver bei niedrigen Temperaturen ohne Flammenbildung wurde ebenfalls starkes Sinterung beobachtet, trotz dieser war die vollständige Oxidation des Pulvers möglich [13]. Alternativ wäre die Sinterung auf eine potenziell unvollständige Säuberung zurückzuführen. Es besteht die Möglichkeit, dass nach der Reinigung Anteile von gesintertem Eisen im Brennerrohr zurückgeblieben sind, die als Kontaktstellen für erneute Sinterung fungiert haben. Des Weiteren kann es auch sein, dass nach dem Versuch mit 10  $\mu\text{m}$  Eisenpulver (Pulver  $\beta$ ) Reste des Pulvers weiterhin in der Brennkammer geblieben sind, die als Feinanteile zum Auslösen der Schlackenbildung gewirkt haben. Zudem wäre die Wärmeübertragung im Brenner durch die Präsenz dieser Reste beeinträchtigt. Welcher der Erklärungen richtig ist, ist derzeit unklar. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass sogar mehrere Mechanismen zur Verschlackung beigetragen haben.

**Tabelle 4.** Betriebsparameter der Versuche DLR-003 ... 006. Im Vordergrund stand hier das Erreichen einer stabilen Flamme ohne Schlackenbildung.

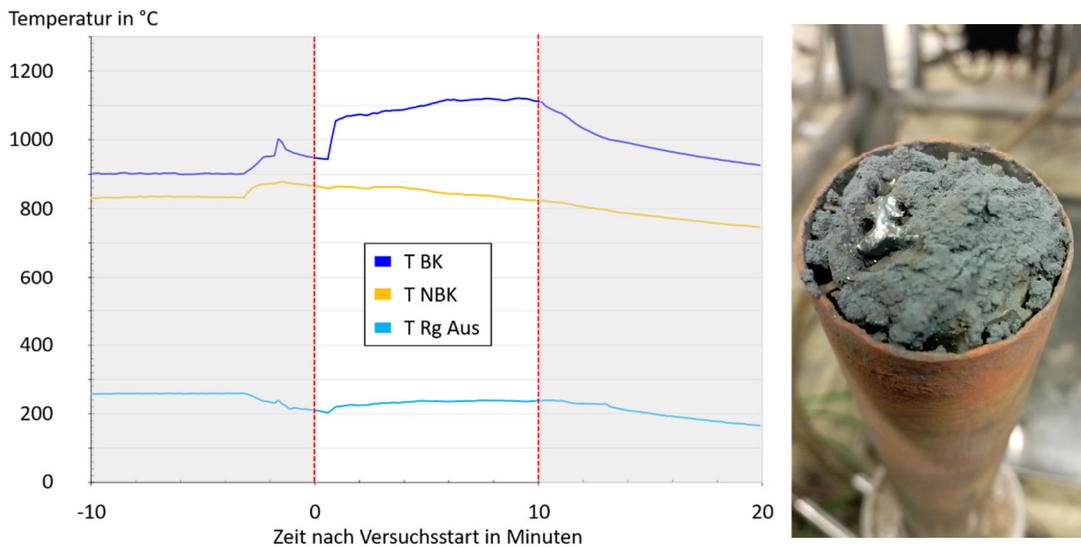
Versuch	T BK in °C	T NBK in °C	Vol% O <sub>2</sub> im Abgas	Volumenstrom Luft in NI/h	Massenstrom Fe in kg/h	Verwendete Pulver
DLR-003	800	800	10	-	-	$\beta$
DLR-004	1000	800	2,73	1634	3,90	$\alpha$
DLR-005	1000	800	10	3283	3,28	$\alpha$
DLR-006	800	800	10	3282	4,69	$\alpha$

Im darauffolgenden Versuch (DLR-005) wurde lediglich die Soll-O<sub>2</sub>-Konzentration im Rauchgas erhöht, mit dem Ziel, den Volumenstrom durch den Reaktor zu erhöhen und somit den Partikeltransport durch den Reaktor zu verbessern. Die genauen Betriebsparameter sind aus Tabelle 4 zu entnehmen. Dies war nur teilweise erfolgreich: Die Schlackenbildung verzögerte sich zwar, aber dennoch kam es zu einer Verstopfung des Brenners nach ca. 25 Minuten.



