

Bericht

3/4162/14

über die Ergebnisse des Vorhabens

**Ressourceneffizienz durch Ausschussminimierung
mittels effizienten Betriebs von Trocknungs- und Brennanlagen
zur Keramikherstellung
- Anonymisierte Berichtsversion -**

für

**Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landespla-
nung
Stiftsstraße 9
55116 Mainz**

vorgelegt von

**Forschungsinstitut für Anorganische Werkstoffe
- Glas/Keramik - GmbH
Heinrich-Meister-Straße 2
56203 Höhr-Grenzhausen**

3. November 2014

Inhalt:

1. Einleitung
2. Partner
3. Durchführung
4. Ergebnisse
 - 4.1 Trockner
 - 4.2 Vorwärmer
 - 4.3 Brennöfen
 - 4.3.1 Ergebnisse der Messungen vor und nach Veränderungen der Öfen und des Gesamtsystems
 - 4.3.2 Berechnungen zur Ofen-Abwärmemenge für die Trocknung
 - 4.4 Ofenwagen
 - 4.4.1 Ergebnisse der Messungen ohne und mit neuem Ofenwagenaufbau
 - 4.4.2 Kalkulationsberechnungen Einspar- und Nutzungspotentiale bei neuem Ofenwagenaufbau
 - 4.5 Gasverbräuche seit Durchführung der bisherigen Optimierungsschritte
 - 4.6 einfache Möglichkeit zur Nutzung der Überschusswärme am Wochenende
 - 4.7 Ausschussmenge seit Durchführung der bisherigen Optimierungsschritte
5. Zusammenfassung und Bewertung der Vorhabensergebnisse
6. Ausblick
7. Nutzung der Ergebnisse im Branchen-Netzwerk „Umweltpartnerschaft Keramik Rheinland-Pfalz“
8. Schlusswort

Anhang

1. Einleitung

Die Produktion keramischer Erzeugnisse ist besonders ressourcenintensiv. Im Projekt „Branchenkonzept zur Verbesserung der Material- und Energieeffizienz in der Keramikindustrie in Rheinland-Pfalz“ wurden bereits im Zeitraum von August 2010 bis Juli 2012 bei 6 Keramikproduzenten in einer systematischen Herangehensweise zunächst alle material- und energierelevanten Teilströme erfasst und im Hinblick auf Ressourceneffizienz bewertet. Als branchenübergreifend gültiges besonders interessantes Einsparpotential wurde die Verringerung von Ausschuss quantifiziert. Dies gilt sowohl für ungebrannten Ausschuss (Trockenbruch) als auch für gebrannten Ausschuss (Brennbruch). Die Berechnung der realen Ausschusskosten im Hinblick auf die Rohstoffe, aber auch auf die bis dahin irreversibel investierten Energie- und Personalkosten, zeigte je nach Produkt jährliche Kosten im 6- bis 7-stelligen Euro-Bereich. Diese hohen tatsächlichen Ausschusskosten führen derzeit dazu, dass die Unternehmer sich erneut intensiv um die optimalen Einstellungen an Trocknern, Vorwärmern und Öfen kümmern müssen, da hier die häufigste Ursache für das Anfallen von Ausschuss, aber auch für ineffizient eingesetzte teure Energie zu finden ist.

Das Vorhaben hatte deshalb zum Ziel, exemplarisch bei einem mittelständischen rheinland-pfälzischen Fliesen- und Platten-Produzenten genau diese Prozessschritte genau zu identifizieren und zu optimieren, um dieses mittelfristig in die Lage zu versetzen, die Kostenschwerpunkte Energie und Material effizient zu verringern. Diese Vorgehensweise soll weiteren Keramikproduzenten die Einsparpotentiale genauer aufzeigen und damit den Anstoß geben, durch eine analoge systematische Vorgehensweise im eigenen Betrieb die teilweise sehr großen Potentiale zu quantifizieren und mittels geeigneter Maßnahmen umzusetzen.

Das Vorhaben wurde vom 1.1.2013 bis 30.4.2014 durchgeführt. Die Quantifizierung der erzielten und möglicherweise noch zu erzielenden Einsparung an Energie und Ausschuss konnte in diesem Zeitrahmen noch nicht vollständig erfolgen und wird im Verlauf der Jahre 2014 und 2015 möglich sein. Hierfür sind noch weitere Messungen durchzuführen, die seitens des am Vorhaben beteiligten Keramikherstellers für die mittelfristige Zukunft bereits in Planung sind.

2. Förderung und Partner

Förderung:



Das Vorhaben wurde gefördert vom Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Mainz. Etwa die Hälfte der Fördermittel stammt aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), dessen Ziel der Ausbau der regionalen Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung (RWB) ist. Die Förderung erfolgte unter dem EFRE-Schwerpunkt „Auf- und Ausbau von Kompetenzfeld- und Clusterstrukturen“. Die andere Hälfte der Fördermittel stammt aus dem EffNet, bereitgestellt durch das Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung.

Im Verlauf des Vorhabens wurden insbesondere die Vertreter des Wirtschaftsministeriums kontinuierlich über den Projektfortschritt informiert. Beim nunmehr dritten Netzwerktreffen „Umweltpartnerschaft Keramik Rheinland-Pfalz“, das sofort nach Abschluss des Vorhabens am 6. Mai 2014 im Keramikmuseum Höhr-Grenzhausen mit sehr guter Industriebeteiligung stattfand, wurde über die Ergebnisse im Rahmen einer Präsentation durch das FGK ausführlich berichtet. Diese Netzwerktreffen sind eines der wichtigen Resultate aus dem ersten Vorhaben zur Ressourceneffizienz der rheinland-pfälzischen Keramikherstellung („Branchenkonzept zur Verbesserung der Material- und Energieeffizienz in der Keramikindustrie in Rheinland-Pfalz“) und stellen eine nachhaltige Maßnahme für den Technologiestandort dar.

Partner:

Keramikproduzenten:

Aus Gründen der Vertraulichkeit wird der beteiligte Keramikproduzent in der vorliegenden anonymisierten Berichtsversion nicht namentlich aufgeführt. Das Unternehmen wird deshalb nachfolgend kurz mit „Firma“ bezeichnet.

Die **Durchführung und Koordination** des Vorhabens erfolgte durch das Forschungsinstitut für Anorganische Werkstoffe – Glas/Keramik – GmbH.

Für die energiespezifische Datenerfassung und nicht-keramische Bewertung stand als Unterauftragnehmer ein erfahrener **Energieberater** zur Verfügung:

Pöyry Environment GmbH
Augustaanlage 67
68165 Mannheim

3. Durchführung

Problemstellung

Eine Hauptursache für das Anfallen des besonders energie- und kostenintensiven Brennbruchs liegt in der nicht optimalen Betriebsweise von Trocknungs- und Brennaggregaten begründet. So werden – damals wie heute – diese Anlagen häufig auf vielfältige Weise miteinander gekoppelt betrieben. Auch aktuell ist die Nutzung von Abwärme aus den Öfen direkt zur Trocknung der Keramik meist sehr sinnvoll. Dagegen wird jedoch die bei der Firma aus früheren Zeiten herrührende Kopplung von 3 parallel nebeneinander befindlichen alten Tunnelöfen nicht immer effizient genutzt. Hier wird beispielsweise die Abwärme aller Öfen über eine Sammelleitung dem Trockner, dem Vorwärmer, und den Tonsilos zugeführt. Gleichzeitig wird die Abwärme auch zur Raumbeheizung (Produktionshalle) genutzt. Diese sehr eng gekoppelte Zusammenführung der Abwärme aller drei Öfen war in den letzten Jahren nicht immer effizient, da heutzutage je nach Auftragslage nicht mehr alle drei Öfen gleichzeitig in Betrieb sind. So wurde der mittlere der drei Öfen von Oktober 2012 bis Februar 2014 nicht betrieben. Wegen der Kopplung mit der Heißluftsammeleitung wurde der Abwärmeventilator dieses in dieser Zeit kalten Ofens jedoch weiterhin betrieben, um den Druck in der Sammelleitung aufrechtzuerhalten, damit alle Abwärmeverbraucher gleichermaßen mit den notwendigen Volumenströmen betrieben werden können. Auch in den beiden übrigen ebenfalls mit der Sammelleitung gekoppelten Öfen können bei Druckschwankungen in der Sammelleitung wiederum Druckschwankungen innerhalb der Öfen entstehen mit möglicherweise negativen Folgen für die Führung des Brennregimes und damit für die Produktqualität.

Die Temperaturveränderungen in der Sammelleitung wurden außerdem seit dem Stilllegen des Ofens 2 nicht überprüft. Auch solche Veränderungen der Heißlufttempe-

ratur können weitreichende Folgen für die Qualität der Trocknung in den Tonsilos, dem Vorwärmer und dem Trockner haben.

Weiterhin war nicht hinreichend genau bekannt, ob der Trockner mit maximal möglicher Effizienz betrieben wird. Auch die Sinnhaftigkeit der Nachtrocknung im Vorwärmer war in Frage zu stellen: wird der Trockner effizienter betrieben, kann es sogar sein, dass der Vorwärmer nicht mehr dafür benötigt wird, um evtl. noch vorhandene Restfeuchte besonders an den größeren Produktformaten sicher vor dem Brennen zu eliminieren. Er wird jedoch auch zukünftig weiterhin dafür benötigt werden, die Produkte auf Vortemperatur zu erwärmen.

Vorgehensweise

In den diversen Arbeitspaketen des Vorhabens wurden die verschiedenen Aggregate zunächst komplett bezüglich ihrer Bau- und Betriebsweise im Standard-Betrieb erfasst. Wo es erforderlich war, wurden entsprechende Messkampagnen durchgeführt, um fehlende Informationen wie Volumenströme, Temperaturen und die Feuchte in den Trocknungs- und Brennaggregaten zu erfassen. Anhand von schrittweisen Veränderungen in den einzelnen Anlagen wurden daraufhin die Effekte dieser Schritte messtechnisch überwacht. In den Öfen wurden zusätzlich zur Erfassung des Ist-Zustandes Messwagen aufgebaut, um die Temperaturverteilung im Ofenwagenmaterial selbst sowie im Besatz der Wagen während der Ofenreise zu erfassen. Hier wurden weitere Versuche mit neuen effizienteren Ofenwagenaufbauten durchgeführt und der Effekt auf die Abwärme aus den Ofenwagenaufbauten gemessen. Zur Entkopplung der Öfen von der Sammelleitung wurde exemplarisch der druckgesteuerte Betrieb von Ofen 1, später auch von Ofen 3 installiert und erfolgreich erprobt und danach automatisiert eingesetzt. Weitere Versuche im gesamten gekoppelten System zeigten weit reichende Möglichkeiten auf, um den Trocknungsbetrieb nachhaltig zu verbessern. Hierfür sind noch weiterführende Messungen nach Änderungen am Trockner erforderlich.

4. Ergebnisse

Vorbemerkung zu Abkürzungen im folgenden Kapitel:

Die verschiedenen Luftströme in den einzelnen Anlagen und in der Sammelleitung zur Abwärmenutzung aus den Öfen werden wie folgt bezeichnet und abgekürzt:

Mit „Heißluft“ oder „Warmluft“ wird die von der Sammelleitung der Abwärme von den Öfen kommende Trocknungsluft bezeichnet. Abkürzung: „HL“. Die Sammelleitung wird mit „SL“ abgekürzt.

Mit „Nassluft“ wird der Volumenstrom im Trocknereingangsbereich bezeichnet. Abkürzung: „NL“.

Mit „Zusatzluft“ wird der optional zuschaltbare Volumenstrom im heißen Bereich des Trockners bezeichnet, der durch den Gasbrenner beheizt wird. Abkürzung: „ZL“.

„Frischlufte“ wird mit „FL“ abgekürzt.

4.1 Trockner

Ist-Zustand: Beschreibung Aufbau und Funktionsweise des Trockners (Warm- und Nassluftsystem)

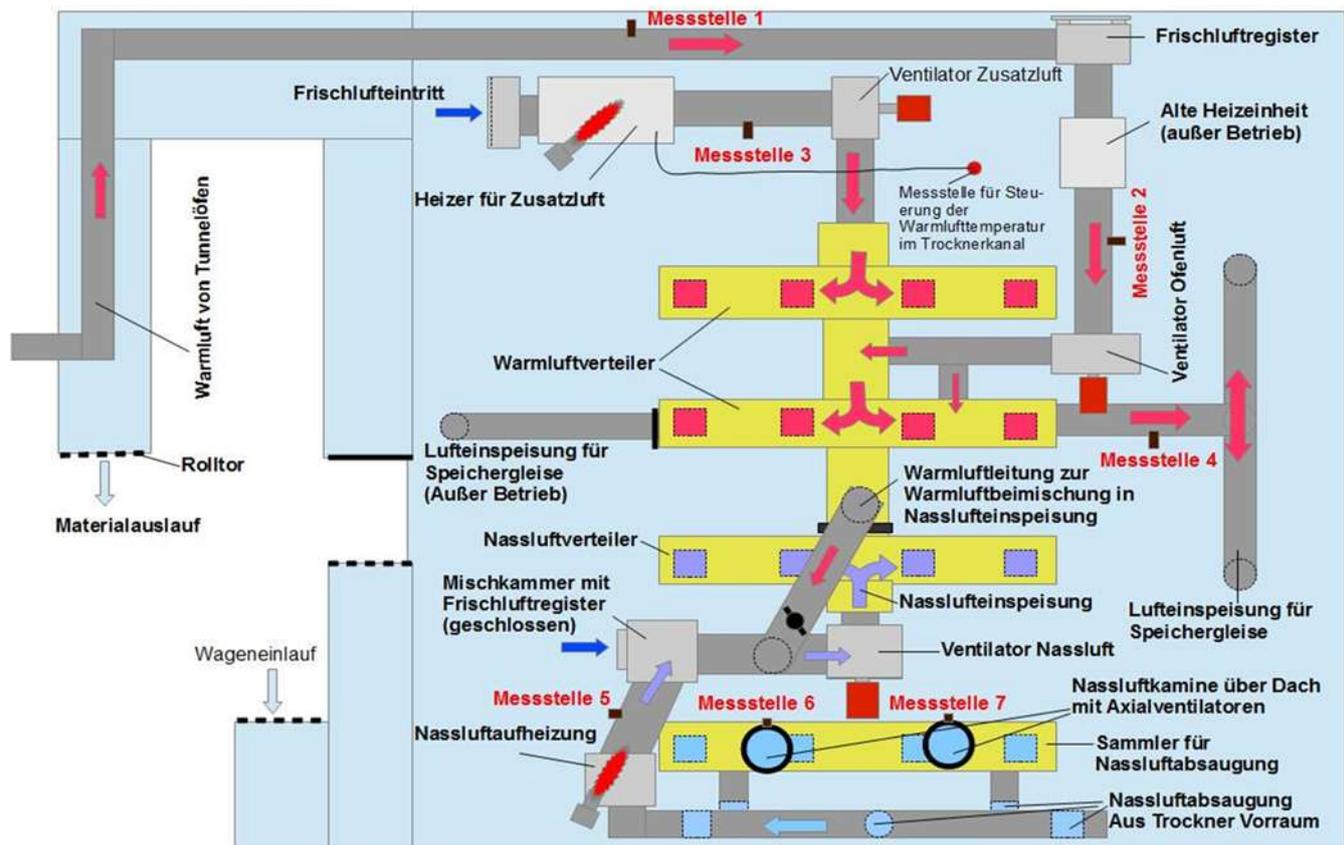


Bild 1: Schematische Darstellung des 4-zügigen Kanaltrockners: Luftzu- und -abführung, von oben betrachtet.

