

Keller HCW GmbH



**KELLER** ENVIRO  
COUNTERTRAVEL KILN

**„Ofen 2020 - Entwicklung eines neuartigen, energiesparenden Tunnelofens zum Brand keramischer Produkte mit Solid-Solid Rekuperation“**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem AZ: 31094 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Von

B. Sc. Jan-Hendrik Elixmann

B. Sc. Carsten Weier

September 2015



Az	<b>31094</b>	Referat	<b>21</b>	Fördersumme	<b>432.500,- €</b>
----	--------------	---------	-----------	-------------	--------------------

**Antragstitel** Entwicklung eines Tunnelofens „Ofen 2020“ zum Brennen von keramischen Produkten, die auf gegeneinander fahrenden Ofenwagen gesetzt werden nach dem Solid-Solid Rekuperatorprinzip

**Stichworte** Tunnelofen, Primärenergieeinsparung, Solid-Solid Rekuperator

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>30 Monate</b>	<b>18.03.2013</b>	<b>18.09.2015</b>	

Zwischenberichte	Zwischenbericht I	14.04.2014
	Zwischenbericht II	11.11.2014

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Keller HCW GmbH Carl-Keller-Straße 2-10 49479 Ibbenbüren-Laggenbeck	Tel	05451 85210
		Fax	
		Projektleitung	Dipl. Ing. Robert Kohl
		Bearbeiter	B. Sc. Carsten Weier B. Sc. Jan-Hendrik Elixmann

**Kooperationspartner** keine

### ***Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens***

Das angestrebte Ziel ist es, ein alternatives Brennkonzept zu entwickeln, bei dem die Wärmeübertragung anders als beim konventionellen Tunnelofen nicht zwischen Produkt und Luft (Solid-Fluid) sondern nach dem Solid-Solid-Rekuperator-Prinzip stattfindet.

Damit werden die folgenden Ziele angestrebt:

1. Senkung des Primärenergieeinsatz Ofens
2. Reduzierung der Rauchgasmengen
3. Entkopplung der Prozesse – kein Wärmeverbund Ofen / Trockner –

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

#### **Mathematisches Modell zur Simulation**

1. Simulationsrechnungen zur Optimierung des Ofenmodells und der Besatzgeometrie
2. Analyse der Umwälzströmung
3. Bestimmung der zu erwartenden Druckverluste
4. Analyse der Wärmeübertragung
5. Analyse der freien Konvektion und Wärmestrahlung
6. Aufstellen allgemein gültiger Auslegungsrichtlinien

#### **Bau Versuchsofen**

#### **Versuchsbetrieb**

#### **Strömungssimulation für Produktgruppen**

## **Ergebnisse und Diskussion**

1. In der Simulation wurde festgestellt, dass die dort verwendete Anordnung des Umwälzventilators in der Mitte des Ofens zu keiner guten Durchströmung des Besatzes führt. Eine Durchströmung von der einen zur anderen Seite ist hier sinnvoller. An der Besatzgeometrie sind hierfür keine Änderungen notwendig.

2. Nach der Analyse der Umwälzströmung im gebauten Versuchsofen wurde festgestellt, dass die Strömung durch eine Leitvorrichtung verbessert werden muss, um ein gleichmäßiges Brennergebnis zu erhalten. Die Ermittlung der Abmessungen der Strömungsleitvorrichtung wurde empirisch am kalten Ofen ermittelt und im späteren Verlauf in einem feuerfesten Material in den Einströmbereich gebaut.

3. Die Bestimmung der Druckverluste war an der Versuchsanlage nur sehr schwer möglich. Der Grund hierfür liegt darin, dass aus Platzgründen an keiner Messstelle die nötigen Einlauf- und Auslaufängen eingehalten werden konnten. So konnte keine repräsentative Messung durchgeführt werden.

4. Bei der Analyse der Wärmeübertragung wurde festgestellt, dass die Wärmeübertragung nach dem Solid-Solid-Prinzip funktioniert. In diesem Versuchsofen stellt sich nur das Problem ein, das es sich um einen Kammerofen handelt, bei dem auch der Isolieraufbau mit aufgeheizt werden muss. Durch diesen Umstand wird der Wärmestrom zwischen einer heißen und einer kälteren Besatzscheibe begrenzt. Für eine reale Anlage entfällt dieses Problem, da der Ofen im Dauerbetrieb fährt und so schon auf Betriebstemperatur ist, wenn der Besatz eingeschoben wird.

5. Da aus den Messungen bekannt war, welche Energie insgesamt übertragen wird, wurde versucht mit Hilfe der Formeln für den Energieaustausch durch Strahlung, auf die durch freie Konvektion ausgetauschte Energie zu schließen. Da beim Strahlungsaustausch nicht nur die sich direkt gegenüber stehenden Ziegelflächen Energie austauschen, wurde versucht für diesen Zustand Faktoren festzulegen. Allerdings hat man im Rahmen dieser Arbeit keine realistischen Ergebnisse erreicht.

6. Allgemeingültige Auslegungskriterien lassen sich aus dieser Anlage nur schwer abschätzen, da der gesamte Isolieraufbau mit aufgeheizt werden muss. Nach unseren Versuchen lassen sich Gradienten von mindestens 100 K/h erreichen. Wenn man bedenkt, dass der Isolieraufbau in den Versuchen mit aufgeheizt werden musste, kann in einer realen Anlage mit höheren Gradienten gerechnet werden. Weiter konnten in dieser Anlage erste Erfahrungen mit dem Besatzaufbau gemacht werden. Hier ist die Besatzhöhe besonders interessant, da auf Grund der Thermik eine Temperaturschichtung zu erwarten war, die am Ende aber geringer ausgefallen ist, als gedacht. Weiter ist man im Laufe der Versuche dazu übergegangen vom Einfachstoß auf einen Doppelstoß zu wechseln. Außerdem hat man verschiedene Lösungen zum Schutz des Unterwagenbereichs vor Übertemperatur getestet und verbessert.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Erste Ergebnisse wurden auf dem „Würzburger Ziegellehrgang“ am 03.12.2014 präsentiert. Außerdem wurde in der Zeitschrift „Ziegelindustrie International“ ein Bericht über das Projekt veröffentlicht. Dieser Bericht wurde gleichzeitig auf der Homepage [www.keller.de](http://www.keller.de) veröffentlicht. Weiter wurde ein Prospekt ausgearbeitet, welches potenziellen Kunden und Interessierten einen Überblick über das Projekt geben soll.

## **Fazit**

Als Ergebnis der Versuche lässt sich festhalten, der Brennprozess nach dem Solid-Solid-Prinzip ist möglich. Die Energieübertragung funktioniert in allen Temperaturbereichen. Zwar sind die Wärmeströme in der Praxis generell geringer als in der Simulation, allerdings muss auch der gesamte Ofenaufbau mit aufgeheizt werden.

In dieser Versuchsanlage wurden erste wichtige Erkenntnisse gewonnen, die uns einen großen Schritt auf dem Weg zu einer realen Kundenanlage vorgebracht haben. Um die sichere industrielle Produktion zu garantieren, stellt der nächste Schritt eine Pilotanlage dar, die als Tunnelofen ausgeführt ist. In diesem Bereich ist man noch auf der Suche nach einem Kunden, der bereit dazu ist, eine erste, evtl. geförderte, Anlage zu bauen.

# Inhalt

Inhalt .....	1
Abbildungsverzeichnis.....	2
Tabellenverzeichnis.....	3
Abkürzungsverzeichnis .....	4
1 Zusammenfassung .....	5
2 Einleitung.....	7
3 Simulation der Strömung und Wärmeübertragung.....	14
4 Versuchsbetrieb.....	18
4.1 Strömungsversuche .....	19
4.2 Brennversuche mit Heizregister .....	25
4.2.1 Versuche mit Dachziegel .....	25
4.2.2 Versuche mit Vollziegel .....	34
4.2.3 Versuche mit Hintermauerziegel.....	42
4.2.4 Weitere Versuche mit Dachziegeln.....	47
4.3 Brennversuche mit Brenneranlage .....	49
4.3.1 Versuche mit Dachziegeln .....	49
5 Beispielrechnung Energiekosten .....	56
6 Fazit.....	57
7 Literaturverzeichnis.....	58

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip Gegenlaufofen in der Draufsicht [1].....	8
Abbildung 2: Prinzipdarstellung Querschnitt eines Gegenlaufofens [1].....	9
Abbildung 3: Enviro Versuchsofen [1].....	10
Abbildung 4: Prinzipdarstellung Querschnitt eines Gegenlaufofens und eines Keller Enviro Ofens [1] .....	11
Abbildung 5: Prinzipdarstellung Draufsicht eines Keller Enviro Ofens [1] .....	12
Abbildung 6: Prinzip der Enviro-Versuchsanlage .....	12
Abbildung 7: Schema des für die Simulation verwendeten Ofens [2].....	14
Abbildung 8: Halber Ofenwagen zur Simulation der Durchströmung [2] .....	15
Abbildung 9: Horizontalgeschwindigkeit $v_y$ senkrecht zur Tunnelachse in m/s (4130 mm neben der Tunnelsymmetrieebene) [2] .....	15
Abbildung 10: Stromlinien in m/s [2].....	17
Abbildung 11: Messebene und Messpunkte für die Strömungsmessung im Besatz bei Dachziegelbesatz.....	19
Abbildung 12: Messebene und Messpunkte für die Strömungsmessung im Besatz bei Vollziegel.....	20
Abbildung 13: Messebene und Messpunkte für die Strömungsmessung im Besatz bei Hintermauerziegeln .....	20
Abbildung 14: Ergebnis der Strömungsmessung beim Dachziegelbesatz .....	22
Abbildung 15: Ergebnisse der Strömungsmessung beim Vollziegelbesatz.....	23
Abbildung 16: Ergebnisse der Strömungsmessung beim Hintermauerziegelbesatz .....	23
Abbildung 17: Dachziegelbesatz.....	26
Abbildung 18: Wagenstand mit Dachziegelbesatz .....	26
Abbildung 19: Beispielbrennkurve mit Dachziegelbesatz.....	27
Abbildung 20: Mit im Enviro gebrannten Ziegeln bedecktes Dach .....	29
Abbildung 21: Spezifische Wärmekapazität Ziegel [2] .....	31
Abbildung 22: Wärmestrom an den Besatz in der BK über den Versuchsverlauf [3] ....	33
Abbildung 23: Wagenstand mit Vollziegeln .....	34
Abbildung 24: Besatzaufbau mit Vollziegel .....	35
Abbildung 25: Brennkurve im Enviro, mit Vollziegel .....	36
Abbildung 26: Probefläche der Vollziegel .....	37
Abbildung 27: Verlauf der Wärmeströme über der Temperatur [4] .....	40
Abbildung 28: Schema Wagenstand .....	42

Abbildung 29: Hintermauerbesatz auf Ofenwagen.....	43
Abbildung 30: Beispiel Brennkurve für einen Hintermauerziegel .....	44
Abbildung 31: Verlauf der Wärmeströme bei HMZ.....	46
Abbildung 32: Wagenstand Doppelstoß.....	47
Abbildung 33: Brennkurve eines Doppelstoßversuches.....	48
Abbildung 34: Wagenstand mit Dachziegel im Doppelstoß .....	50
Abbildung 35: Brennkurve mit Dachziegeln und Brenneranlage .....	50
Abbildung 36: Verschiedene Dachziegelarten aus einem Brennversuch .....	52
Abbildung 37: Naturroter Dachziegel aus dem Enviro Versuchsofen.....	53
Abbildung 38: Energieverbrauch und Kosten für ein Dachziegelwerk .....	56

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Spezifische Wärmeströme bezogen auf die Tonnage in der BK [3] .....	32
Tabelle 2:	Wärmeströme aus dem Versuch mit Vollziegeln [4].....	39
Tabelle 3:	Ergebnisse der Wärmeübertragung beim Hintermauerziegel .....	45
Tabelle 4:	Wärmeströme am Dachziegelbesatz mit Brenneranlage .....	51
Tabelle 5:	Vergleich der keramischen Daten .....	54

## Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
HK	Heizkammer	-
BK	Brennkammer	-
HMZ	Hintermauerziegel	-
VZ	Vollziegel	-
DZ	Dachziegel	-
$\dot{q}_{HK}$	Spezifischer Wärmestrom Heizkammer	$\frac{W}{kg}$
$\dot{q}_{BK}$	Spezifischer Wärmestrom Brennkammer	$\frac{W}{kg}$
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität Ziegel	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
$m_{BK}$	Ziegelmasse Brennkammer	kg
$m_{HK}$	Ziegelmasse Heizkammer	°C
$T_{Anfang}$	Temperatur zu Beginn des Schubs	°C
$T_{Ende}$	Temperatur am Ende des Schubs	°C
t	Zeit	sek.
$\dot{Q}_{Strahlung}$	durch Strahlung übertragender Wärmestrom	kW
$\dot{Q}_{freie\ Konvektion}$	durch freie Konvektion übertragender Wärmestrom	kW
$\dot{Q}_{BK > 700^\circ}$	Wärmestrom Brennkammer im Bereich über 700 °C	kW
$\dot{Q}_{HK}$	Wärmestrom Heizkammer	kW
$\dot{Q}_{BK}$	Wärmestrom Brennkammer	kW

# 1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Enviro-Projekts sind umfassende Versuche zur Entwicklung eines neuartigen, energiesparenden Tunnelofens zum Brand keramischer Produkte durchgeführt worden. In diesem Ofen findet der Energieaustausch nicht mehr zwischen der Luft und dem Produkt statt. Bei diesem Ofen gibt es mehrere gegenläufig fahrende Produktströme, die untereinander Energie nach dem Solid-Solid-Prinzip austauschen. Um erste Erfahrungen mit diesem Prinzip zu machen, wurde von der Firma Keller HCW ein Versuchsofen mit einer Grundfläche von 16 x 5 m und einer Höhe von 5 m errichtet.

Während der Versuchsofen konstruiert und errichtet wurde, ist an der Hochschule Osnabrück eine Strömungssimulation durchgeführt worden. Aus dieser Simulation sind weitere Erkenntnisse zur Strömungsverteilung und zur Verbesserung der Wärmeübertragung hervorgegangen.

Bevor erste Brennversuche gefahren wurden, hat man am kalten Ofen die Strömungsverteilung ermittelt. Dies war nötig, um für eine gleichmäßige Energieübertragung zu sorgen. Erreicht wurde eine gleichmäßige Strömung, in dem eine Strömungsleitvorrichtung im Einströmbereich installiert wurde. Die Abmessungen, dieser Leitvorrichtung, wurden in weiteren Versuchen empirisch ermittelt. Nachdem bei den Dachziegeln ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wurde, sind weitere Besätze vermessen worden.

Zur Beheizung der Anlage sind im ersten Schritt elektrische Heizregister gewählt worden. Diese bieten folgende Vorteile:

- Keine Emissionen
- Vereinfachtes Genehmigungsverfahren zum Betrieb des Versuchsofens
- Einfacher, sicherer Betrieb

Weiter sollte in den ersten Versuchsreihen nur ermittelt werden, ob die Wärmeübertragung nach dem Solid-Solid-Prinzip überhaupt möglich ist. Hierzu ist es nicht nötig die Ziegel auf ihre Garbrandtemperatur aufzuheizen. Der interessante Bereich ist hierbei der im Temperaturbereich unterhalb von 800 °C.

In einem weiteren Schritt hat man sich dazu entschlossen, den Ofen auf eine Gasbrenneranlage umzurüsten. Durch diese Umrüstung ist es nun möglich praxisnahe Temperaturen der Produkte zu erreichen. Dieser umfangreiche und zeitaufwendige Umbau hat uns dazu gezwungen die Projektlaufzeit um 12 Monate zu verlängern. Jedoch war dieser Umbau unumgänglich, da nun erst die endgültigen Brenntemperaturen und somit Produkteigenschaften erreicht werden können. Dies ist nötig, da sich das Gefüge im Ziegel durch die höhere Temperatur weiter verdichtet und die Gefahr der Kühlrissbildung zunimmt. Um herauszufinden, ob sich mit dem geänderten Brennprozess höhere Kühlgradienten fahren lassen, ist es also unumgänglich die Garbrandtemperatur zu erreichen.

## 2 Einleitung

Die Energiewende ist eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe, die in Deutschland schon seit vielen Jahren diskutiert wird und inzwischen von der Mehrheit der Bevölkerung und der Politik getragen wird. Bis zum Jahre 2050 soll die Energieversorgung in Deutschland weitestgehend auf regenerative Energiequellen umgestellt sein. Mindestens ebenso wichtig ist in diesem Zusammenhang die Energieeffizienz, die seit einiger Zeit in den öffentlichen Diskussionen zunehmend die notwendige Beachtung findet. Die Firma KELLER HCW hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Energieeffizienz in Ziegelwerken nachhaltig zu steigern und somit die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken.

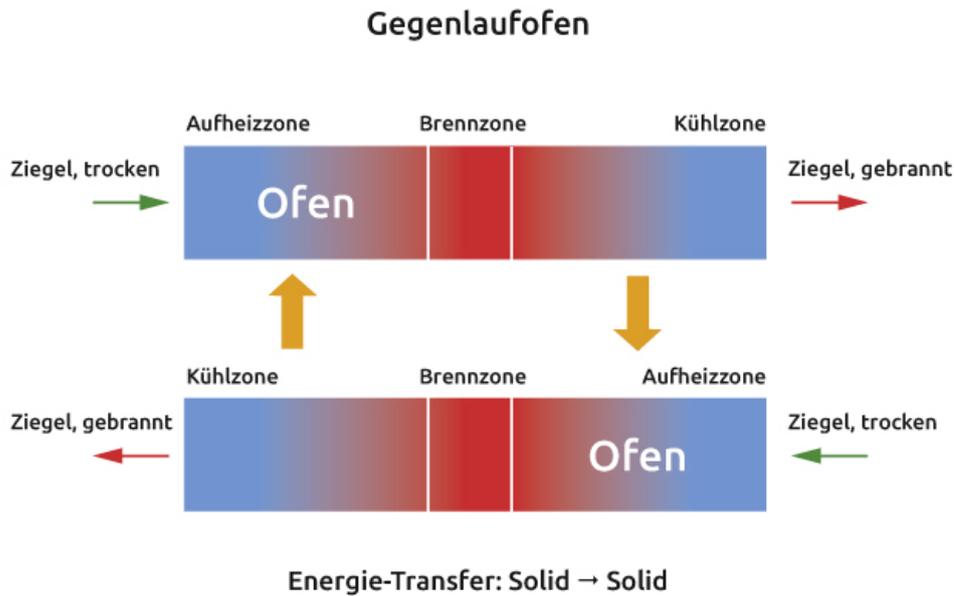
Bei den zur Herstellung eines Ziegels notwendigen Prozessen sind zweifelsohne der Trocken- und Brennprozess die energieintensivsten Vorgänge. Um den Energiebedarf beim Brennen drastisch zu reduzieren, hat die Fa. KELLER HCW das Prinzip des Gegenlaufofens grundlegend überdacht und in ein zukunftsfähiges Konzept überführt. Der Energieverbrauch kann somit beispielsweise für eine Dachziegelanlage um 30 % reduziert werden.