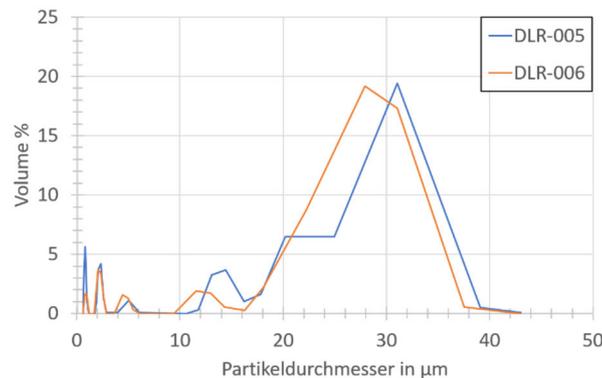
**Abbildung 7.** Der Versuch DLR-003: (links) Pulver  $\beta$  zündet sofort nach dem Glühen. (rechts) Es kam rasch zu einer Schlackenbildung, und dadurch zu einer Verstopfung des Brenners

Im letzten Versuch (DLR-006) wurde die Temperatur der Brennkammer auf 800 °C reduziert, um die Schlackenbildung zu reduzieren. Weitere Betriebsparameter sind in Tabelle 4 dargestellt. Diese Maßnahme könnte die Schlackenbildung zwar für eine Zeit unterdrücken, aber nicht komplett verhindern: nach ca. 25 Minuten wurde der Versuch erneut abgebrochen.



**Abbildung 8.** Der Versuch DLR-004: (links) Temperaturverläufe mit der Zeit an drei unterschiedlichen Stellen im Reaktor: Brennkammer, Nachbrennkammer sowie am Gasauslass. (rechts). Auch bei diesem Versuch ist Fouling eingetreten.

KGVs des oxidierten Eisenpulvers aus beiden dieser Versuche sind in Abbildung 9 dargestellt. Neben dem erwarteten Peak bei 30 µm sind viele kleinere Peaks sichtbar. Die meisten dieser sind wahrscheinlich Zeichen für kleinere Partikel, die aus Explosionen stammen, so wie sie in Abbildungen 4 und 5 zu sehen sind. Interessant sind die Peaks bei ca. 10 µm: Diese könnten ein Zeichen für Reste von Pulver β sein, die die Verschlackung verursacht haben.



**Abbildung 9.** Partikelgrößenverteilungen des oxidierten Pulvers aus den Versuchen DLR-005 (blau) und DLR-006 (rot).

Bilder der Schlacke sind in Abbildung 10 zu sehen. Die Unterseite besteht aus einem glatten und einem rauen, aus Schichten gebildeten Anteil. Die Oberseite besteht aus dendritisch aufgebauten Bereichen, die sich klar voneinander trennen. An beiden Seiten sind kleine braune Bereiche erkennbar, jedoch ist die Farbe der Verschlackung überwiegend grau. Eine Oxidation an der Oberfläche während der Lagerung kann nicht ausgeschlossen werden.



**Abbildung 10.** Bilder der Verschlackung: links die Oberseite und rechts die Unterseite.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Das „Zittau Iron Combustion Chamber“ (ZIICC), eine vertikal ausgerichtete Mikrobrennkammer, die das feuerungstechnische Verhalten industrieller Brennkammern nachbildet, wurde erstmalig verwendet, um Eisenpulver zu verbrennen. Nachdem zunächst die Machbarkeit der Eisenpulververbrennung in einer solchen Brennkammer gezeigt wurde, wurden anhand erster Versuche einige verfahrenstechnische Daten des Verbrennungsprozesses geliefert. In weiteren Versuchen wurde die Problematik der Schlackenbildung beobachtet, die trotz unterschiedlicher Betriebsbedingungen immer wieder eingetreten ist. Diese könnte an der Präsenz von Kleinstpartikeln der Größenordnung 2  $\mu\text{m}$  liegen, die sich zwischen den größeren Partikeln gelagert und Sinterkontakt hergestellt haben, was sowohl numerisch als auch experimentell beobachtet wurde. Alternativ könnte es die Folge einer unvollständigen Reinigung des Brenners sein, wodurch Reste von gesintertem Eisen oder kleine Eisenpartikel im Brenner zurückgeblieben sind und gleichzeitig als Kontaktstellen und Wärmedämmung für neue Sintervorgänge fungierten. Welcher Mechanismus tatsächlich vorhanden war, oder ob sogar mehrere eine Rolle gespielt haben, ist derzeit unklar.