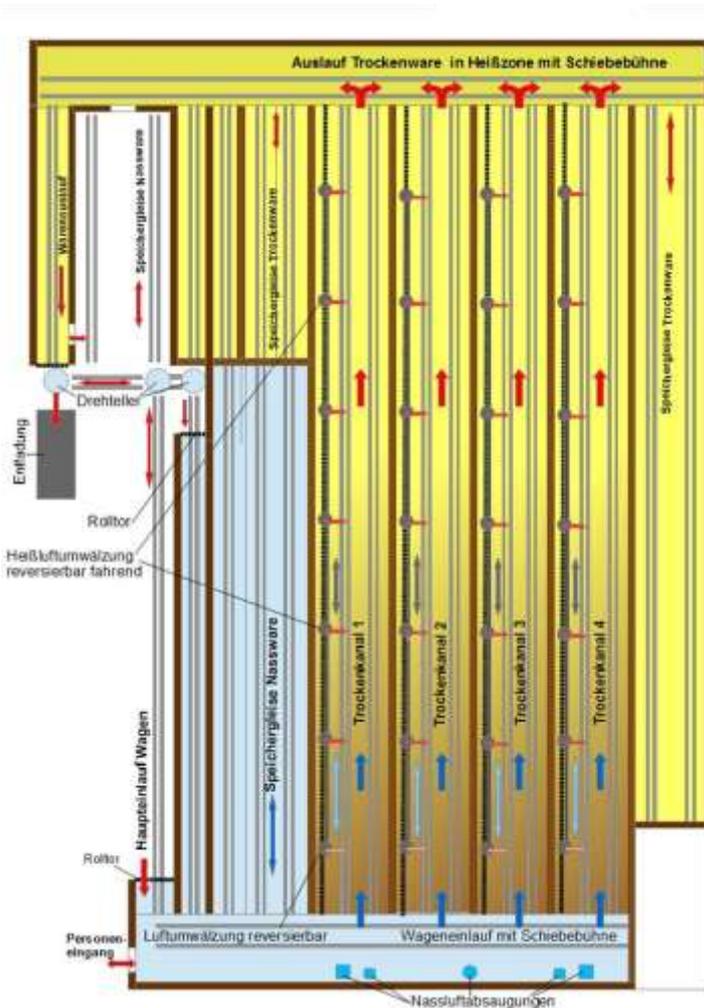


Bild 2: Innenraum des Trockners (Warenlaufschema incl. Speichergleisen).

In Bild 1 und Bild 2 ist der Aufbau des Trockners schematisch dargestellt. Die Produkte fahren in den Bildern von unten nach oben. Rechts und links der 4 Durchlaufzüge befinden sich Speichergleise (vor und nach Trocknung; im Bild 1 nicht dargestellt). Bild 1 zeigt die Abwärmезufuhr, sowie die Nassluftzu- und Abführung. Bild 2 zeigt das Warenlaufschema einschließlich der Speichergleise und der Ventilation in jedem der 4 Züge.

Der Trockner wird mit einem kombinierten Verteilersystem für Nassluft und Heißluft betrieben.

Er ist nassluftseitig beheizt (Nassluftsystem: im Bild 2 blaue Symbole, blauer und brauner Hintergrund). Die Abluft wird über das Nassluft-Verteilersystem in die Trockenkanäle zurückgeführt; Überschuss wird mit zwei Axialventilatoren über zwei Kamine abgeführt.

Heißluftseitig wird der Trockner mit Abwärme aus der Sammelleitung von den Öfen gespeist, und bei Bedarf zusätzlich mit einem Gasbrenner beheizte Zusatzluft mit Hilfe eines Zusatzluft-Ventilators zugeführt (Heißluftsystem: im Bild rote Symbole, gelber Hintergrund). Eine weitere ältere Heizeinrichtung in der HL-Leitung von den Öfen (in Bild 1: Kasten oben rechts mit Gasbrenner) ist stillgelegt.

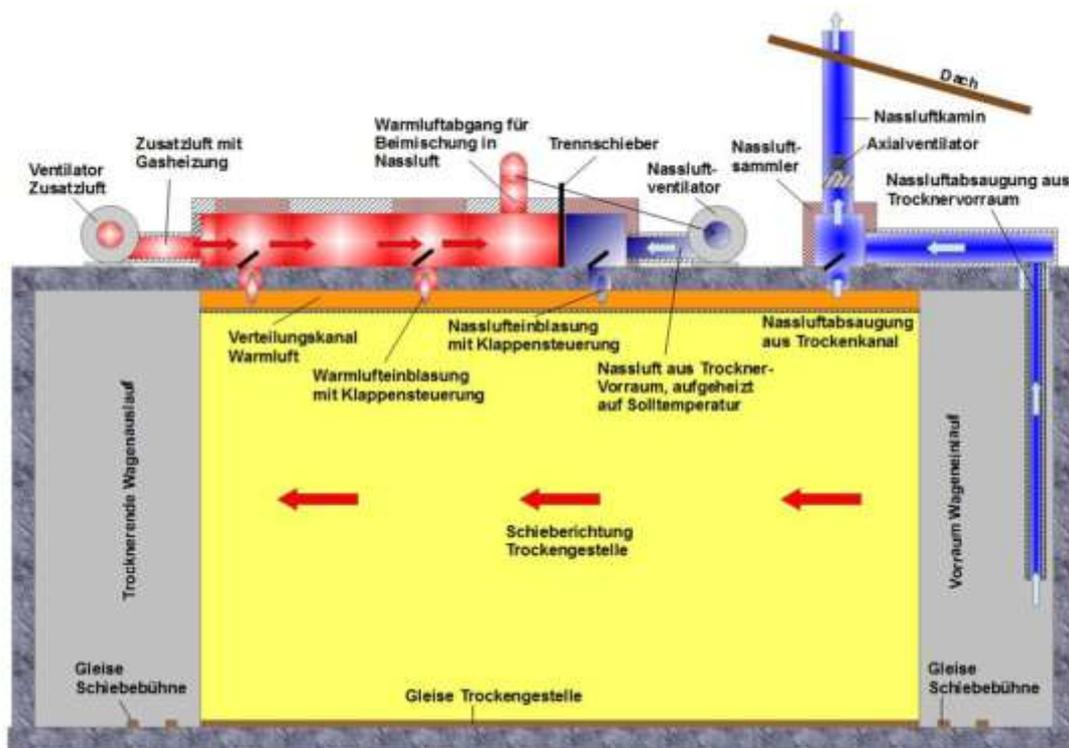


Bild 3: Längsschnittansicht Trockner (Luftversorgung)

In Bild 3 ist die Seitenansicht des Trockners im Schnitt zu sehen. Die Trockenkanäle sind beidseitig offen, die Zuführung der Trocknungsluft erfolgt über Deckeneinspeisung. Im Bild links (rot) ist die HL-Einspeisung der Zusatzheizung zu sehen. In der Mitte der Eintrag der nachgeheizten Nassluft, rechts das Nassluftabzugssystem. Aufgrund der offenen Bauweise und Steuerung des Trocknungsverlaufs über den Materialfluss (je mehr Ware, umso kürzere Durchlaufzeiten) ist ein programmgemäßer Trocknungsablauf nicht möglich.

Ist-Zustand: Messungen und Aufnahme der aktuellen Einstellungen am Trockner

Zunächst wurde der aktuelle Stand der Klappen in den Zu- und Abführungen erfasst und an relevanten Stellen im System die Luftmengen und die Temperaturen ermittelt, sowie der Feuchte in der Nassluftzuführung.

Mit mobilen Datenloggern wurden Messfahrten durchgeführt. Die Datenlogger wurden im Besitz an verschiedenen Stellen in den Trocknungsgestellen angebracht (Temperatur und Feuchte). Die Messwerte sind dem Anhang des vorliegenden Berichtes zu entnehmen.

Es wurde festgestellt, dass die Position der Führungsbleche für die HL in die Trocknungs-Kanäle teilweise im Luftaustritt in den Trockner verschlossen waren. Hier ist die Justierung in den Originalzustand erforderlich, sodass der Ausblasquerschnitt im Trockner überall gleich und konstant ist.

Das Einlauftor in den Kanaltrockner wurde zu Projektbeginn pro Setzgestell für bis zu 5 Minuten geöffnet und gab damit einen großen Querschnitt für den unkontrollierten Eintritt von Frischluft in den Trockner frei. Dies führte zu einer deutlichen Reduzierung der Luftfeuchte im Einlaufbereich des Trockners.

Trockner-Optimierung: Durchgeführte Maßnahmen

Zunächst wurden die Warmluft- und Nassluft-Klappen auf einen einheitlichen Öffnungsgrad eingestellt (vgl. Bilder im Anhang des vorliegenden Berichtes).

Der Heißluftabzweig aus der SL zu den seitlich befindlichen Speichergleisen (in Produktfahrrichtung rechts) wurde zu etwa 90 % geschlossen. Damit stand dem Trockner eine zusätzliche größere Heißluftmenge zur Verfügung.

Die über den Kamin abgeführten Mengen an Nassluft wurden über eine Drehzahlminderung frequenzgesteuerter Axialventilatoren für die Nassluft verringert.

An der Zusatzluft-Einspeisung für HL wurden erhebliche Undichtigkeiten im Deckenbereich festgestellt und behelfsweise repariert. Defekte Thermoelemente zur Darstellung der Kanaltemperaturen wurden ersetzt. Das FL-Register in der HL-Leitung (Bild 1 oben rechts), das in geöffnetem Zustand vorgefunden worden war, wurde mit einer Spanplatte verschlossen, mit der Folge, dass die HL-Temperatur in der Sammelleitung deut-

lich erhöht werden konnte. Der FL-Zutritt wurde dann über spaltweises Öffnen der Platte geregelt. Das FL-Register in der NL-Zuführung (Bild 1 unten links) wurde kurzzeitig in Betrieb genommen, als ab Februar 2014 wieder mit drei statt ursprünglich zwei Tunnelöfen produziert wurde, weil ein zu starker Temperaturanstieg im Eingangsbereich der Trocknungskanäle aufgrund des hohen Energieeintrags am Wochenende ohne Materialzufluss eingetreten war. Das Problem wurde eine Woche später durch Wärmeablass über den Raumheizungswärmetauscher aus der SL gelöst.

Im Verlauf des Vorhabens wurde eine Änderung der Steuerung an der Trocknereinlaufseite vorgenommen, sodass nun kürzest mögliche Einlaufzeiten der Setzgestelle möglich werden, damit der FL-Zutritt aufgrund des geöffneten Rolltores minimiert wird. Die Öffnungszeit des Tors konnte somit von ca. 5 auf ca 2 Minuten deutlich reduziert werden.

Weitere Empfehlungen:

Die beschriebene Justierung der HL-Führungsbleche ist dringend zu empfehlen.

Beurteilung der Ergebnisse der Maßnahmen:

Die Erhöhung der HL-Temperatur durch das teilweise Verschließen der FL-Zufuhr und Erhöhung der Volumenstrommenge der HL aus der Sammelleitung (Öffnen der Klappe in der SL zum Trockner, sowie etwa 90 %-iges Abschiebern der HL-Leitung zu den Speichergleisen) führte zu einem Anstieg der Kammertemperaturen, jedoch nicht zu einer auffällig reduzierten Restfeuchte in dickeren Standard-Produkten mit einer Stärke größer als 20 mm (1,5 – 2 M.-% Restfeuchte). Die Ursache für diesen zu geringen Effekt liegt wahrscheinlich in der offenen Bauweise der Trocknungszüge begründet, sowie in der nicht optimalen Verteilung der HL über dem Kanalquerschnitt: die HL-Ventilatoren in den einzelnen Kanälen haben unterschiedliche Drehzahlen und Luftmengen; außerdem ist die Zuführung der HL aus der SL wegen der teilweise falsch sitzenden Führungsbleche z. T. minimiert. Zudem sind die Durchlaufzeiten produktionsbedingt sehr unterschiedlich, d.h. bei hoher Produktionsleistung sind die Durchlaufzeiten im Trockner verringert.

Die Einstellung der Steuerklappen an den Verteilerzügen im Deckenbereich auf einen einheitlichen Öffnungsgrad führte zu einer Vergleichmäßigung der Kammertemperaturen, ohne jedoch Idealwerte erreichen zu können.