### **Der Brennprozess**

Um eine drastische Energieeinsparung beim Brennprozess zu erzielen, bedarf es der grundlegenden Überarbeitung des Konzeptes eines klassischen Tunnelofens, woraus sich folgende Fragen ergeben:

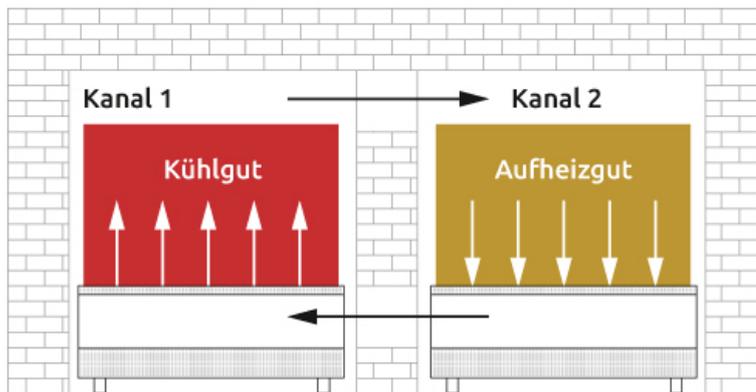
- Wie kann das Ofenkonzept verändert werden, damit keine heiße Luft aus der Kühlzone kommt und somit die vollkommene Entkopplung von Ofen und Trockner erreicht werden kann?
- Wie kann sichergestellt werden, dass keine Luft in Form von Längsströmung durch die Brennzone gezogen wird?
- Welches Energieeinsparpotential würde sich aus diesen Schritten ergeben?
- Wie sieht die technische Lösung hierfür aus? [1]

Die Antworten auf diese Fragen sind schwierig und dennoch nicht unbekannt. Der Gegenlaufofen vereint grundsätzlich zahlreiche Vorteile. Der Energietransfer im Gegenlaufofen erfolgt nach dem Solid-Solid-Prinzip, siehe Abbildung 1, Seite 8 und nicht wie im klassischen Ofen nach dem Fluid-Solid Prinzip.



**Abbildung 1:** Prinzip Gegenlaufofen in der Draufsicht [1]

Somit ist prinzipiell sichergestellt, dass keine Luft in Form einer Längsströmung durch die Brennzonen strömt. Wenn der Energietransfer Solid-Solid hinreichend funktioniert, ist bei diesem Prinzip eine Energieabfuhr aus der Kühlzone und somit eine Kopplung mit dem Trockner hinfällig. Bekannte Gegenlauföfen sind zweigleisig mit ca. 3 bis 4 m breiten Ofenwagen. Der Energietransfer von einem zum anderen Gleis erfolgt über freie Konvektion, zu erkennen ist dies in Abbildung 2, Seite 9. Verbesserungspotential haben diese Öfen hinsichtlich der Temperaturvergleichmäßigkeit sowie der Intensivierung der Konvektion durch eine Zwangsbelüftung. Ein Strahlungsaustausch ist, aufgrund der Trennwand zwischen den Gleisen, nicht möglich. [1]



**Abbildung 2:** Prinzipdarstellung Querschnitt eines Gegenlaufofens [1]

Weiterhin bekannt sind theoretische Betrachtungen von Universitäten und Instituten, in welchen überprüft wird, inwieweit eine Zwangskonvektion den Wärmeaustausch verbessern kann. Die Fa. KELLER HCW hat sich mit den bekannten Ergebnissen und Grundlagen des Gegenlaufofens intensiv auseinandergesetzt und durch Neugestaltung und Modifikation den neuen Gegenlaufofen „Enviro“ geschaffen. Dieser Ofen eliminiert bestehende Nachteile und nutzt die bekannten Vorteile, sodass ein völlig neues Brennkonzert mit hohem Energieeinsparpotential entstanden ist.

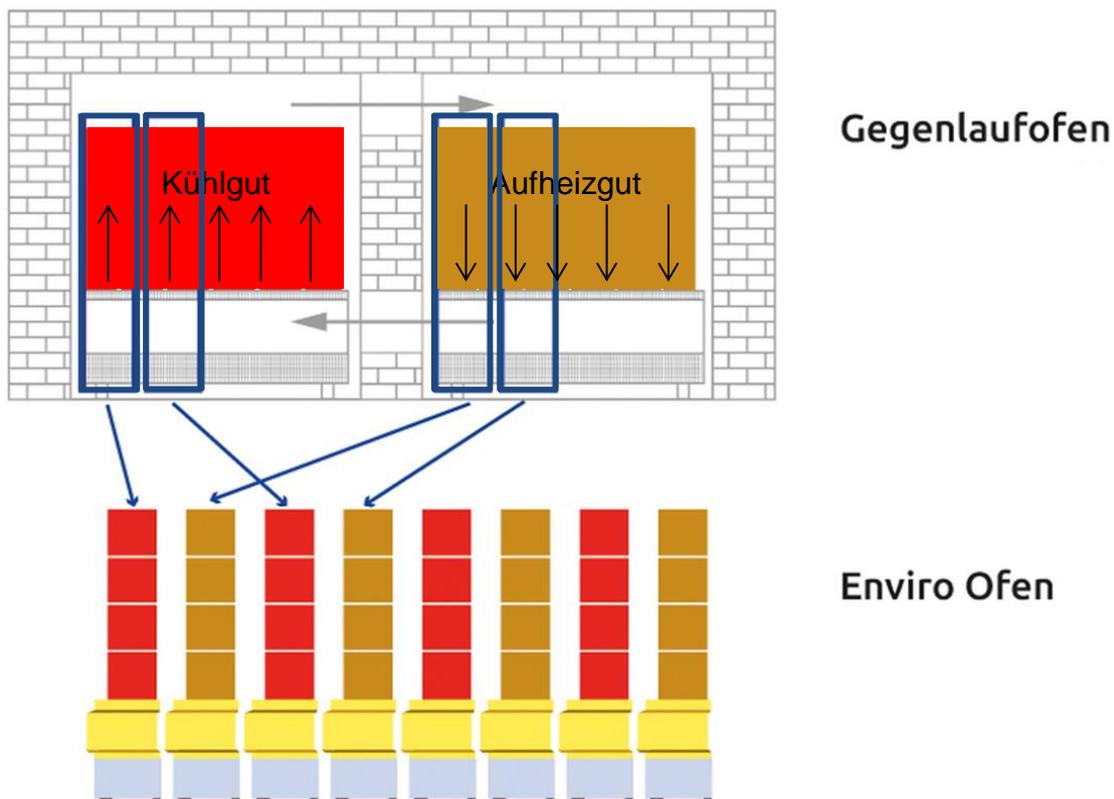
## Der „Enviro“ Ofen



Abbildung 3: Enviro Versuchsofen [1]

Wie ist der „Enviro“ Ofen aufgebaut, wie funktioniert er?

Wichtigste Aufgabe im Gegenlaufofen ist, dass der Energietransfer Solid-Solid erfolgreich abläuft. Deshalb ist es naheliegend, dass die nebeneinanderherfahrenden Produktströme geometrisch begrenzt sind, die Konvektion als Zwangskonvektion ausgeführt ist und die Wärmeübertragung mittels Strahlung möglichst vollständig genutzt wird. Um diese Anforderungen zu erzielen, hat KELLER die Ofenwagen gedanklich in Scheiben geschnitten und nebeneinander aufgereiht, siehe auch Abbildung 4, Seite 11. [1]



**Abbildung 4:** Prinzipdarstellung Querschnitt eines Gegenlaufofens und eines Keller Enviro Ofens [1]

Auf diese Weise bildet sich eine Vielzahl an Ofenwagen, auf denen sich aufzuheizende und abzukühlende Produkte gegenüberstehen. Die Wärmeübertragung findet hier in optimalen Rahmenbedingungen statt. Über die Länge des Ofens sind im Bereich der Konvektion Umwälzventilatoren angeordnet, die für eine Querumwälzung sorgen. Ab einer bestimmten Grenztemperatur sind diese Umwälzer nicht mehr erforderlich, da der Strahlungsanteil überwiegt und der Wärmeaustausch vorwiegend hierüber erfolgt. In der Brennzone erfolgt wie bei einem konventionellen Ofen der Garbrand mit Hilfe von Brennern. Die Draufsicht eines „Enviro“ Ofens ist in Abbildung 5, Seite 12 als Prinzip dargestellt.

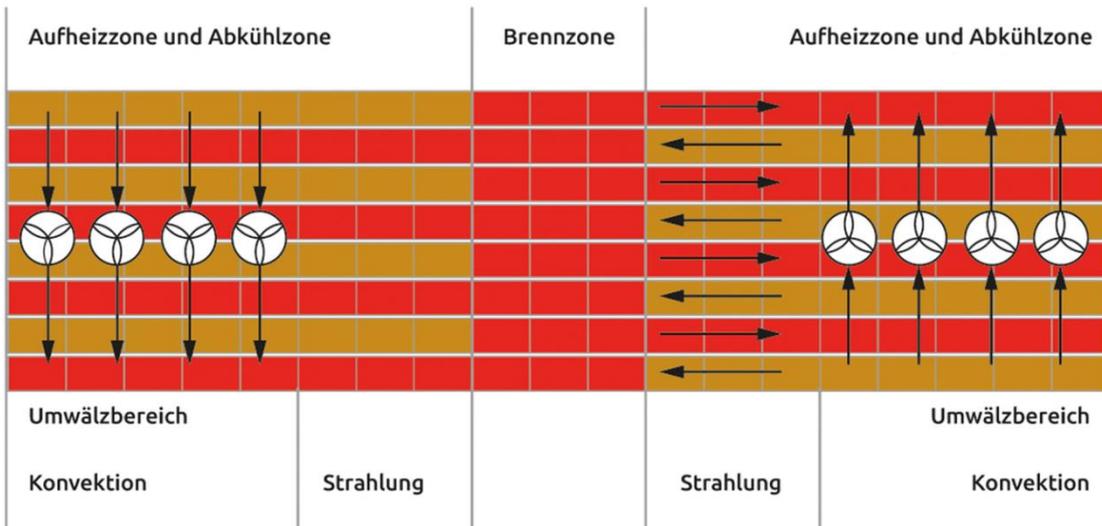


Abbildung 5: Prinzipdarstellung Draufsicht eines Keller Enviro Ofens [1]

Den Überlegungen zur Neugestaltung des Gegenlaufofens sind umfangreiche theoretische Betrachtungen unter anderem mit der Software „Fluent“ vorausgegangen. Um die Erkenntnisse abzusichern und fundierte Messdaten zu erhalten, hat KELLER einen Versuchsofen mit den Abmessungen Breite 5 m, Länge 16 m und Höhe 5 m aufgebaut. Eine Prinzip Darstellung dieser Versuchsanlage ist in Abbildung 6, Seite 12 zu sehen. [1]

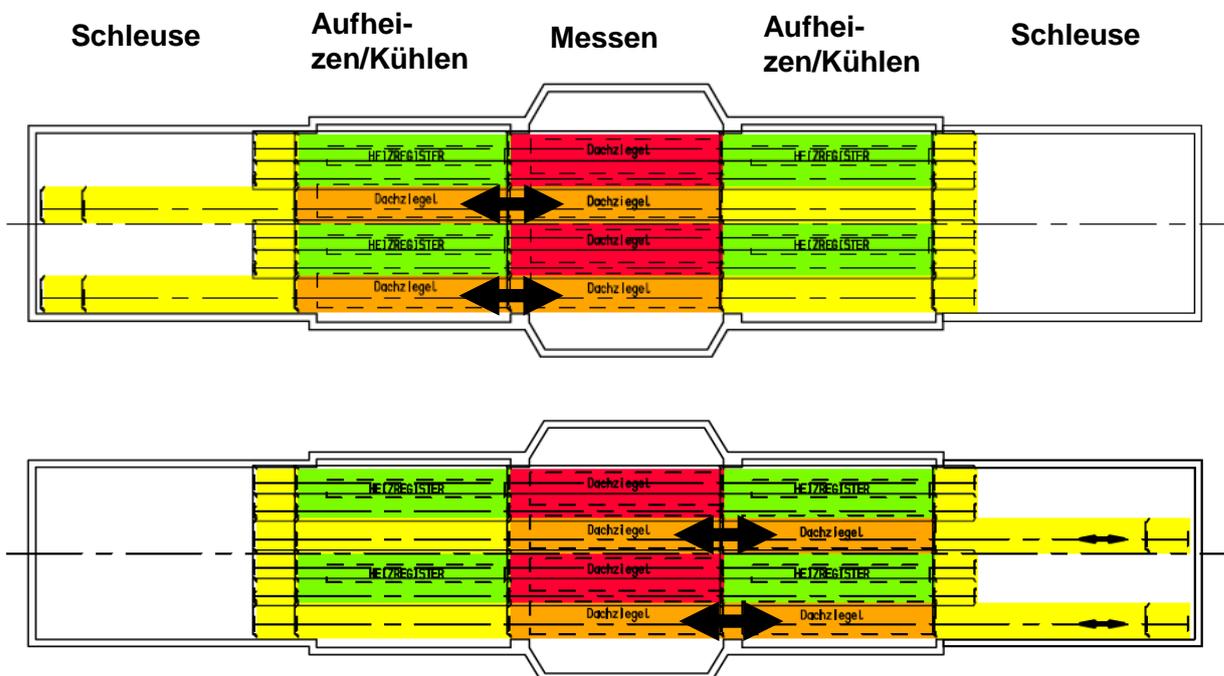


Abbildung 6: Prinzip der Enviro-Versuchsanlage

Aus dieser Abbildung geht hervor, dass der Ofen aus mehreren Ofenwagensträngen besteht, von denen zwei in Längsrichtung verfahren werden können. Diese fahrbaren Ofenwagen stellen den Energietransport dar. Durch das Verfahren der Wagen auf diesen Gleisen wird Energie aus den Nebenkammern in die mittlere Messkammer/Brennkammer übertragen. Die in der Abbildung beschrifteten Kammern haben folgende Aufgaben:

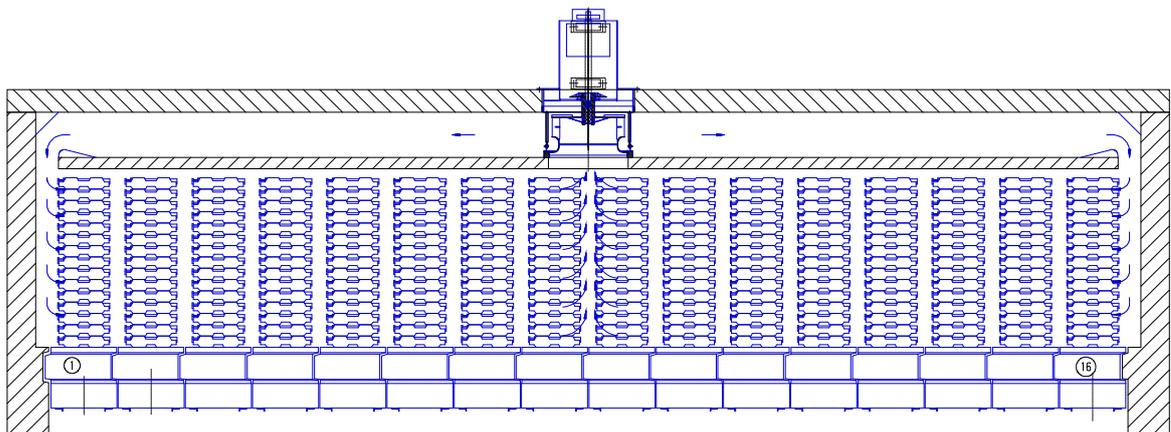
- **Schleuse**  
Die Schleusen haben die Aufgabe, die letzten Wagen der fahrbaren Stränge aufzunehmen und zu isolieren. Eine Schleusenkammer befindet sich auf jeder Seite des Ofens, sodass immer die Schleuse auf der Seite belegt ist, auf der auch die Heizkammer bzw. Kühlkammer in Betrieb ist.
- **Heiz- bzw. Kühlkammer**  
Auch diese Kammerart befindet sich auf beiden Seiten des Ofens. In dieser Kammer wird der fahrbare Besatz aufgeheizt, so dass er im nächsten Schritt, einen Teil seiner aufgenommenen Energie in der mittleren Kammer wieder abgeben kann. Beim Kühlvorgang wird der fahrbare Besatz in dieser Kammer gekühlt, so dass er im nächsten Schritt, in der mittleren Kammer wieder Energie aufnehmen kann.
- **Brennkammer bzw. Messkammer**  
Diese Kammer ist nur einmal in der Mitte des Ofens vorhanden. In dieser Kammer findet der eigentliche Wärmeübertragungsprozess statt. Diese Kammer stellt im Prinzip eine Zelle eines realen Enviro-Tunnelofens dar, die durch den Energieeintrag aus den Heizkammern in ihrer Temperatur immer weiter ansteigt. Außerdem steht in dieser Kammer der Probebesatz, der für die Ermittlung der Aufheizgradienten und für die Ermittlung der keramischen Ergebnisse herangezogen wird. Über dieser Kammer ist außerdem der Umwälzventilator angebracht, der im unteren Temperaturbereich die konvektive Energieübertragung antreibt.

Durch die Kombination der verfahrbaren Wagen und die Anordnung der Kammern ist es möglich, mit dieser Versuchsanlage, den in der Messkammer stehenden Besatz so aufzuheizen bzw. abzukühlen, wie er in einem realen Enviro-Tunnelofen geschehen wird.

### 3 Simulation der Strömung und Wärmeübertragung

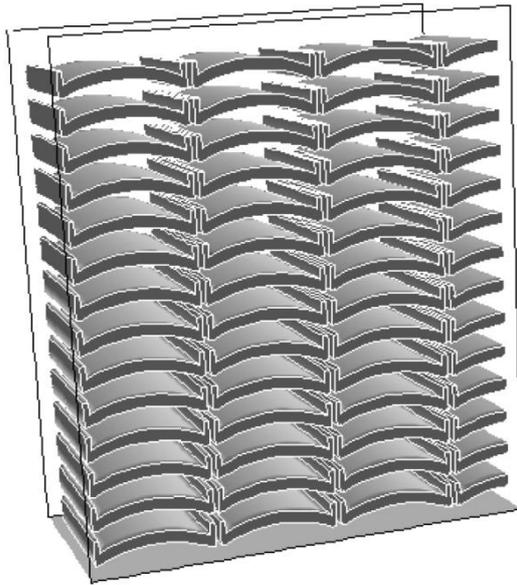
Um Anhaltswerte für die nötigen Strömungsgeschwindigkeiten im Umwälzkreis und weitere Erkenntnisse für eine spätere Industrieanlage zu bekommen, wurde an der Hochschule Osnabrück von Prof. Dr. - Ing. Ralf-Gunther Schmidt eine Strömungssimulation unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung in einem Dachziegelofen durchgeführt.