Als Nächstes werden REM-Bilder sowie Partikelgrößenverteilungen des zu Schlackenbildung führenden Pulvers erzeugt und analysiert, um daraus Hinweise zu diesem Verhalten zu gewinnen. Ebenso empfiehlt es sich, eine Möglichkeit zu schaffen, die Temperatur im Brennerrohr zu messen. Weitere Überlegungen beziehen sich auf das Bestreben, die Schlackenbildung zu vermeiden. Somit gäbe es die Möglichkeit, eine Kühlung am Brennkammerboden oder einen Ascheabzug einzubauen. Es soll allerdings bedacht werden, dass industrielle Kohlebrennkammern sich in manchen Aspekten von der ZIICC unterscheiden, sodass das Problem der Schlackenbildung eventuell dort nicht vorhanden wäre. Industrielle Brennkammern haben oft zwar einen Gasdurchfluss von unten nach oben, jedoch sind die Brenner horizontal ausgelegt und keine Bodenbrenner. Die Gasdurchflussraten und auch die turbulente Intensität sind viel höher in industriellen Brennkammern. Beide könnten dazu führen, dass Fouling in industriellen Brennkammern nicht geschieht. Voraussichtlich werden kleine Partikel zwar gut mit der Hauptströmung transportiert, jedoch schnell verbrannt, während größere Partikel schlecht mittransportiert werden, aber bessere Zündeigenschaften besitzen. Alle diese Punkte sprechen dafür, dass die industrielle Eisenverbrennung in umgerüsteten Brennkammern weiterhin ein erstrebenswertes Ziel darstellt, und die Hindernisse, die in diesem Beitrag präsentiert wurden, sicherlich gelöst werden können.

### **Danksagung**

Dieses Werk ist innerhalb des DLR-Projekts „IronCircle®“ sowie des Cluster-Projekts „Clean Circles“ entstanden. RM bedankt sich bei Dr. Sven Mehlhose und Dipl.-Ing. Syafinah Fong für die hilfreichen Gespräche.

### **Literatur**

- [1] Ning D., Li Y., Li T., Böhm B., Dreizler.: *Size-resolved ignition temperatures of isolated iron microparticles*, Combustion and Flame, 270, 11379, 2024.
- [2] Deutschmann M. P., Sperling A., et al.: *Single iron particle combustion - A morphology study of partially oxidized iron particles*, Powder Technology, 445, 120102, 2024.

- [3] Goroshin S., Tang F.-D., Higgins A. J., Lee J. H. S.: *Laminar dust flames in a reduced-gravity environment*, Acta Astronautica, 68, 656-666, 2011.
- [4] Fedoryk M., Stelzner B., Harth S., Trimis D.: *Experimental investigation of the laminar burning velocity of iron-air flames in a tube burner*, Applications in Energy and Combustion Science, 13, 100111, 2023.
- [5] Baigmohammadi M., Prasadha W., et al.: *Towards utilization of iron powders for heating and power*, Applications in Energy and Combustion Science, 13, 100116, 2023.
- [6] Prasadha W., Baigmohammadi M., Shoshin Y., de Goey, P.: *Towards an efficient metal energy carrier for zero-emission heating and power: Iron powder combustion*, Combustion and Flame, 268, 113655, 2024.
- [7] Steffens P., Hebel J., et al.: *Exploring turbulent methane-assisted iron dust combustion: A combined experimental and numerical study of a 47 kW th lab-scale combustor*, Fuel, 392, 135205, 2025.
- [8] Ilinich M., Zanganeh K., Shafeen A., Staneva K.: *Metal Fuel Combustion Tests Using NRCan's 0.3 MWth Vertical Combustor Research Facility*, ASME Turbo Expo 2024, London, UK, 2024.
- [9] Takahashi H., Kawai H., Kondo T., Sugawara M.: *Permeation and Blockage of Fine Particles Transported by Updraft through a Packed Bed*, ISIJ International, 51, 1608-1616, 2011.
- [10] Luo Z.G., Zhou H. et al.: *DEM study of blockage behaviour of cohesive fine particles in a packed structure of large particles*, Powder Technology, 314, 102-109, 2017.
- [11] Fukuda M., Suziku J., Kawai H., Nohami H.: *Numerical Analysis on Passage and Blockage Behaviors of Fine Particles through an Orifice Consists of Coarse Particles*, ISIJ International, 55, 1291-1298, 2015.
- [12] Walther G., Büttner T. et al.: *Properties and sintering behaviour of fine spherical iron powders produced by new hydrogen reduction process*, Powder Metallurgy, 57, 176-183, 2014.
- [13] Fradet Q., Fong S., et al.: *Thermogravimetric and microstructural analysis of the low-temperature oxidation of iron powders*, Fuel, 401, 135866, 2025