

Bericht Nr. 32.033

Forschungsvorhaben gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Weiterentwicklung und industrielle Erprobung einer neuen kompakteren Bauart von hocheffizienten Regeneratoren für Industrieöfen und Entwicklung eines Auslegungsprogramms (OptiReg 2)

von

C. Rein, W. Adler, BFI

M. Buchwald, R. Buchwald Stahl- und Metallbau

Schlussbericht

DBU-Aktenzeichen: 30559-02

Düsseldorf, September 2017

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	30559/02	Referat	24/0	Fördersumme	212.028 €
----	-----------------	---------	-------------	-------------	------------------

Antragstitel **Weiterentwicklung und industrielle Erprobung einer neuen kompakteren Bauart von hocheffizienten Regeneratoren für Industrieöfen und Entwicklung eines Auslegungsprogramms (OptiReg 2)**

Stichworte Energie, Wärmerückgewinnung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
2 Jahre	22.09.2015	21.09.2017	1

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH	Tel	0211/6707-893
	Bereich Energie- und Ressourcentechnik	Fax	0211/6707-205
	Abteilung Industrieöfen- und Verbrennungstechnik	Projektleitung	
	Sohnstraße 65	Dr.-Ing. Carsten Rein	
	40237 Düsseldorf	Bearbeiter	
		Dr.-Ing. Carsten Rein	

Kooperationspartner R. Buchwald Stahl- und Metallbau
Industriestraße 5
41564 Kaarst

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In Projektphase 1 wurden Konzepte aufgezeigt wie sich die Wärmeübertragung in Regeneratoren verbessern lässt. Unter anderem wurde ein System mit kleinerem Wabenkörper-Pitchmaß getestet, welches die Wärmeübertragungsleistung um über 20% steigern konnte.

Ziel dieses Vorhabens ist die betriebliche Erprobung dieser kompakteren Regeneratorbauform mit kleinerem Wabenkörper-Pitchmaß sowie die Entwicklung eines Auslegungsprogramms zur schnellen und komfortablen Auslegung der Regeneratoren. Weiterhin soll die Strömungsführung im System optimiert und die Stabilität des Systems verbessert werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zunächst werden alte Schadensfälle von Vorgängersystemen ausgewertet und Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet. Die innere Strömungsführung soll mittels CFD dargestellt und verbessert werden. Im Anschluss sollen die Verbesserungsmaßnahmen in ein neues System einfließen und dieses betrieblich erprobt werden. Parallel werden parametrisierte Versuchsreihen für das Regeneratorsystem durchgeführt, anhand dessen ein Programm zur schnellen und komfortablen Auslegung entwickelt wird.

Ergebnisse und Diskussion

Mit der regenerativen Brennluftvorwärmung kann über 80 % der im Abgas von Industrieöfen enthaltenen Energie zurückgewonnen werden. Dies ist eine Steigerung von über 30 % zur konventionellen Wärmerückgewinnung an Industrieöfen. Wie bei jeder neuen Technik ist eine konsequente Weiterentwicklung bis hin zum industriellen Einsatz nötig.

Es wurden Schadensfälle von bereits betriebenen IST-Regneratorsystemen ausgewertet. Solche Schadensfälle können im schlimmsten Fall dazu führen, dass viele Ofenbetreiber von der Regenerativtechnik Abstand nehmen und auf die Energieeinsparung verzichten. Die Umwelt würde damit durch Meidung dieser hocheffizienten Technik unnötig belastet. Deshalb wurde im aktuellen Vorhaben eine detaillierte Analyse der Schadensfälle vorgenommen und das System im Hinblick auf die Standzeit optimiert. Die eingesetzten Faserkeramiken zur Wärmedämmung boten den Vorteil, dass sie leicht sind und sehr gute Dämmeigenschaften haben. Allerdings stellte sich heraus, dass eine ausreichende Beständigkeit gegen bestimmte Bestandteile (bspw. alkalische Verbindungen) nicht gegeben ist. Bei Industrieöfen führte dies zur Überhitzung und Zerstörung der Regeneratoren. Durch den Einsatz von Feuerfestbeton ist diese Beständigkeit nun gegeben, das System hat allerdings bei gleichem Bauraum nun ein höheres Gewicht. Weiterhin konnte im Vorgängerprojekt die ungleichmäßige Durchströmung in der Kopfgeometrie des Regenerators festgestellt werden. Mit einer 90°-Umlenkung wurde diese Strömung deutlich vergleichmäßigt, was die Fußkonstruktion des Regenerators vor zeitweise sehr heißen Strahlen schützt. Die Standfestigkeit der Systeme wurde erhöht.

Weiterhin wurde der betriebliche Einsatz, des in Projektphase 1 getesteten Regnerators mit kleinerem Wabenkörper-Pitchmaß beschrieben. Aufgrund der Verringerung des Bauraums von 25 % war es möglich, die Systeme an einem Drehherdofen einer Freiformschmiede zu installieren. Es wurden insgesamt acht Systeme verbaut, die mittlerweile seit sechs Monaten in Betrieb sind. Betriebsmessungen und / oder Inspektionen an den eingesetzten Systemen sind bisher aus betrieblichen Gründen nicht möglich. Nach Auswertung durch den Betreiber gibt es bisher keinerlei Leistungseinbußen oder Ausfälle.

Die weiteren Untersuchungen befassten sich mit systematischen Versuchsreihen und der Entwicklung eines Auslegungs-Tools auf Basis dieser Versuche und der Theorie zur Wärmeübertragung in Regeneratoren. Es wurden mit 137 Versuchen deutlich mehr Versuche als geplant durchgeführt und so eine Datenbasis geschaffen, mit der sich viele Systemkombinationen direkt auswerten lassen. Die Erstellung einer Versuchsmatrix bietet die direkte Möglichkeit nach Parametern zu filtern und mögliche Systemkombinationen und das zugehörige Ergebnis zu erhalten. Schon allein dies ist für die Fa. Buchwald und den Ofenbauer von großem Vorteil. Es bietet eine wesentlich höhere Flexibilität hinsichtlich der Konstruktion. Für eine Auslegungsleistung und Auslegungstemperatur gibt es nun immer mehrere Möglichkeiten in der Regeneratorkonstruktion. Hierbei ist zu beachten, dass Pitchmaße unterhalb der betrieblich erprobten 7,5 mm nur eingeschränkt eingesetzt werden können. Die Staubbelastung der Ofenraumatmosfera sollte hierbei sehr gering sein.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Um die Ergebnisse weiterführend publik zu machen ist die Veröffentlichung in bekannten Branchenzeitschriften wie bspw. „Stahl und Eisen“ und/oder „Gaswärme International“ geplant.

Fazit

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens unmittelbar in eine neue Konstruktion des Regenerators einfließen können bzw. bereits eingeflossen sind. Die verbesserte Standzeit und die Möglichkeiten, den Bauraum der Regeneratorsysteme zu verringern wird die Marktakzeptanz und die Marktdurchdringung dieser hocheffizienten Technik deutlich erhöhen. Die Eisen- und Stahlindustrie hat einen Anteil von 4 bis 5 % am weltweiten Energiebedarf. Da zahlreiche Prozesse sehr hohe Temperaturen benötigen bietet die effizienteste Art der Wärmerückgewinnung, die Regeneratorteknik, ein sehr großes Einsparpotenzial. Ein Mosaikstein stellt das hier weiterentwickelte Regeneratorsystem dar.

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

40237 Düsseldorf, Sohnstraße 65

Forschungsvorhaben gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

WEITERENTWICKLUNG UND INDUSTRIELLE ERPROBUNG EINER NEUEN KOMPAKTEREN BAUART VON HOCHEFFIZIENTEN REGENERATOREN FÜR INDUSTRIEÖFEN UND ENTWICKLUNG EINES AUSLEGUNGSPROGRAMMS (OPTIREG 2)

von

C. Rein, W. Adler (BFI), AZ 30559-02

M. Buchwald (R. Buchwald Stahl- und Metallbau), AZ 30559-02

Schlussbericht

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.
Laufzeit des Forschungsvorhabens: 22.09.2015 – 22.09.2017

Bericht Nr. 32.033

Kurzfassung

Regeneratoren stellen die effizienteste Form der Wärmerückgewinnung an Industrieöfen dar. Der hohe Raumbedarf dieser Technik verhindert aber oft den Einsatz der Technik. Bereits in Projektphase 1 (Vorgängerprojekt AZ-30559-01) konnte gezeigt werden, dass die Wärmeübertragungsleistung von Regeneratoren durch verbesserte Strömungsführung und/oder kleinere Wabenkörper-Pitchmaße erhöht werden kann. Zur Steigerung der Marktakzeptanz der hocheffizienten Regenerativbrennersysteme wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens eine kompaktere Bauform des Regenerators an einem Drehherdofen installiert und in Betrieb genommen. Im Rahmen der Untersuchungen konnten durch gezielte Optimierung der Konstruktion Schwachstellen des Systems durch Änderung der wärmedämmenden Materialien beseitigt werden. Zudem wurde die Strömungsführung durch eine neue Kopfgeometrie deutlich verbessert. Diese Maßnahmen werden zu einer erhöhten Standzeit des Systems führen. Das Projekt stellt somit die Umsetzung der in Projektphase 1 erarbeiteten Erkenntnisse dar.

Ein Regeneratorsystem mit Wabenkeramik mit einem 7,5 mm Pitchmaß und 25 % verringerter Bauhöhe wurde erstmals an einem Wärmofen einer Freiformschmiede installiert. Es wurden hier insgesamt acht Systeme angebaut, die mittlerweile mehr als sechs Monate ohne Störung betrieben werden.

In systematischen Versuchsreihen wurden die Parameter Leistung, Absaugrate, Taktzeit und Pitchmaß an einem Regenerator-testsystem variiert und messtechnisch erfasst. Es wurden insgesamt 137 Versuche durchgeführt. Das Regeneratorsystem mit 7,5 mm Pitchmaß und einer Bauhöhe von 750 mm lieferte erhöhte Brennluftvorwärmtemperaturen als das bisherige Standradsystem (11 mm Pitchmaß, 1 m Bauhöhe). Wabenkörper mit 3,6 mm und 5,8 mm Pitchmaß werden bislang nur in China hergestellt. Die Qualität dieser Wabenkörper ist deutlich geringer. Es konnte in den Versuchsreihen eine gesteigerte Rissbildung festgestellt werden. Auf Basis der Theorie zur Wärmeübertragung in Regeneratoren und der Messergebnisse konnte ein Regeneratorauslegungsprogramm entwickelt und validiert werden. Dies ermöglicht die flexible Auslegung der Regeneratoren nach Leistung, Pitchmaß, Taktrate und Bauhöhe. Eine Erweiterung des Modells macht es möglich, auch die Dimension der Anströmfläche in die Berechnung mit einzubeziehen.