Für die Strömungssimulation wurde ein Ofen mit der Breite von sechzehn Ofenwagen und einem Seitenspalt von 400 mm angenommen. Die Besatzhöhe wurde bei vierzehn Kassetten mit einer Gesamthöhe von 1400 mm und einem Deckenspalt von 80 mm angenommen. Ein Ofenwagen fasst sieben Kassetten in der Länge (Abbildung 7, Seite 14). Um den Rechenaufwand möglichst gering zu halten wird nur der halbe Ofenwagen mit 3,5 Kassetten simuliert. Dies ist aufgrund der Symmetrie des Ofenwagens möglich. In diesem Modell befindet sich der Umwälzventilator mit der Absaugung mittig auf dem Ofen und bläst seitlich in den Ofen ein. Mögliche Längsströmungen werden in dieser Simulation vernachlässigt. Dieses Modell kommt einer möglichen industriellen Anlage schon sehr nahe und liefert deshalb wichtige Erkenntnisse, ob diese sich so ausführen lässt. [2]



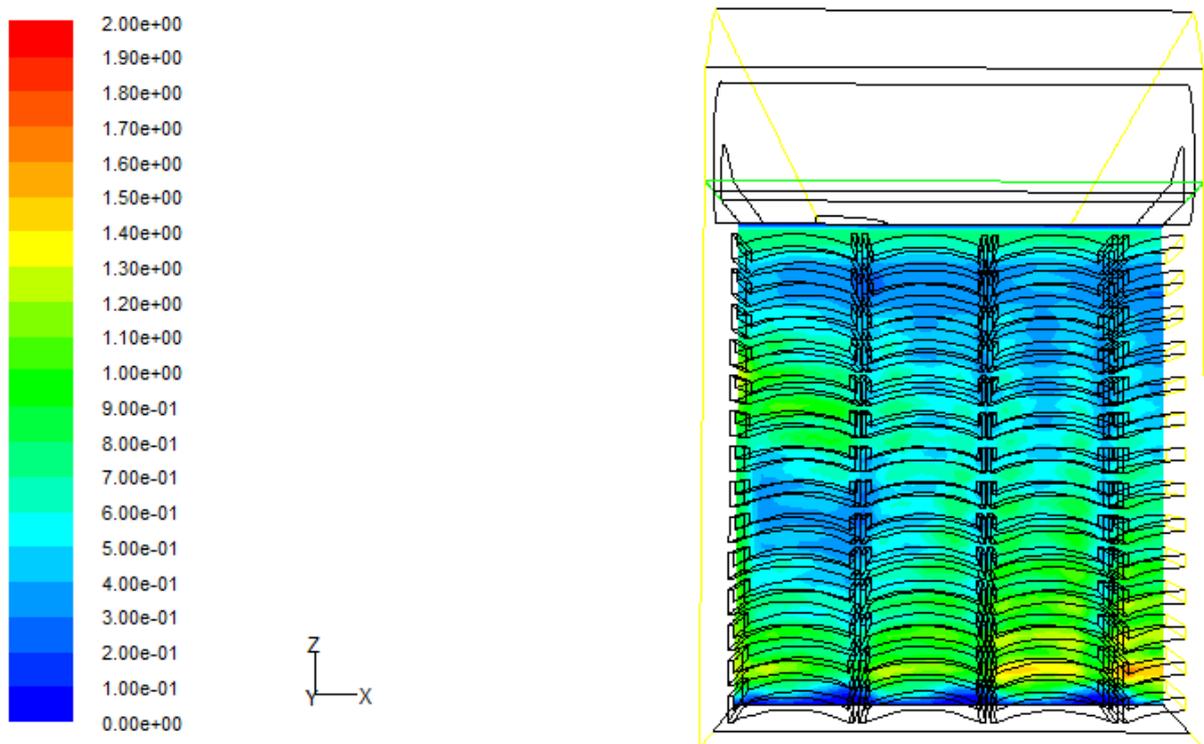
**Abbildung 7:** Schema des für die Simulation verwendeten Ofens

Die Abbildung 8 auf Seite 15 zeigt das Modell, welches zur Simulation der Durchströmung der Besatzscheiben verwendet wird. Hier sind die 14 Kassetten in der Höhe und die 3,5 Kassetten in der Tiefe zu sehen, die für die Simulation verwendet werden. Weiterhin wird ersichtlich, dass der Einfachheit halber Kasette und Ziegel als eine Einheit angenommen werden. Dies ist eine weitere Maßnahme um den Rechenaufwand der Simulation möglichst gering zu halten.



**Abbildung 8:** Halber Ofenwagen zur Simulation der Durchströmung [2]

In Abbildung 9, Seite 15 sind die in der Strömungssimulation ermittelten Geschwindigkeiten in einer Ebene von der Tunnelachse dargestellt. In diesem Fall ist der Bereich der Einblasung dargestellt. Die Geschwindigkeiten liegen im Mittel etwas unter 1 m/s.



**Abbildung 9:** Horizontalgeschwindigkeit  $v_y$  senkrecht zur Tunnelachse in m/s (4130 mm neben der Tunnelsymmetrieebene) [2]

In der Simulation wurde zuerst ermittelt welcher Wärmestrom bzw. Wandwärmestromdichten erforderlich sind, um eine Temperaturänderung des Besatzes von  $\pm 25$  K innerhalb von 18 Minuten zu erreichen. Das heißt der heißere Besatz kühlt sich um 25 K ab und der kältere erwärmt sich um 25 K. Um die angestrebten Aufheiz- bzw. Abkühlgradienten zu erreichen sind in der Theorie Wandwärmestromdichten zwischen  $407 \text{ W/m}^2$  und  $577 \text{ W/m}^2$  erforderlich.

In der Analyse der Wärmeübertragungssimulation zeigt sich, dass diese Wandwärmestromdichten ohne Umwälzung erst ab Temperaturen von etwa  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht werden. Eine Zwangsumwälzung wäre somit, in der Theorie, ab einer Temperatur von  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  nicht mehr erforderlich. Der für die Simulation gewählte Umwälzventilator kann den erforderlichen Wärmeübergang bis herab zu Temperaturen von  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  gewährleisten.

Weitere wichtige Erkenntnisse die aus der Simulation gewonnen werden konnten sind unter anderem die Position des Umwälzventilators. Dieser wurde in dem Modell in der Ofendecke vorgesehen, so wie in einer möglichen industriellen Anlage. Die Luft sollte über einen Kanal in der Ofendecke zu den Seiten geleitet werden und dort durch die Ziegel wieder zur Ofenmitte strömen. Es zeigte sich aber, dass sich bei dieser Anordnung Bereiche im Besatz bilden in denen kaum noch Strömung vorhanden ist. Trotz mehrerer konstruktiver Anpassungen ließen sich diese Bereiche nicht vollständig vermeiden. Einer dieser Bereiche befindet sich in der Mitte des Ofens direkt unterhalb des Umwälzventilators. Hier werden die untersten Kassetten nicht mehr ausreichend durchströmt. Eine weitere Problemstelle dieser Geräteanordnung sind die oberen Kassetten an der Seite. Auch hier werden die Ziegel kaum durchströmt. Dies ist in dem Strömungsliniendiagramm Abbildung 10 auf Seite 17 gut zu erkennen. Aus diesem Grund erschien es besser die Position des Ventilators zu überdenken. Eine industrielle Anlage sollte deshalb, wie bei dem Enviro Versuchsofen, von der einen zur anderen Seite durchströmt werden. Dadurch soll sichergestellt werden, dass alle Ziegel möglichst gleichmäßig angeströmt werden und sich keine Bereiche mit wenig bis gar keiner Strömung bilden.

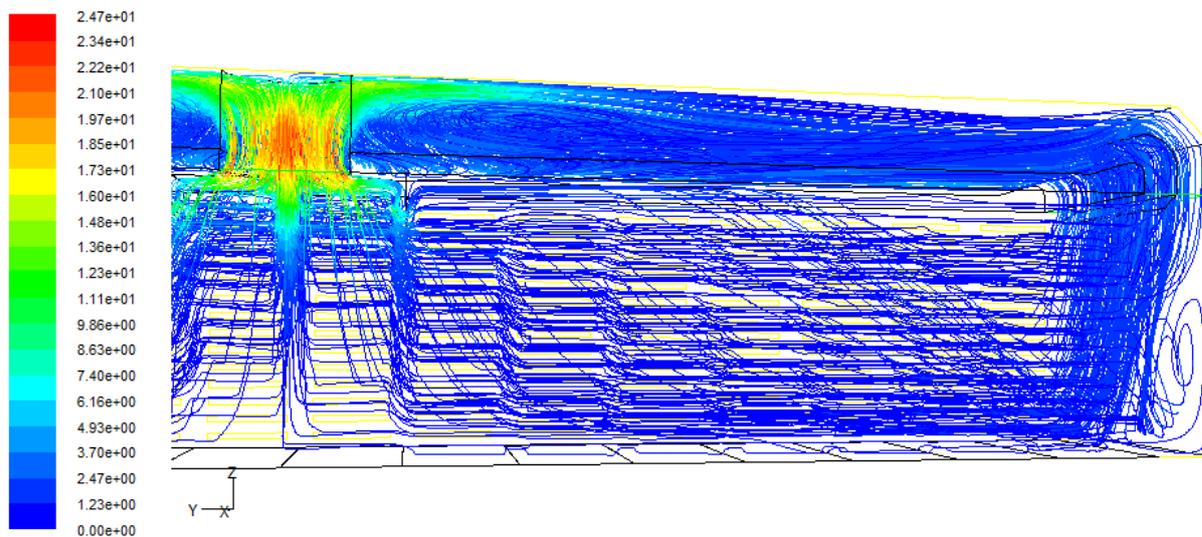


Abbildung 10: Stromlinien in m/s [2]

## 4 Versuchsbetrieb

In diesem Teil wird zuerst auf die Analyse der Umwälzströmung eingegangen. Eine gleichmäßig verteilte Strömung ist besonders wichtig für die Energieübertragung im Bereich der konvektiven Wärmeübertragung.

Im Anschluss hierzu wird auf die Brennversuche mit den Heizregistern und folgenden Produktgruppen eingegangen:

- Dachziegel
- Vollziegel
- Hintermauerziegel

Bei diesen drei Produktgruppen geht es zuerst darum, herauszufinden, wie gut sich die Energie von einer heißeren zu einer kälteren Besatzscheibe übertragen lässt. Hier werden keramisch gesehen keine maximalen Brenntemperaturen erreicht, so dass die Produkteigenschaften nicht mit denen eines konventionell gebrannten Ziegels verglichen werden können. Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, wurden einige Ziegel in einem Laborgasofen mit derselben Brennkurve gebrannt, wie sie im Versuchsofen gefahren wird. Bei dem Vergleich dieser Daten kann dann ermittelt werden, ob die Eigenschaften voneinander abweichen.

Um allerdings auch wirklich Ziegel brennen zu können, hat man sich dazu entschlossen den Ofen in einem weiteren Schritt auf eine Gasbrenneranlage umzurüsten. Dieser Schritt wird nur durchgeführt, wenn in den ersten Versuchen keine Auffälligkeiten bei der Energieübertragung festgestellt werden. Durch diesen Schritt lassen sich dann in der Versuchsanlage auch die erforderlichen Garbrandtemperaturen der Ziegel erreichen. Die Ziegel aus den Versuchsreihen mit der Gasbrenneranlage lassen sich dann mit den Originalziegeln der jeweiligen Produktionsstätte vergleichen. Dies stellt einen wichtigen Schritt dar, weil sich die Eigenschaften der Produkte, aufgrund eines anderen Herstellungsprozess, nicht verschlechtern dürfen.

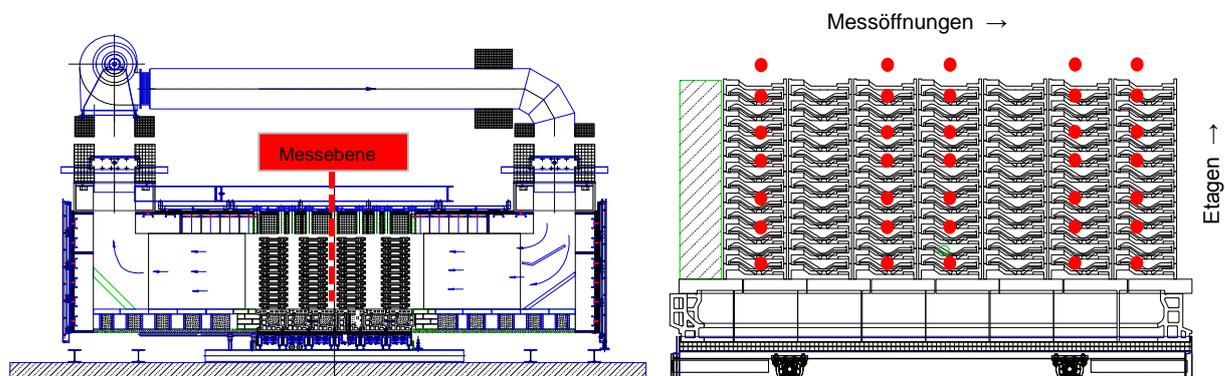
## 4.1 Strömungsversuche

Um in dem gebauten Versuchsofen verwertbare Brennergebnisse zu erzielen, muss zuerst das Strömungsprofil auf seine Gleichmäßigkeit hin überprüft und angepasst werden. Wenn dies nicht erledigt wird, kann es passieren, dass der Besatz nicht gleichmäßig aufgeheizt wird.

Folgende Punkte wurden im Rahmen Strömungsmessungen abgearbeitet:

- Aufnehmen des Ist-Zustandes mit Dachziegelbesatz
- Vorschläge zur Verbesserung des Strömungsprofils
- Realisierung der Verbesserungen
- Nachweis der Verbesserung

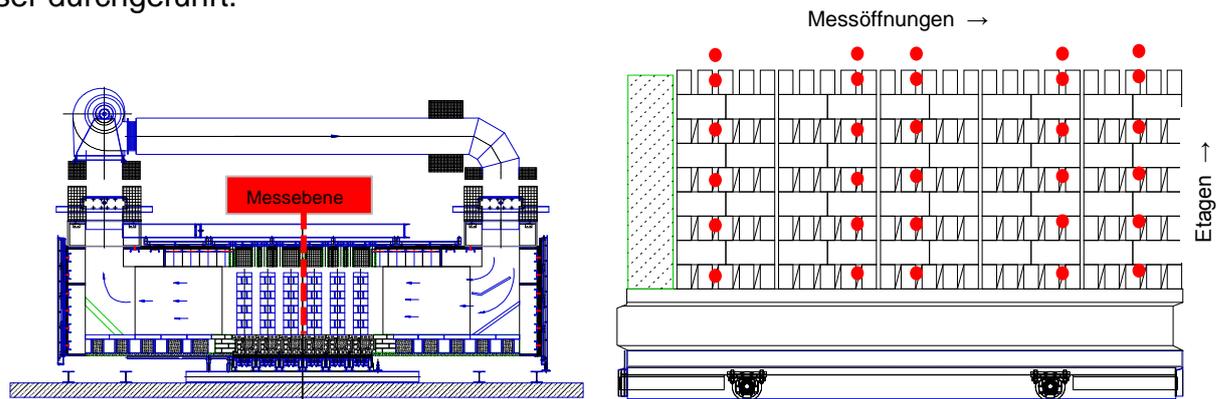
Um verlässliche Ergebnisse zu erhalten, wie sich die Strömung im Besatzgitter verhält, werden die Strömungsverhältnisse bei allen Besätzen hinter der zweiten durchströmten Besatzscheibe aufgenommen. Die Strömungsmessungen werden am kalten Ofen durchgeführt.



**Abbildung 11:** Messebene und Messpunkte für die Strömungsmessung im Besatz bei Dachziegelbesatz

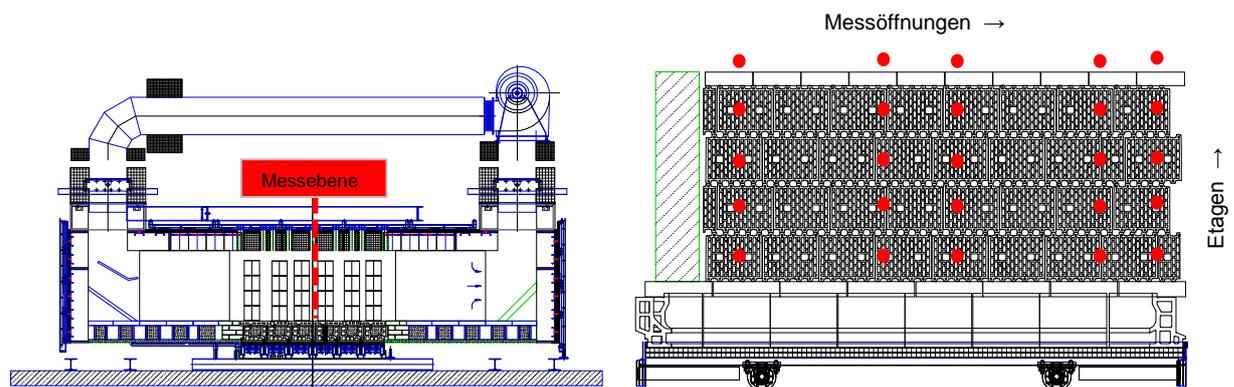
In der, in Abbildung 11, Seite 19, dargestellten Messebene sind 35 Messpunkte gleichmäßig über den Besatzquerschnitt verteilt. Die Messpunkte sind so platziert, dass die Geschwindigkeit zwischen einem Dachziegel und der über ihm stehenden H-Kassette gemessen wird. An jeder Messöffnung wird in 7 Etagen die Strömungsgeschwindigkeit aufgenommen. Der oberste Punkt in der Etage 13 liegt in der oberen leeren H-Kassette. Dieser Punkt stellt bei diesem Aufbau den Deckenspalt dar. Nach einer Messung hinter jeder Besatzscheibe hat sich herausgestellt, dass die Besätze gleichmäßig durchströmt werden, wenn die Strömung gleichmäßig aus der zweiten

Scheibe austritt. Alle Messungen werden mit einem Flügelrad mit 60 mm Durchmesser durchgeführt.



**Abbildung 12:** Messebene und Messpunkte für die Strömungsmessung im Besatz bei Vollziegel

In der Abbildung 12, Seite 20 sind Messebene und Messpunkte für die Strömungsmessung bei den Vollziegeln dargestellt. Hier wird, wie bei den Dachziegeln, hinter der zweiten Besatzscheibe gemessen. Auf der Messebene sind bei diesem Besatz 30 Messpunkte verteilt. An jeder Messöffnung wird in 6 Etagen die Strömungsgeschwindigkeit aufgenommen. Diese sind so gesetzt, dass immer an den Stellen gemessen wird, an denen eine Öffnung im Besatz ist. So soll die Durchströmungsgeschwindigkeit ermittelt werden. Der oberste Messpunkt befindet sich nicht mehr innerhalb des Besatzes. An diesem Punkt wird die Geschwindigkeit im Deckenspalt ermittelt. Auch hier wird mit einem Flügelrad mit 60 mm Durchmesser gemessen.