Es ist nach wie vor festzustellen, dass die Lufttemperaturen im Endbereich der Kammer gegenüber dem mittleren Bereich absinken. Eine Anhebung wäre nur durch Einbau von Türen am Kammerende möglich, jedoch für das Trocknungsergebnis außerordentlich sinnvoll. Diese Maßnahme erfordert Investitionen und wurde im Rahmen des Vorhabens noch nicht durchgeführt. Eine optimale Trocknungskurve ist nicht erreichbar, da die gewünschte Maximaltemperatur am Kanalende wegen der fehlenden Türen nicht erreicht werden kann und zu einer Verkürzung der aktiven Trocknungsstrecke führt. Wärme fließt in den kühleren Schiebebühnenbereich hinter den Trockenkanälen ab. Bei geschlossenem Trocknerausgang wäre die HL aus zwei Öfen nach jetziger Einschätzung mit deutlich verbesserter Wärmerückgewinnung aus den Endkühlzonen der Öfen eventuell ausreichend zur Trocknung.

4.2 Vorwärmer

Ist-Zustand:

Der kontinuierlich betriebene Vorwärmer, der sich direkt neben den drei vorhandenen Tunnelöfen befindet, wird zum Nachtrocknen und Vorwärmen der dickwandigeren Produkte genutzt, die grundsätzlich nach der Trocknung noch eine zu hohe Restfeuchte haben.

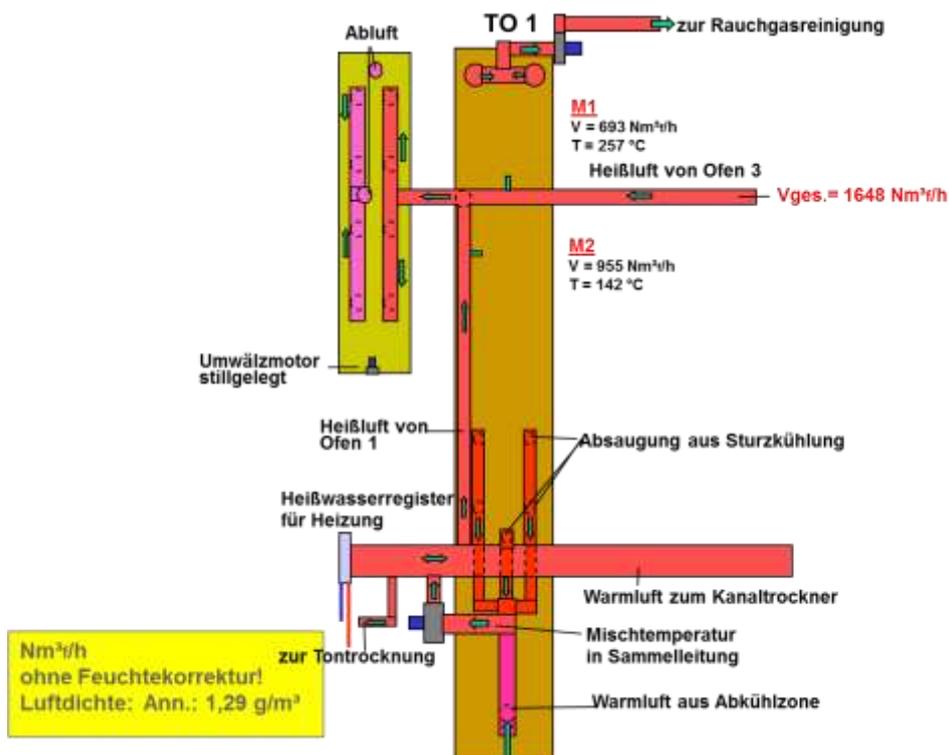


Bild 4: Vorwärmer mit Anschluss an die Sammelleitung der drei Tunnelöfen
 (im Bild dargestellt: Absaugung der Abwärme aus Tunnelöfen 1)

Der Vorwärmer (nachfolgend kurz „VW“) wird ausschließlich mit Abwärme aus den Tunnelöfen gespeist. Die thermische Nassluftabsaugung am Produkteingang des VW ist abgeschaltet (Ventilator ausgeschaltet und kein Kaminabzug; dieser ist mit einer Klappe verschlossen). Auch die Luftumwälzung im VW ist wegen Lagerschäden durch Übertemperatur abgeschaltet. Der Austritt von NL findet durch Überdruck im VW an den Schiebetüren (Ein- und Ausgang) statt. Der durch den verschlossenen Kamin entstehende Staudruck in der VW-Kammer ist sinnvoll, da hierdurch eine Verteilung der Abwärme im Besatz auch ohne weitere Umwälzvorrichtung möglich ist. Allerdings ist die Energieausnutzung hier durch fehlende Konvektion nicht optimal. Die Temperaturen im Vorwärmer liegen deutlich über 200°C.

Durchgeführte Maßnahmen:

Es wurden keine Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des VW durchgeführt, da die Nachrocknungsergebnisse beim jetzigen Zustand des VW ausreichend sind und Veränderungen des VW Investitionen erfordern.

Mögliche Maßnahmen:

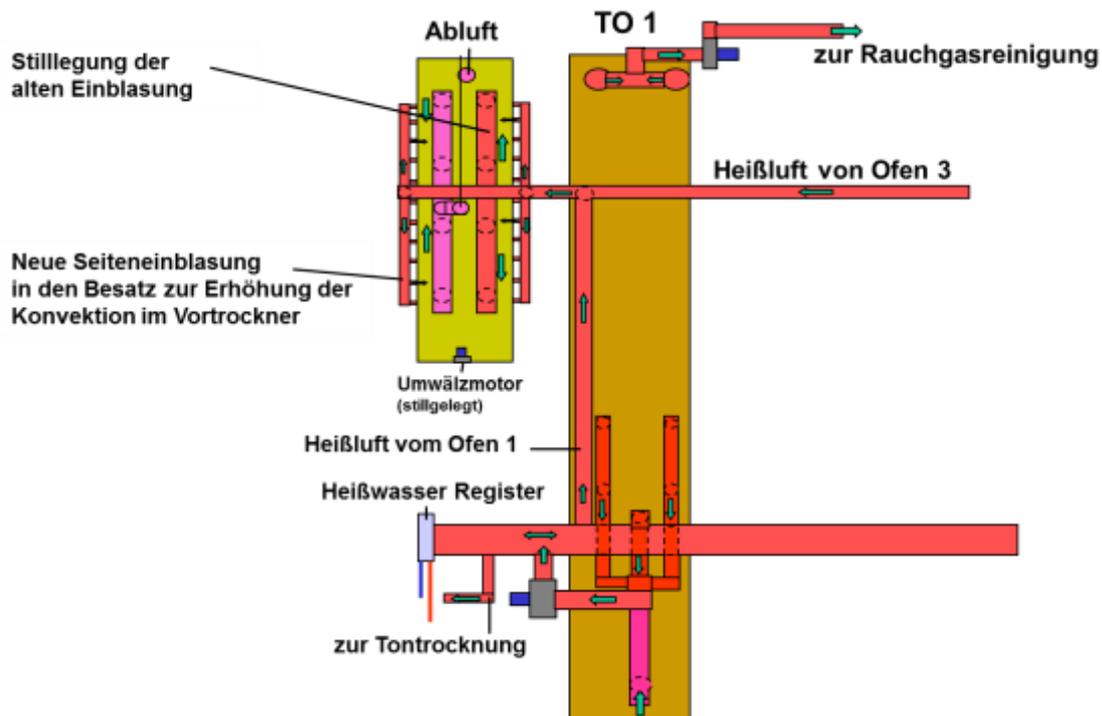


Bild 5: Vorwärmer mit Anschluss an die Sammelleitung (wie Bild 4);

Darstellung möglicher Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des VW

Es wäre sinnvoll und vergleichsweise kostengünstig, wenn der HL-Eintritt in den VW über eine versetzte Wandeinspeisung mit der heutigen Überdruck-Fahrweise erfolgen könnte, um eine turbulente Atmosphäre im VW-Innenraum zu erzeugen (vgl. Bild 5).

Fazit:

Im aktuellen Zustand des VW wird durch den hohen Überdruck ebenfalls ein Wärmeintrag bis in die Wagenmitte gewährleistet. Falls eine verbesserte Strömung im VW zu erzielen wäre, beispielsweise durch das Öffnen des Kamins, würden sich die Abwärmemengen eher in den Bereichen mit geringen Widerständen bewegen, jedoch im Inneren des VW und der Ofenwagen, wo der Besatz eng gesetzt ist, jedoch weniger.

Eine deutlich bessere Variante wäre eine komplette Optimierung des vorgeschalteten Trockners, wie im vorherigen Kapitel unter „mögliche Maßnahmen“ beschrieben.

Trotz der Investitionskosten könnte dann bereits beim Trocknen eine Restfeuchte auch dicker Produkte unter 1 M.-% erreicht.

4.3 Brennöfen

4.3.1 Ergebnisse der Messungen vor und nach Veränderungen der Öfen und des Gesamtsystems

Gesamtsystem: Kopplung Abwärme der Öfen mit verschiedenen Verbrauchern

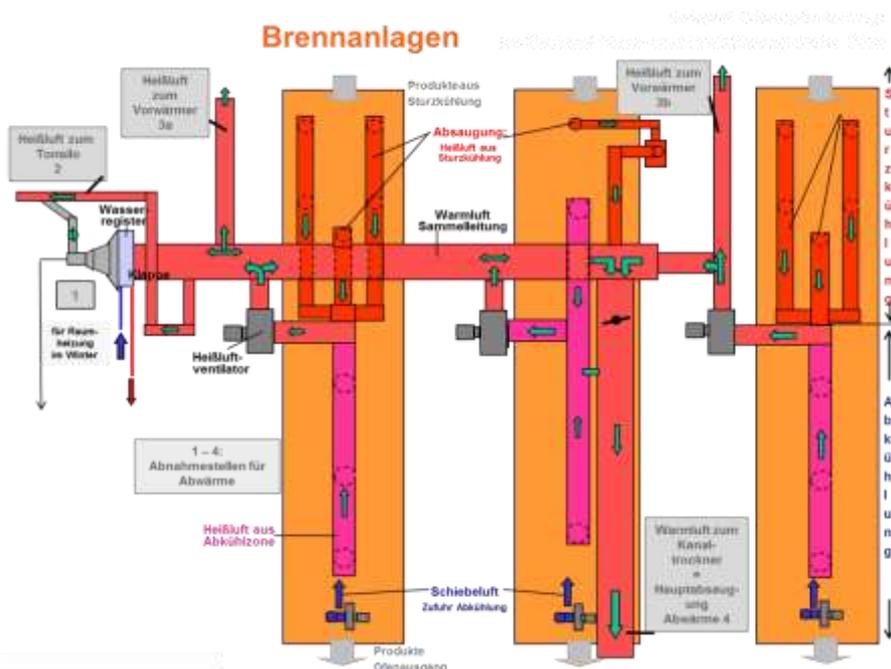


Bild 6: gekoppeltes Gesamtsystem der Nutzung von Abwärme aus Sturz- und Endkühlung der drei Tunnelöfen und ihre verschiedenen Verbraucher

Bei dem vorliegenden System sind die drei Tunnelöfen (kurz „TÖ“), der Vorwärmer, der Trockner, die Raumheizung, die Beheizung des Tonsilo und die Heizung der Zusatzluft (ZL) für den Trockner in einem System miteinander gekoppelt. Sämtliche HL-Verbraucher beeinflussen das Gesamtsystem und damit den Ofendruck in unregelmäßigem Zustand. Die Verbindung aller Verbraucher mit Ausnahme der Zusatzbeheizung für den Trockner erfolgt über die HL-Sammelleitung. Die Zusatzheizung für den Trockner speist in das Verteilersystem des Trockners ein und nimmt damit indirekt über Veränderung des Druckniveaus im Trockner ebenfalls Einfluss auf die HL-Menge in der SL. In die SL speisen alle drei TÖ die Abwärme aus der Sturz- und Endkühlung mit je einem Ventilator ein. Die abgehenden Verbraucher werden durch Überdruck im Sammelsystem gespeist.

Die Zusatzbeheizung im Trockner mit ihrem eigenen Ventilator war bei Projektbeginn permanent, mit Ausnahme der Wochenenden, in Betrieb. Bei Abschaltung dieser Zu-

satzheizung im Trockner am Wochenende wurde bei Projektbeginn das Kanalsystem zur Zusatzheizung nicht mit dem vorhandenen Steckschieber geschlossen. Dies hatte zur Folge, dass ein großer Teil der von den Öfen kommenden HL über dieses Kanalsystem ungenutzt in den Raum abgeblasen wurde. Eine der ersten Maßnahmen im Vorhaben war es, die Zusatzbeheizung versuchsshalber außer Betrieb zu nehmen und den Steckschieber zum Trockner zu schließen. Hierbei stellte sich heraus, dass beim damaligen Betrieb von nur zwei TÖ die von der SL zur Verfügung stehende HL-Menge nicht ausreichte, um das Temperaturniveau in den Trocknungskanälen zu halten. Daraufhin wurde die Zusatzheizung wieder in Betrieb genommen und der Steckschieber geöffnet.

Im Verlauf des Vorhabens wurde der ursprünglich stillgelegte TO 2 wieder eingeschaltet. Es zeigte sich, dass bei Betrieb mit allen drei TÖ und der weiter geöffneten Klappe zum Trockner in der SL so viel HL zur Verfügung steht, dass ein Betrieb ohne Zusatzheizung mit geschlossenem Steckschieber möglich wird und dabei die Endtemperatur in den Trocknungskanälen sogar noch ansteigt. Da bei dieser Fahrweise der Endbereich des Trockners ca. 80°C heiß wird, ist diese Temperatur für das Bedienpersonal jedoch nicht erträglich.

Durchgeführte Maßnahmen zur Abkopplung der Öfen

Abkopplung Ofen 1

Um einen konstanten Ofenbetrieb zu gewährleisten, müssen alle Einflüsse, die zu einer Veränderung der Luftleistung in den Öfen führen, kompensiert werden.

Im Ofen 1 wurde zunächst erstmals die Entkopplung vom Gesamtsystem erprobt.