Inhaltsverzeichnis	Seite
Kurzfassung	IV
1. Untersuchung von Schadensfällen bestehender Systeme und Verbesserung von Stabilität, Zuverlässigkeit und Strömungsführung	1
1.1 Untersuchung bisheriger Schadenfälle	1
1.2 Untersuchung der Strömungsführung	3
2. Betriebliche Erprobung des Regenerators mit kleineren Wabenkörper-Pitchmaßen (Konzentration auf den vielversprechendsten Ansatz aus dem Vorgängervorhaben)	12
3. Systematische Versuche verschiedener Regeneratoren anhand von parametrisierten Messreihen zur Modellentwicklung	14
4. Entwicklung eines Berechnungsprogramms zur Auslegung von Regeneratoren mit Wabenkeramiken	22
5. Diskussion der Ergebnisse	26
6. Danksagung	28
Schrifttum	VI

1. Untersuchung von Schadensfällen bestehender Systeme und Verbesserung von Stabilität, Zuverlässigkeit und Strömungsführung

Das aktuelle Regeneratorsystem wird bereits an einigen Wärmöfen erfolgreich eingesetzt und spart nachweislich 30 % Energie im Vergleich zur Zentralrekuperatoren ein, siehe [1]. Allerdings gab es einige Hemmnisse, die die weitere Marktverbreitung des Systems behinderten. Zum einen kam es zu verschiedenen Schadensfällen, die den Austausch von Systemen erforderlich machten. Zum anderen ist der Bauraum des IST-Systems so groß, dass der Einsatz an vielen Industrieöfen unmöglich ist. Im vorangegangenen Forschungsvorhaben [1] wurde daher ein kompakteres System auf Basis von Waben mit kleinerem Kanaldurchmesser (Pitchmaß) untersucht. Am Prüfstand konnten etwa 25 % Bauraum eingespart werden. Um das System für den industriellen Einsatz vorzubereiten, wurde es im aktuellen Projekt konstruktiv optimiert. Es sollte eine höhere Leistungsdichte und Standfestigkeit des Systems erreicht werden, um so die Marktakzeptanz zu steigern und das Interesse der Industrie an diesen Systemen zu erhöhen. Der großflächige Einsatz der Regenerativtechnik birgt enorme Energieeinsparpotenziale an Industrieöfen in der Eisen- und Stahlindustrie. Dies stellt das übergeordnete Ziel des Vorhabens dar.

1.1 Untersuchung bisheriger Schadenfälle

Die bisherigen Regeneratorsysteme mit 11 mm Pitchmaß zeigten bislang Schäden an den Regeneratorköpfen und -füßen. Diese Schäden traten allerdings nur an einzelnen Industrieöfen auf. Sie können wie folgt zusammengefasst werden:

- Schäden bis zur teilweisen Auflösung der metallischen Einbauten im Regeneratorfuß (**Bild 1**)
- Schäden der Faserzustellung im Regeneratorkopf bis zu Verstopfung der Waben von oben (**Bild 2**)



Bild 1: Aufgelöste Metallteile im Regeneratorfuß



Bild 2: Faserzustellung (links) und Verstopfung der Waben (rechts) im Regeneratorkopf

Zurückzuführen waren die Schäden im Kopf auf eine Belastung des Abgases mit alkalischen Bestandteilen. Der Schmelzpunkt des Fasermaterials wird durch alkalische Bestandteile im Abgas soweit gesenkt, dass es zum Schmelzen und Abtropfen der Fasermaterialien kommt. Diese Tropfen verstopfen nachfolgende Wabenkörper von oben. In der weiteren Folge kommt es zur Überhitzung im Kopf und Fuß, da nur noch vereinzelt Waben durchströmt werden können. Die Beständigkeit gegenüber alkalischen Bestandteilen wur-

de durch eine andere Wahl bei der Zustellung im Kopf behoben. Es wird Feuerfestbeton anstatt von Faserformteilen eingesetzt. Durch diese Wahl der Festzustellung kann ein Verstopfen der Wabenkörper in Zukunft vermieden werden. Die Konstruktion wird dadurch allerdings schwerer, was den Installationsaufwand etwas erhöht. Die Schäden im Fuß treten vermehrt auch bei anderen Systemen auf und konnten auf Überhitzung zurückgeführt werden. Aufgrund der am kalten Ende eingesetzten Metallbauteile sollte die Temperatur hier 500 °C nicht überschreiten. Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie es zu solchen Überhitzungen kommen kann und inwiefern diese behoben werden können. Der Wabenkörperbesatz war in keinem Fall der Grund für Schäden und bedarf keiner Änderung.

1.2 Untersuchung der Strömungsführung

Im vorangegangenen Forschungsvorhaben wurden detaillierte Versuche mit dem bestehenden IST-Regenerator und Verbesserungsvarianten durchgeführt [1]. Bei allen Versuchen wurden Temperaturwerte auf verschiedenen Ebenen in den keramischen Wabenkörpern aufgenommen. Die Thermoelemente wurden mittig in den Wabenkörpern platziert. Der vertikale Abstand zwischen den Messebenen beträgt 200 mm. **Bild 3** zeigt die zur Auswertung der Messergebnisse verwendeten Bezeichnungen für Wabenkörper-Quadranten (1-4) und Ebenen (A-D).

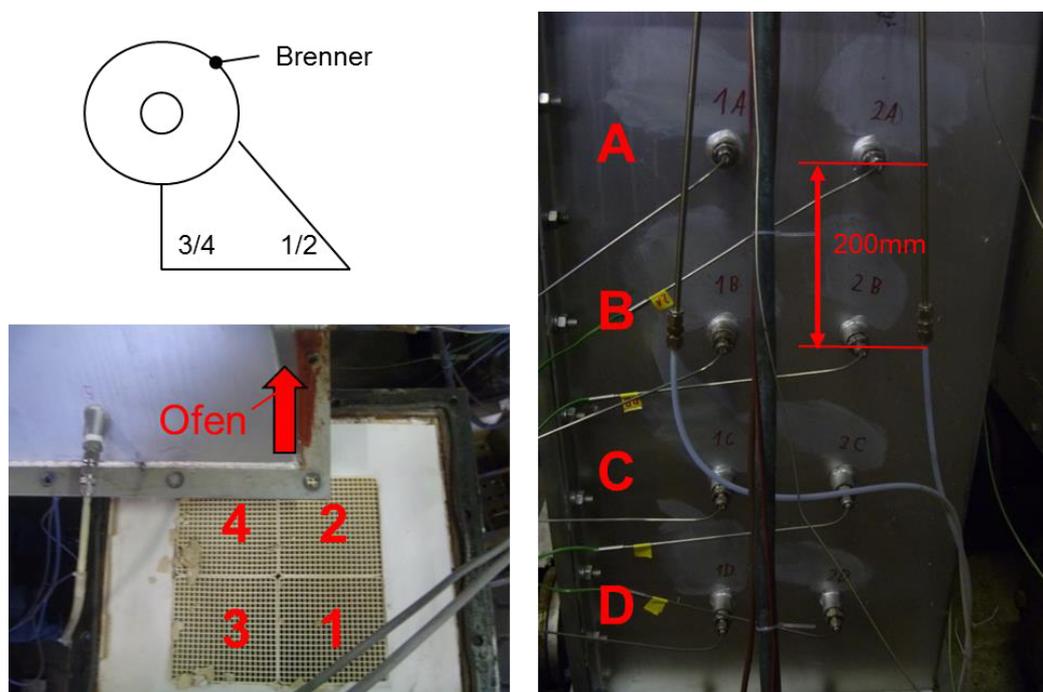


Bild 3: Aufteilung der Messstellen in Quadranten (1-4) und Ebenen (A-D)

In allen durchgeführten Messungen zeigte sich, dass die Temperatur im Quadrant 1 deutlich höher ist, als in allen weiteren Quadranten. Dies lässt auf eine ungleichmäßige Strömung im Regeneratorkopf schließen. Aufgrund der nicht vorhandenen Möglichkeit der Quervermischung in oder zwischen den Wabenkörper erhöht sich diese Temperaturdifferenz bis in Ebene D auf bis zu 400 K, siehe **Bild 4**.

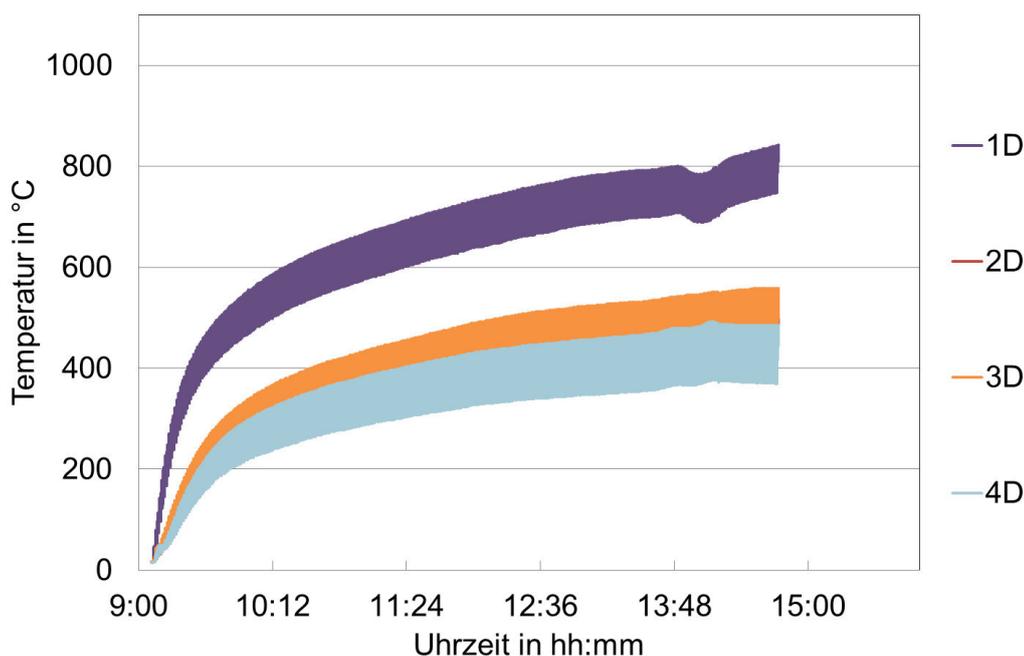


Bild 4: Gemessene Temperaturen am IST-Regenerator in Ebene D

Diese heißen Strahlen in Quadrant 1 können am Regeneratorfuß zu Überhitzung führen und Schäden verursachen, wie sie in Bild 1 zu sehen sind. Zudem sinkt der Wirkungsgrad des Regenerators, da der Wabenkörperbesatz lokal überlastet ist und in den anderen Quadranten sein Speicherpotenzial nicht voll ausgeschöpft wird.