**Abbildung 13:** Messebene und Messpunkte für die Strömungsmessung im Besatz bei Hintermauerziegeln

In der Abbildung 13, Seite 20 sind wieder Messebene und Messpunkte für die Strömungsmessung bei den Hintermauerziegeln dargestellt. Die Messung wird, wie zuvor, wieder hinter der zweiten Besatzscheibe durchgeführt. Auf der Messebene sind hier 25 Messpunkte verteilt. Wobei, hier, an jeder Messöffnung in 5 Etagen die Strömungsgeschwindigkeit aufgenommen wird. Auch bei diesem Besatzaufbau befindet sich der oberste Messpunkt außerhalb des Besatzes. An diesem Punkt wird wieder

die Geschwindigkeit im Deckenspalt ermittelt. Auf Grund des recht hohen Lochanteils der Ziegel kann hier mittig vor dem Ziegel gemessen werden. Verwendet wird wieder ein Flügelrad mit 60 mm Durchmesser.

## Ergebnisse

Nach der Aufnahme des Ist-Zustandes ist aufgefallen, dass Veränderungen an der Einströmung in den Besatz vorgenommen werden müssen. Es wurden folgende Probleme herausgefiltert:

- **Starke Strömung im unteren Bereich des Besatzes**  
Die Konzentration der Strömung auf die unteren Etagen des Besatzes lässt sich darauf zurückführen, dass der Ventilator über dem Ofen installiert ist und die Rohrleitungsführung dafür sorgt, dass sich die Strömung im unteren Bereich konzentriert.
- **Zu geringe Durchströmung des Ziegelbesatzes**  
Dies resultiert daraus, dass sich zu viel des Volumenstromes in der untersten Etage konzentriert.

Um die Verteilung über die Höhe zu verbessern, wurde ein Spoiler in den Einlaufbereich installiert. Die Abmessungen und die Neigung des Spoilers wurden in weiteren Versuchen soweit verbessert, bis die Strömungsverteilung den Vorstellungen entsprach.

In der Abbildung 14, Seite 22 sind die Ergebnisse der Strömungsmessung dargestellt. Die linke Grafik zeigt die mittlere Geschwindigkeit, in den einzelnen Etagen. Die Etagen eins bis elf bilden den Dachziegelbesatz. Der Deckenspalt entspricht der Etage 13. Innerhalb des Besatzes ist die Strömungsgeschwindigkeit gleichmäßig, im Mittel 1,1 m/s. Im Deckenspalt ist die Geschwindigkeit mit 1,6 m/s etwas höher. Dies ist durch den geringeren Strömungswiderstand zu erklären. Die rechte Grafik zeigt die mittlere Geschwindigkeit aller Etagen in den einzelnen Stapeln. Hier fällt auf, dass die Stapel zwei bis vier eine etwas höhere Strömungsgeschwindigkeit aufweisen als die beiden äußeren. Auch in diesem Fall kann das mit der erhöhten Geschwindigkeit im Deckenspalt erklärt werden. Aus der Grafik wird erkenntlich, dass sich die Strömung im Deckenspalt und in der Ofenmitte konzentriert.

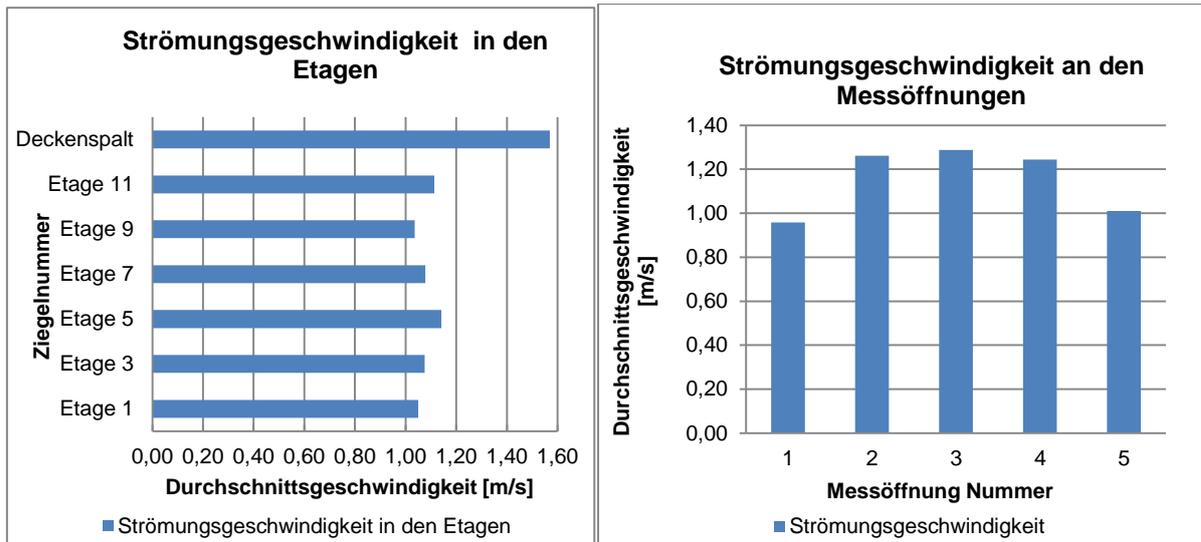


Abbildung 14: Ergebnis der Strömungsmessung beim Dachziegelbesatz

Nach dem die Strömungsverteilung am Dachziegelbesatz soweit verbessert wurde, sind weitere Versuche mit Vollziegeln und Hintermauserziegeln durchgeführt worden. Die Ergebnisse der Strömungsversuche mit diesen Besätzen, werden im weiteren Verlauf erläutert.

In der Abbildung 15, Seite 23 sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten an den Etagen und den Messöffnungen beim Vollziegelbesatz dargestellt. Auf den ersten Blick fällt auf, dass die Strömungsgeschwindigkeiten insgesamt höher sind als bei den Dachziegeln. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Vollziegelbesatz wesentlich dichter ist als der Dachziegelbesatz. Hier liegt der Mittelwert im Besatz bei etwa 3 m/s. Im Deckenspalt werden Geschwindigkeiten von bis zu 4,5 m/s erreicht. Zur Verteilung der Strömung kann gesagt werden, dass über die Höhe (Etagen) wie auch über die Breite (Messöffnungen) keine gravierenden Abweichungen festzustellen sind. Unter diesen Umständen müssen, wie erwartet, an der Strömungsleitvorrichtung keine Änderungen vorgenommen werden um den Vollziegelbesatz in der Versuchsanlage zu brennen.

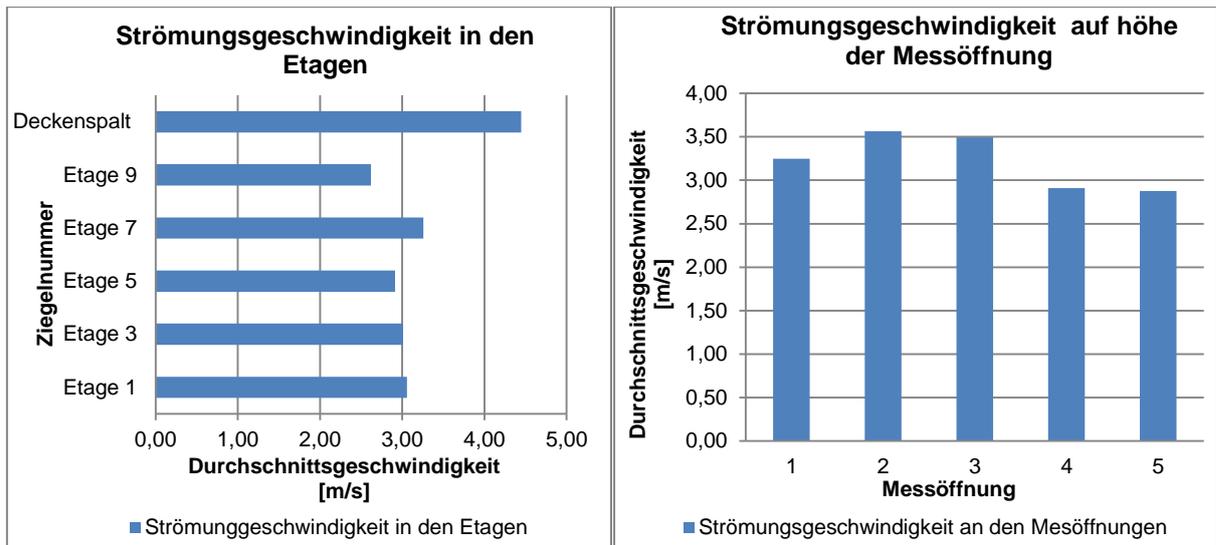


Abbildung 15: Ergebnisse der Strömungsmessung beim Vollziegelbesatz

In der Abbildung 16, Seite 23 sind die Ergebnisse der Strömungsversuche mit den Hintermauerziegeln dargestellt. Im linken Diagramm sind wieder die Geschwindigkeiten an den Etagen dargestellt. Im rechten Diagramm sind die Ergebnisse an den Messöffnungen zu sehen. Aus diesen geht hervor, dass die Strömungsgeschwindigkeiten im Mittel bei etwas über 1 m/s liegen. Der Wert ist aufgrund der geringeren Fläche die, die Ziegel im Ofenkanal einnehmen geringer als bei den Vollziegeln. Im Deckenspalt sind in dieser Messung Geschwindigkeiten von etwa 2,5 m/s gemessen worden. Dieser hohe Wert ist auch wieder auf den geringen Strömungswiderstand im Deckenspalt zurückzuführen.

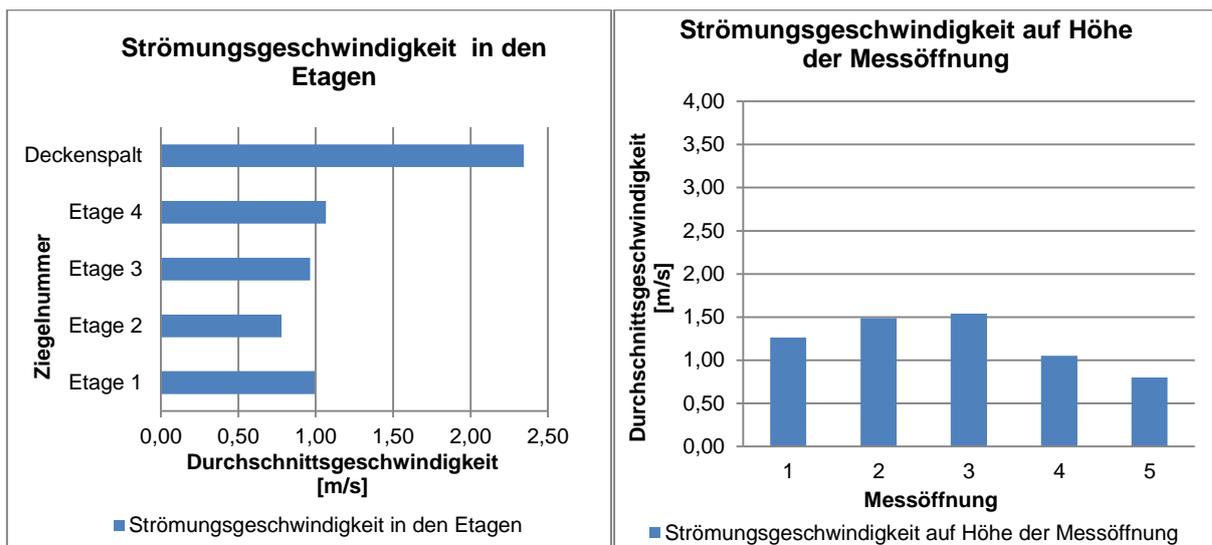


Abbildung 16: Ergebnisse der Strömungsmessung beim Hintermauerziegelbesatz

Im Zuge der Strömungsmessungen ist auch der Druckverlust des Ventilators gemessen worden. Es stellte sich jedoch heraus, dass die gemessenen Werte unrealistisch sind. Nach einer Analyse des Messaufbaus wurde festgestellt, dass die Position der Messstellen ungünstig gewählt ist. In der Rohrleitung des Umwälzventilators befinden sich zu viele Klappen und Krümmungen, als dass realistische Messwerte aufgenommen werden könnten.

## 4.2 Brennversuche mit Heizregister

Nachdem die Strömungsversuche abgeschlossen sind, ist damit begonnen worden, den ersten Brennversuch mit Dachziegeln vorzubereiten. In dieser Versuchsreihe soll herausgefunden werden, ob das Prinzip des Solid-Solid-Rekuperators funktioniert und ob die Produkteigenschaften, mit einem, in einem herkömmlichen Ofen gebranntem Ziegel, vergleichbar sind. In den ersten Versuchsreihen werden zur Beheizung der Anlage elektrische Heizregister gewählt. So können sich zwar auf Grund der anderen Ofenatmosphäre geringfügig andere keramische Eigenschaften einstellen, allerdings sind die Heizregister relativ einfach zu Handhaben und zu Installieren. Weiter soll in den ersten Versuchsreihen nur überprüft werden, ob das Grundprinzip des Gegenlaufofens funktioniert. Für diesen Aspekt ist es nicht wichtig, wie die Energie zugeführt wird, es soll herausgefunden werden, ob ausreichend Energie vom heißeren auf den kälteren Besatzstapel übertragen wird.

### 4.2.1 Versuche mit Dachziegel

Bei den Versuchen im Enviro-Versuchsofen wurde mit Dachziegeln als Besatz begonnen. Hierfür spricht, dass beim Dachziegel durch den Einsatz der neuen Ofentechnologie rechnerisch mindestens 30 % der Energiekosten eingespart werden können und somit auch die größte CO<sub>2</sub> Einsparung erreicht werden kann. Für die Dachziegelversuche wird jeder Wagen mit 84 Ziegeln und 92 H-Kassetten, sowie in Abbildung 17, Seite 26 zusehen, beladen. Die Wagen können mit sieben Dachziegelstapeln beladen werden, welche jeweils dreizehn H-Kassetten enthalten in denen zwölf Dachziegel liegen. Die oberste Kassette dient zur Verringerung des Deckenspaltes und ist nicht belegt. Die Türmchen aus Feuerleichtstein, die links und rechts im Bild auf den Ofenwagen zu sehen sind, dienen zur Abdichtung der Kammern untereinander. So soll der Energieaustausch der Kammern untereinander so gering wie möglich gehalten werden. Dies ist notwendig um die Messergebnisse nicht mit direktem Energieeintrag der Heizregister in die mittlere Kammer zu verfälschen.



Abbildung 17: Dachziegelbesatz

Der Wagenstand ist so aufgebaut wie er in Abbildung 18, Seite 26 zu erkennen ist. Dort ist zu sehen, dass sich bei diesem Aufbau zwei fahrbare Stränge im Ofen befinden. Diese sind auf den Gleisen eins und vier angeordnet. Die fahrbaren Stränge bestehen aus den äußeren Platzhalterwagen die hier gelb markiert sind. Weiter sind dort die zwei Wagen, die mit den Ziegeln für den Energietransport beladen sind, hier orange markiert, zu sehen. Außerdem sind in der Abbildung die Positionen für die Heizregister in den Nebenkammern in grün markiert. Rot sind die Wagen markiert, die mit den Dachziegelstapeln beladen sind, welche Probeziegel enthalten, sich nicht bewegen und nur in der mittleren Kammer stehen.

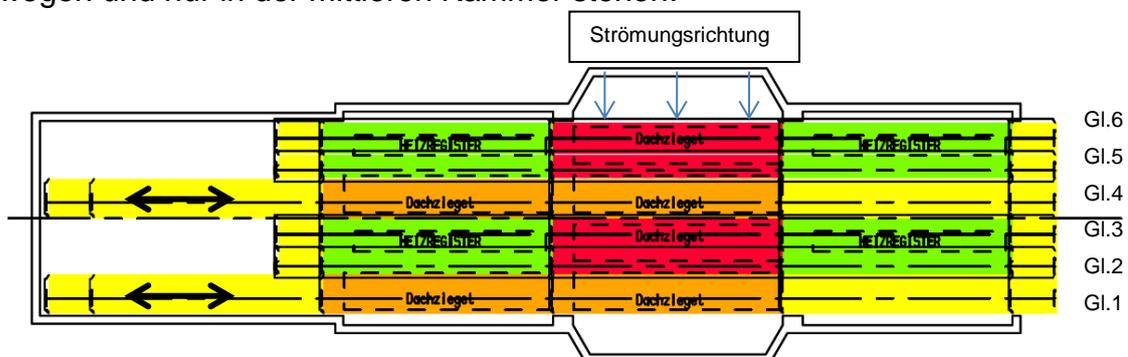
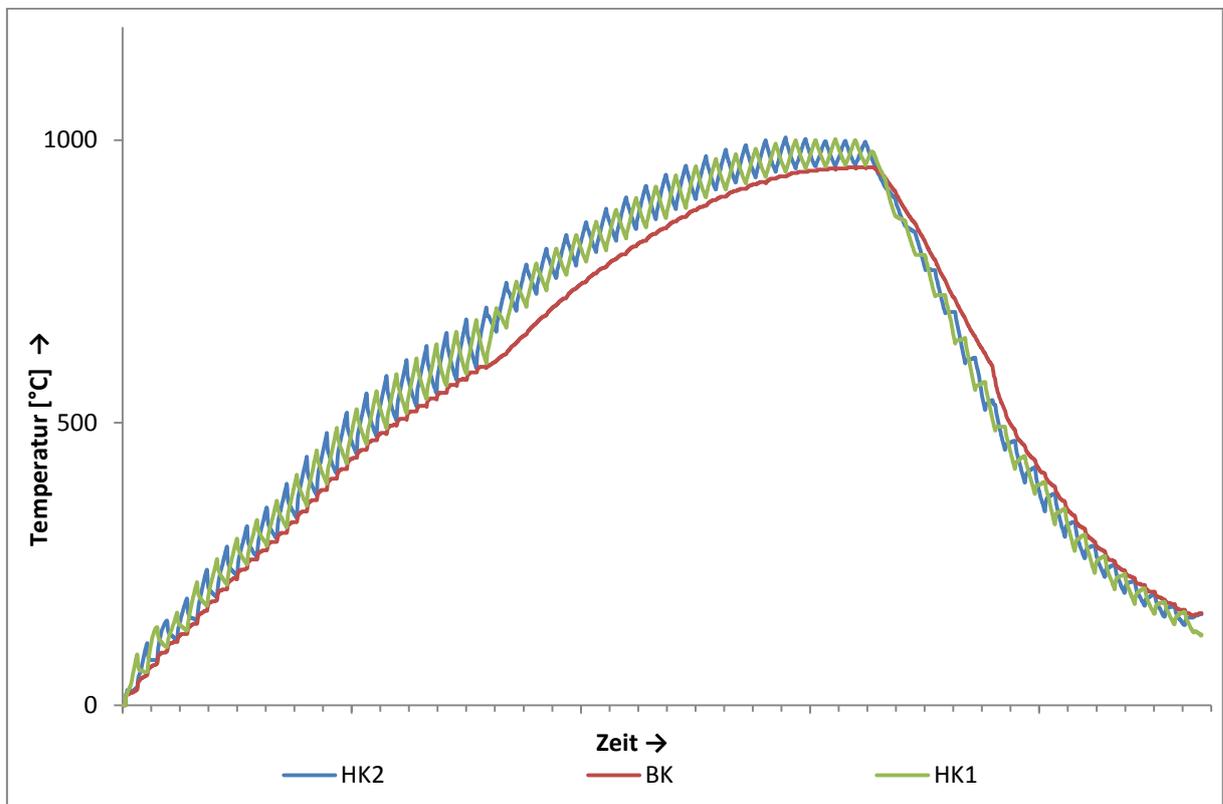


Abbildung 18: Wagenstand mit Dachziegelbesatz

Die Besätze auf den Wagen für den Energietransport und die Wagen, auf denen die Probebesätze aufgebaut sind, sind nach dem in Abbildung 17 auf Seite 26 zu sehenden Schema aufgebaut. Der Besatz in der mittleren Kammer auf den Gleisen zwei

und drei sowie die Dachziegel auf Gleis vier sind mit Thermoelementen ausgestattet. Mit Hilfe dieser Thermoelemente wird die Leistung der Heizregister in den Heizkammern reguliert und die Temperatur aufgezeichnet. In der Abbildung 19 auf Seite 27 ist das Resultat dieser Aufzeichnung abgebildet. Die rote Kurve gibt den Temperaturverlauf in der mittleren Kammer wieder. Hier stehen die Ziegel, die nur dadurch aufgeheizt werden, dass ihnen wärmere Ziegel aus den Heizkammern gegenüber gestellt werden. Den Temperaturverlauf der Ziegel aus den Heizkammern stellen die blaue und die grüne Kurve dar. An diesen Kurven ist erkennbar, dass sich immer einer der beiden Ziegelstapel in einer Heizkammer befindet und aufgeheizt wird. Der Andere befindet sich währenddessen in der mittleren Kammer und gibt Wärme an die dort feststehenden Besatzwagen ab und kühlt somit selbst ab.