Aufbau der Tunnelöfen und Zugverhältnisse

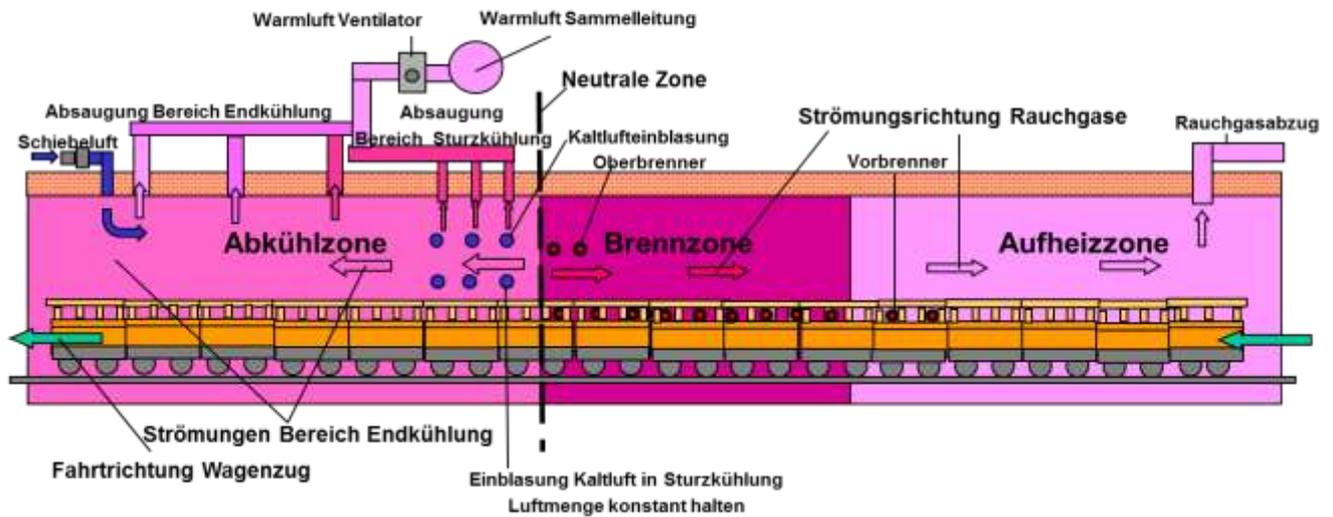


Bild 7: Darstellung der Rauchgas- und Abwärmeführung in einem kontinuierlich betriebenen Tunnelofen im Gegenstromverfahren

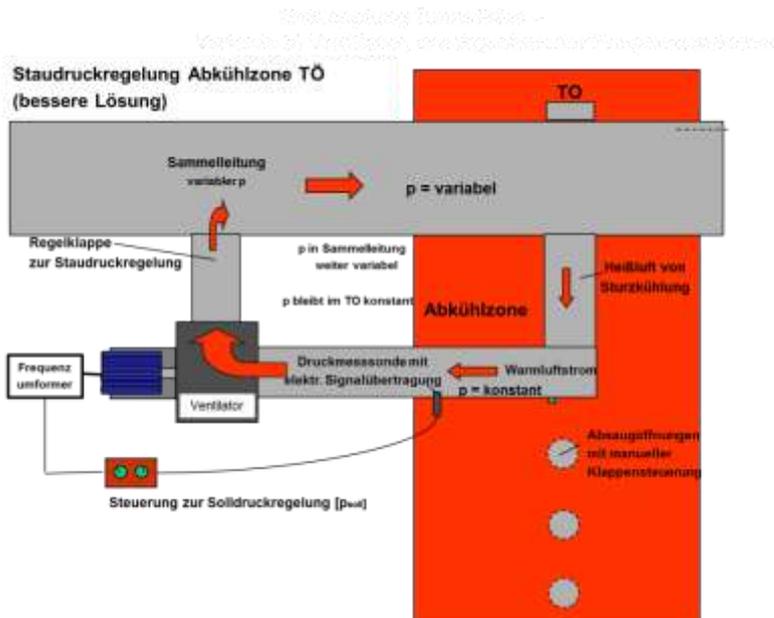


Bild 8: realisierte Variante zur druckgesteuerten Regelung von Ofen 1 über einen Frequenzumformer für den Abwärme-Ventilator.

Nachdem verschiedene Möglichkeiten in Betracht gezogen worden waren (unter anderem eine automatisierte Druckregelung über eine Klappe), wurde die in Bild 8 darge-

stellte Variante mittels Frequenzumformer (nachfolgend kurz „FU“) am Ventilator realisiert.

Über eine Druckmessstelle vor dem HL-Ventilator des TO 1, die über einen Regler und einen FU die Drehzahl des HL-Ventilators variabel macht, wird eine geregelte Absaugmenge gewährleistet. Mithilfe dieses Reglers kann vor dem Ventilator ein Solldruck im Ofen definiert werden, der über den zugeschalteten FU und Drehzahlanpassung des Ventilators jede gewünschte Absaugmenge im Rahmen der Ventilatorleistung ermöglicht. Dadurch ergeben sich mehrere Vorteile, die den Ofen unabhängig machen von verschiedenen im Produktionsprozess möglichen Veränderungen im Gesamtsystem, wie z. B. die Zuschaltung des Raumheizungs-Registers, das Öffnen des FL-Registers am Trockner, das Zu- und Abschalten der Zusatzheizung am Trockner, Änderungen der Wärmemengen zum VW und zum Tonsilo sowie Änderungen im Besatzschema.

Vorgehensweise im Probetrieb:

Bei gutlaufender Produktion wurde bei unregelmäßigem Ventilator zunächst der Ist-Druck an der Messstelle vor dem Ventilator ermittelt. Der ermittelte Ist-Druck (p_{stat}) von 450 Pa (Unterdruck in der Leitung zum Ventilator) wurde als Referenzdruck im Regler eingespeichert.

Nach Einschalten der Regelung wurden versuchsshalber einige Systemveränderungen zur Feststellung der Funktionsweise vorgenommen. Die Sammelklappe zum Trockner wurde für kurze Zeit maximal geöffnet. Der Ist-Druck an der Messstelle im TO 1 stieg kurzfristig auf etwa 900 Pa an, wurde jedoch innerhalb von ca. 30 sec auf den Sollwert zurückgeregelt. Die Frequenz des FU fiel von 50 Hz auf 37 Hz ab. Damit war die Funktionsfähigkeit des Reglers im Ofen 1 dokumentiert.

Durch diesen Versuch wurde unter anderem auch festgestellt, dass der Überdruck in der SL nach dem Öffnen der Klappe zum Trockner zum Unterdruck geworden war. Bei voll geöffneter Klappe zum Trockner in der SL werden durch diesen Unterdruck alle abgehenden Verbraucher nicht mehr mit Heißluft versorgt, da sie nur bei Überdrucksituationen versorgt werden.

Im nächsten Schritt wurde daher zunächst die Klappe zum Trockner wieder in die Ursprungsstellung gebracht und der Druck im System wieder auf den Ausgangszustand

zurückgeführt. Eine nachfolgende Messung vor dem Ventilator des Trockners ergab, dass bei dieser ursprünglichen Klappenstellung dem Trockner eine Luftmenge von ca. 5.000 Bm³/h, ca. 3.400 Nm³/h zugeführt wird. Diese Luftmenge allein ist für einen geregelten Trocknungsbetrieb jedoch nicht ausreichend.

Durchgeführte Maßnahmen zur Erhöhung der Luftmenge für die Trocknung:

In dieser Ausgangssituation wurde in der HL-Leitung zur Tonsilotrocknung zunächst der Ist-Druck gemessen, da das Tonsilo im Hinblick auf die erforderliche Trocknung besonders sensibel ist. Dieser Unterdruck von ca. 175 Pa wurde in der Folge als mindestens erforderlicher Unterdruck festgelegt, um das Tonsilo mit einer ausreichenden Wärmemenge zu versorgen.

Im nächsten Versuch wurde die Drosselklappe zur Raumheizung geschlossen, da dort ein großer Heißluftaustrag stattfand, der insbesondere in den Sommermonaten nicht erforderlich ist. Dadurch stieg der Druck vor dem Tonsilo auf ca. 300 Pa an.

Anschließend wurde die Klappe in der SL zum Trockner so weit geöffnet, bis an der Messstelle Tonsilo ein Druck von 200 Pa anstand. Damit ist bei geschlossenem Raumheizungsregister die Zuführung einer ausreichenden Wärmemenge ins Tonsilo sicher gewährleistet.

Die gemessene Luftmenge am Trockner erhöhte sich durch diese Maßnahme auf etwa 22.600 Bm³/h bzw. 15.200 Nm³/h.

Damit wurde die Versorgung des Trockners mit der fast dreifachen Menge an Wärme im Vergleich zum Ursprungs-Zustand erheblich verbessert.

Die Regelung von Ofen 1 glich alle beschriebenen Druck-Veränderungen im System innerhalb von ca. 10 Sekunden aus.

Fazit aus den bisherigen Erkenntnissen:

Durch die Messstelle am Tonsilo, die inzwischen mit einem Druckmanometer versehen wurde, auf dem der Solldruck markiert ist, sind problemlose Änderungen im System möglich. Wenn an der Zuführung zum Tonsilo konstante Druck-Verhältnisse herrschen, dann sind die Verhältnisse an allen anderen HL-Verbrauchern ebenfalls konstant. Selbst eine so drastische Veränderung wie die deutliche Erhöhung der Luftmenge zum Trockner (erzielt durch das Öffnen der Klappe in der SL zum Trockner nach dem Verschließen des RH-Registers) kann damit ohne Risiko für die übrigen Verbraucher und die Öfen erfolgen.

Vorgehensweise bei Änderungen im System:

Um die Einstellung der erforderlichen Druckverhältnisse in der SL bei verschiedenen möglichen Veränderungen im System zu vereinfachen, wurde der Einbau eines weiteren Druckmanometers unmittelbar vor der Klappe zum Trockner in der Sammelleitung angeregt und umgesetzt.

Bei Solldruck an der Messstelle Tonsilo wurde der in der SL vor der Klappe zum Trockner anstehende Druck markiert.

Bei allen nachfolgenden Verstell-Maßnahmen im System kann nun problemlos mittels Verstellens der Klappe zum Trockner der Solldruck in der SL erneut eingestellt werden und so die gesamte Systemsicherheit gewährleistet werden.

Falls beispielsweise die Zusatzheizung am Trockner – d. h. Brenner und Ventilator – zugeschaltet wird, muss eine Druckkorrektur in der Sammelleitung erfolgen (weiteres Öffnen der Klappe zum Trockner, da der Druck zwischen Klappe und Ventilator am Trockner dann ansteigen wird).

Insbesondere das Öffnen oder Schließen der Raumheizungsklappe führen zu gravierenden Druckänderungen im System, da hier ein großer Querschnitt (ca. 0,8 m²) vorliegt. Die aus solchen Veränderungen resultierenden Druckverhältnisse im System sind nun sehr deutlich in den Veränderungen des FU an der Regelung von Ofen 1 ablesbar.

Zuschalten Ofen 2:

Aufgrund der Auftragslage wurde am 21. Februar 2014 der TO 2 wieder zugeschaltet. Hierdurch ergaben sich folgende Veränderungen im System:

Der Druck in der SL stieg stark an: am Tonsilo erfolgte eine Drucksteigerung von 200 Pa auf 500 Pa. Die Steigerung war so stark, dass Staub aus dem Tonsilo ausgeblasen wurde. Der Druck am Ofen 1 konnte trotz dieser Drucksteigerung durch die Regelung konstant gehalten werden. Zur Lösung des Problems wurde die Drosselklappe in der SL zum Trockner so weit geöffnet, bis der Druck an der Messstelle Tonsilo wieder seinen Sollwert erreicht hatte.

Durch den zusätzlichen Energieeintrag von Ofen 2 ergibt sich eine völlige Änderung der Energie-Situation am Trockner: die zur Verfügung stehende Wärmemenge ist auch im Zweischichtbetrieb der Pressabteilung für die Trocknung ausreichend. Am Wochenende ergibt sich sogar ein starker Temperaturüberschuss, da keine Frischware mehr in den Trockner eingefahren wird. Dies führt zu einer starken Übertemperatur im Trockner. Zur Abkühlung wird dann die Klappe zum Heizregister RH in der SL am Wochenende geöffnet und dadurch die zum Trockner geförderte Luftmenge stark reduziert. Die Kontrolle erfolgt über den Druck an der Messstelle an der Klappe zum Trockner. Diese ermöglicht eine praxisgerechtere Kontrolle des Systemdrucks als die sensible Stelle im Übergang aus der Sammelleitung zum Tonsilo.

Eine Abschätzung der Wärmemenge, die in solchen Zeiten (an den Wochenenden bei Betrieb aller drei Öfen) in den Sommermonaten über die Raumheizung z. gr. T. ohne sinnvolle Nutzung in die Produktionshalle entlassen wird, müsste durch zusätzliche Messungen ermittelt werden.

Eine anderweitige Nutzung ist aufgrund der räumlichen Gegebenheiten durch eine vergleichsweise einfache und kostengünstige Umbaumaßnahme (Umleitung der überschüssigen Abwärme aus der Sammelleitung im Bereich des Formteil-Trockners in den Nachbarraum, vgl. Beschreibung und Abbildungen im separaten Kapitel 5.3 des vorliegenden Berichtes) denkbar. Sollten in der Zukunft Türen im Trockner eingebaut werden, so ist diese Vorgehensweise zwingend erforderlich.

Eine weitere energetisch ungünstige Situation ergibt sich daraus, dass bei Betrieb aller drei Öfen das Gebläse an der Zusatzheizung im Trockner zugeschaltet werden muss

(ohne Brennerbetrieb), um den Trockner im Endbereich zu kühlen, da hier ansonsten die Temperaturen für das Bedienpersonal nicht mehr erträglich sind.

Wären hier Türen installiert, wäre die Trocknung mit der zur Verfügung stehenden HL aus der SL nahezu nach idealer Trocknungskurve fahrbar. Es ist hierbei jedoch zu berücksichtigen, dass in dem Fall dann zusätzliche HL in das Ausfahrgeleis gefahren werden müsste.