Im aktuellen Projekt wurde ein numerisches CFD-Modell erstellt, mit dessen Hilfe die Strömung im Regeneratorkopf dargestellt werden kann. **Bild 5** zeigt die Stromlinien und Strömungsgeschwindigkeit dieser im Fluid-Modell (Negativ-Volumen) des Regenerators. Man erkennt, dass das Abgas mit sehr hoher Geschwindigkeit aus dem Regeneratorkopf ausströmt. Um diese Strömung zu verteilen wurde bereits eine Strömungskante vorgesehen, die allerdings dazu führt, dass die Strömung sehr stark in Richtung der Quadranten 1-2 abgelenkt wird.

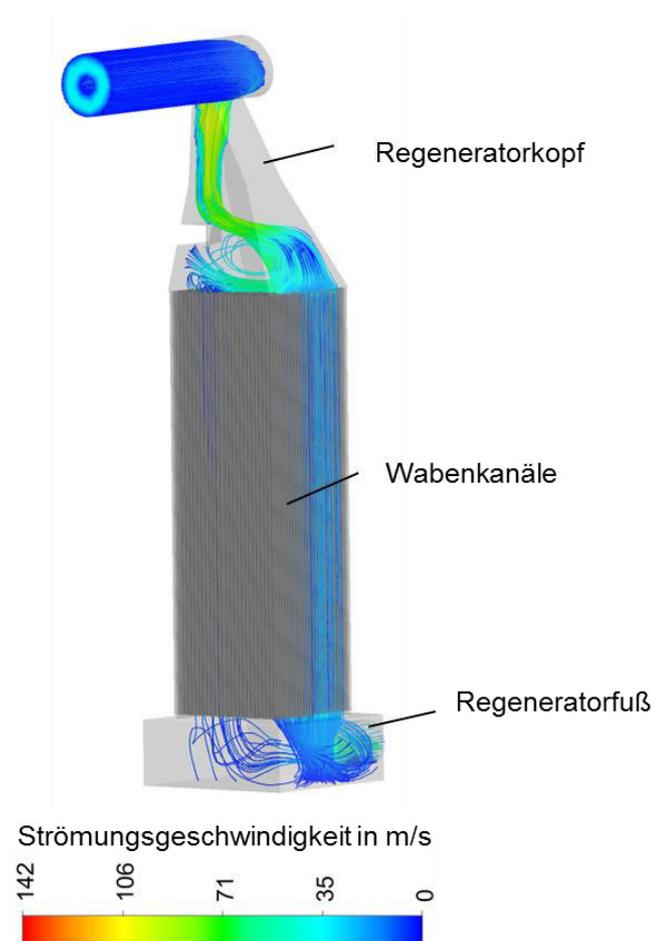


Bild 5: Stromlinien des Abgases im Fluid-Modell des Regenerators (Farbe: Geschwindigkeit)

Bild 6 zeigt die Geschwindigkeit des Abgases 3 cm oberhalb der Waben. Die numerische Berechnung stimmt mit dem gemessenen Strömungsverlauf gut überein. Der tiefrot eingefärbte Bereich in Quadrant 1 zeigt, dass hier das Abgas mit hoher Geschwindigkeit eintritt. Da der Volumenstrom proportional zur Geschwindigkeit ansteigt, tritt an dieser Stelle auch mehr Gas ein, als in anderen Quadranten.

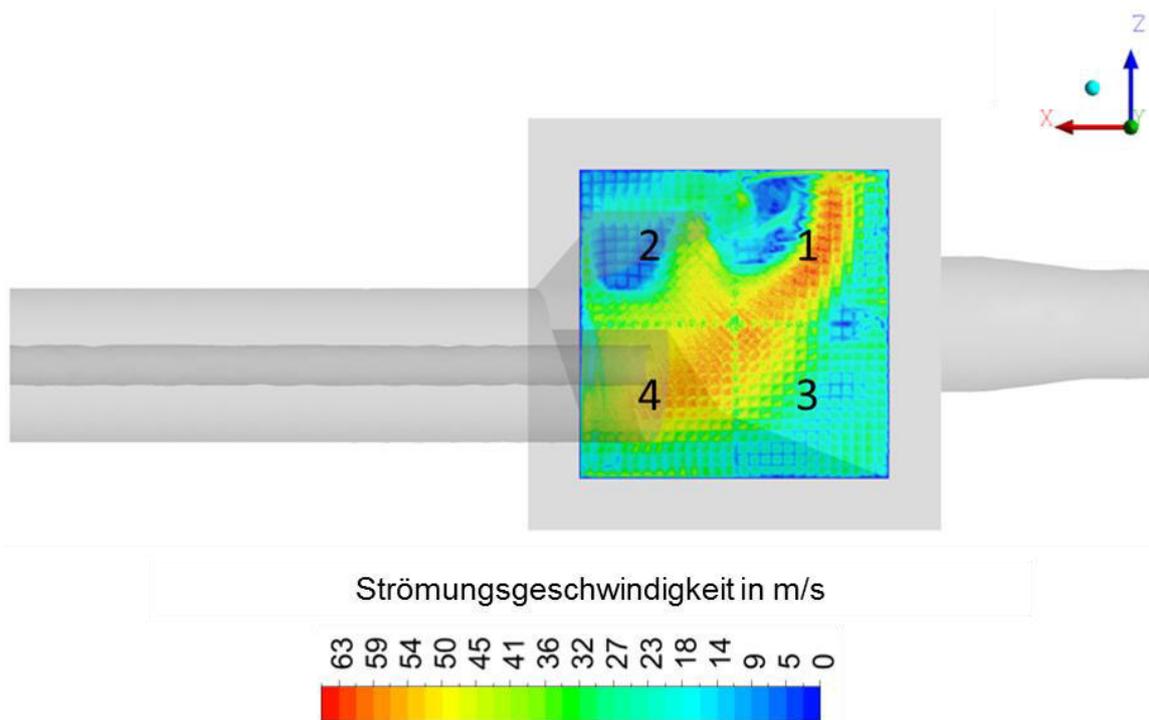


Bild 6: Strömungsgeschwindigkeit oberhalb der Waben

Ziel dieser Untersuchung war es, eine Regenerator-Kopfgeometrie zu entwickeln, die eine gleichmäßigere Anströmung ermöglicht. **Bild 7** zeigt die verschiedenen berechneten Varianten des Regeneratorkopfes. Neben der IST-Variante wurde eine Variante ohne Strömungskante, eine Variante mit vergrößerter Strömungskante und eine Variante mit einer 90°-Umlenkung berechnet. Die Randbedingungen waren in allen Berechnungen gleich. Während die Varianten ohne und mit vergrößerter Strömungskante zu einer Verschlechterung der Strömungsbedingungen führte, konnte mittels 90°-Umlenkung die Strömung am Wabeneintritt homogenisiert werden. In Bild 7 unten sieht man, dass die Strömung sich an die obere Wand des Strömungskanals anlegt und im folgendem horizontal auf die Waben strömt. Dies verhindert ein direktes Eintreten in die Waben und führt somit zu einer Vergleichmäßigung der Eintrittsströmung in die Waben.

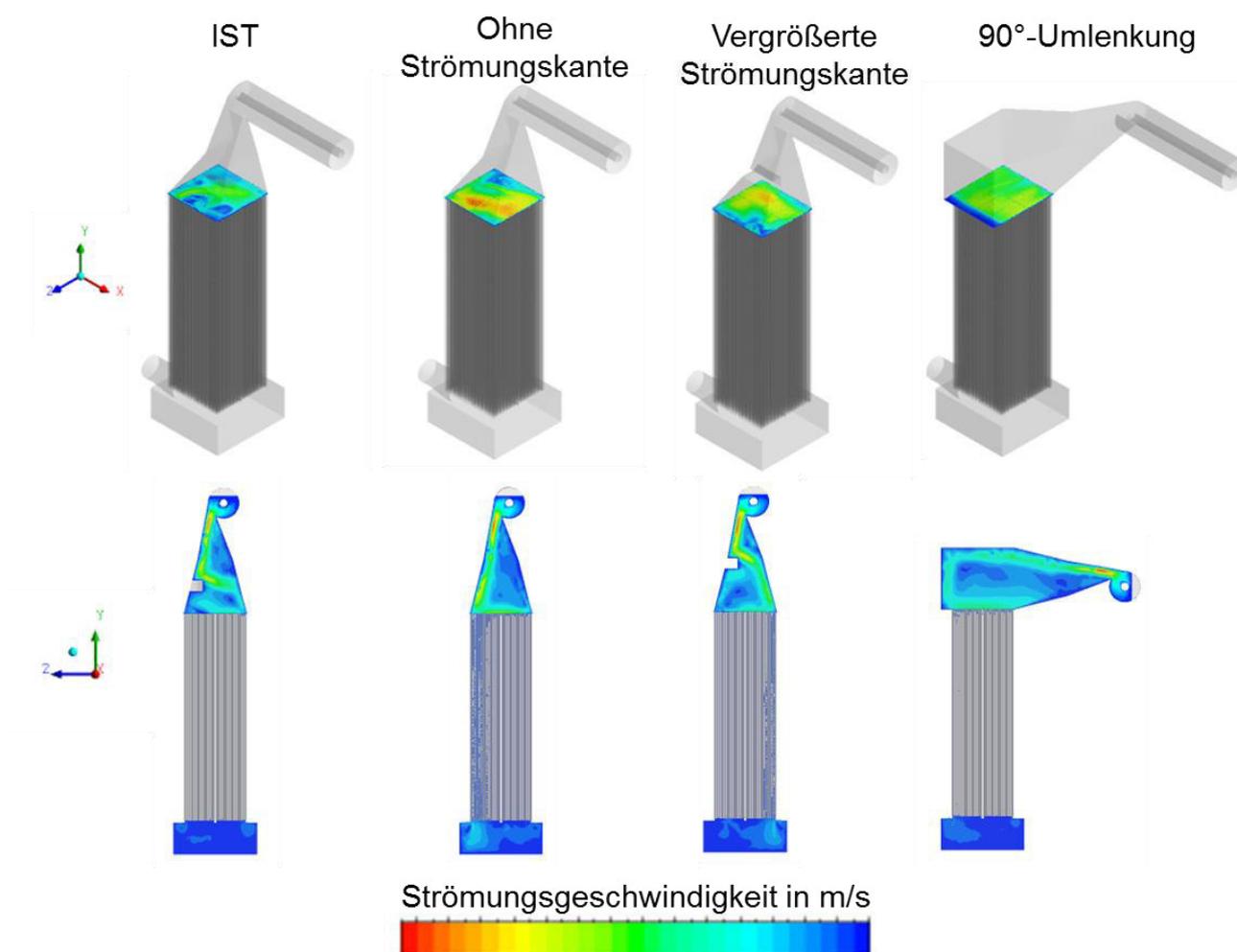


Bild 7: Berechnete Varianten und Ergebnis für die Strömungsgeschwindigkeit aus verschiedenen Sichtweisen