**Abbildung 19:** Beispielbrennkurve mit Dachziegelbesatz

Anhand der Brennkurve kann man erkennen, dass das Prinzip des Solid-Solid-Rekuperators funktioniert. Die Ziegel in der mittleren Kammer werden durch die in den Heizkammern aufgeheizten Ziegel erwärmt. Das starke Abkühlen der Ziegel aus den Heizkammern ist der Tatsache geschuldet, dass diese Ziegel die gesamte mittlere Kammer mit aufheizen. Die Masse der Ofenwagen, der Isolierung und des Ofenkörpers übersteigen die Masse der Ziegel bei weitem. In einer industriellen Anlage ist dies nicht der Fall. Hier müssen Isolierung und Ofenkörper nur bei der Inbe-

triebnahme erwärmt werden. Die Ofenwagen machen den gleichen Temperaturwechsel wie die Ziegel mit. Aus diesen Gründen kann man davon ausgehen, dass die Wärmeübertragung in einer realen Anlage genauso gut oder besser funktionieren wird.

Nach einem Brennversuch wird der Ofen ausgeräumt und die durch Wärmeübertragung gebrannten Ziegel in der mittleren Kammer werden keramisch untersucht. Unter anderem wird die Bruchfestigkeit, der Glühverlust und die Wasseraufnahme der Ziegel ermittelt. Die Bruchfestigkeit wird anhand einer Dreipunktbiegung ermittelt. Die hierfür benötigten Probestäbe werden aus den Dachziegeln herausgeschnitten und für die Dreipunktbiegung ins Labor gegeben. Für den Glühverlust und die Wasseraufnahme werden die Ziegel trocken, nach dem Brand und nach 24 Stunden im Wasserbad gewogen und vermessen. Des Weiteren wird die Farbe der gebrannten Ziegel begutachtet. Hierzu wird ein Dach mit den Ziegeln gedeckt. Auf so einem Dach können eventuelle Farbunterschiede oder Farbverläufe besser begutachtet werden. Ein solches Dach ist in Abbildung 20 auf Seite 29 zu sehen. Auf diesem Dach sind die im Enviro gebrannten, nach einem Schema geordneten Ziegel, aufgedeckt worden. Von oben nach unten sind die einzelnen Stapel eines Ofenwagens angeordnet. Von links nach rechts sind die Ziegel eines Stapels von unten nach oben angeordnet. Links im Bild befinden sich also die Ziegel, die direkt über dem Ofenwagenplateau, ganz unten im Stapel, auf der ersten Etage, gebrannt wurden. Auf der Rechtenseite sind die Ziegel, die auf der zwölften Etage, ganz oben auf dem Wagen gebrannt wurden.



**Abbildung 20:** Mit im Enviro gebrannten Ziegeln bedecktes Dach

Die Dachziegel auf diesem Dach sind in ihrer Farbe noch etwas hell. Dies liegt daran, dass die maximale Brenntemperatur mit den Heizregistern nicht erreicht werden kann. Bei derartig hohen Temperaturen würde das Stahlgestell der Heizregister weich werden, sich verformen und somit zerstört werden. Aus diesem Grund sind auch die keramischen Werte wie Festigkeit und Wasseraufnahme nicht mit den originalen Ziegeln vergleichbar. Um dennoch Vergleichswerte zu bekommen, wurden im Gasofen des Keramiklabors Ziegel mit gleicher Temperatur gebrannt. Beim Vergleich der keramischen Eigenschaften der Ziegel aus dem Gasofen und dem Enviro stellte sich heraus, dass die Werte identisch sind und so die im Enviro gebrannten Ziegel keinen Nachteil gegenüber herkömmlich gebrannten Ziegel haben.

**Analyse der Wärmeübertragung**

In der anschließenden Analyse soll festgestellt werden, wie gut die Übertragung der Energie von einer „heißen“ Besatzscheibe zu einer „kalten“ Besatzscheibe funktioniert. Hierzu wird mit Hilfe der aufgezeichneten Temperaturen und der Masse der Ziegel der Wärmestrom berechnet, welcher von einer aus der Heizkammer kommenden Besatzscheibe abgegeben und welchen Wärmestrom die in der Brennkammer stehende Scheibe aufgenommen hat. Diese Rechnung wird für mehrere Schübe in der Umwälzphase und in der Strahlungsphase durchgeführt. So ergibt sich ein ungefähres Bild, wie die Übertragung über den gesamten Brennprozess funktioniert. Zur Berechnung der Wärmeströme aus Brenn- und Heizkammer werden die folgenden Gleichungen verwendet:

$$\dot{Q}_{BK} = \frac{m_{BK} * c_p * (T_{Ende} - T_{Anfang})}{t} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{HK} = \frac{m_{HK} * c_p * (T_{Ende} - T_{Anfang})}{t} \quad (2)$$

$\dot{Q}_{BK}$  = Wärmestrom Brennkammer

$\dot{Q}_{HK}$  = Wärmestrom Heizkammer

$m_{BK}$  = Masse in der Brennkammer

$m_{HK}$  = Masse der Heizkammer

$c_p$  = Spezifische Wärmekapazität

$T_{Ende}$  = Temperatur am Ende des Schubes

$T_{Anfang}$  = Temperatur am Anfang des Schubes

Der Wärmestrom wird für die fest in der Brennkammer stehenden und für die aus der Heizkammer kommenden Ziegel berechnet. Hierbei gilt folgende Vorzeichenregel:

- Wärmestrom des Besatzes aus der Heizkammer → negativ
- Wärmestrom des Besatzes in der Brennkammer → positiv

Die zur Berechnung benötigte spezifische Wärmekapazität ist temperaturabhängig. Sie kann mithilfe des Diagrammes aus Abbildung 21 auf Seite 31 ermittelt oder mit der dazugehörigen Gleichung errechnet werden.

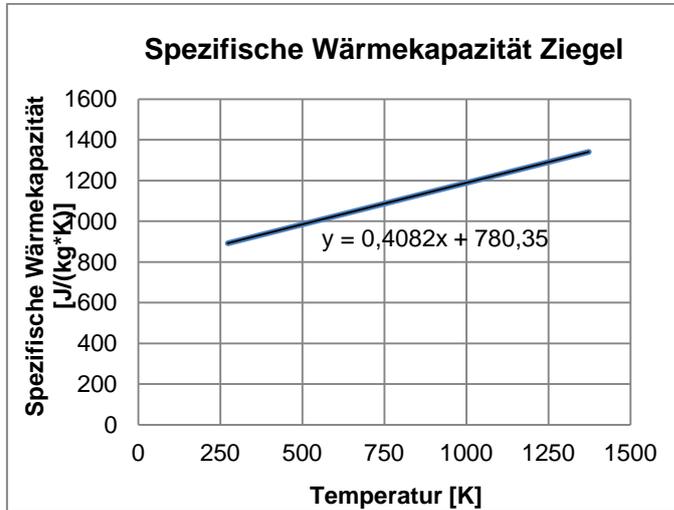


Abbildung 21: Spezifische Wärmekapazität Ziegel [2]

Um die Werte Masseunabhängig vergleichen zu können, werden die Wärmeströme auf spezifische Wärmeströme umgerechnet. Hierdurch wird der Wärmestrom bezogen auf 1 kg des Besatzes bestehend aus Ziegel und Kasette bestimmt. Diese Umrechnung wird mit folgenden Formeln durchgeführt:

$$\dot{q}_{\text{HK}} = \frac{\dot{Q}_{\text{HK}}}{m_{\text{HK}}} \quad (3)$$

$$\dot{q}_{\text{BK}} = \frac{\dot{Q}_{\text{BK}}}{m_{\text{BK}}} \quad (4)$$

$\dot{Q}_{\text{BK}}$  = Wärmestrom Brennkammer

$\dot{Q}_{\text{HK}}$  = Wärmestrom Heizkammer

$m_{\text{BK}}$  = Masse in der Brennkammer

$m_{\text{HK}}$  = Masse der Heizkammer

$\dot{q}_{\text{BK}}$  = spezifischer Wärmestrom Brennkammer

$\dot{q}_{\text{HK}}$  = spezifischer Wärmestrom Heizkammer

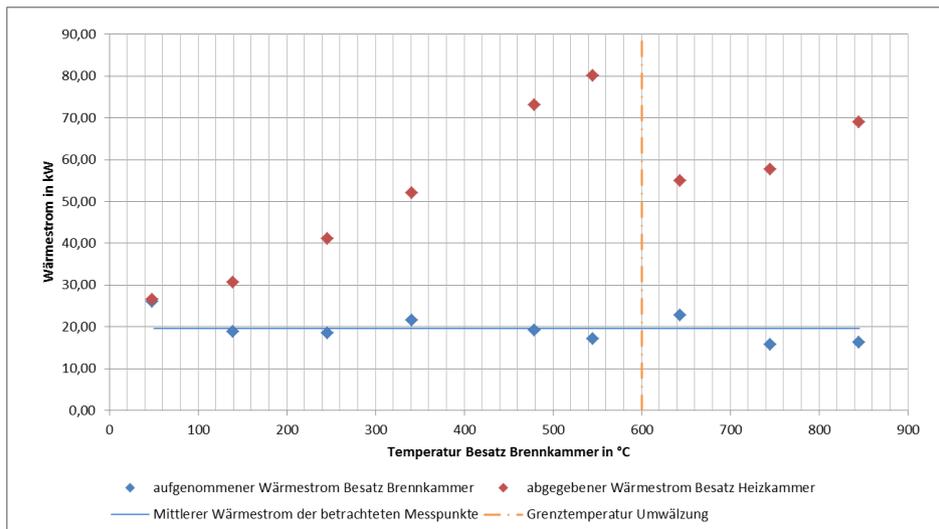
Die Ergebnisse der Berechnung der Wärmeströme ist in der Tabelle 1, Seite 32 aufgelistet.

$T_{HK1}$	$T_{HK20}$	$T_{BK1}$	$T_{BK20}$	$\dot{Q}_{HK1-20}$	$\dot{Q}_{BK1-20}$	$\dot{Q}_{BK1-20}/m_{\text{Tonnage BK}}$
°C	°C	°C	°C	kW	kW	W/kg
114	88	48	74	-26,55	25,97	19,77
197	168	139	157	-30,65	18,78	14,30
315	278	246	263	-41,09	18,50	14,08
418	373	341	360	-51,99	21,52	16,38
569	509	479	495	-73,06	19,13	14,56
646	582	545	559	-80,22	17,11	13,02
759	717	643	661	-54,90	22,80	17,36
833	790	745	757	-57,65	15,74	11,98
933	883	845	857	-68,93	16,28	12,39
Mittelwert				-53,89	19,54	14,87

**Tabelle 1:** Spezifische Wärmeströme bezogen auf die Tonnage in der BK [3]

Aus den Ergebnissen der Berechnung geht hervor, dass der Wärmestrom von den aus der Heizkammer kommenden Ziegeln bis zur Abschaltung des Umwälzventilators bei 600 °C kontinuierlich ansteigt. Danach sinkt der abgegebene Wärmestrom, steigt aber bei höheren Temperaturen wieder an. Der von den Ziegeln in der Brennkammer aufgenommene Wärmestrom ist über die gesamte Aufheizphase etwa konstant. Die Ergebnisse der Berechnung aus Tabelle 1, Seite 32 sind in Abbildung 22 auf Seite 33 nochmal grafisch dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass der Wärmestrom von den aus der Heizkammer kommenden Ziegeln positiv eingetragen ist. Dies dient der besseren Vergleichbarkeit der Wärmeströme beider Ziegelpakete.

Der Wärmestrom, der, von den Ziegeln aus der Heizkammer abgegeben wird, ist immer größer, als der von den Ziegeln in der Brennkammer aufgenommene. Eine Erklärung hierfür ist die Aufheizung des gesamten Ofens. Ein großer Teil des Wärmestroms wird hierfür benötigt. Desweiteren ist dies mit immer größer werdenden Verlusten in der Umwälzrohrleitung zu begründen.



**Abbildung 22:** Wärmestrom an den Besatz in der BK über den Versuchsverlauf [3]

Weiter wurde hier versucht den Anteil der freien Konvektion an der Wärmeübertragung im Bereich über 700 °C zu ermitteln. Als Grundlage wurde folgende einfache Bilanz aufgestellt:

$$\dot{Q}_{\text{Strahlung}} + \dot{Q}_{\text{freie Konvektion}} = \dot{Q}_{\text{BK} > 700^{\circ}\text{C}} \quad (5)$$

$\dot{Q}_{\text{Strahlung}}$  = durch Strahlung übertragender Wärmestrom

$\dot{Q}_{\text{freie Konvektion}}$  = durch frei Konvektion übertragender Wärmestrom

$\dot{Q}_{\text{BK} > 700^{\circ}\text{C}}$  = Wärmestrom Brennkammer über 700 °C

$\dot{Q}_{\text{BK} > 700^{\circ}\text{C}}$  stellt einen Messwert dar, der in der Versuchsanlage mit Hilfe der Thermoelemente ermittelt wurde.  $\dot{Q}_{\text{Strahlung}}$  stellt den theoretisch durch Strahlung übertragenden Wärmestrom dar. Die Formel führt allerdings zu keinem realistischen Ergebnis, da sich der durch Strahlung übertragende Anteil nicht genau genug berechnen lässt. Der Grund hierfür ist darin zu suchen, dass sich die Faktoren Wandtemperatur und Emissionskoeffizient nicht hinreichend genau bestimmen lassen. Dies liegt daran, dass beim Dachziegelbesatz jede Fläche des Besatzes anders am Strahlungsaustausch beteiligt ist. So werden zum Beispiel die kleinen Stirnflächen sehr gut Energie durch Strahlung austauschen können, da sie sich direkt gegenüberstehen. Die Ober- und Unterseiten der Ziegel haben sehr große Flächen, liegen aber relativ versteckt im Besatz, sodass der Energieaustausch durch Strahlung behindert wird. Bei den Ober- und Unterseiten ändern sich die Faktoren sogar innerhalb der Fläche. Je weiter man in die Mitte des Besatzes kommt je geringer wird der Emissionskoeffizient und auch die Temperatur.

#### 4.2.2 Versuche mit Vollziegel

Nachdem die Versuche mit Dachziegeln zu einem positiven Ergebnis geführt haben, ist damit begonnen worden, den Ofen für Vollziegel umzubauen. Dieser Umbau hat einige Zeit in Anspruch genommen, da unter anderem der Wagenstand umgesetzt werden musste. Wie aus der Abbildung 23, Seite 34 hervorgeht befinden sich bei dem Versuchsaufbau mit Vollziegeln 3 fahrbare Wagenstränge im Ofen. Diese befinden sich auf den Gleisen 1, 3 und 5. In der Abbildung sind die fahrbaren Stränge durch Pfeile gekennzeichnet. Zwei Wagen dieser Stränge sind mit Vollziegeln beladen und in der Abbildung orange markiert. Außerdem gibt es in den fahrbaren Strängen noch leere Wagen die als Platzhalter vorgesehen sind, wenn der fahrbare Strang verschoben wird. Diese Positionen sind in dem Schema gelb markiert. Die fest in der Brennkammer stehenden Prüfbesätze sind hier rot markiert. In grün sind die Heizregisterwagen markiert, die fest in den Nebenkammern installiert sind.

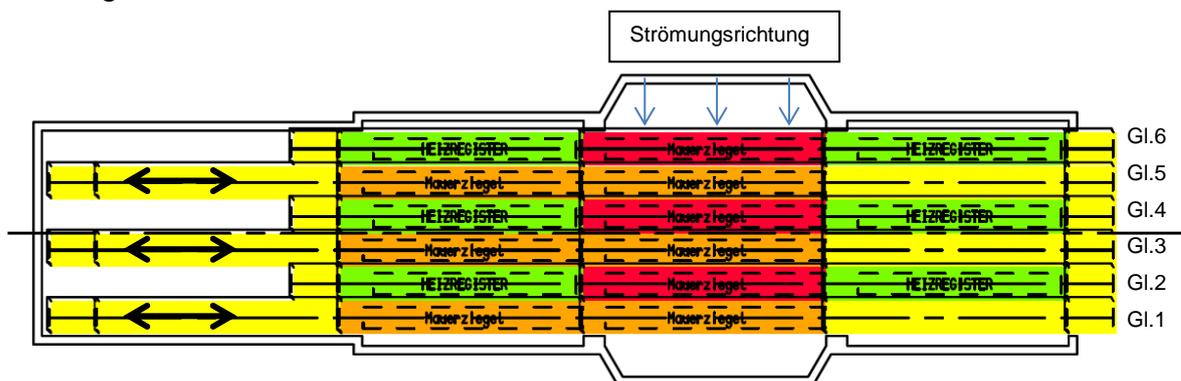


Abbildung 23: Wagenstand mit Vollziegeln

Der Besatzaufbau besteht je Wagen aus einem ein Läufer tiefen Türmchenbesatz, der im Verbund aufgebaut ist. Hierbei stehen fünf Ziegel in Strömungsrichtung und in der nächsten Etage sechs Ziegel quer zur Strömungsrichtung. Dieser Aufbau wiederholt sich 4-mal. Verdeutlicht wird dieser Aufbau in Abbildung 24, Seite 35. Durch diesen Aufbau entsteht ein stabiler Turm, der auch den Belastungen beim verfahren der Wagen standhält.