Abkopplung Ofen 3

Aufnahme des Ist-Zustandes

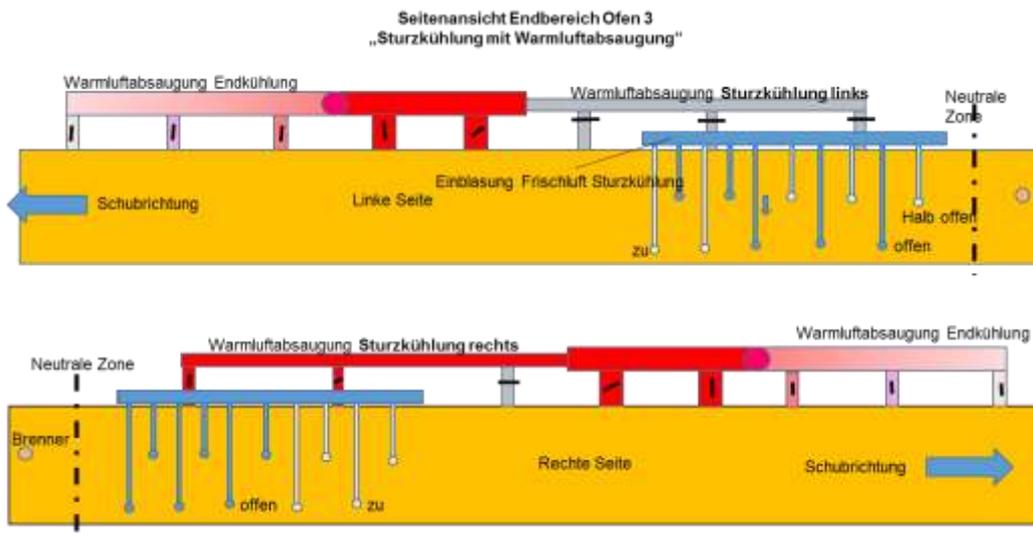


Bild 9: Seitenansicht Ofen 3. Oben: linke Seite (in Schubrichtung), unten: rechte Seite.

**Draufsicht Endbereich Ofen 3
 „Warmluftsystem mit Wärmeverbund zur Sammelleitung“**

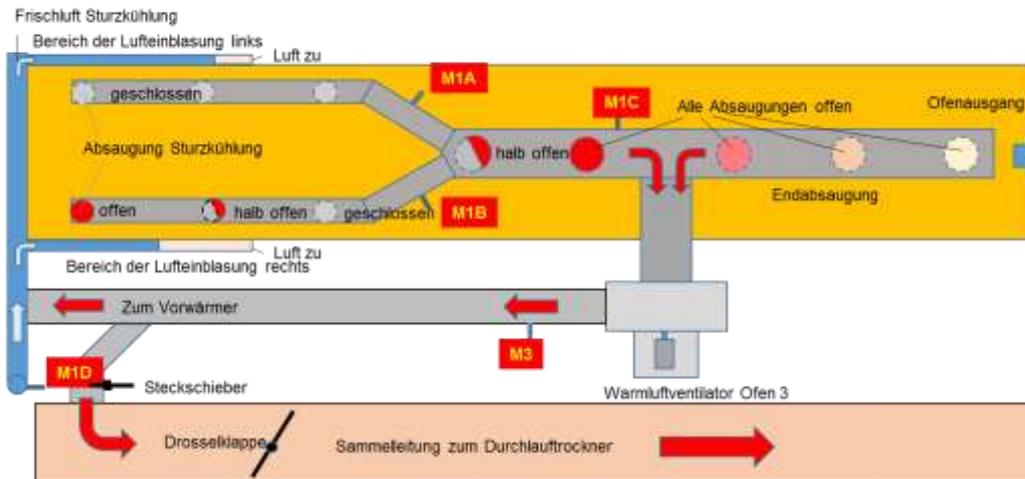


Bild 10: Draufsicht Endbereich Ofen 3

Ofen 3 besitzt ebenso wie Ofen 1 und 2 eine Sturzkühlung hinter der Brennzone mit 10 Einblas-Öffnungen pro Ofenseite. Zur Absaugung der eingeblasenen FL dienen zwei U-förmig angeordnete Absaugrohre auf der Ofendecke mit jeweils 3 Absaugöffnungen pro Rohr (vgl. Bild 10 oben links, „Absaugung Sturzkühlung“). Beide Rohre werden in einem Sammelrohr zusammengeführt, in dem zwei Absaugöffnungen für HL hinter der Sturzkühlung, und drei Absaugöffnungen Richtung Ofenende aus dem Bereich der Endkühlung angeordnet sind (vgl. Bild 10 oben rechts, „Endabsaugung“). Diese gemeinsamen Luftströme werden von einem HL-Ventilator abgesaugt und auf der Druckseite zum VW und über einen Abzweig mit Steckschieber der SL zum Trockner zugeführt (vgl. Bild 10 unten links).

Bei den durchgeführten Luftmengen-Messungen zur Ermittlung des Ist-Zustandes zeigte sich, dass in der SL der Sturzkühlung ein hohes Druckniveau herrscht, jedoch kaum Luftfluss: die eingespeiste Luftmenge zur Sturzkühlung ist mit ca. 250 Nm³/h verschwindend gering.

Dieses lässt darauf schließen, dass die laut Klappenstellung offenen seitlichen Einblasöffnungen in den Ofen größtenteils verstopft sein müssen (vgl. Bild 9, blau dargestellte Luftzuführungen).

Die Absaugöffnungen in den Rohren auf der Decke mit Klappensteuerung sind ebenfalls unterschiedlich weit geöffnet: in Fahrtrichtung links sind alle Absaugöffnungen

geschlossen, während in Fahrtrichtung rechts die hinterste Öffnung Richtung Brennzone komplett offen ist und die nachfolgende Öffnung Richtung Ofenende halb offen (vgl. dargestellter Klappenzustand in Bild 9 und Bild 10).

Demzufolge wird auf der linken Seite keine Luft abgezogen, und auf der rechten Seite mit $273 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ebenfalls eine verschwindend geringe Menge. Die Gesamtleistung des Absaugventilators liegt ebenfalls mit ca. $1.630 \text{ Nm}^3/\text{h}$ deutlich unter der Luftmenge etwa von Ofen 1.

Zufuhr und Abfuhr der Kühlluft der Sturzkühlung funktionieren also beide anders als aufgrund der jeweiligen Klappenstellung zu erwarten wäre. Ggf. ist eine (teilweise) Verstopfung von Leitungen die Ursache. In der Kühlluft-Absaugung ist zusätzlich der Ventilator augenscheinlich nur sehr bedingt funktionsfähig. Es wurde ein statischer Druck von nur 80 Pa an der Regelungs-Messstelle erreicht. Der dynamische Druck betrug hier lediglich 20 Pa (Messung am 13.3.14).

Optimierungsschritte an Ofen 3:

Nach zufriedenstellender Erprobung der druckgeregelten Ofensteuerung von Ofen 1 wurde eine solche analog auch in Ofen 3 installiert. Bei der Installation der Drucksteuerung wurde ersichtlich, dass der vorhandene HL-Ventilator nicht in der Lage ist, einen zufriedenstellenden Unterdruck am Ventilatoreingang zu erzeugen. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Leistung des Ventilators (Alter: ca. 30 Jahre) nicht mehr den ursprünglichen Leistungsdaten entspricht. Da im Ofen 3 ein sehr hohes Druckniveau im Abkühlbereich gefahren wird, und die Ware beim Ofenaustritt noch sehr hohe Temperaturen besitzt, scheint es sinnvoll, den HL-Ventilator und das Rohrsystem zu überprüfen. Bei einer Begehung im August 2014 wurde festgestellt, dass die eingesetzte Schiebeluft mehr als sonst üblich zum Ofenausgang gedrückt wird.

Damit könnte mit der vorhandenen Drucksteuerung ein definiertes Solldruckniveau im Brennkanal erzeugt werden, das am Ofenaustritt einen geringeren Überdruck als derzeit ermöglicht. Derzeit ist eine solche Regelung aufgrund der geringen Ventilatorleistung jedoch noch nicht möglich.

Da die Produktqualität der im Ofen 3 gebrannten Ware derzeit gut ist, stellt sich aktuell das Unternehmen allerdings die Frage, ob an der Sturzkühlung etwas geändert werden sollte. Aus energetischen Gründen erscheint es jedoch sinnvoll, über einen leistungs-

stärkeren Absaugventilator die Ware im Bereich der Endkühlung stärker kühlen zu können und die dabei gewonnene Energie der SL zum Trockner zuführen zu können.

Die neue Druckregelung des Ofens funktioniert zufriedenstellend, ist jedoch nicht in der Lage, die Defizite des HL-Ventilators auszugleichen. Leichte Schwankungen der Druckverhältnisse in der SL wirken sich bereits jetzt nicht mehr negativ auf das Druckniveau des Ofens aus. Stärkere Schwankungen können jedoch aufgrund des nicht leistungsfähigen Ventilators derzeit durch die Automatisierung nicht voll ausgeglichen werden.

Ein weiterer Vorteil eines funktionsfähigen HL-Ventilators wäre die damit zusätzlich zur Verfügung stehende Abwärme in der SL. Derzeit liefert Ofen 3 nur 80 Pa bei dem eingestellten Solldruck zum Tonsilo von 200 Pa. Das heißt, die HL des Ofens 3 kann derzeit wegen zu geringen Drucks nicht die SL bedienen; diese Wärme erreicht derzeit fast ausschließlich den VW. Ofen 1 liefert im Vergleich dazu mit 440 Pa im geregelten Zustand deutlich mehr Wärme in das Gesamtsystem.

Der hohe Druck im Ofen 3 würde im Bereich der Brennzone durch einen leistungsfähigeren Absaugventilator in der Sturzkühlung wenig beeinflusst werden, da die Öffnungen der Absaugung in Richtung Brennzone z.gr. Teil geschlossen sind. Stattdessen würde der Hauptanteil der angesaugten Luft dann über die HL-Absaugung im Endkühlungsbereich erfolgen, was sich positiv auf die Abkühlung der Ware auswirken würde. Zusätzlich würde damit sichergestellt, dass die HL in die SL eingespeist werden kann.

Mit Hilfe von Klappeneinstellungen und der Anpassung des Druckniveaus wäre eine gezielte Temperatureinstellung bei der Abkühlung möglich, die derzeit noch nicht realisierbar ist.

Aufbau der Turmofen und Zugverhältnisse

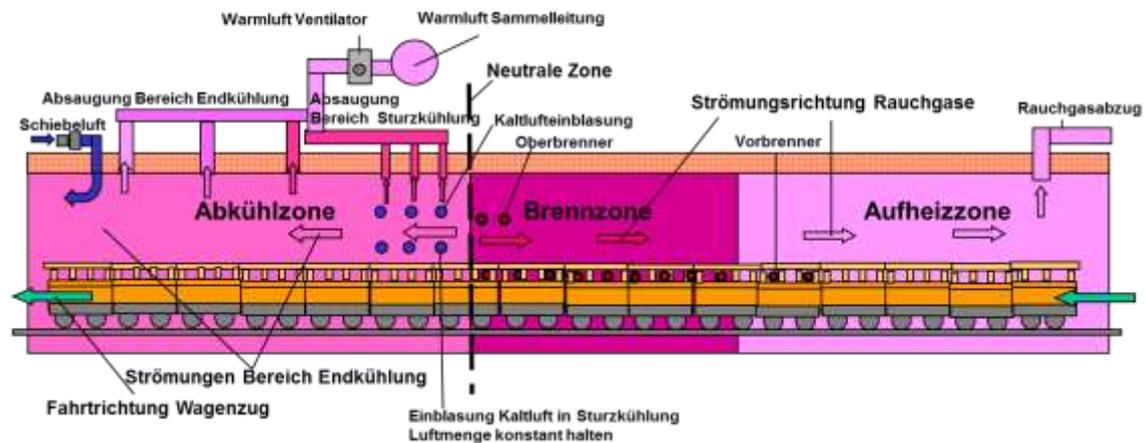


Bild 11: Ist-Situation Schiebeluft an Ofen 3 (Schiebeluft, links im Bild, wird am Ofenausgang ausgeblasen, statt in Richtung Brennzone zum Kühlen der Produkte gesaugt zu werden).

Ausblick:

Die angeführten Maßnahmen könnten in absehbarer Zeit durchgeführt werden, um einen Energiegewinn für den Trockner zu erzielen.

Abkopplung Ofen 2

Ofen 2 wurde wie bereits beschrieben, im Projektverlauf wieder in Betrieb genommen und läuft derzeit noch ohne Regelung problemlos. Die Abkopplung von Ofen 2 analog Ofen 1 und Ofen 3 ist jedoch bereits in Planung. Da Änderungen in der SL in Zukunft eher vermeidbar sein werden, weil inzwischen annähernd Konstantdruck in der SL herrscht und Variationen wie der Einsatz der Raumheizung im Winter oder drastische Änderungen in der Besatzmenge durch Anpassung des SL-Drucks ausgeglichen werden können (Solldruckeinstellung mit der Klappe zum Trockner), ist diese Maßnahme jedoch nicht zwingend notwendig.

4.3.2 Berechnungen zur Ofen-Abwärmemenge für die Trocknung

Theoretische Abwärmemenge aus den Öfen:

Ab dem Ende der Brennzone (nach der Phasenumwandlung) steht eine theoretisch nutzbare Wärmemenge aus dem Besatz (Produkte), den Brennhilfsmitteln (Stützen und Setzplatten) und dem Wagenaufbau zur Verfügung. Praktisch sind jedoch hohe Verluste zu verzeichnen (offene Ofenenden, Druckführung der Öfen, unvermeidliche Verluste nach dem Ausfahren der Wagen aus dem Ofen). Weiter muss berücksichtigt werden, dass für die Trocknung nur die Restwärme zur Verfügung steht, die nicht für die übrigen Nutzungen entnommen wurde (Tonsilo, Raumheizung im Winter, Vorwärmer).