Auf Basis der Ergebnisse in Bild 7 wurde die 90°-Umlenkung weiter hinsichtlich ihrer Kompaktheit optimiert. In **Bild 8** wurde die Geschwindigkeit in Wabendurchströmungsrichtung am Wabeneintritt berechnet. Im Vergleich ist die IST-Variante, die Variante mit 90°-Umlenkung und eine kompaktere Variante der 90°-Umlenkung zu sehen. Der Vergleichmäßigungseffekt durch die 90°-Umlenkung kommt in dieser Darstellung deutlicher zur Geltung. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Länge des horizontalen Kanals prinzipiell vernachlässigbar ist bzw. dieser verkürzt werden kann. Die kompakte 90°-Umlenkung wurde als zielführende Lösung weiterverfolgt.

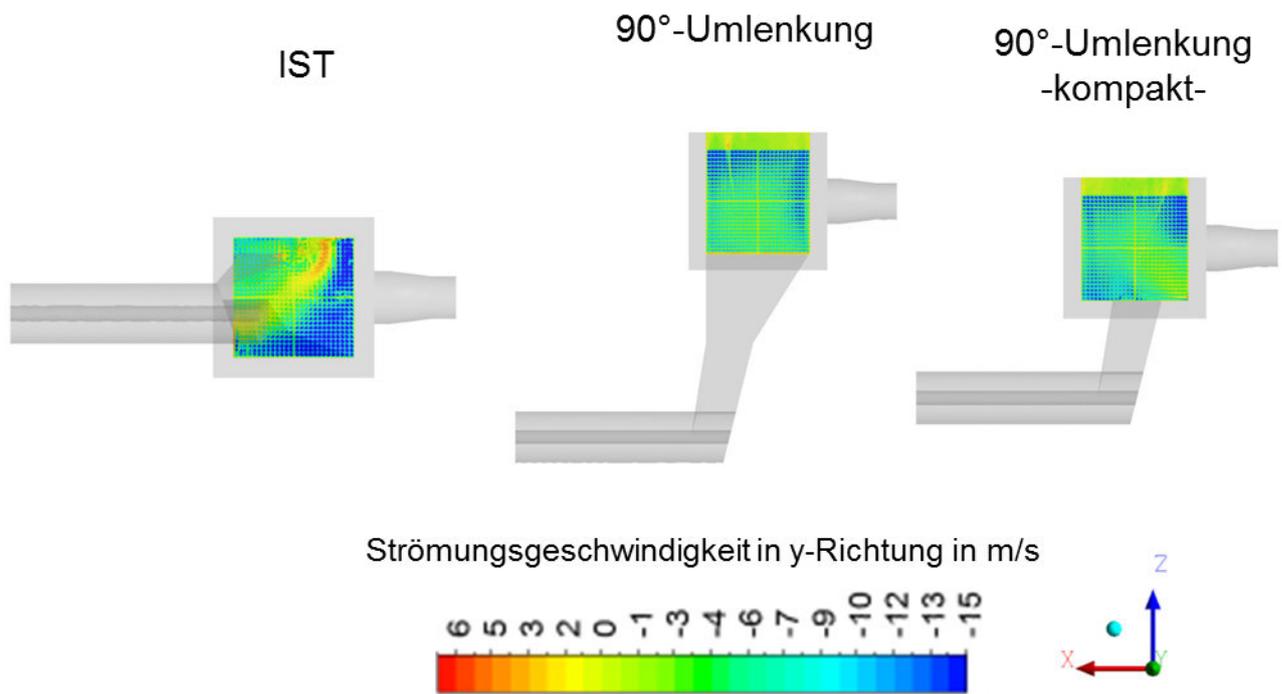


Bild 8: Strömungsgeschwindigkeit am Wabeneintritt in y-Richtung

Die kompaktere 90°-Umlenkung wurde nach den Vorgaben aus der numerischen Berechnung gebaut und am Prüfstand getestet, siehe **Bild 9**.

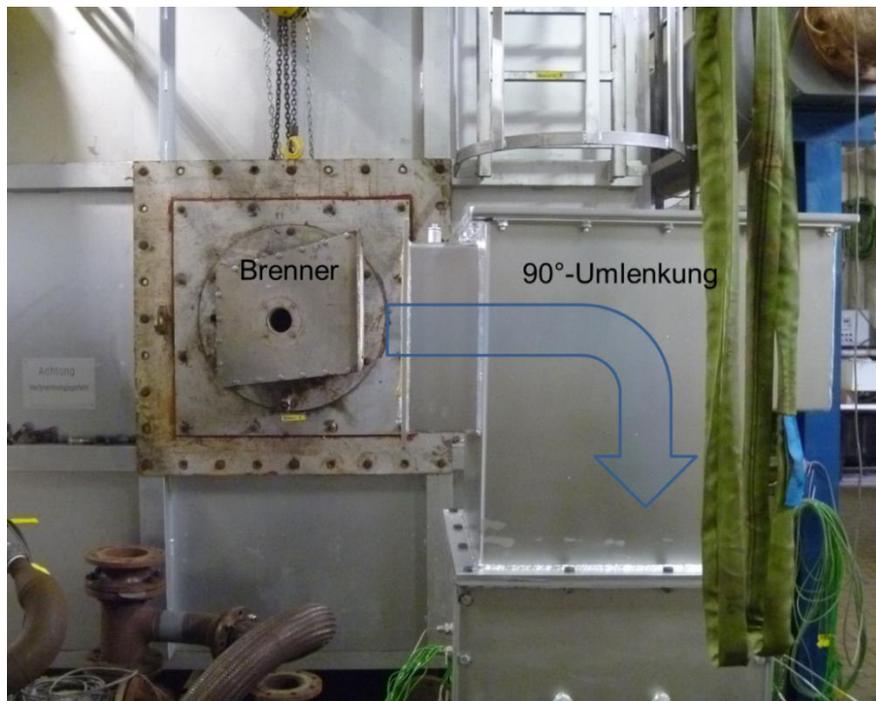


Bild 9: Foto des neuen Regeneratorkopfes mit 90°-Umlenkung vor Einbau an der Versuchsbrennkammer

Bild 10 zeigt den Messstellenplan der in diesem Vorhaben durchgeführten Versuche. Es wurden jeweils die Fuß- und Kopftemperaturen ober- und unterhalb des Regeneratorbesatzes, sowie mittig in jedem Wabenkörper (16 Stück) ein Temperaturwert gemessen. Für alle Messungen wurden Ni-Cr-Ni-Thermoelemente verwendet. Im Kopf wurde das Thermoelement durch ein Keramikröhrchen abgeschirmt und Gas lokal angesaugt. Damit wird die Messgenauigkeit hier deutlich erhöht. Der Strahlungseinfluss wird hierdurch deutlich reduziert.

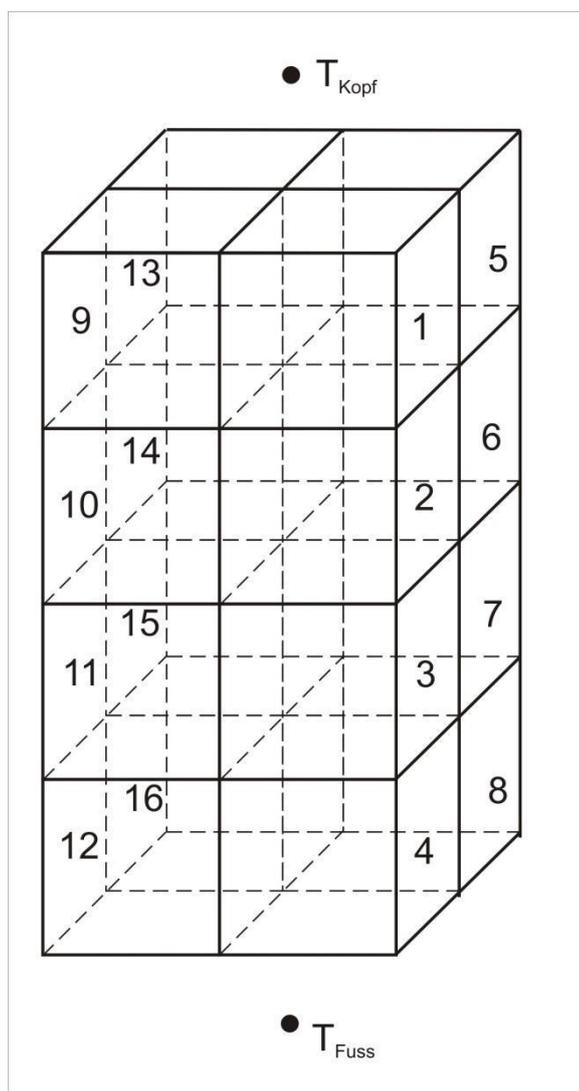


Bild 10: Messstellenplan der parametrisierten Regeneratorversuche

Bild 11 zeigt die Messergebnisse des Regeneratorversuchs mit 360 kW bei einer Ofenraumtemperatur von 1.200 °C, einer Taktzeit von 40 s und einer Abgasleistung von 100%.

Die Ergebnisse des alten Regeneratorkopfes sind links, die des neuen Regeneratorkopfes rechts dargestellt.