**Abbildung 24:** Besatzaufbau mit Vollziegel

In der Abbildung 25, Seite 36 ist die von den Thermoelementen aufgenommene Brennkurve zu erkennen. Dargestellt ist der Temperaturverlauf der fahrbaren Wagen in grün (HK 1) bzw. blau (HK 2) und der Temperaturverlauf des feststehenden Probewagens in rot (BK). Am Anfang der Brennkurve ist ein Plateau eingebaut, das als Trocknungsphase genutzt wird. Weiter ist zu erkennen, dass über die gesamte Aufheizung ein ähnlicher Gradient gehalten wird. Das Abflachen bei etwa der Hälfte der Aufheizung ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Bereich die Verluste, über die Umwälzleitung, stark ansteigen. Im weiteren Verlauf wird in den Temperaturbereich gewechselt in dem die Energie vollständig durch Strahlung übertragen wird. In diesem Bereich wird die Umwälzleitung vom Rest des Ofens getrennt, so dass die Verluste über die Umwälzleitung keine Rolle mehr spielen und der Aufheizgradient wieder ansteigt. Das Problem des Abflachens der Brennkurve stellt für den realen Ofen kein Problem dar, da die Umwälzleitung dort, durch eine andere konstruktive Ausführung, besser isoliert sein wird.

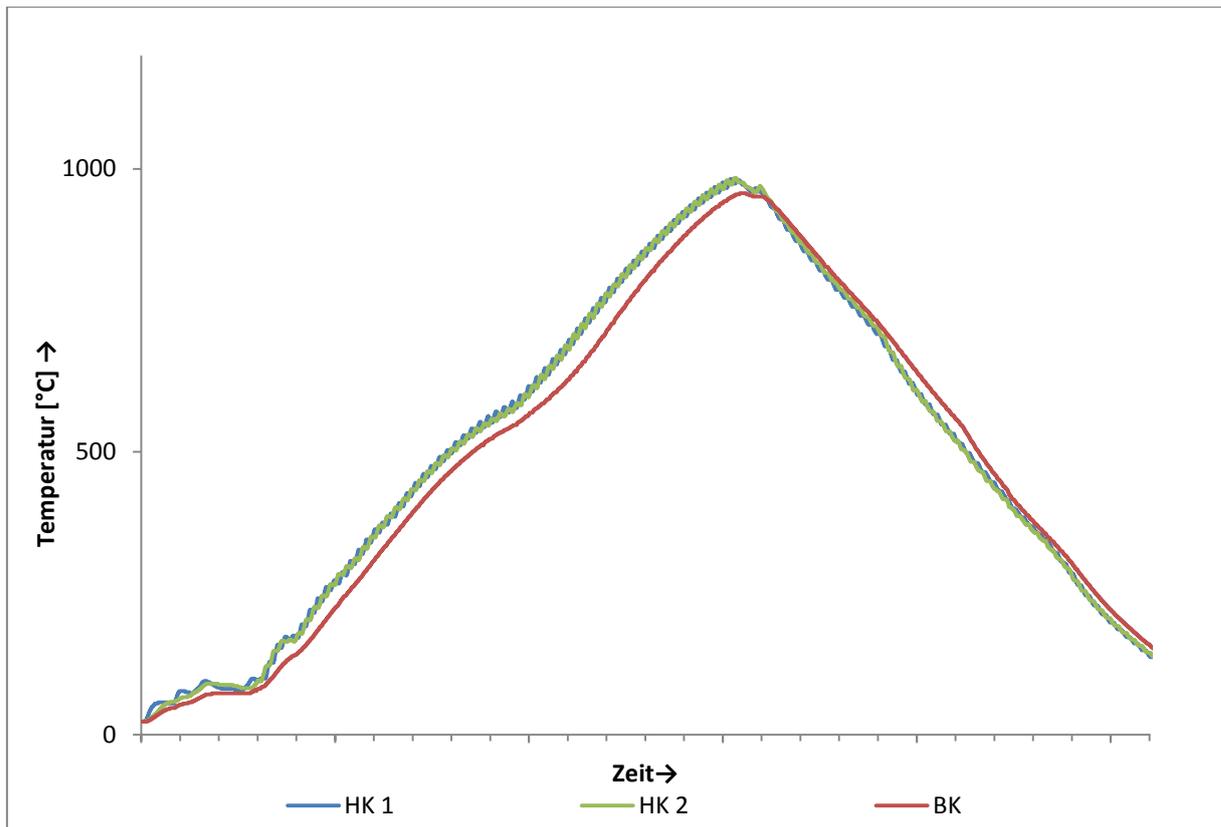
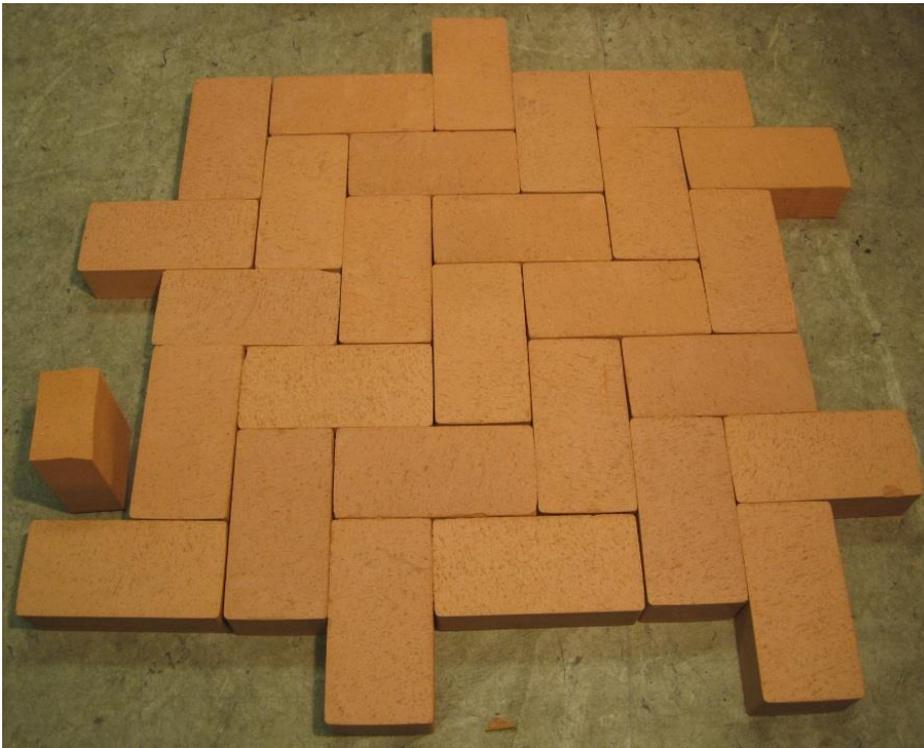


Abbildung 25: Brennkurve im Enviro, mit Vollziegel

In dieser Versuchsreihe wurden vier Versuche mit Vollziegeln durchgeführt. Bei allen Versuchen wurde festgestellt, dass die Wärmeübertragung nach dem Solid-Solid-Prinzip funktioniert. Dies geht auch aus der Brennkurve in Abbildung 25, Seite 36 hervor. Deutlich wird dies, da durch die Einteilung des Ofens in mehrere Kammern die Energie von den fahrbaren Wagen in die Brennkammer übertragen werden muss. Und nach der Auswertung des Diagramms passiert dies auch, da die Brennkammer (BK) in ihrer Temperatur immer zeitlich verzögert zu den beiden Heizkammern (HK1, HK2) ansteigt. Wenn die Energie über einen anderen Weg in die Brennkammer gelangen würde, dann würden die Besatztemperaturen in den drei Kammern dichter beieinander liegen.

Die keramischen Eigenschaften sind, auf Grund der geringeren Brenntemperatur, nicht mit dem Originalziegel vergleichbar. Allerdings lässt sich zu den Ziegeln die im Laborgasofen der Firma Keller die gleiche Maximaltemperatur und die gleiche Brennkurve erfahren haben, kein qualitativer Unterschied feststellen. Verglichen werden die Wasseraufnahme, der Glühverlust und die Bruchfestigkeit. Die Bruchfestigkeit wird an, aus dem vollen Ziegel heraus geschnittenen Proben, ermittelt.

In der Abbildung 26, Seite 37 ist eine Probefläche mit den Vollziegeln aus dem Enviro Versuchsofen dargestellt. Bei genauerem Hinsehen ist noch ein leichter Farbverlauf zu erkennen, der allerdings auf Grund der fehlenden Brenner und der so entstehenden Temperaturschichtung in der Brennkammer zu erwarten war. In einer realen Anlage würden Brenner im hohen Temperaturbereich für eine Vergleichmäßigung der Temperatur sorgen. Außerdem wurde der auf der linken Seite aufrecht stehende Ziegel zerbrochen, um zu zeigen, dass der Ziegel vollständig durchgebrannt ist. Dieser aufgebrochene Ziegel ist der, der am schlechtesten aufgeheizt werden kann und stellt somit den schlechtesten Fall dar.



**Abbildung 26:** Probefläche der Vollziegel

Zu Beginn des Projekts war es geplant, dass man Versuche mit Reduktion fährt. Allerdings sind diese mit den Heizregistern nicht möglich, da die Atmosphäre im Ofen mit den Heizregistern nicht beeinflusst werden kann.

### **Analyse der Wärmeübertragung**

In diesem Teil wird betrachtet, welche Wärmeströme während der Aufheizphase in der Brennkammer abgegeben, beziehungsweise aufgenommen werden. Bei dieser Betrachtung werden alle Ziegelstapel in der Brennkammer beachtet. Es wird hierbei nicht weiter darauf eingegangen, ob der Wärmestrom durch Konvektion oder Strahlung übertragen wird. Zur Berechnung der Wärmeströme werden wieder die Gleichungen (1) und (2) aus Kapitel 4.2.1 verwendet

Der Wärmestrom wird für die fest in der Brennkammer stehenden und für die aus der Heizkammer kommenden Ziegel berechnet. Hierbei gilt folgende Vorzeichenregel:

- Wärmestrom des Besatzes aus der Heizkammer → negativ
- Wärmestrom des Besatzes in der Brennkammer → positiv

Positiver Wärmestrom bedeutet aufgenommene Energie, während negativer Wärmestrom abgegebene Energie bedeutet.

Für die Berechnung ist die spezifische Wärmekapazität der Ziegel zwingend notwendig. Der Verlauf dieser, über der Temperatur, ist in Abbildung 21, Seite 31 dargestellt.

Um die Werte Masseunabhängig vergleichen zu können, werden die Wärmeströme auch hier auf spezifische Wärmeströme umgerechnet. Dies geschieht mit den in Kapitel 4.2.1 dargestellten Formeln. Die Ergebnisse der Berechnung der Wärmeströme sind in der Tabelle 2, Seite 39 aufgelistet.

Werte aus den Versuchen						
mit Umwälzung						
mittlere Temperatur [°C]			Wärmestrom [kW]		spezifischer Wärmestrom [W/kg]	
Besatz HK	Besatz BK	Luft	$\dot{Q}_{HK}$	$\dot{Q}_{BK}$	$\dot{q}_{HK}$	$\dot{q}_{BK}$
198,00	149,20	187,10	-27,76	21,52	-8,11	6,35
304,80	253,80	281,50	-34,80	22,48	-10,16	6,64
403,70	356,60	367,20	-30,15	23,43	-8,81	6,92
451,00	399,70	408,00	-24,56	23,83	-7,17	7,03
503,00	455,00	459,80	-43,83	18,25	-12,80	5,39
551,80	505,40	510,50	-51,00	18,60	-14,89	5,49
ohne Umwälzung						
605,30	556,20	595,40	-39,00	18,95	-11,39	5,59
718,60	652,60	708,60	-54,11	26,16	-15,80	7,72
852,70	801,00	831,90	-49,53	27,53	-14,47	8,13

**Tabelle 2:** Wärmeströme aus dem Versuch mit Vollziegeln [4]

Aus der Tabelle 2, Seite 39 geht hervor, dass die Wärmeströme  $\dot{Q}_{HK}$  immer größer sind, als die Wärmeströme  $\dot{Q}_{BK}$ . Dieser Zustand entspricht den aus der Theorie hervorgehenden Erwartungen. Die Erklärung dafür ist, dass der Besatz aus der Heizkammer neben dem Besatz in der Brennkammer auch die anderen Massen in der Brennkammer aufheizen muss.

In der Abbildung 27, Seite 40 sind die Wärmeströme des Besatzes in der Brennkammer und des Besatzes aus der Heizkammer über der Besatztemperatur in der Brennkammer in ein Diagramm eingetragen. Da es sich nur um Messpunkte handelt, wird auf die Darstellung einer Kurve verzichtet. Hier ist zu beachten, dass der Wärmestrom aus der Heizkammer eigentlich ein negatives Vorzeichen hat, da der Besatz aus der Heizkammer Wärme abgibt. Zur besseren Vergleichbarkeit wird das in dem Diagramm nicht beachtet. Als Bezugstemperatur wird die mittlere Temperatur in der Brennkammer gewählt.

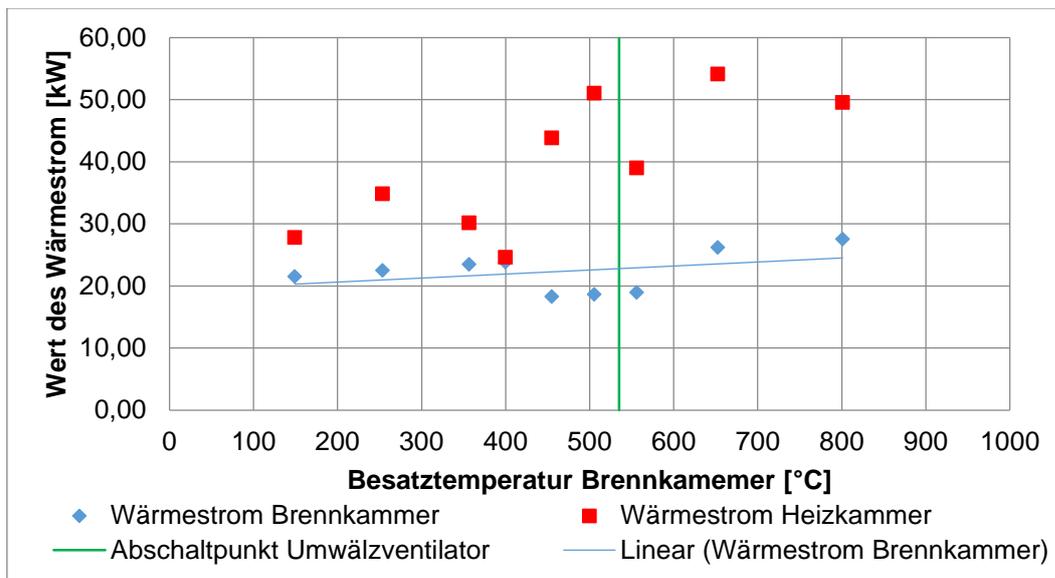


Abbildung 27: Verlauf der Wärmeströme über der Temperatur [4]

In diesem Diagramm ist zu erkennen, dass der aufgenommene Wärmestrom Brennkammer über den gesamten Temperaturbereich nur leicht ansteigt. Der aufgenommene Wärmestrom liegt bei 150 °C in der Brennkammer bei 21,52 kW und steigt über den gesamten Versuchsverlauf nur auf einen Maximalwert von 27,53 kW an. Der maximale aufgenommene Wärmestrom wird bei einer Besatztemperatur in der Brennkammer von 800 °C erreicht. Der abgegebene Wärmestrom Heizkammer liegt zu Beginn bei 27,76 kW. Er steigert sich bis zu einem Maximum von 54,11 kW bei 652 °C Besatztemperatur in der Brennkammer. Im weiteren Verlauf fällt der abgegebene Wärmestrom wieder leicht ab. Die Messpunkte bei 356 °C und 399 °C unterbrechen den Anstieg des abgegebenen Wärmestroms. Wenn man sich die Punkte bei niedrigerer und höherer Temperatur anschaut, ist eigentlich zu erwarten, dass die abgegebenen Wärmeströme bei 356 °C und 399 °C geringfügig höher liegen. Für den ungleichmäßigen Anstieg könnte z.B. ein Messfehler verantwortlich sein. Ein besonderer Punkt liegt noch bei 505 °C in der Brennkammer. An dieser Stelle ist zu erkennen, dass die Differenz zwischen abgegebenen und aufgenommenen Wärmestrom am größten ist. Diese große Differenz ist wiederum ein Anzeichen für die großen Verluste am Ende der Umwälzphase. Die große Differenz nimmt im Strahlungsbereich erst wieder ab und steigt dann, aufgrund der mit der Temperatur ansteigenden Wandverluste wieder an.

### 4.2.3 Versuche mit Hintermauerziegel

Nachdem die Versuche mit Vollziegeln abgeschlossen sind, werden Versuche mit Hintermauerziegeln (HMZ) durchgeführt. Hierzu kann der aktuelle Wagenstand beibehalten werden und muss nicht umgebaut werden siehe Abbildung 28, Seite 42.

Auf Gleis 1, Gleis 3 und Gleis 5 befinden sich die verfahrbaren Wagenstränge mit jeweils zwei Wagen mit Ziegelstapeln (orange). Von diesen Stapeln befindet sich einer in der Brennkammer während der andere in einer der Nebenkammern aufgeheizt bzw. abgekühlt wird. Auf den Gleisen 2, 4 und 6 befinden sich in der Brennkammer feststehende Wagen mit Ziegelstapeln (rot). In den Nebenkammern befinden sich die Heizregister (grün).