Vereinfachende Annahmen zur groben Berechnung der theoretischen Abwärmemenge:
Masse pro Wagen incl. Besatz: es wird nachfolgend mit einem geschätzten Mittelwert von 1.950 kg Wagenmasse gerechnet (Produkte + Wagenaufbau + Brennhilfsmittel), da der Wagen nicht überall die höchstmögliche Temperatur hat. [Produktbesatzmenge pro Wagen: 1.250 kg Ware (Durchschnittswert); Wagenaufbau: 960 kg alte Bauweise, 736 kg neue Bauweise; Brennhilfsmittel: geschätzt]. Spezifische Wärmekapazität der Wagen incl. Besatz: es wird nachfolgend mit einem geschätzten Mittelwert von 1,03 kJ/kgK gerechnet (Produkte + obere Betonschicht Wagenaufbau + Brennhilfsmittel). [Wagenaufbau: 1,1 bis 0,98 kJ/kgK (berechnet aus Literaturwerten der Einzelkomponenten), Produktbesatz: 1,03 kJ/kgK (Literaturwert)]. Durchschnittliche Produktionsmenge pro Tag: Ofen 1: 18 Wagen/d , Öfen 2 und 3: je 12 Wagen/d (Angaben des Unternehmens). Nutzbare Temperaturdifferenz: 1.000°C (Schätzwert).

Die theoretisch nutzbare Wärmemenge aus den Öfen ergibt sich demnach wie folgt:

$$Q (\text{Ofen1}) = 1.950 \text{ kg} \times 1.03 \text{ kJ/kgK} \times 18 \text{ Wagen/d} \times 1.000 \text{ K} \times 365 \text{ d/a} = \\ = 13.195.850.000 \text{ KJ/a} = 3.665.514 \text{ kWh/a.}$$

$$Q (\text{Ofen2}) = Q (\text{Ofen3}) = 1.950 \text{ kg} \times 1.03 \text{ kJ/kgK} \times 12 \text{ Wagen/d} \times 1.000 \text{ K} \times 365 \text{ d/a} = \\ = 8.797.2300.000 \text{ KJ/a} = 2.443.675 \text{ kWh/a pro Ofen.}$$

Theoretische Abwärmemenge bei Betrieb von 2 Öfen (Ofen 1 und Ofen 3):

6.109.189 kWh/a oder 604.870 m³ Erdgas/a (Annahme: 10,1 kWh/m³ Erdgas),

Theoretische Abwärmemenge bei Betrieb von drei Öfen:

8.552.864 kWh/a oder 846.818 m³ Erdgas/a (Annahme: 10,1 kWh/m³ Erdgas).

Aktuelle reale Wärmemenge aus den Öfen (nach bisherigen Optimierungsmaßnahmen)

Von diesen nicht unerheblichen Wärmemengen wird für die Trocknung bei Betrieb von 2 Öfen ein Anteil von 3.634.848 kWh/a (252 Produktionstage/a, 14.424kWh/d) kontinuierlich für die Trocknung zur Verfügung gestellt, nachdem bereits Abwärme für Ton-silos und Vorwärmer entnommen wurden. Dieser Wert wurde bei Betrieb von 2 Öfen ermittelt, seit sämtliche Maßnahmen zur Optimierung des Systems umgesetzt wurden [vorher: etwa 1/3 hiervon]. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass im Winterhalbjahr zusätzlich Abwärme zur Raumbeheizung entnommen wird, die dann dem Trockner nicht mehr zur Verfügung steht.

Eine Quantifizierung der durch die bisherigen Maßnahmen im gesamten System erzielten Einsparungen konnte zum Zeitpunkt der Berichterstattung noch nicht erfolgen. Dies liegt darin begründet, dass zwar eine Verringerung des Gasverbrauchs durch den Zusatzbrenner in der Heißluftseite des Trockners zwischen Januar und März 2014 zu verzeichnen war (von ca. 14.000 Nm³ Gas/Monat im Januar auf ca. 4.000 Nm³ Gas/Monat im März).

Diese ist jedoch nicht allein auf die Optimierungsmaßnahmen zurückzuführen, da in diesem Zeitraum Ofen 2 wieder eingeschaltet und außerdem die Raumheizung wieder abgestellt wurde. Eine Quantifizierung der Gasverbräuche bei den unterschiedlichen Betriebszuständen (Betrieb von 2 oder 3 Öfen, Betrieb mit und ohne Raumheizung, Betrieb mit und ohne die Umsetzung der bisherigen Optimierungsmaßnahmen) soll deshalb bei nächster Gelegenheit erfolgen.

Durch Kenntnis des erforderlichen Druckniveaus in der SL kann aber in Zukunft auch im Winter mehr HL zum Trockner geleitet werden.

Reale Abwärmemenge bei Betrieb von 2 Öfen (ohne Betrieb der Raumheizung):

Volumenstrom (ca. 115°C), der in der SL dem Trockner zur Verfügung steht:

14.431 Nm³/h Luft feucht = 18.659 kg genormte Luft/h (1,293 kg/Nm³).

[Vor Optimierung: ca. 5.000 Nm³/h].

Die reale (gemessene) Wärmemenge aus den Öfen für den Trockner ergibt sich demnach wie folgt:

$Q(\text{HL zum Trockner}) = 18.659 \text{ kg} \times 1,009 \text{ kJ/kgK} \times 115 \text{ K} = 2.165.097 \text{ kJ} = 601 \text{ kWh.}$
= 14434 kWh/d

Da an den Produktionstagen nur diese Wärmemenge von zwei Öfen zur Verfügung steht, ergibt dieses für 21 Produktionstage im Monat **303.114 kWh/a.**

An den Wochenenden entsteht kein Fehlbedarf an Energie.

Reale Abwärmemenge bei Betrieb von 3 Öfen:

Volumenstrom müsste hierfür aktuell ermittelt werden.

Theoretischer Wärmebedarf zum Trocknen der Produkte für die Öfen 1 bis 3:

Theoretischer Wärmebedarf zum Trocknen bei Betrieb von 2 Öfen:

Produktionsmenge für November 2013 (Angabe der Firma):

1.034 t/Monat = 12.408 t/a (jeweils Produkt trocken).

Annahme: 14 M.-% Wasseranteil durchschnittlich = **6,893 m³ Wasser/d**

bei 21 Produktionstagen/Monat

Der durchschnittliche **Wasseranteil beträgt 1.737m³/a**

Theoretischer Wärmebedarf zum Heizen der Keramik von 20 auf 80°C:

Zum Aufheizen der Keramik von 20 auf 80°C:

$Q(\text{Bedarf Keramik}) : 49,256 \text{ kg} \times 0,85 \text{ kJ/kgK} \times 60 \text{ K} = 2.512.037 \text{ kJ} = 698 \text{ kWh/d}$

= 175.896 kWh/a (bei 21 d/Monat, 12 Monate/a).

Spezifische Wärmekapazität : Literaturwert für Keramik gilt für 20-200°C.

Theoretischer Wärmebedarf Wasserverdunstung:

Theoretischer spezifischer Wärmebedarf zur Wasserverdunstung:

Q (Bedarf Verdampfung Wasser): **0,69 kWh/kg.**

Praktischer Wärmebedarf zum Trocknen bei Betrieb von 2 Öfen:

Praktischer spezifischer Wärmebedarf:

etwa 2- bis 3-facher theoretischer Wert = Erfahrungswert für das Trocknen von Keramik)

→ **2,08 kWh/kg** praktisch erforderlich (3-facher Wert wurde hier angenommen).

Praktischer Wärmebedarf zum Verdampfen des Anmachwassers:

$1.737.000\text{kg} \times 2,08 = \mathbf{3.612.960\text{ kWh/a.}}$

Zusätzlich: **175.896 kWh/a** zum Aufheizen der Keramik

D.h.: insgesamt **3.788.856 kWh/a = Wärmebedarf zum Trocknen der Keramik.**

Praktischer Zusatz-Wärmebedarf (außer Ofenabwärme) zum Trocknen bei Betrieb von 2 Öfen:

Bei Betrieb von 2 Öfen steht seit der Optimierung durch die im Vorhaben bereits umgesetzten Maßnahmen nun eine Wärmemenge von

14.434 kWh/d = 3.637.368 kWh/a real an 252 Produktionstagen zur Verfügung.

An Wochenenden ist keine zusätzliche Wärmeeinspeisung über Zusatzbrenner erforderlich!

Damit ergibt sich ein Zusatz-Wärmebedarf für die Trocknung von lediglich

601 kWh/Produktionstag (60 m³ Erdgas/d). Der **Zusatz-Wärmebedarf pro Jahr** ergibt sich hieraus wie folgt:

$601\text{kWh} \times 21\text{ d (d.h. ohne WE)} = 12.621\text{ kWh/Monat (1.250 m}^3\text{ Erdgas/Monat)}$

$12.621\text{ kWh} \times 12\text{ Monate} = \mathbf{151.488\text{ kWh/a (14.999 m}^3\text{ Erdgas/a).}$

Bei einem durchschnittlichen Erdgaspreis (gemittelter Erfahrungswert für die Keramikindustrie) von 4 Ct/kWh sind $151.488\text{ kWh} \times 0,04\text{ €} = \mathbf{6.060\text{ € Erdgaskosten}}$ zusätzlich zur Trocknung erforderlich.

Auf die **Zusatzbeheizung auf der Nassluftseite** des Trockners konnte auch nach den bisherigen Optimierungen in der SL nicht verzichtet werden. Hier werden nach wie vor ca. 6.000 m³ Erdgas pro Monat = **72.000 m³/a** verbraucht, entsprechend ca. 30.000 € Kosten pro Jahr. Diese Kosten können durch Umsetzung der vorgeschlagenen Änderungen auf der Nassluftseite (siehe vorgeschlagene Maßnahmen am Ende des Berichtes) noch reduziert werden.

Reale Abwärmemenge bei Betrieb von drei Öfen (s.o):

Annahme: Ofen 2 stellt die gleichen Wärmemengen zur Verfügung wie Ofen 3. Die tatsächlich in der HL aus der SL zur Verfügung stehende Wärmemenge (ohne entnom-

mene Wärme für Tonsilo, Vorwärmer und im Winter Raumheizung) muss für den Betrieb aller drei Öfen noch gemessen werden!

8.552.864 kWh/a oder 846.818 m³ Erdgas/a (Annahme: 10,1 kWh/m³ Erdgas), s.o..

Praktischer Wärmebedarf zum Trocknen bei Betrieb von 3 Öfen:

Annahme: 1,5-fache Produktionsmenge wie November 2013: **5.425.434 kWh/a** (= 537.172 m³ Erdgas/a).

Praktischer Wärmeüberschuss aus Ofenabwärme für weitere Nutzung bei Betrieb von 3 Öfen:

Gesamtmenge aller drei Öfen: **8.552.464 kWh/a**

Überproduktion an Wärme aus den Öfen = 3.127.030 kWh/a (=309.606 m³ Erdgas/a) = **125.081 €/a bei Betrieb aller drei Öfen.**

In der Produktionszeit von 252 Tagen/a stehen jedoch nur **5.904.714 kWh** der Ofenabwärme für die Trocknung zur Verfügung. Damit besteht bei 1,5-facher Menge an Trocknungsgut noch ein Überschuss von 479.281kWh zur erforderlichen Trocknungsenergie in dieser Zeit, der jedoch von den anderen angeschlossenen Verbrauchern genutzt wird.

Zusätzlich wird auch bei Betrieb aller drei Öfen derzeit die Zusatzbeheizung in der Nassluft am Trockner unverändert betrieben; sogar die Zusatzbeheizung Heißluft am Trockner wird sporadisch zugeschaltet.

Ziel für die Zukunft sollte sein, die Laufzeit dieser Zusatzheizer so weit wie möglich zu reduzieren!

4.4 Tunnelofen-Wagen

4.4.1 Ergebnisse der Messungen ohne und mit Optimierung der Ofenwagen

Die vorhandenen TO-Wagen bestehen aus einer sehr starken Schicht von FF-Beton als Wagenabdeckung mit einer darunter liegenden Schicht aus FL-Steinen, die unmittelbar auf 10 mm dicken Bodenblechen stehen.

Tunnelofenwagen

Ofenwagenaufbau alt



Bild 12 a: Aufbau Ofenwagen, alte Bauweise

Tunnelofenwagen

Ofenwagenaufbau neu

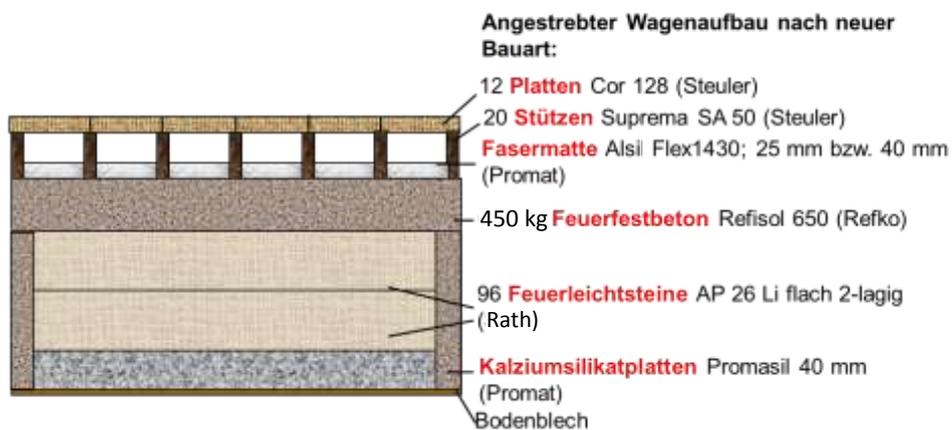


Bild 12 b: Aufbau Ofenwagen, neue Bauweise, mit Faserabdeckung

Im Rahmen des Vorhabens wurde der Wagenaufbau geändert, indem die Stärke der Deckschicht aus Beton von 180 auf 80 mm reduziert wurde. Eine zusätzlichen Lage von Feuerleichtstein (kurz „FLS“) und eine 40 mm starke Calcium-Silikatplatte wurden ebenfalls eingebaut. Das Betongewicht wurde damit von ca. 840 auf 490 um 350 kg reduziert. Diese Modernisierung der Ofenwagen erfolgt seit Projektbeginn kontinuierlich bei jedem erforderlichen Wagenneuaufbau. Im Vorhaben wurden Abdeckungen des Wagenplateaus mit einer dichten Fasermatte Typ AISil Flex 1430 in Stärken von 25 und 40 mm aufgebracht, jeweils auf einem Versuchswagen alter und einem neuer Bauweise.

In die Versuchswagen wurden Thermolemente in 3 verschiedenen Positionen (Schichthöhe) eingebaut, um die mittlere Temperatur während einer Ofenreise mittels Datenlogger zu erfassen.