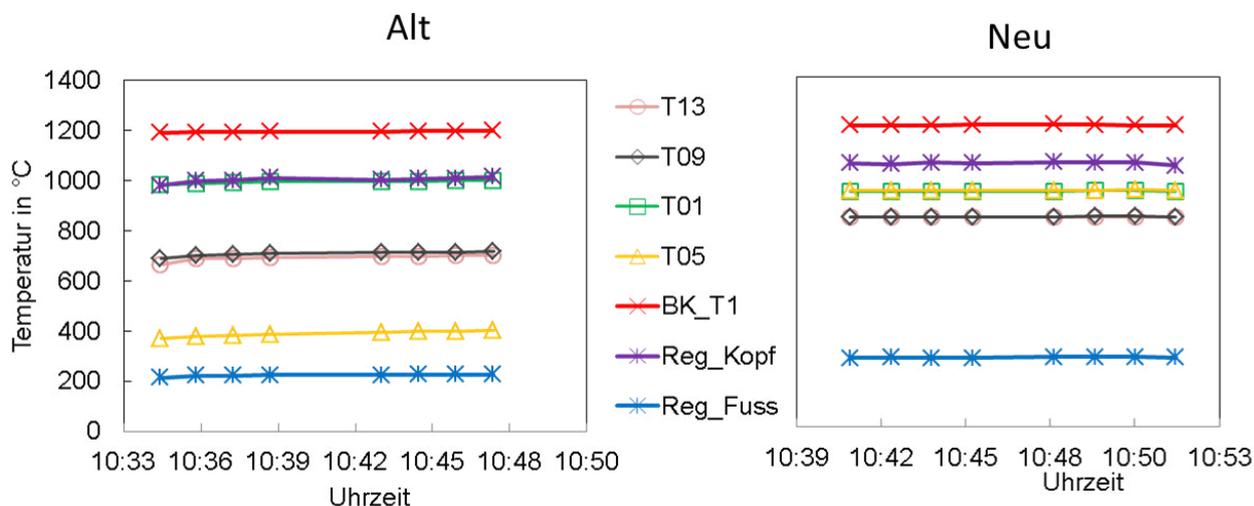


Bild 11: Messergebnisse des Regeneratorversuchs mit 360 kW, Ofenraumtemperatur 1.200 °C, Taktzeit 40 s, Abgasleistung 100 % (links: alter Regeneratorkopf; rechts: neuer Regeneratorkopf)

Tabelle 1: Messergebnisse aus Bild 11 in tabellarischer Form

	Alt	Neu
BK_T1	1193	1206
Reg_Kopf	1009	1058
T01	1009	946
T05	390	946
T09	710	839
T13	710	839
Reg_Fuß	223	275

Die gemessenen Temperaturen im alten Regeneratorkopf decken sich gut mit den Werten der numerischen Untersuchungen. Die Hauptströmung des heißen Abgases tritt in Quad-

rant 1 bei Thermoelement T01 in die Wabenkörper ein. Dadurch ist hier eine bedeutend höhere Temperatur als in den anderen Quadranten zu messen. Die Temperaturdifferenz zwischen höchster und niedrigster Temperatur liegt hier bei 619 K. In Quadrant 2 erfolgt nur eine sehr geringe Durchströmung, was die niedrige Temperatur erklärt. Vergleicht man die Ergebnisse mit der im Projekt neu entwickelten Anströmung, stellt man ein bedeutend gleichmäßigeres Strömungsbild fest. Die maximale Temperaturdifferenz liegt im neuen Kopf bei 107 K. Quadrant 1 und 2 werden hier noch etwas besser durchströmt als Quadrant 3 und 4. Das Ziel, die Strömungsführung im Kopf zu vergleichmäßigen wurde hiermit erreicht. Zudem konnte auch ein Grund für Schäden beseitigt werden, da anhand der Messung gezeigt werden konnte, dass der Quadrant 1 durch die überproportionale Durchströmung überlastet war. Dies führte zu einer Überhitzung in Ebene 4 bzw. im Regeneratorfuß. An Thermoelement 4 wurde 677 °C gemessen, was kritisch für die Fußkonstruktion des Regenerators ist.

2. Betriebliche Erprobung des Regenerators mit kleineren Wabenkörper-Pitchmaßen (Konzentration auf den vielversprechendsten Ansatz aus dem Vorgängervorhaben)

Im Vorgängervorhaben [1] wurde ein Regenerator mit Pitchmaß 7,5 mm getestet. Dieser erreichte eine Wirkungsgradverbesserung von 13 Prozentpunkten gegenüber dem IST-Regenerator. Zudem konnte eine Leistungssteigerung von 30 % unter Einhaltung der kritischen Fußtemperatur erreicht werden. Die Erkenntnisse aus Kapitel 1 wurden zudem durch die Fa. Buchwald in die neue Konstruktion mit aufgenommen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Ergebnisse des Vorgängervorhabens und die aktuellen Ergebnisse mit einem Brennerhersteller und einem Ofenbauer besprochen. Dadurch kam es parallel zu einer gemeinsamen Neuentwicklung des Systems. Die im Vorgängervorhaben getestete Konfiguration mit 7,5 mm Pitchmaß wurde gebaut, die in Kapitel 1 beschriebenen Änderungen und die 90°-Umlenkung wurden umgesetzt, siehe **Bild 12**.

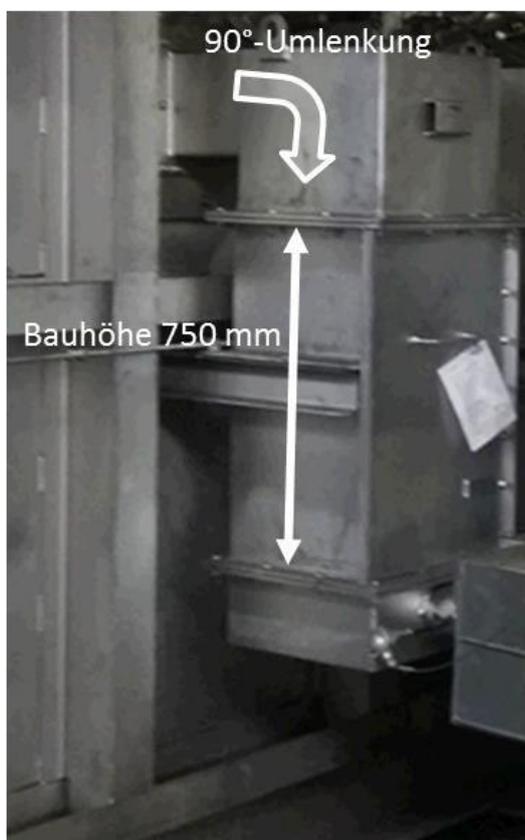


Bild 12: Entwickeltes Regeneratorsystem am Wärmofen einer Freiformschmiede

Der an diesem Regeneratorsystem eingesetzte Brenner ist ein Impulsbrenner. Aufgrund der höheren Leistungsdichte konnte die Bauhöhe um 25% reduziert werden, was letztendlich den Einsatz an einem Drehherdofen möglich machte. Der Ofen wurde insgesamt mit acht Systemen ausgerüstet. Die Prozesstemperatur des Ofens beträgt 1.250 °C. Es handelt sich um einen Wärmofen einer Freiformschmiede.

Die Systeme sind mittlerweile über sechs Monate im Einsatz. Nach Auswertung durch den Betreiber gibt es bisher keinerlei Leistungseinbußen oder Ausfälle. Die Funktion und Zuverlässigkeit ist bislang gegeben. Daher ist davon auszugehen, dass es bisher weder Verstopfen von Kanälen noch Schäden im Besatz gegeben hat. Betriebsmessungen und / oder Inspektionen an den eingesetzten Systemen sind bisher aus betrieblichen Gründen nicht möglich.

Diese Ergebnisse werden als erfolgreiche betriebliche Erprobung angesehen. Die Systeme werden weiter überwacht. Es wird angestrebt, das System in das Produktprogramm des Brennerherstellers mit aufzunehmen. Der Einsatz an diesem Wärmofen einer Freiformschmiede stellt das erste Beispiel dar, bei dem durch die kleinere Baugröße ein neues Einsatzgebiet des Systems erschlossen werden konnte. In Zukunft ist geplant das Brenner-Regenerator-System in die Produktpalette des Brennerherstellers aufzunehmen und die Ergebnisse in Fachzeitschriften zu veröffentlichen.

3. Systematische Versuche verschiedener Regeneratoren anhand von parametrisierten Messreihen zur Modellentwicklung

Der größte Arbeitspunkt im Projekt waren die parametrisierten Messreihen. Insgesamt wurden 137 Versuche durchgeführt. Die Versuche wurden an der 2-MW-Technikumsanlage des BFI auf dem Gelände der Hüttenwerke Krupp Mannesmann in Duisburg durchgeführt. **Bild 13** zeigt den Versuchsaufbau schematisch.

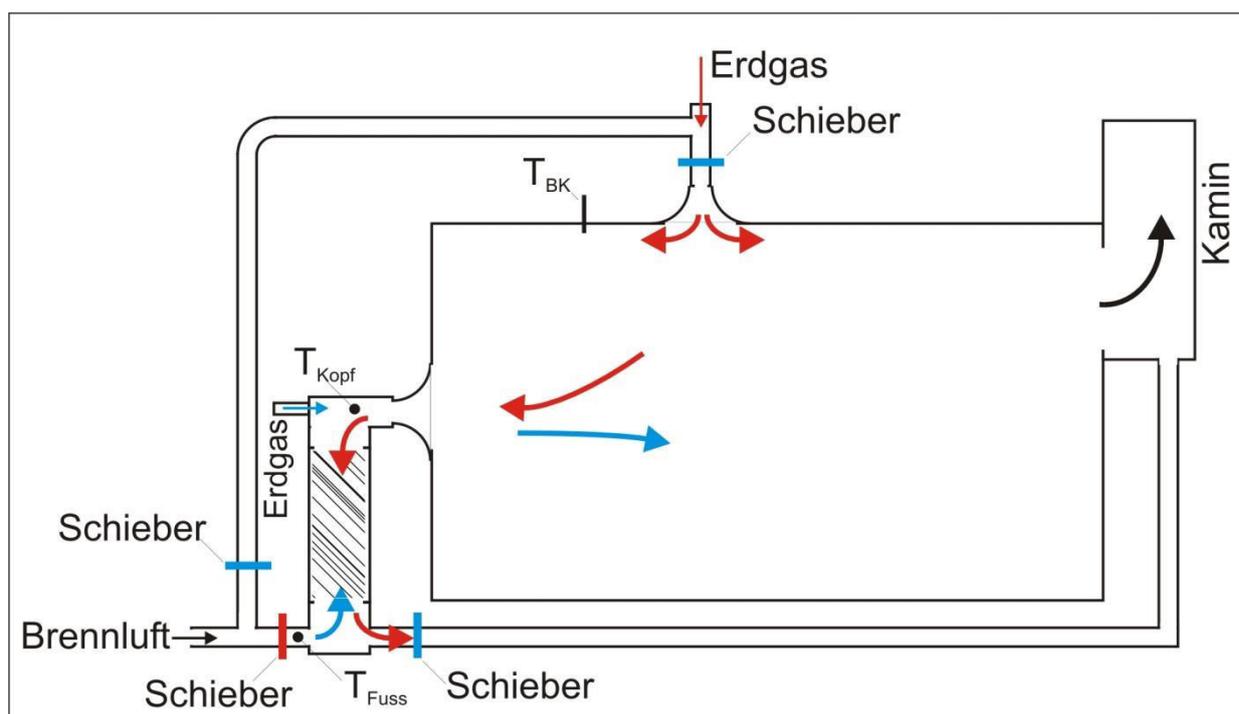


Bild 13: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus an der 2-MW-Technikumsanlage des BFI auf dem Gelände der Hüttenwerke Krupp Mannesmann