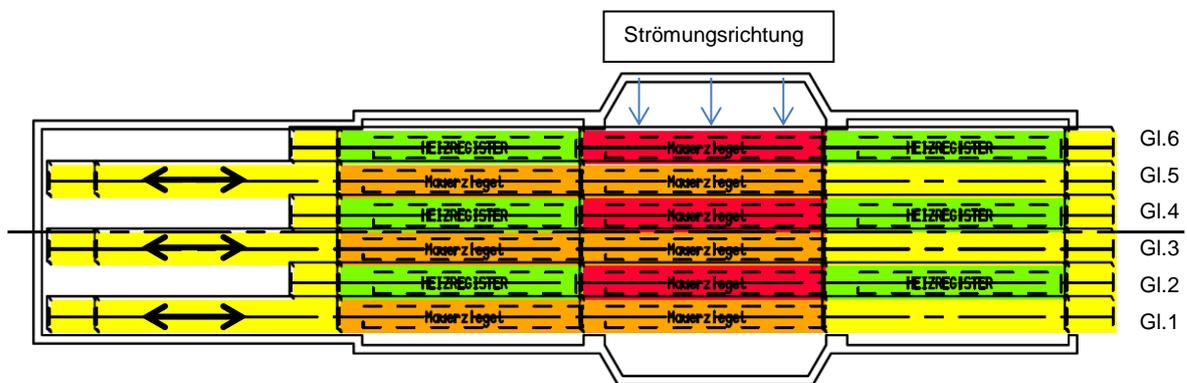


Abbildung 28: Schema Wagenstand

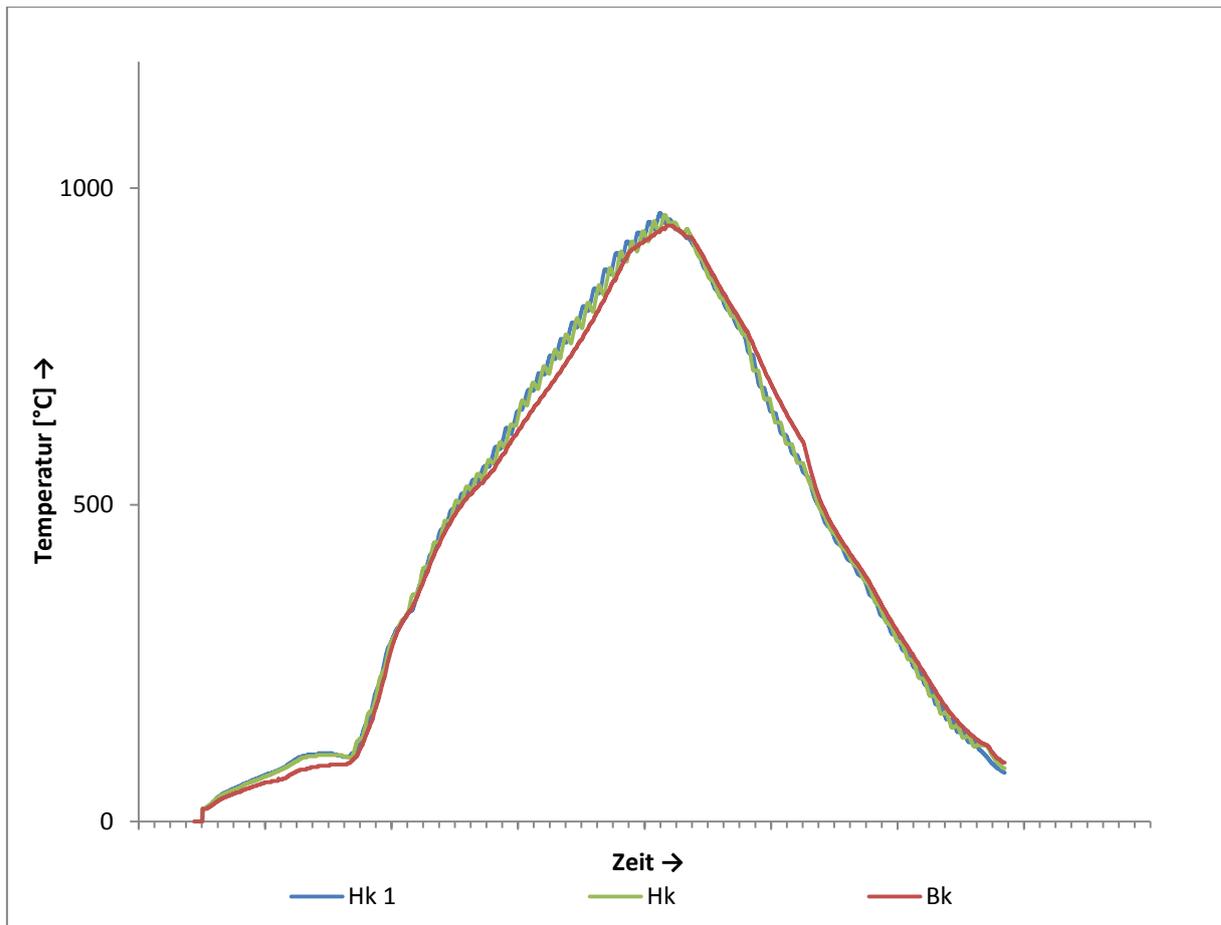
Der Besatz besteht aus einer Reihe HMZ mit acht Ziegeln in der Länge und vier Ziegel in der Höhe (Abbildung 29, Seite 43). Die Ziegel sind im Verbund gesetzt. Entstandene Lücken an den Seiten und oben wurden mit Ziegeln gefüllt. Dadurch soll sichergestellt werden, dass während der konvektiven Phase die Luft möglichst gleichmäßig durch den Besatz strömt.



**Abbildung 29:** Hintermauerbesatz auf Ofenwagen

Beim ersten Versuch mit HMZ im Enviro werden die Ziegel vor dem Brand 8 Stunden getrocknet, da diese vorher schon einige Zeit in der Halle standen und somit wieder Feuchtigkeit aufgenommen haben. Während des ersten Brennversuchs soll getestet werden, wie sich der HMZ im Enviro verhält.

Der Ofen wird mit 50 K/h bis auf 940 °C aufgeheizt. Diese Temperatur wird dann gehalten bevor der Ofen wieder mit 50 K/h abgekühlt wird. Die Abschaltung bzw. die Einschaltung der Umwälzung wurde auf 600 °C festgelegt. Der Versuch hat eine Gesamtdauer von 49,5 Stunden.



**Abbildung 30:** Beispiel Brennkurve für einen Hintermauerziegel

In Abbildung 30, Seite 44 ist die Brennkurve des Versuches dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass kurz nach dem Übergang von der Trocknungsphase in die Brennphase die Temperaturen stark ansteigen. Dieses ansteigen geht soweit, dass das Brennprogramm zeitlich vorgespult werden konnte. Der Anstieg der Temperatur lässt sich durch die in den Ton eingebrachten Porosierungsmittel erklären, die hauptsächlich aus Papierschlamm und Styropor bestehen. Diese Stoffe entzünden sich bei einer Temperatur von etwa 150 °C bis 200 °C und bringen so noch eine erhebliche Menge an Wärmeenergie mit in den Ofen.

Es wurde festgestellt, dass der Wärmeaustausch zwischen den Ziegeln in einem Temperaturbereich ab etwa 450 °C funktioniert. Vorher wird der Prozess von den eingebrachten Porosierungsmittel und deren Entzündung behindert. Für eine Industrielle Enviro-Anlage stellt dies einen Nachteil dar. Hier fahren bereits gebrannte, heiße Ziegel an getrockneten, kühlen Ziegeln vorbei. Die kühlen Ziegel sollen die Wärme der heißen Ziegel aufnehmen und diese so kühlen. Wenn sich jedoch die Porosierungsmittel in den kühlen Ziegeln entzünden und diese dann auch Wärme abgeben, können die heißen Ziegel nicht mehr abkühlen und würden noch heiß aus dem

Ofen kommen. Der Enviro müsste für eine Anlage mit stark porosierten Hintermauerziegeln konstruktiv verändert werden.

Mit Hintermauerziegeln wurden insgesamt 2 Versuche durchgeführt. Anschließend wurde die Anlage wieder für einen Betrieb mit Dachziegeln umgebaut. Da hier das größte Energieeinsparpotential besteht, sollen noch weitere Versuche gemacht werden. Es soll unter anderem erprobt werden, ob das Verfahren auch mit zwei Besatzstapeln nebeneinander auf einem breiteren Ofenwagen funktioniert.

### Analyse der Wärmeübertragung

Im Anschluss an die Versuche wurde die Wärmeübertragung analysiert. Hier werden dieselben Gleichungen wie schon bei der Analyse der Dachziegel verwendet. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 3 auf Seite 45 dargestellt. Auch hier gelten die schon bekannten Vorzeichenregeln. Aufgenommene Wärmeströme werden positiv und abgegebene Wärmeströme werden negativ angenommen.

Werte aus den Versuchen						
mit Umwälzung						
mittlere Temperatur [°C]			Wärmestrom [kW]		spezifischer Wärmestrom [W/kg]	
Besatz HK	Besatz BK	Luft	$\dot{Q}_{HK}$	$\dot{Q}_{BK}$	$\dot{q}_{HK}$	$\dot{q}_{BK}$
389	399	373	4,70	9,40	7,03	14,06
453	453	429	1,18	5,88	1,77	8,80
531	501	495	-4,89	6,11	-7,32	9,14
585	547	547	-8,56	6,11	-12,81	9,14
Ohne Umwälzung						
631	602	590	-7,33	6,11	-10,97	9,14
703	645	672	-8,87	7,61	-13,27	11,39
761	699	726	-10,14	7,61	-15,17	11,39
809	751	775	-13,12	6,56	-19,63	9,81
849	797	816	-13,12	6,56	-19,63	9,81
887	847	856	-13,59	8,15	-20,33	12,19
923	903	897	-11,23	5,62	-16,80	8,41

Tabelle 3: Ergebnisse der Wärmeübertragung beim Hintermauerziegel

Bei den HMZ ergibt sich eine Besonderheit. Durch die Porosierungsmittel wird am Anfang des Brennvorgangs zusätzlich Energie zugeführt. Dies führt dazu, dass sich der Besatz aus der Heizkammer bis etwa 450 °C in der Brennkammer nicht abkühlt. Rechnerisch also keine Energie abgibt. Deutlich wird dies in der Tabelle 3 Seite 45 und Abbildung 31, Seite 46 an den ersten beiden Einträgen. Ab etwa 500 °C zeigt sich dann ein ähnliches Bild wie bei den Dachziegeln. Der abgegebene Wärmestrom

des Besatzes aus der Heizkammer steigt immer weiter an. Bei dem Besatz in der Brennkammer bleibt der aufgenommene Wärmestrom während des Brennvorgangs hingegen in etwa konstant. Durch das Verbrennen der Porosierungsmittel ist der Abfall des Wärmestromes aus der Heizkammer in diesem Diagramm nicht so deutlich wie bei den Dachziegeln. Generell ist der Wärmestrom kleiner. Ein Grund hierfür ist, dass bei den Dachziegeln die Temperatur der Ziegel weiter an der Ziegeloberfläche gemessen worden ist. Bei den HMZ steckten die Thermoelemente weiter im Ziegel, so dass die Wärmeleitung durch die Ziegel und nicht die Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion gemessen wird. Dieses Problem trat in ähnlicher Form auch bei den Vollziegeln auf und ist mit den verwendeten Thermoelementen auch ohne weiteres nicht zu lösen.

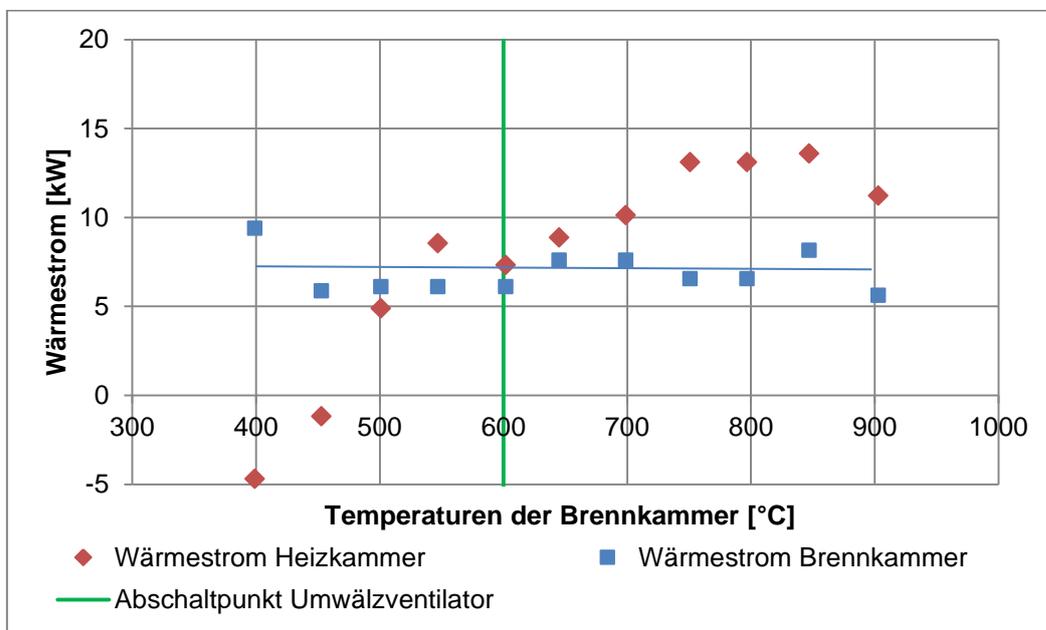
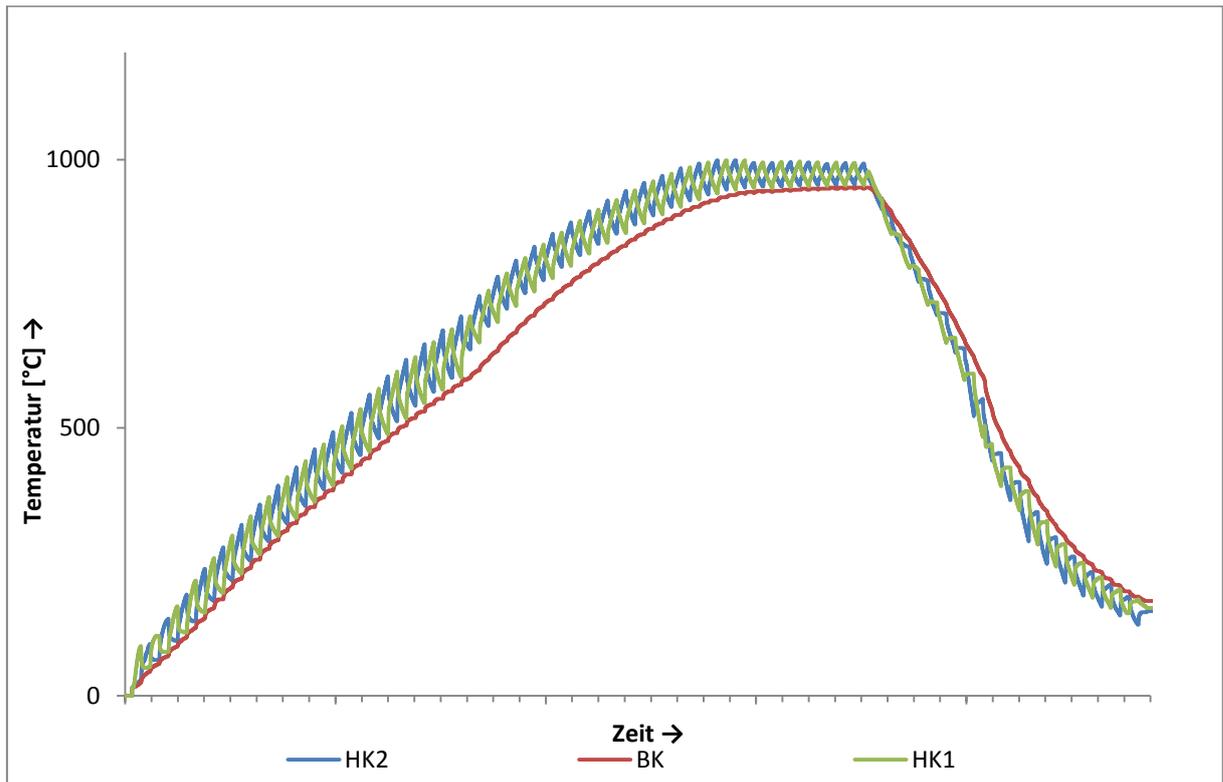


Abbildung 31: Verlauf der Wärmeströme bei HMZ

Bei allen Besätzen wurden Abgasmessungen durchgeführt. Besonders die Hintermauerziegel mit ihren Porosierungsmitteln sind hier interessant. Es wurde festgestellt, dass die vorgeschriebenen Grenzwerte in keinem Versuchen überschritten wurden.



An der Brennkurve in Abbildung 33 auf Seite 48 wird ersichtlich, dass das Solid-Solid Prinzip auch mit einem Doppelstoß funktioniert. Die Brennkurve zeigt, dass sich die Ziegel in der Brennkammer mit jedem Schub weiter aufheizen. Wie schon bei den ersten Dachziegelversuchen ist auch hier das starke Abkühlen der Ziegel aus den Heizkammern damit zu begründen, dass diese die gesamte mittlere Brennkammer mit aufheizen müssen.



**Abbildung 33:** Brennkurve eines Doppelstoßversuches

Bei den im Anschluss, durchgeführten keramischen Untersuchungen konnten keine Abweichungen zu den Versuchen mit nur einem Dachziegelstapel festgestellt werden. Sowohl Biegefestigkeit wie auch die Wasseraufnahme weisen keine Unterschiede auf. Diese Ergebnisse zeigen, dass ein Enviro mit Doppelstoß ohne keramische Nachteile sowie ohne stark verlängerte Brennzeiten möglich ist.

### 4.3 Brennversuche mit Brenneranlage

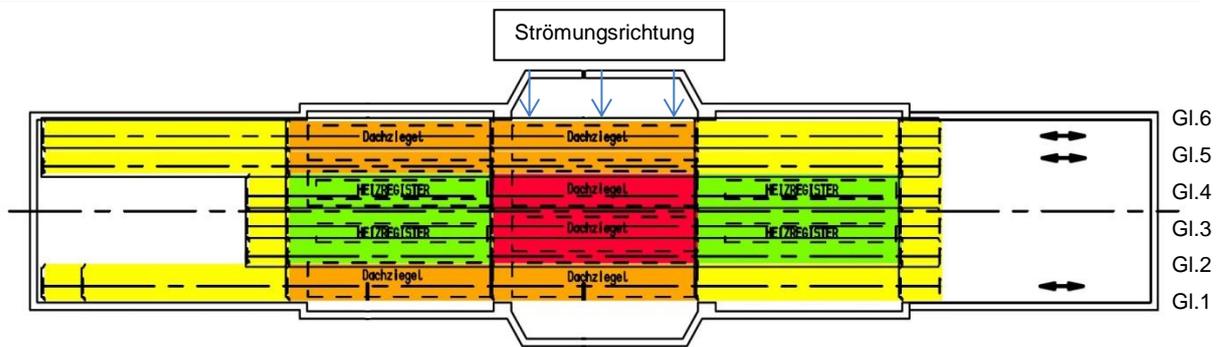
Nachdem die ersten Versuche mit den Heizregistern ergeben haben, dass die Wärmeübertragung nach dem Prinzip des Solid-Solid-Rekuperators funktioniert, wurde damit begonnen den Ofen auf eine Gasbrenneranlage umzurüsten. Hierzu musste in der Halle, in der der Versuchsofen steht, eine neue Gasleitung verlegt werden. Außerdem musste die Brenneranlage auf dem Ofen installiert werden. Um die Installation zu realisieren, mussten Glockenverschluss, Abluftkanäle, Sturzkühlleitungen und die Laufwege sowie Geländer deinstalliert werden, die Schürflöcher neu ausgeführt werden und im Anschluss musste die gesamte Verfahrenstechnik samt der Laufwege und Geländer wieder installiert werden. Die eigentlichen Brenner feuern durch die Decke hindurch in die Aufheizkammern. Die Positionen sind so angeordnet, dass sie an der gleichen Stelle feuern, an der zuvor die Heizregister installiert waren. Somit wird der Besatz für den Energietransport auch weiterhin gleichmäßig aufgeheizt.

Mit dieser Leistungssteigerung ist zu erwarten, dass jetzt auch die produktspezifischen Brenntemperaturen erreicht werden können. Somit ist dieser Schritt wichtig um nachzuweisen, dass sich aufgrund des geänderten Brennprozesses mindestens gleichwertige keramische Eigenschaften einstellen.