Anordnung Thermolemente (Flächenverteilung)

Ermittlung der aufgenommenen Speicherwärme

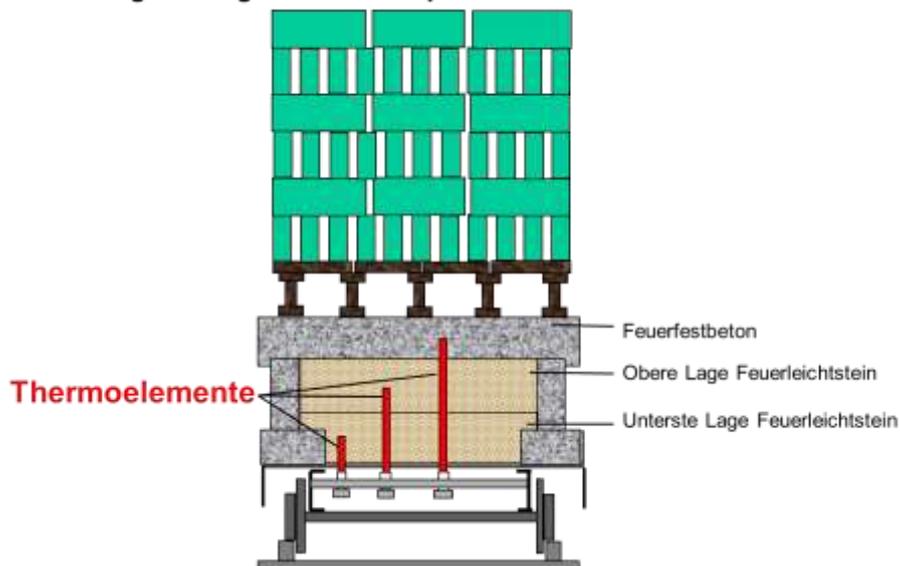


Bild 12 c: Aufbau eines Ofenwagens mit Besatz, Anordnung der Thermolemente für die Messung der aufgenommenen Wärmemenge im Wagenaufbau (Kilntracker-Fahrten).

Eigentlich hätten alle Messreihen in Ofen 1 erfolgen sollen, um eine gute Vergleichbarkeit zu erzielen. Dies war aber wegen ständiger Wechsel zwischen reduzierendem und oxidierendem Brand nicht immer möglich. Daher wurden die meisten Versuche in Ofen 3 gefahren. Hier sind jedoch aufgrund der Ofenbauweise und der Setzhöhe nur 25-mm-Fasermatten im Bereich der Stützen möglich.

Zum Projektende hin gelang es jedoch noch, die erforderlichen Versuche auch mit den 40 mm-Fasermatten in Ofen 1 durchzuführen.

Die Ergebnisse sind nachfolgenden Ausführungen und graphischen Darstellungen zu entnehmen:

Ergebnisse: Ofen 3 mit und ohne Fasermatten (25 mm):

Im Ofen 3 (Vergleich jeweils nur mit 25 mm starker Faserschicht möglich) liegen die Messungen sowohl für neuen als auch für alten Wagenaufbau, und sowohl mit als auch ohne Fasermatte vor. Der genaue Vergleich der Ergebnisse untereinander ist jedoch leider nicht möglich, da im Vorhabensverlauf das Brennprogramm je nach zu brennenden Produkten kontinuierlich gewechselt werden musste.

Selbst eine Abdeckung mit nur 25 mm Fasermatte führte zu einer Temperaturverringering an der obersten Messstelle im Wagenaufbau von ca. 180°C (alte Bauweise).

Ergebnisse: Ofen 1 mit und ohne Fasermatten (40 mm):

Im Anschluss an die Versuche im Ofen 3 wurde der Testwagen auf hohe Stützen umgebaut, die für die Geometrie des Ofens 1 eingesetzt werden müssen, da die Geometrie von Ofen 1 eine andere Setzweise erfordert. Durch Einsatz der hohen Stützen ist hier die Verwendung der dickeren Fasermatten (40 mm) möglich. Auch hier erfolgten Testfahrten sowohl mit einem alten, als auch mit einem neuen Wagenaufbau.

4.4.2 Kalkulationsberechnungen Einspar- und Nutzungspotentiale bei neuem Ofenwagenaufbau

Wärmemengen bei verschiedenen Ofenwagen-Aufbauten:

Nachfolgend wird die Berechnung der Wärmemenge dargestellt, die pro Wagen am Ende der Brennzone im Wagenaufbau und im Besatz insgesamt gespeichert ist.

Wichtige Anmerkung: ein direkter Vergleich der Wärmemengen im Wagenaufbau aus Ofen 3 mit denen aus Ofen 1 ist nicht möglich aufgrund der unterschiedlichen Schubzeiten und Brenntemperaturen.

Berechnete Wärmemenge im Wagenaufbau (kWh/Wagen).							
Nicht berücksichtigt: Brenntemperatur, Besatzdichte, Brenndauer.							
Ofen 3; 12 Wagen/d, Brenntemperatur max. 1220°C				Ofen 1; 18 Wagen/d, Brenntemperatur max. 1190°C			
Alte Bauweise		Neue Bauweise		Alte Bauweise		Neue Bauweise	
ohne Faser	mit F. (20 mm)	ohne Faser	mit F. (20 mm)	ohne Faser	mit F. (40 mm)	ohne Faser	mit F. (40 mm)
210	195	192	158	194	152	168	141

Die Verringerung der Wärmemenge im Wagenaufbau bei neuer Bauweise entspricht der Wärmemenge, die in der Aufheiz- und Brennzonen nicht erzeugt werden muss. Diese Wärmemenge steht damit theoretisch für den Besatz, also das Produkt im Bereich der Brennzonen zusätzlich zur Verfügung. Weiterhin ist damit die Verringerung von Wärmeverlusten beim Ausfahren der Ware aus dem Ofen, sowie in Richtung der Wagenunterseite verbunden.

Für die Berechnungen wurde der Wagenaufbau in 3 Messschichten aufgeteilt. Eine gemessene Schicht wurde mit der dort ermittelten Durchschnittstemperatur (Messungen Ofenreisen) gemittelt. Bei Schichten unterschiedlicher Materialzusammensetzung wurde jede einzelne Schicht mit ihrer Masse berechnet und die Wärmekapazität mit dem für diese Schicht zuständigen spezifischen Wert berechnet. Beispielsweise wurden Beton und FLS jeweils separat berechnet und danach im Verhältnis des vorhandenen Volumens addiert.

Dies ergab jeweils Wärmewerte für 3 Schichten; aus diesen wurde der gesamte Wärmeinhalt Q_{gesamt} der Wagenaufbauten berechnet.

Anmerkungen: die Zahl der Wagen pro Tag (Wagen/d) gibt Aufschluss über die jeweilige Brenndauer. Die hieraus resultierenden Ungenauigkeiten im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der im Wagenaufbau gespeicherte Wärme ist rechnerisch leider nicht zu eliminieren. Analog gilt dies für die jeweilige Brenntemperatur und den jeweiligen Besatz.

Aus diesen Berechnungen kann die erzielte Differenz der Wärmemengen im Wagenaufbau wie folgt dargestellt werden:

Fasern 40 mm (Ofen 1)

Wagen alt: mit Fasern 41,1 kWh/Wagen weniger Wärmeinhalt als ohne Fasern

Wagen neu: mit Fasern 26,3 kWh/Wagen weniger Wärmeinhalt als ohne Fasern

Mit Fasern: Wagen neu 10,9 kWh/Wagen weniger Wärmeinhalt als Wagen alt

Ohne Fasern: Wagen neu 25,9 kWh/Wagen weniger Wärmeinhalt als Wagen alt

Fasern 25 mm (Ofen 3)

Wagen alt: mit Fasern 15,4 kWh/Wagen weniger Wärmeinhalt als ohne Fasern

Wagen neu: mit Fasern 34,9 kWh/Wagen weniger Wärmeinhalt als ohne Fasern

Mit Fasern: Wagen neu 37,2 kWh/Wagen weniger Wärmeinhalt als Wagen alt

Ohne Fasern: Wagen neu 17,8 kWh/Wagen weniger Wärmeinhalt als Wagen alt

Die verringerte Wärmemenge im neuen Wagenaufbau kann unmittelbar den Produkten zugute kommen, sodass auf diesem Wege Energie eingespart werden kann.

Wichtige Anmerkung: Die Differenzen bei Einsatz der dünneren Fasermatten liegen teilweise höher (im Vergleich zum Aufbau ohne Fasermatten), als bei den dickeren Fasermatten. Dies ist damit zu begründen, dass die Werte nicht direkt vergleichbar sind wegen unterschiedlicher Brennprogramme (Durchlaufzeiten) und auch Besatzdichte!

Ofenwagenaufbau: Wärmeverluste bei verschiedenen Ofenwagen-Aufbauten

Mittels Wärmeübergangszahlen und Wärmeleitzahlen für die verwendeten Materialien des Wagenaufbaus wurden die k-Werte (Wärmedurchgangszahlen) rechnerisch bestimmt. Damit ist der Wärmeverlust aufgrund der unterschiedlichen Bauweisen der Ofenwagen abschätzbar.

Wärmedurchgangszahlen kW/m²K:

Ofenwagen alt ohne Faser:	1,37 W/m ² K
Ofenwagen alt mit 25 mm Faserabdeckung:	1,26 W/m ² K
Ofenwagen alt mit 40 mm Faserabdeckung:	1,20 W/m ² K
Ofenwagen neu ohne Faser:	0,96 W/m ² K
Ofenwagen neu mit 80 mm Calciumsilikat:	0,87 W/m ² K
Ofenwagen neu mit 25 mm Faserabdeckung:	0,90 W/m ² K
Ofenwagen neu mit 40 mm Faserabdeckung:	0,87 W/m ² K
Ofenwagen neu mit 80 mm Calciumsilikat und 25 mm Faserabdeckung:	0,82 W/m ² K

Eine Berechnung der absoluten Energieeinsparung während der Ofenreise ist wegen des instationären Wärmeverlaufs mit den vorhandenen Rechenprogrammen nicht

möglich, jedoch wird aus den Wärmedurchgangszahlen ersichtlich, dass alleine die neue, heutige Bauweise einen um 30 % reduzierten Wärmedurchgang gegenüber den Wagen alter Bauart realisiert.

Eine weitere Möglichkeit zur deutlichen Reduzierung des Wärmedurchgangs besteht theoretisch darin, die Stärke der Calciumsilikatschicht von heute 40 mm auf 80 mm in den neuen Wagen zu verdoppeln. Dadurch wäre eine der Feuerleichtsteinschichten nicht mehr erforderlich. Der resultierende k-Wert entspricht der Größenordnung mit 40 mm Faserabdeckung bei der neuen Wagenbauweise (Reduzierung von ca. 36,5 %). Für den Einsatz von Calciumsilikatschichten ist allerdings die Druckfestigkeit dieser Schichten unter Langzeitbedingungen zu überprüfen. Eine zusätzliche 25 mm Faserschicht auf dem Wagenplateau ermöglicht dann sogar eine Reduzierung des Wärmedurchgangs um ca. 40 %. Diese Stärke der Faserschicht kann bauartbedingt sowohl für Ofen 1 als auch für die Öfen 2 und 3 eingesetzt werden. Da im Gegensatz zur Speicherwärme in den Wagen die Verluste durch den Wärmedurchgang in den Begehungskanal des jeweiligen Ofens nicht reaktivierbar sind, ist ein optimierter Wagenaufbau besonders sinnvoll.

Das Einsparpotential bei optimierten Tunnelofenwagen liegt erfahrungsgemäß im Bereich von bis zu 10 % des gesamten Wärmeverbrauchs eines Ofens. Im Falle der Firma wäre bei kompletter Optimierung der Ofenwagen mit einem Einsparpotential in einer Größenordnung von ca. 30.000 € pro Jahr und pro Ofen zu rechnen.

Die Kosten für den neuen Wagenaufbau wurden inzwischen seitens der Firma ermittelt und mit den Kosten für den alten Aufbau verglichen. Demnach liegen die Kosten für die neue Bauweise (mit einer 40 mm-Calciumsilikatschicht) sogar geringfügig (ca. 170 €/Wagen) unterhalb der Kosten für den alten Aufbau, da insbesondere die Calciumsilikatplatten deutlich kostengünstiger sind als Feuerfestbeton und Feuerleichteine. Ob sogar 2 dieser Calciumsilikatschichten möglich sind, muss nun in einem Langzeitversuch besonders im Hinblick auf die Druckbeständigkeit erprobt werden. Die Erneuerung des gesamten Fuhrparks wird derzeit seitens der Firma geplant. Danach kann mit dem nun vorliegenden Kostenvergleich in näherer Zukunft darüber entschieden werden, ob die gleichzeitige Erneuerung aller etwa 300 Wagen erfolgen soll, oder ob weiterhin nach und nach einzelne Wagen in der neuen Bauweise aufgebaut werden, sobald eine Erneuerung erforderlich ist.

4.5 Gasverbräuche seit Durchführung der bisherigen Optimierungsschritte:

Zwischenzeitlich liegen erste Ergebnisse über die Gasverbräuche seit Durchführung der bisherigen Optimierungsmaßnahmen vor. Demnach hatte der durchschnittliche Wert für den Gasverbrauch in der Zusatzbeheizung für den Trockner („Trockner Spalt“) 2012 (Betrieb von nur 2 Öfen, vor jeglicher Veränderung am gesamten System) bei ca. 15.000 m³/Monat gelegen (Trockenseite = Heißluftseite Trocknerausgang). Dies entspricht Kosten in Höhe von ca. 70.000 €/Jahr.

Im Verlauf des Jahres 2013 wurde das Heizregister aus der Sammelleitung für die Raumluft von FGK mehrfach im Rahmen der Versuchsdurchführungen geschlossen und gelegentlich durch Firmenmitarbeiter wieder geöffnet. Ebenso wurde das Frischluft-Register an der Heißluftseite des Trockners geschlossen. Ein zeitweise geringerer Gasverbrauch in der Heißluftseite des Trockners (Verringerung auf ca. 10.000, zeitweise auf ca. 5.000 m³ Gas/Monat) ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf diese Veränderungen zurückzuführen.