Die roten Pfeile und Schieber zeigen den Strömungsweg der Verbrennungsgase im sogenannten Aufladevorgang des Regenerators. Der Brenner an der Ofendecke erzeugt heißes Verbrennungsgas für eine bestimmte Taktzeit, welches zum „Aufladen“ des Regeneratorbesatzes genutzt wird. Die Wabenkörper speichern in dieser Zeit die Wärme aus dem Abgas. Die blauen Pfeile und Schieber zeigen den Entladevorgang, bei dem kalte Brennluft durch die heißen Wabenkörper strömt, sich erwärmt und mit dem Erdgas im seitlichen Brenner reagiert. Das Abgas verlässt in diesem Fall die Brennkammer über den Kamin. Auch die entsprechenden Messstellen für die Ofenraumtemperatur (T_{BK}) und die Regeneratortemperaturen sind im Bild dargestellt ($T_{Fu\beta}$, T_{Kopf}).

Im Wabenkörperbesatz wurden vier der aktuell am Markt verfügbaren Pitchmaße für Wabenkörper getestet (3,6 – 11 mm). In allen Versuchen wurde die wärmeübertragende Oberfläche in etwa konstant gehalten. Wabenkörper mit kleineren Pitchmaßen und mehr Strömungskanälen besitzen eine höhere spezifische Oberfläche. Dadurch kann die Anzahl der Wabenkörper verringert werden. **Tabelle 2** zeigt die Daten der verwendeten Wabenkörper.

Tabelle 2: Daten der Wabenkörper

Kanäle pro Stein		Wand- stärke	Pitch	freier Querschnitt	Höhe			V ges.	A ges.	A spez.	Masse Be- satz
Zahl	Weite				Stein	Zahl	ges.				
-	mm	mm	-	%	mm	-	mm	m ³	m ²	m ² /m ³	kg
169	9	2	11	61	250	4	1000	0,09	23,4	260	77,5
400	5,8	1,7	7,5	60	250	3	750	0,0675	23,6	350	59,7
625	4,9	0,9	5,8	67	250	2	500	0,045	24	534	33,0
1600	2,9	0,7	3,6	60	330	1	330	0,0297	24,2	815	26,3

Da mit abnehmendem Pitchmaß entsprechend weniger Wabenkörper nötig waren, um dieselbe wärmeübertragende Oberfläche zu erreichen, wurden die Wabenkörper mit kleineren Pitchmaßen entsprechend im Standardregeneratorgehäuse aufgeständert. Dies geschah mit einer Stahlstütze im Regeneratorfuß, vgl. **Bild 14**.



Bild 14: Links: Geöffnetes Gehäuse mit 16 Wabenkörpern (11 mm Pitchmaß); Rechts: Geöffnetes Gehäuse mit 12 auf einer Stahlstütze aufgeständerten Wabenkörpern (7,5 mm Pitchmaß)

Bild 15 zeigt den Beschriftungsschlüssel der Versuchsnummern. Es wurden systematisch für die vier Pitchmaße, die Parameter Ofenraumtemperatur, Abgasstrom, Taktzeit und Leistung variiert. Die Ofenraumtemperatur wurde zwischen 900 und 1300 °C, der Abgasstrom zwischen 50 und 150 %, die Taktzeit zwischen 20 und 90 s und die Leistung zwischen 250 und 600 kW variiert. Zudem wurden Abstandshalter (siehe Bild 16) zwischen verschiedenen Wabenkörperebenen und deren Auswirkung auf die Temperaturverteilung getestet. Durch die Abstände zwischen den Wabenkörper wird der Abgasströmung die Möglichkeit der Quervermischung zwischen den Wabenabschnitten gegeben. Ziel war eine gleichmäßigere Auslastung des Wabenkörperbesatzes.

Bild 15: Beschriftungsschlüssel der Versuchsnummern

Bild 16: Geöffnetes Regeneratorgehäuse mit Abstandhaltern zwischen den Wabenkörperebenen

Eines der ersten und wichtigsten Ergebnisse der Versuche war, dass der Regenerator mit dem 7,5 mm Pitchmaß und 25 % verringerter Bauhöhe, eine um ca. 100 K höhere Brennluftvorwärmung bei allen Taktzeiten ermöglicht, siehe Bild 17. Diese Ergebnisse bestätigt

die Versuche des Vorgängervorhabens und konnte letztendlich zur Entscheidung der betrieblichen Erprobung in Kapitel 2 beitragen. Während die Fußtemperaturen bei beiden Varianten in etwa gleich sind, ist die Kopftemperatur (Brennlufttemperatur) beim Regenerator mit 7,5 mm Pitchmaß höher.

Bild 17: Variation der Taktrate bei 360 kW, 1.200 °C, 100 % Abgasabsaugung mit 11 mm Pitchmaß und 7,5 mm Pitchmaß

Bild 18 zeigt die Regeneratortemperaturen in Abhängigkeit der verschiedenen Pitchmaße. Die Temperatur Reg_Kopf_min ist die Temperatur der Brennluft im Kopf (Brennluftvorwärmung). Die Temperatur Reg_Fuß_max ist die Abgastemperatur im Fuß. Die wärmeübertragenden Oberflächen sind bei den Pitchmaßen 3,6 und 5,8 mm geringfügig höher (etwa 3 %), siehe Tabelle 2. Trotz dieser in etwa gleichen wärmeübertragenden Oberfläche steigt die Brennluftvorwärmtemperatur (Reg_Kopf min) mit abnehmendem Pitchmaß. Eine Erklärung hierfür könnte eine gleichmäßigere Durchströmung aufgrund des leicht erhöhten Druckverlustes bei kleineren Pitchmaßen darstellen. Die Brennluftvorwärmtemperatur liegt bei den Pitchmaßen 3,6 und 5,8 mm über 1.000 °C. Beim 7,5 mm Pitchmaß liegt sie bei ca. 900 ±1.000 °C und beim 11 mm Pitchmaß bei ca. 800 ±950 °C. Die maximalen Regeneratorfußtemperaturen liegen allesamt zwischen 225 ±311 °C. Es kann festge-

stellt werden, dass kleinere Pitchmaße bei in etwa gleicher wärmeübertragender Oberfläche eine erhöhte Brennlufttemperatur liefern.

Bild 18: Vergleich der Ergebnisse in Abhängigkeit des Pitchmaßes mit 360 kW, der Temperatur mit 1200 °C, einer Abgasabsaugung von 100% und einer Taktrate von 40s

Bild 19 zeigt die Regeneratortemperaturen bei Variation der Absaugrate des Abgases für das Pitchmaß 7,5 mm. Bei 50, 100, und 150 % Absaugung wird eine Brennluftvorwärmung ($T_{\text{Kopf,min}}$) von 618, 907 und 993 °C erreicht. Kritisch ist die maximale Temperatur im Fuß. Diese steigt stark an bei Erhöhung der Absaugrate. In Ofenprozessen kann durch Anpassung dieser Absaugrate eine erhöhte Flexibilität erzielt werden, allerdings sollte man diese Absaugung auf maximal 150 % begrenzen, um Schäden an der Regeneratorfußkonstruktion zu vermeiden.

Bild 20 zeigt die Variation der Brennerleistung bei einem Pitchmaß von 7,5 und 11 mm. Bei beiden Pitchmaßen sinkt die Brennluftvorwärmung und es steigt die maximale Fußtemperatur mit steigender Leistung. Beide Regeneratorsysteme sind bis 500 kW einsetzbar, jedoch liefert der Regenerator mit 7,5 mm Pitchmaß und eine um 250 mm reduzierten Bauhöhe bessere Ergebnisse.

Bild 19: Variation der Abgas-Absaugrate bei 7,5 mm Pitchmaß

Bild 20: Variation der Brennerleistung bei 7,5 und 11mm Pitchmaß (1.200 °C, 40 s Taktzeit)

Aufgrund der umfassenden Untersuchungen und zahlreichen Versuche wurden im Bericht nur die wichtigsten Ergebnisse in Diagrammen und Bildern dargestellt. Zusammenfassend können aus den systematischen Versuchen folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Das 7,5 mm Pitchmaß mit 750 mm Bauhöhe lieferte bessere Ergebnisse als das 11 mm Pitchmaß mit 1 m Bauhöhe.
- Abstandshalter hatten geringfügigen bis keinen Einfluss auf die Regenerator-temperaturen.
- Bei erhöhten Absaugraten (>100 %) und längeren Taktraten (Pausenzeiten) von mehr als 1 min besteht Überhitzungsgefahr im Regeneratorfuß.
- Die Dämmplatten des Regenerators waren nach zahlreichen Umbauten noch intakt.
- Wabenkörper sind bei Einsatz von Distanzstücken weniger anfällig für Rissbildung.
- Wabenkörper mit 3,6 und 5,8 mm Pitchmaß werden ausschließlich in China gefertigt und haben deutlich höhere Toleranzen in den Abmessungen. Weiterhin waren die Wabenkörper deutlich anfälliger für Rissbildung und Brüche.
- Die Qualität der Wabenkörper mit 7,5 und 11 mm Pitchmaß des deutschen Herstellers ist deutlich höher.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wird derzeit vom Einsatz der Pitchmaße 3,6 und 5,8 mm abgeraten. Bei längerfristig großen Bedarfsmengen für diese Geometrien kann allerdings der deutsche Hersteller seine Fertigungsanlagen umrüsten, sodass diese Pitchmaße auch in guter Qualität verfügbar wären.