#### 4.3.1 Versuche mit Dachziegeln

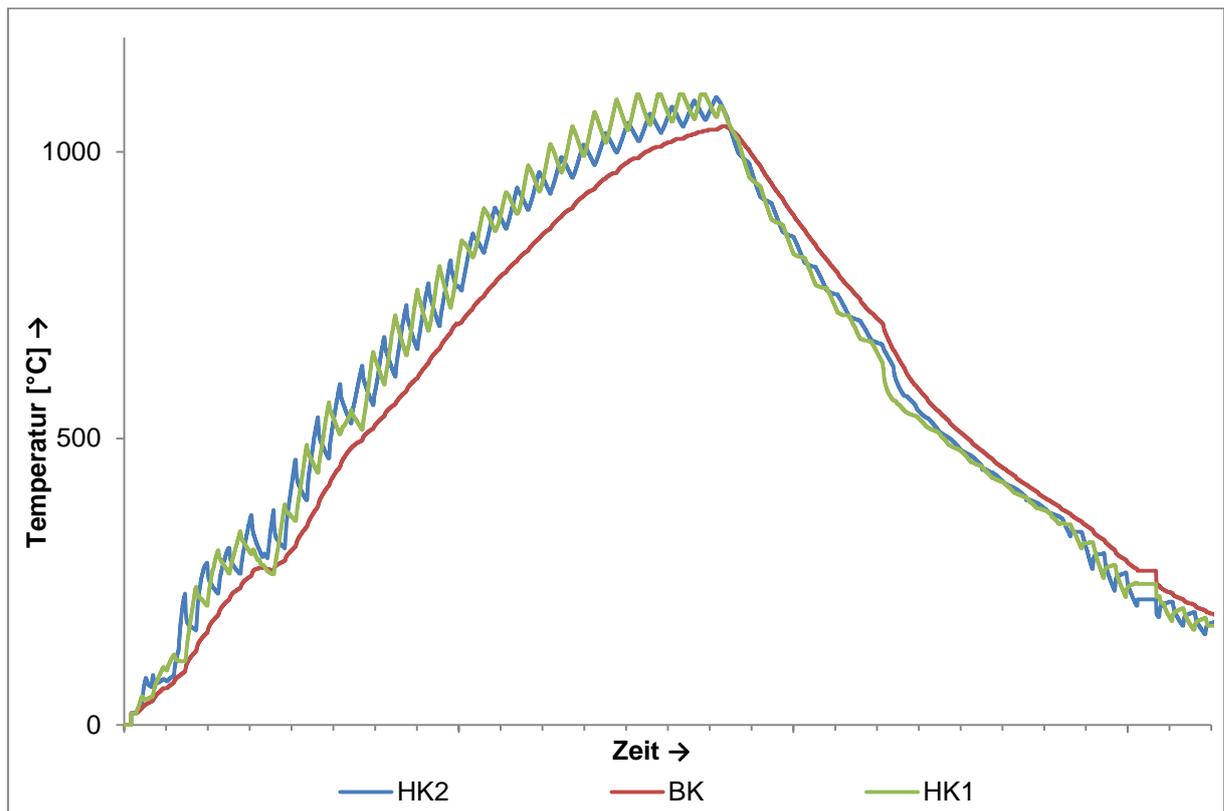
Nachdem die ersten Versuche mit den Dachziegeln zu einem positiven Ergebnis geführt haben, sollen in den weiteren Versuchen genauere Aussagen zu den keramischen Eigenschaften der Ziegel gemacht werden. Hierzu ist man nun im Stande, da die Brenneranlage die Leistung mitbringt, die benötigt wird, um die produktspezifischen Brenntemperaturen fahren zu können.

Hierzu wurde der Ofen wie in der Abbildung 34, Seite 50 zu erkennen ist, aufgebaut. Die Farben in der Abbildung haben dieselben Bedeutungen, wie schon in den Schemata zu vor. Nur das an den in grün markierten Positionen keine Heizregister mehr stehen, sondern die Brenner installiert sind.



**Abbildung 34:** Wagenstand mit Dachziegel im Doppelstoß

In der Abbildung 35, Seite 50 ist die Brennkurve der Dachziegel mit der Brenneranlage dargestellt. Die Probleme, die im unteren Temperaturbereich, um 300 °C aufgetreten sind, sind auf ein Problem an der Versuchsanlage zurückzuführen. Diese Probleme konnten allerdings recht schnell wieder in den Griff bekommen werden und haben keinen Einfluss auf den weiteren Versuchsverlauf.



**Abbildung 35:** Brennkurve mit Dachziegeln und Brenneranlage

Auch in der Brennkurve Abbildung 35, Seite 50 ist zu erkennen, dass die Wärmeübertragung nach dem Solid-Solid-Prinzip funktioniert. Bei diesem Versuch konnte, im Gegensatz zu den vorangegangenen Versuchen, die Garbrandtemperatur der Dachziegel erreicht werden. Dies ist jetzt möglich, da durch die Brenneranlage eine wesentlich höhere Leistung zu Verfügung steht.

Werte aus den Versuchen						
mit Umwälzung						
mittlere Temperatur [°C]			Wärmestrom [kW]		spezifischer Wärmestrom [W/kg]	
Besatz HK	Besatz BK	Luft	$\dot{Q}_{HK}$	$\dot{Q}_{BK}$	$\dot{q}_{HK}$	$\dot{q}_{BK}$
223	145	203	-39,44	36,77	-30,02	27,99
280	207	252	-33,00	27,77	-25,12	21,14
459	365	423	-53,68	43,41	-40,86	33,04
589	510	542	-87,86	28,84	-66,88	21,95
686	590	646	-91,31	26,89	-69,50	20,47
760	672	718	-98,74	36,95	-75,16	28,13
ohne Umwälzung						
878	761	830	-59,93	31,85	-45,62	24,24
955	839	900	-75,16	32,78	-57,21	24,95
1033	950	992	-88,03	27,24	-67,01	20,73
1077	1028	1051	-67,69	10,51	-51,52	8,00

**Tabelle 4:** Wärmeströme am Dachziegelbesatz mit Brenneranlage

In der Tabelle 4, Seite 51 sind die Wärmeströme am Dachziegelbesatz mit der Brenneranlage dargestellt. Zu sehen ist hier, dass der von der Heizkammer abgegebene Wärmestrom immer größer ist, als der, der von dem Besatz in der Brennkammer aufgenommen wird. Dies ist wie zuvor darauf zurückzuführen, dass der Wagen der die Energie abgibt die gesamte Brennkammer aufheizen muss.

Wenn man Tabelle 4, Seite 51 mit der Tabelle 1, Seite 32 in der die Wärmeströme beim Dachziegelbesatz mit elektrischer Beheizung dargestellt sind vergleicht, fällt auf, dass die Wärmeströme in diesem Versuch insgesamt höher sind. Der Grund dafür ist, dass die Leistung durch die Brenneranlage erhöht wurde und so eine schnellere Aufheizung in der Nebenkammer realisiert werden kann. Dies führt dazu, dass die Schubzeit verringert werden kann. Da die Schubzeit verringert wird, steigt die Temperaturdifferenz zwischen den energieaustauschenden Besätzen.

In der Abbildung 36, Seite 52 ist ein Probedach dargestellt, auf dem alle Dachziegel eines Probewagens aufgelegt sind. Zu sehen sind hier von oben nach unten folgende Farbgebungen:

- Schwarze glasierte Dachziegel
- Naturrote Dachziegel
- Schwarze engobierte Dachziegel

Die oben genannten Ziegelfarben waren alle auf einem Tunnelofenwagen nebeneinander gesetzt. Wie vor allem an den naturroten Ziegeln zu erkennen ist, haben sich keine Ausgasungen der Glasur oder der Engobe auf den Ziegeln niedergeschlagen. Bei einem konventionellen Tunnelofen wird es so gehandhabt, dass bei einem Farbwechsel der Besatz, von etwa drei Ofenwagen, verschrottet wird, da die neuen Ziegel noch Flecken in der zuvor gebrannten Ziegelfarbe aufweisen. Nach diesem Versuch können im Enviro Ofen auch Produkte verschiedener Farben, nebeneinander und völlig unabhängig voneinander, gebrannt werden. Dies führt zu einer flexibleren Produktion, spart so Geld und trägt dazu bei Rohstoffe zu sparen, da bei einem Farbwechsel keine Ziegel mehr entsorgt werden müssen.

Der fehlende Ziegel ist beim händischen Abräumen der Wagen zerbrochen.



**Abbildung 36:** Verschiedene Dachziegelarten aus einem Brennversuch

Neben diesem Wagen mit Mischbesatz, stand bei diesem Versuch noch ein Wagen mit naturroten Dachziegeln in der Brennkammer. Der vollständige Besatz dieses Wagens ist in der Abbildung 37, Seite 53 dargestellt. Auch der hier fehlende Ziegel ist beim händischen Abräumen der Wagen zerbrochen.



**Abbildung 37:** Naturroter Dachziegel aus dem Enviro Versuchsofen

Auch in dieser Abbildung ist zu erkennen, dass sich keine Flecken der Engobe oder der Glasur auf den Ziegeln befinden. Obwohl dieser Wagen in Strömungsrichtung hinter dem Wagen mit dem Mischbesatz im Ofen gestanden hat. Es ist nur ein leichter Farbverlauf von links nach rechts zu erkennen. Die Ziegel werden von links nach rechts hin immer dunkler. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die linken Ziegel in der untersten Etage und die rechten Ziegel in der obersten Etage gelegen haben. Da in der eigentlichen Brennkammer keine Brenner installiert sind, stellt sich an dieser Stelle eine Temperaturschichtung ein, die den zuvor beschriebenen Effekt hervorruft. In einer realen Anlage sind im oberen Temperaturbereich Brenner installiert, die einer Temperaturschichtung entgegen wirken.

In der Tabelle 5, Seite 54 sind die keramischen Eigenschaften der im Enviro gebrannten Ziegel zusammen mit den vorhandenen keramischen Eigenschaften der originalen Ziegel dargestellt. Hierbei fällt auf, dass bei den Originalen Ziegeln kein Glühverlust vorhanden ist. Das liegt daran, dass nur gebrannte original Ziegel zur Verfügung standen und zur Bestimmung des Glühverlustes das Gewicht vor und nach dem Brand bekannt sein muss. Wenn man Wasseraufnahme und Druckfestigkeit vergleicht, fällt auf, dass die Wasseraufnahme bei den im Enviro gebrannten Ziegeln etwas höher ist. Jedoch ist die Druckfestigkeit geringfügig höher als bei den originalen Ziegeln. Insgesamt kann aber gesagt werden, dass die keramischen Eigenschaften auf einem Niveau liegen. Die Werte aus dem Enviro Versuch könnten noch verbessert werden, indem die maximale Temperatur erhöht wird und diese dann auch länger gehalten wird. Dies ist in der Versuchsanlage allerdings nur schwer zu realisieren.

	Enviro Versuchsofen max. Temperatur: 1041 °C Haltezeit: 1h	Original Ziegel max. Temperatur: 1050 °C Haltezeit: 2 h
Glühverlust [%]	6,5	-
Wasseraufnahme [%]	5,1	4,7
Druckfestigkeit [ $\frac{N}{mm^2}$ ]	18,9	18,3

**Tabelle 5:** Vergleich der keramischen Daten

Bei der genauen keramischen Auswertung des Besatzes ist man zu dem Ergebnis gekommen, dass bei dem Probesatz von 186 Ziegeln 99 % der Ziegel ohne Fehler waren. In dieser Versuchsreihe wurde jeder Ziegel einzeln auf Risse und Fehler überprüft. Besonders sei hier noch zu erwähnen, dass bei diesem Versuch im Bereich des Quarzsprunges mit bis zu 100 K/h gekühlt wurde. Dies ist möglich, da die Kühlung nicht wie in einem konventionellen Ofen mit einer Sturzkühlung realisiert wird, sondern durch die Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung. Dies führt zu einer viel sanfteren und sicheren Kühlung. Weiter kann durch den Besatzaufbau im Enviro viel genauer definiert werden wann der Quarzsprung stattfindet. Bei einem konventionellen Besatzaufbau kann es passieren, dass die äußeren Ziegel viel eher durch den Quarzsprung gehen als die Ziegel, die im inneren des Pakets stehen. So muss der geringe Kühlgradient über einen längeren Zeitraum gehalten werden, damit auch wirklich alle Ziegel den Quarzsprung durchlaufen haben, wenn der

Kühlgradient wieder erhöht wird.

Da in den Versuchen schon einen doppelt so hoher Kühlgradienten erreicht wurde wie in der realen Anlage, wurde darauf verzichtet, Versuche mit Additiven durchzuführen die die Kühlrissempfindlichkeit des Materials verringern. Bei der Verwendung von Additiven, müsste der Kunde sein Grundstoff komplizierter aufbereiten und die Additive zusätzlich einkaufen, was zu einer Erhöhung der Kosten führen würde. Da, zum einen die Kosten immer ein wichtiger Faktor sind und zum anderen schon wesentlich höhere Kühlgradienten als in der Produktionsstätte erreicht wurden, wurde dieser Punkt bis auf weiteres zurückgestellt.

## 5 Beispielrechnung Energiekosten

Um den Energieverbrauch eines Enviro Ofens besser abschätzen zu können, wurde er energetisch mit einem konventionellen Dachziegelwerk verglichen. In Abbildung 38 ist beispielhaft der Energieverbrauch für ein Dachziegelwerk mit einer Jahresleistung von 23 Millionen Dachziegeln dargestellt. Die Gesamtenergie pro Kilogramm Dachziegel für Ofen und Trockner ist bei einer Anlage mit Enviro deutlich geringer. So verbraucht der Enviro in diesem Beispiel 37 % weniger Energie als das Werk mit konventionellem Tunnelofen.

Energieverbrauch		23 Mio Dachziegel /Jahr	
Gewicht DZ= 3,56 kg / Kass.4,90kg Anmachwasser 19,0%, Glühverlust 6%		Verhältnis DZ/(DZ+Kass.) 42%	
	Konv.Projekt	Enviro	
Rohstoffenthalpie	30	30	kcal/kg DZ
Rauchgas	249	100	kcal/kg DZ
Abstrahlung	18	51	kcal/kg DZ
Ausfahrtverluste	67	31	kcal/kg DZ
Ofenluft zum Trockner / Vorwärmer	267	0	kcal/kg DZ
Summe Ofen	631	212	kcal/kg DZ
Trockner - Zuheizen über Gasbrenner	0	186	kcal/kg DZ
Trockner	267	186	kcal/kg DZ
<b>Gesamt für Trocknen + Brennen</b>	<b>631</b>	<b>398</b>	<b>kcal/kg DZ</b>
Ofenleistung	233	233	to/Tag
Leistung	23	23	Mio DZ/a
Brennzeit	10	25,8	Stunden

2,5-fache Abstrahlfläche !!

entspricht 920 kcal/kg Wasser

Abbildung 38: Energieverbrauch und Kosten für ein Dachziegelwerk

Aus der Abbildung geht hervor, dass der Energieverlust durch das Rauchgas deutlich geringer ist und keine Energie in Form von Ofenluft mehr zum Trockner geleitet wird. Dies ist möglich, da weniger Rauchgas entsteht und keine Kühlluft mehr in den Enviro eingeblasen werden muss. Da der Trockner nun keine Energie mehr vom Ofen bekommt kann dieser separat beheizt werden. In diesem Beispiel mit der Abwärme eines BHKWs. Die mit Hilfe des BHKWs erzeugte elektrische Energie kann selbst genutzt oder ins Netz eingespeist werden. Durch die Einspeisevergütung (KWKGesetz) wird letzteres noch unterstützt.

In diesem Beispiel sind für die genannte Produktionsleistung so die Betriebskosten für eine Enviro Anlage 1 Mio. Euro p.a. geringer als bei einer konventionellen Anlage.

## 6 Fazit

Nach Abschluss der Versuche und deren Auswertung kann zusammenfassend gesagt werden, dass das Solid-Solid Prinzip funktioniert. Im Enviro Versuchsofen konnten unterschiedlichste Ziegelprodukte mit der Wärmeübertragung von einer Besatzecke zur anderen aufgeheizt und mit der nachgerüsteten Brenneranlage auch gebrannt werden. Zunächst sind Versuche mit Einfachstoß gefahren worden. Nachdem hier ein gutes Ergebnis erreicht wurde, ist man dazu übergegangen Versuche mit Doppelstoß zu fahren. Der Doppelstoß führt dazu, dass sich weniger Wagen im Ofen befinden und so die Anzahl der Lagerungen reduziert wird, was dazu führt, dass sich der Wartungsaufwand und die Wartungskosten reduzieren lassen. Außerdem verringert sich die Anzahl an Labyrinthspalten in den Unterwagenbereich, sodass dieser besser gegen Übertemperatur geschützt ist. Weiterer lassen sich die Brenner beim Doppelstoß besser positionieren. Nach den Doppelstoßversuchen lässt sich sagen, der Energieaustausch nach dem Solid-Solid Prinzip funktioniert auch in einem Besatzaufbau mit Doppelstoß. Im Enviro kann die Energie der heißen, gebrannten Ziegel dazu genutzt werden die Ziegel aufzuheizen, die noch gebrannt werden sollen. Für die heißen Ziegel bedarf es so keiner Kühlung mehr. Somit ist es nicht mehr notwendig Luft zum Kühlen in den Ofen einzublase, welche in einem konventionellen Ofen wieder abgesaugt und dann dem Trockner zur Verfügung gestellt wird oder, wenn dies nicht möglich ist, abgeblasen werden muss. Nachdem nun nachgewiesen ist, dass ein Ofen mit diesem Prinzip in die Praxis umgesetzt werden kann und somit die Entkopplung des Trockners vom Ofen möglich ist, kann über alternative Beheizmethoden des Trockners nachgedacht werden. Beispielhaft kann hier die Beheizung mittels Gasturbine oder eines BHKWs genannt werden. Mit beiden Methoden kann Strom über einen Generator erzeugt werden, welcher dann selbst genutzt oder ins Stromnetz eingespeist werden kann. Die Abwärme aus dem verwendeten Prozess steht dann dem Trockner zur Verfügung.

Der nächste Schritt zur Marktreife ist eine Pilotanlage in Ausführung als Tunnelofen. In dieser kann das Prinzip dann in einem kontinuierlich betriebenen Ofen nachgewiesen werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] „Homepage der Firma Keller HCW,“ [Online]. Available: [www.keller.de](http://www.keller.de). [Zugriff am 07 2015].
- [2] Prof. Dr. R. - G. Schmidt, „Simulation der Strömung im Tunnelofen Enviro mit Dachziegel unter Berücksichtigung von Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung,“ Osnabrück.
- [3] T. Nimz, „Thermodynamische Untersuchung der Wärmeübertragung in einem Gegenlaufofen mit Vollziegelbesatz,“ Laggenbeck.
- [4] C. Weier, „Thermodynamische Untersuchung der Wärmeübertragung in einem Gegenlaufofen mit Vollziegelbesatz,“ Laggenbeck.