4. Entwicklung eines Berechnungsprogramms zur Auslegung von Regeneratoren mit Wabenkeramiken

Auf Basis der Versuche wurde eine Versuchsmatrix erstellt, die eine direkte Filterung der Versuche in Abhängigkeit aller getesteten Parameter ermöglicht. **Bild 21** zeigt einen Ausschnitt aus der Versuchsmatrix und den filterbaren Parametern. Als wichtigste Ausgabeparameter zur Bewertung des Versuchs dient die minimale Kopftemperatur (gleichbedeutend mit der Brennlufttemperatur) und die maximale Fußtemperatur (kritische Temperatur für Fußkonstruktion = 500 °C).

Pitchmaß	P_{therm}	V_{Abgas}	Takt	T_{Ofen}	$T_{\text{Kopf, min}}$	$T_{\text{Fuß, max}}$
7.5 mm	360 KW	150%	20s	1200°C	922	210
7.5 mm	360 KW	150%	40s	1200°C	993	403
7.5 mm	360 KW	150%	20s	1200°C	922	210
7.5 mm	360 KW	100%	30s	1200°C	947	247
7.5 mm	360 KW	100%	40s	1200°C	907	250
7.5 mm	360 KW	100%	50s	1200°C	930	270
7.5 mm	360 KW	100%	60s	1200°C	937	292
7.5 mm	360 KW	100%	70s	1200°C	919	295
7.5 mm	360 KW	100%	80s	1200°C	928	317
7.5 mm	360 KW	100%	90s	1200°C	918	312
7.5 mm	360 KW	50%	40s	1200°C	618	81
7.5 mm	360 KW	150%	40s	1200°C	993	403
5.5 mm	360 KW	150%	40s	1200°C	1059	407
5.5 mm	360 KW	100%	20s	1200°C	1031	292
5.5 mm	360 KW	100%	30s	1200°C	1032	294
5.5 mm	360 KW	100%	40s	1200°C	1020	311
5.5 mm	360 KW	100%	50s	1200°C	1011	320
5.5 mm	360 KW	100%	60s	1200°C	1010	335
5.5 mm	360 KW	100%	70s	1200°C	1010	354

Bild 21: Bildausschnitt aus der erstellten Versuchsmatrix

Beispielsweise bietet dies die Möglichkeit die Versuche nach Leistung und Ofenraumtemperatur zu filtern. Diese Parameter sind für den Ofenbauer am wichtigsten. **Bild 22** zeigt die nach 500 kW und 1200 °C gefilterten Versuche. Hier wird direkt ersichtlich welche Varianten die höchste Brennluftvorwärmung ($T_{\text{Kopf, min}}$) liefern. In diesem Fall wurden die besten Ergebnisse mit Wabenkörperbauhöhe von 330 mm mit 3,6 mm Pitchmaß und 750 mm Wabenkörperbauhöhe mit 7,5 mm Pitchmaß erzielt. Das Pitchmaß 5,5 und 11

mm lieferte nur eine deutlich niedrigere Brennluftvorwärmung. Bei sehr sauberer Ofenatmosphäre könnte mit dem 3,6 mm Pitchmaß gegenüber dem 11 mm Pitchmaß 67 % der Bauhöhe im Wabenkörperbesatz eingespart werden.

Pitchmaß	Versuchskennung	P _{therm}	V _{Abgas}	Takt	T _{Ofen}	T _{Kopfmin}	T _{Fußmax}
5.5 mm	322341	500 KW	100%	40s	1200°C	762	279
3.6 mm	422341	500 KW	100%	40s	1200°C	933	233
7.5 mm	222341	500 KW	100%	40s	1200°C	903	263
11 mm	122341	500 KW	100%	40s	1200°C	783	242

Bild 22: Filterung nach 500 kW Leistung und 1.200 °C Ofenraumtemperatur

Die Wärmeübertragung in Regeneratoren ist aus der Fachliteratur [3] bekannt. Auf Basis der Gleichungen des sogenannten Stufenverfahrens nach Hausen konnte ein Berechnungsprogramm erstellt werden. Dieses wurde mit Korrekturfaktoren versehen, die anhand der Versuchsmatrix validiert wurden. Das Programm „Reg_Modell“ wurde zur einfachen Bedienung in Excel erstellt, vgl. **Bild 23:**

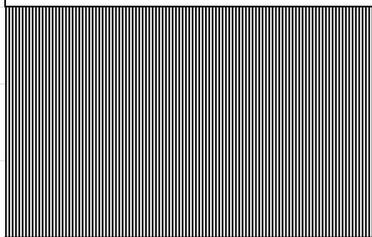
Eingabe		Regeneratorbesatz	
Brennerleistung in kW	360	Brennluftvorwärmtemperatur in °C	
Pitchmaß in mm	11	826	Bauraum Besatz in m³
Prozesstemperatur in °C	1.200		
Besatzhöhe in m	1	276	0,09
Taktrate in s	40	max. Fußtemperatur in °C	

Bild 23: Eingabe- und Ausgabemaske des Regeneratorberechnungsprogramms

Bild 24 zeigt die mit dem Reg_Modell berechneten Werte für Brennluft- und Abgastemperatur verglichen mit den gemessenen Werten bei verschiedenen Pitchmaßen. Die einzige etwas größere Abweichung findet sich beim 5,8 mm Pitchmaß, allerdings kann man hier auch Messungenauigkeiten vermuten.

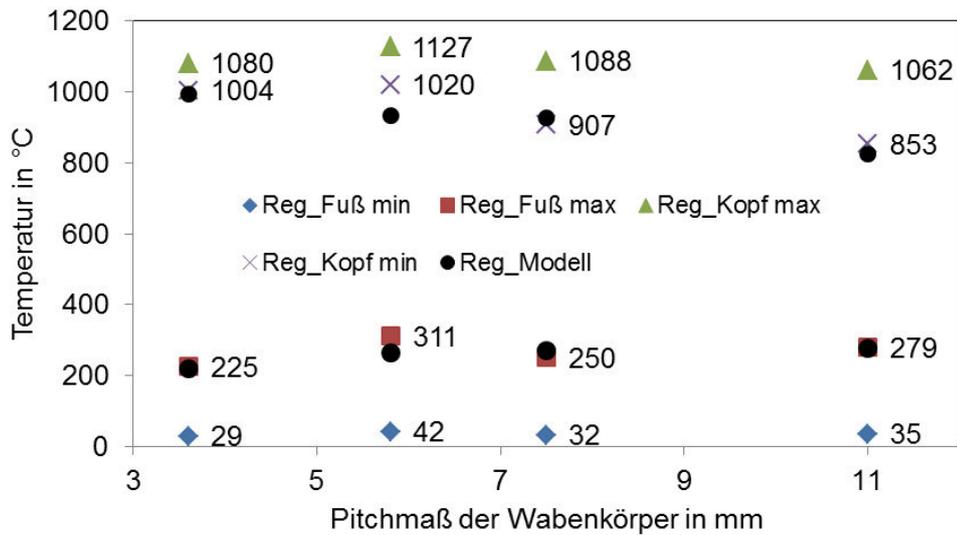


Bild 24: Vergleich der Reg_Modell-Ergebnisse mit den Messungen

Die Ergebnisse des Reg_Modells stimmen gut mit den gemessenen Werten überein. Es konnten auf Basis der systematischen Versuche und der Theorie zur Wärmeübertragung in Regeneratoren [3] ein Auslegungstool geschaffen werden mit dem sich das Regenerator-system der Fa. Buchwald schnell und genau auslegen lässt. Die Flexibilität in der Kon- struktion bzgl. Bauhöhe/Bauraum wurde erhöht. Mit dem Reg_Modell ist es nun möglich auch Konstruktionen, die nicht getestet wurden zu berechnen. Ein Beispiel hierfür zeigt **Bild 25**. Ein Regeneratorsystem mit 1 m Bauhöhe und 3,6 mm Pitchmaß erzielt bei einer Leistung von 1,5 MW eine Brennlufthvorwärmung von 961 °C.

Eingabe		Regeneratorbesatz	
Brennerleistung in kW	1500	Brennlufthvorwärmtemperatur in °C	
Pitchmaß in mm	3,6	961	
Prozesstemperatur in °C	1.200	Bauraum Besatz in m³	
Besatzhöhe in m	1	0,09	
Taktrate in s	40	244	
		max. Fußtemperatur in °C	

Bild 25: Ergebnis für 1,5 MW Leistung und Besatz mit 3,6 mm Pitchmaß und Bauhöhe von 1 m

Es ist zudem möglich das Modell um die Dimension der Anströmfläche zu erweitern. Hierzu wäre die Beibehaltung der Anströmbedingungen nötig. Bei der neuentwickelten 90°-Umlenkung wäre dies durch Anpassung der Strömungskanaldurchmesser möglich. Das erweiterte Reg_Modell berechnet beispielsweise bei einer Anströmfläche von 400x400 mm (Standard ist 300x300 mm), einer Bauhöhe von 500 mm und einem Pitchmaß von 7,5 mm eine Brennluftvorwärmung von 951 °C bei einer maximalen Abgastemperatur von 252 °C. Man könnte somit den Bauraum an einen gegebenen Platzbedarf (Höhe x Breite) anpassen, **Bild 26**.

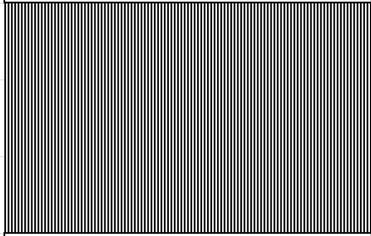
Eingabe		Regeneratorbesatz	
		<i>Brennluftvorwärmtemperatur in °C</i>	
Brennerleistung in kW	360	951	Bauraum Besatz in m³
Pitchmaß in mm	7,5		
Prozesstemperatur in °C	1.200		0,08
Besatzhöhe in m	0,5		
Taktrate in s	40	252	
Anströmfläche in m²	0,16	<i>max. Fußtemperatur in °C</i>	

Bild 26: Ergebnis für 360 kW Leistung und Besatz mit 7,5 mm Pitchmaß, Bauhöhe von 0,5 m und Anströmfläche von 0,16 m²

5. Diskussion der Ergebnisse

Mit der regenerativen Brennluftvorwärmung kann über 80 % der im Abgas von Industrieöfen enthaltenen Energie zurückgewonnen werden. Dies ist eine Steigerung von über 30% zur konventionellen Wärmerückgewinnung an Industrieöfen. Wie bei jeder neuen Technik ist eine konsequente Weiterentwicklung bis hin zum industriellen Einsatz nötig.

In Kapitel 1 wurden Schadensfälle von bereits betriebenen IST-Regeneratorsystemen ausgewertet. Solche Schadensfälle können im schlimmsten Fall dazu führen, dass viele Ofenbetreiber von der Regenerativtechnik Abstand nehmen und auf die Energieeinsparung verzichten. Die Umwelt würde damit durch Meidung dieser hocheffizienten Technik unnötig belastet. Deshalb wurde im aktuellen Vorhaben eine detaillierte Analyse der Schadensfälle vorgenommen und das System im Hinblick auf die Standzeit optimiert. Die eingesetzten Faserkeramiken zur Wärmedämmung boten den Vorteil, dass sie sehr leicht sind und sehr gute Dämmeigenschaften haben. Allerdings stellte sich heraus, dass eine ausreichende Beständigkeit gegen bestimmte Bestandteile (bspw. alkalische Verbindungen) nicht gegeben ist. Bei Industrieöfen führte dies zur Überhitzung und Zerstörung der Regeneratoren. Durch den Einsatz von Feuerfestbeton ist diese Beständigkeit nun gegeben, das System hat allerdings bei gleichem Bauraum nun ein höheres Gewicht. Weiterhin konnte im Vorgängerprojekt die ungleichmäßige Durchströmung in der Kopfgeometrie des Regenerators festgestellt werden. Mit einer 90°-Umlenkung wurde diese Strömung deutlich vergleichmäßigt, was die Fußkonstruktion des Regenerators vor zeitweise sehr heißen Strahlen schützt. Die Standfestigkeit der Systeme wurde erhöht.

In Kapitel 2 wurde der betriebliche Einsatz, des im Vorgängervorhaben [1] getesteten Regenerators mit einem Pitchmaß von 7,5 mm beschrieben. Aufgrund der Verringerung des Bauraums von 25% war es möglich, die Systeme an einem Drehherdofen einer Freiformschmiede zu installieren. Es wurden insgesamt acht Systeme verbaut, die mittlerweile seit sechs Monaten in Betrieb sind. Betriebsmessungen und / oder Inspektionen an den eingesetzten Systemen sind bisher aus betrieblichen Gründen nicht möglich. Nach Auswertung durch den Betreiber gibt es bisher keinerlei Leistungseinbußen oder Ausfälle.

Kapitel 3 und 4 befassten sich mit systematischen Versuchsreihen und der Entwicklung eines Auslegungs-Tools auf Basis dieser Versuche und der Theorie zur Wärmeübertra-

gung in Regeneratoren [3]. Es wurden mit 137 Versuchen deutlich mehr Versuche als geplant durchgeführt und so eine Datenbasis geschaffen, mit der sich viele Systemkombinationen direkt auswerten lassen. Die Erstellung einer Versuchsmatrix bietet die direkte Möglichkeit nach Parametern zu filtern und mögliche Systemkombinationen und das zugehörige Ergebnis zu erhalten. Schon allein dies ist für die Fa. Buchwald und den Ofenbauer von großem Vorteil. Es bietet eine wesentlich höhere Flexibilität hinsichtlich der Konstruktion. Für eine Auslegungsleistung und Auslegungstemperatur gibt es nun immer mehrere Möglichkeiten in der Regeneratorkonstruktion. Hierbei ist zu beachten, dass Pitchmaße unterhalb der betrieblich erprobten 7,5 mm nur eingeschränkt eingesetzt werden können. Die Staubbelastung der Ofenraumatmosfera sollte hierbei sehr gering sein.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens unmittelbar in eine neue Konstruktion des Regenerators einfließen können bzw. bereits eingeflossen sind. Die verbesserte Standzeit und die Möglichkeiten den Bauraum der Regeneratorsysteme zu verringern wird die Marktakzeptanz und die Marktdurchdringung dieser hocheffizienten Technik deutlich erhöhen. Die Eisen- und Stahlindustrie zählt mit einem Anteil von 4 bis 5 % des weltweiten Energiebedarfs zu den größten Energieverbrauchern [2] und Emittenten von Kohlendioxid. Da zahlreiche Prozesse sehr hohe Temperaturen benötigen bietet die effizienteste Art der Wärmerückgewinnung, die Regeneratortechnik, ein sehr großes Einsparpotenzial. Ein Mosaikstein stellt das weiterentwickelte Regeneratorsystem der Fa. Buchwald dar.

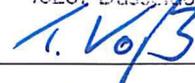
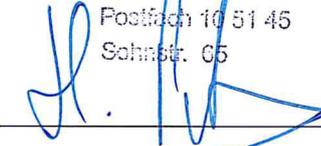
Um die Ergebnisse weiterführend publik zu machen ist die Veröffentlichung in bekannten Branchenzeitschriften wie bspw. „Stahl und Eisen“ und/oder „Gaswärme International“ geplant.

6. Danksagung

Das Forschungsvorhaben (DBU-AZ: 30559-02) wurde aus Haushaltsmitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Düsseldorf, 26.2.2018
Ort, Datum

VDEH-Betriebsforschungsinstitut GmbH
Postfach 10 51 45 40042 Düsseldorf
Sohnstr. 65 40237 Düsseldorf



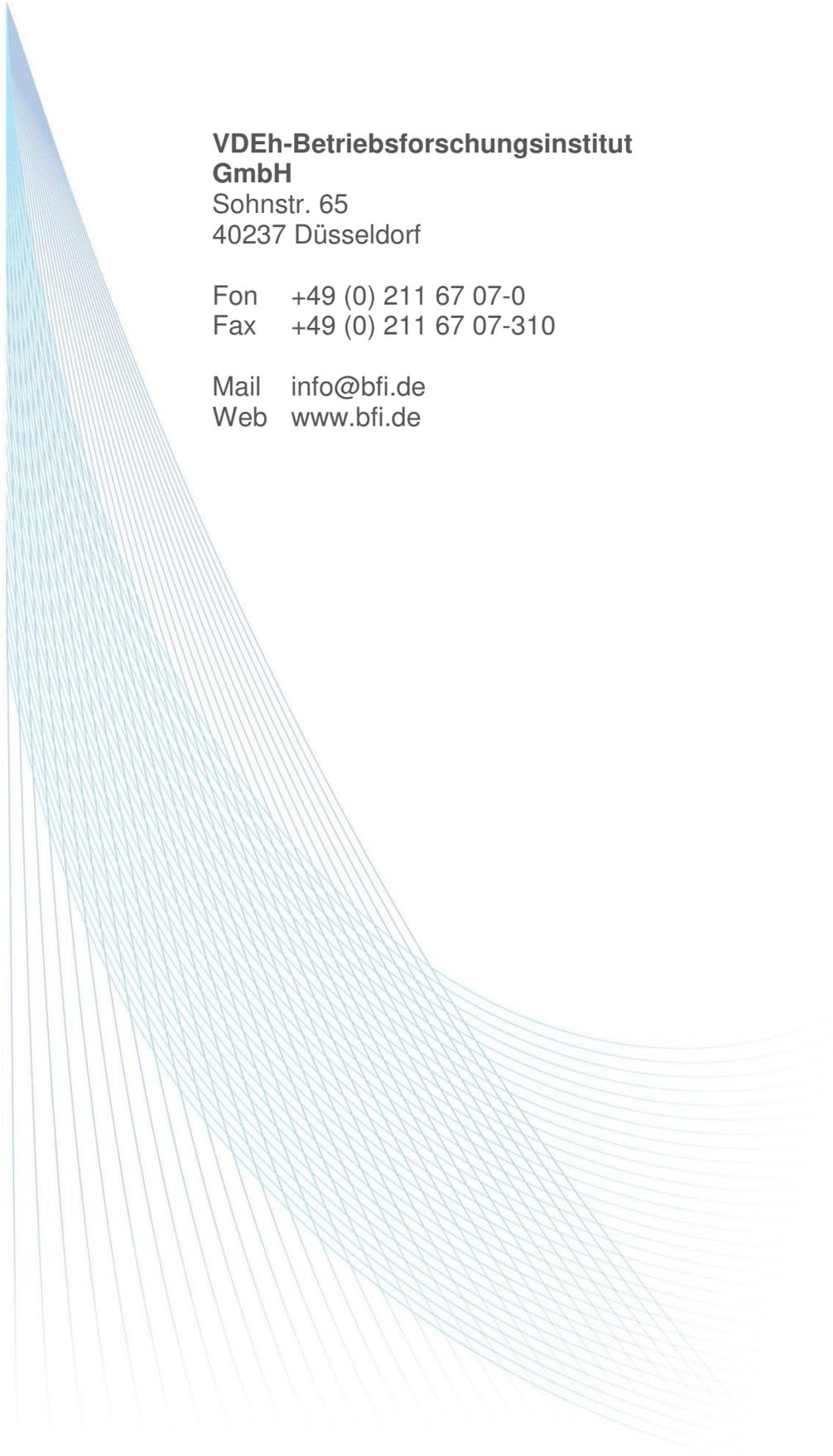
Unterschrift des Leiters und Stempelabdruck
der Forschungsstelle

Schrifttum

- [1] Rein, C.; Buchwald, M.: Entwicklung und Erprobung eines kompakten, hocheffizienten Regenerators für den wirtschaftlichen Einsatz an Industrieöfen, Forschungsbericht, DBU-AZ 30559-24/0, Düsseldorf, November 2014.
- [2] Zhang, H.; Wang, H.; Zhu, X.; Qiu, Y.-J.; Li, K.; Chen, R.; Liao, Q. (2013b): A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry. Applied Energy, 112, S. 956–966.
- [3] VDI-Wärmeatlas, Na 1-13, 9. Auflage 2002

Bericht Nr. 32.033 / U.-Nr. 80.247

Alle Rechte, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.
Ohne ausdrückliche Genehmigung des BFI ist es auch nicht gestattet, diesen Bericht
oder Teile daraus auf photomechanischem oder anderem Wege zu vervielfältigen.



**VDEh-Betriebsforschungsinstitut
GmbH**

Sohnstr. 65
40237 Düsseldorf

Fon +49 (0) 211 67 07-0
Fax +49 (0) 211 67 07-310

Mail info@bfi.de
Web www.bfi.de



VDEh-Betriebsforschungsinstitut
GmbH