Ab Februar 2014 ging der Gasverbrauch für Zusatz-Heißluft am Trockner drastisch auf Werte bis zu 1.100 m³/Monat zurück. Die Ursache hierfür ist das Zuschalten von Ofen 2 am 21.2.14, sodass seither alle 3 Öfen in Betrieb sind. Dadurch wurde die Heißlufttemperatur von 115°C auf 150°C angehoben, da von Ofen 2 nun Heißluft statt zuvor Kaltluft in die SL einspeist wurde.

Zudem wird die beschriebene Verdreifachung der Heißluftmenge (von ca. 5.000 auf 15.000 Nm³ Heißluft/h) aus der Sammelleitung aufgrund der beschriebenen Optimierungsschritte im System durch Festlegung des für das Tonsilo erforderlichen Soll-druckes im Gesamtsystem zu dieser Verringerung des Gasverbrauchs beitragen.

Weiterhin bewirkt das Schließen des Raumheizungs-Registers nach dem Winter eine Senkung des Gasverbrauchs am Trockner.

All diese Veränderungen erfolgten im Januar bis März 2014, sodass eine Überlagerung der verschiedenen Effekte auf den Gasverbrauch vorliegt.

Seit März 2014 wird die Zusatzheizung am Trockner nahezu nicht mehr betrieben. Der Verbrauch wurde auf ca. 1.000 m³ Gas/Monat verringert.

4.6 Einfache Möglichkeit zur Nutzung der Überschusswärme am Wochenende:

Durch den Einbau einer Drosselklappe in der Sammelleitung direkt auf dem Trockner wird es möglich, die Zone mit Überdruck bis hin zum Trockner zu verlagern. Damit kann von dort mit einer kurzen Anschlussleitung der im Nebenraum befindliche Formteil-Trockner an der Sammelleitung angeschlossen werden. Dazu wird die zwischen den Öfen 2 und 3 befindliche Klappe in der Sammelleitung komplett geöffnet. Die zukünftige Regelung des Systemdruckes erfolgt dann über die neue Klappe am Kanaltrockner. Am Wochenende kann die Klappe in der neuen Heißluftleitung zum Formteil-Trockner im Nebenraum geöffnet und die neue über dem Trockner installierte Klappe in der Sammelleitung so weit teilgeschlossen werden, dass der Systemdruck weiter auf Sollwert steht. Die Überschusswärme kann an den Wochenenden so teilweise genutzt werden. Diese Maßnahme wird notwendig, sobald im Trockner zukünftig einmal Türen eingebaut werden sollten.

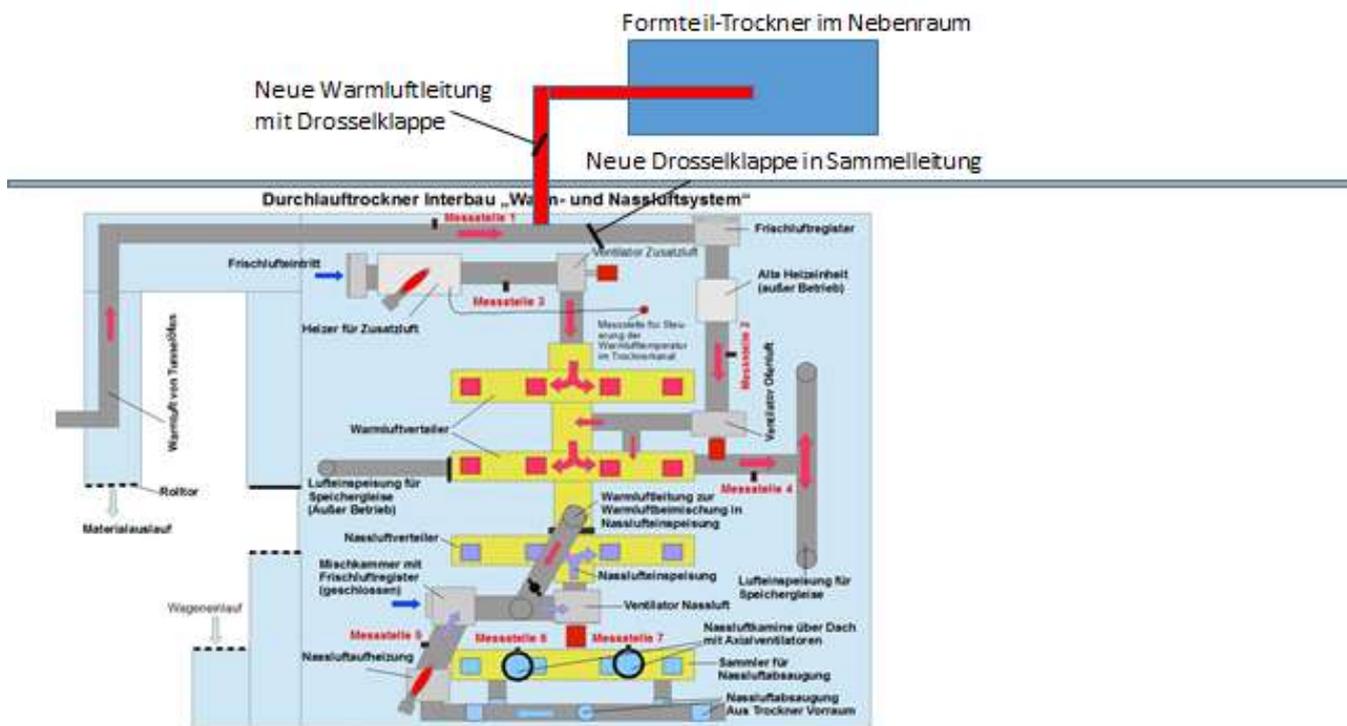


Bild 13: Kopplung der vorhandenen HL-SL zum zusätzlichen Trockner im Nebenraum (Trocknersituation)

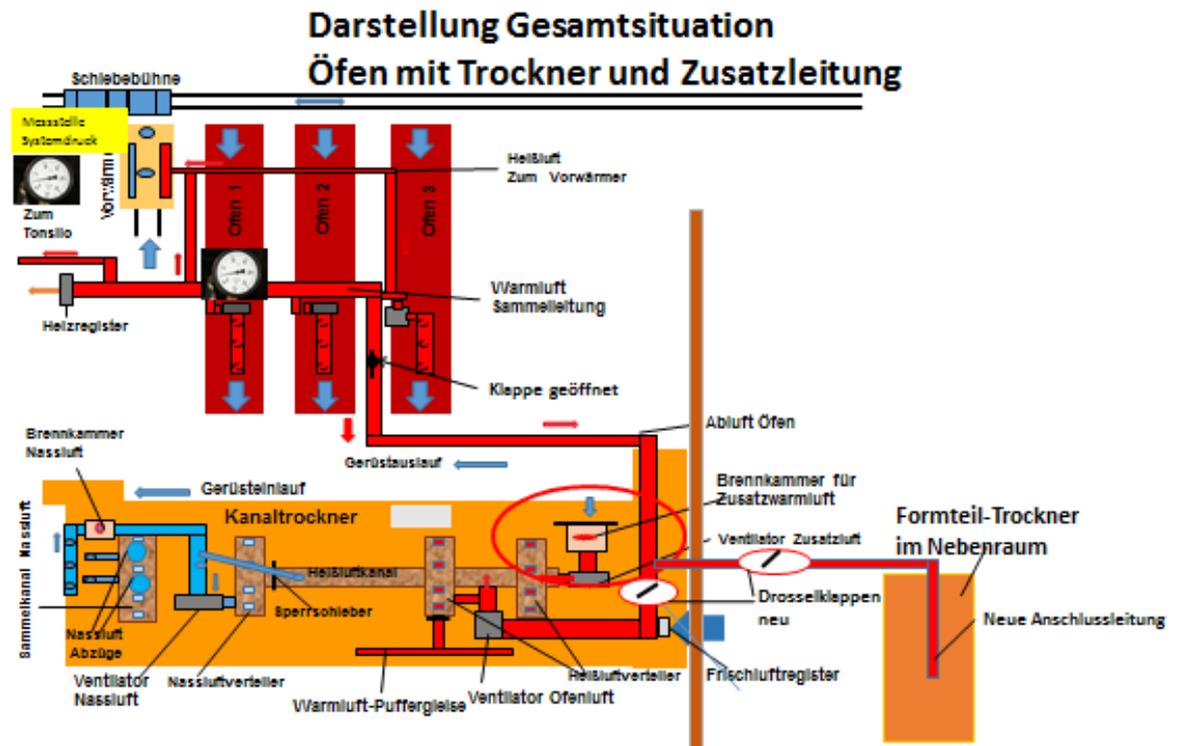


Bild 14: Kopplung der vorhandenen HL-SL zum zusätzlichen Trockner im Nebenraum (Gesamtsituation)

4.7 Ausschussmenge seit Durchführung der bisherigen Optimierungsschritte:

Der Einfluss der bisher erfolgten Maßnahmen (Entkopplung Ofen 1 und 3, Optimierungen am Trockner) auf die **Ausschussmenge** wurde qualitativ bereits festgestellt. Eine sichere Quantifizierung wird im Verlauf der Jahre 2014 bis 2015 möglich sein (Differenzierung nach Produkten erforderlich).

5. Zusammenfassung und Bewertung der Vorhabensergebnisse

Abkopplung der Öfen von Änderungen im Gesamtsystem

Veränderungen des Druckniveaus im Trockner durch Zu- oder Abschalten des Zusatzheizers oder Öffnen und Schließen des Frischluft-Registers am Trockner, Besatzänderungen, aber auch beim saisonabhängig erforderlichen Zu- und Abschalten der Raumheizung führen automatisch zu einer Veränderung des Druckniveaus in der Sammelleitung.

Ursprünglich war davon auch immer die jeweilige Luftmenge bzw. die Drücke auf der Abzugsseite der Heißluft innerhalb der Tunnelöfen betroffen. Diese Schwankungen wirken sich auf den Bereich vom Ende der Brennzone bis zur Abkühlzone aus. Da die Lage der druckneutralen Zone zwischen Sturzkühlung und Brennzone durch die jeweiligen Drücke zwischen diesen beiden Bereichen bestimmt wird, bewirken solche Variationen der Drucksituation in der Sammelleitung immer auch Schwankungen in der Brennführung und Position der neutralen Zone. Dadurch kann die Qualität des Brennprozesses drastisch verschlechtert und letztendlich die Ausschussquote erhöht werden.

Die Abkopplung der Öfen 1 und 3 von solchen Druckschwankungen der Sammelleitung ist bereits im Projektverlauf erfolgt und läuft sehr problemlos. Für Ofen 2 ist eine Entkopplung ebenfalls geplant.

Unterschiedliche **Setzweisen auf den Ofenwagen** führen ebenfalls zu Druckveränderungen im Ofen und damit zu wechselnden Luftmengen. Dieser Effekt wird durch die Regelung ebenfalls vollständig kompensiert.

Beurteilung des Systems bei verschiedenen Einstellungen

Das Zuschalten des Ofens 2 gegen Ende des Vorhabens am 21.2.14 zeigte deutlich, welche unterschiedlichen Abwärmemengen bei **Betrieb von zwei bzw. drei Öfen** für alle nachgeschalteten Verbraucher zur Verfügung stehen. Der Betrieb aller drei Öfen führte zu einem sehr starken Druck- und Temperatur-Anstieg in der Sammelleitung und nahm sofort Einfluss auf die Abzugsmengen der Heißluft aus allen drei Tunnelöfen. In Ofen 1 war die Regelung zu diesem Zeitpunkt bereits in Betrieb. Diese regelte durch Steigerung der Ventilator Drehzahl (50 auf 57 Hz FU) den Druck im Ofen sekundenschnell aus. Die abgezogene Luftmenge aus Ofen 1 blieb dadurch konstant. Ohne Regelung wäre

die abgezogene Luftmenge bei den eingestellten Rahmenbedingungen des Systems deutlich reduziert worden.

Bei **Betrieb aller drei Öfen** ist die Gesamte Abwärmemenge auch ohne Optimierung des Trockners, des Ofens 3 und des Vorwärmers für alle Verbraucher in den Sommermonaten ohne Raumheizung mehr als ausreichend. Die Zusatzbeheizung im Trockner auf der Heißluftseite kann in diesen Zeiten komplett ausgeschaltet werden. Wie viel Abwärme insbesondere an den Wochenenden nicht verbraucht und daher ungenutzt emittiert wird, kann zum derzeitigen Zeitpunkt ohne Messungen nicht quantifiziert werden. Hierzu sind eine Reihe von weiteren Messungen an Trockner, Vorwärmer und Ofen 3 erforderlich. An den übrigen Wochentagen ist der Überschuss deutlich geringer, jedoch ebenfalls ohne weitere Messungen nicht sauber zu quantifizieren.

Bei **Betrieb von nur zwei Öfen** ist dagegen die Abwärmemenge **ohne Trockneroptimierung** nicht sicher ausreichend. Bei Durchführung der am Ende des Berichtes aufgeführten Umbaumaßnahmen am Trockner, Ofen 3 und Vorwärmer entsprechend der im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse wäre die Abwärmemenge für diese Situation jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit so weit zu erhöhen, dass die Zusatzbeheizung am Trockner abgeschaltet werden könnte.

Mit der funktionierenden **Entkopplung von Ofen 1 und 3** wurde im Vorhabensverlauf die Unabhängigkeit des hochsensiblen Brennprozesses von allen Veränderungen in der Sammelleitung erzielt.

In verschiedenen Betriebsversuchen wurde eine **Reihe von Änderungen der Einstellungen in der Sammelleitung erprobt** und kontinuierlich entsprechend den beobachteten Veränderungen in der Sammelleitung und an den Verbrauchern sinnvolle **Anpassungen des Systems** vorgenommen. Diese Versuche erfolgten im Januar 2014. Mit den hieraus gewonnenen Veränderungen und Erkenntnissen wird bereits jetzt die Prozesssicherheit für alle Verbraucher deutlich verbessert.

Das Unternehmen besitzt darüber hinaus nun eine sehr gute **Kenntnis über die Situation im System und die Effekte von Änderungen am System**.

Die hierfür relevanten Versuche und Ergebnisse sind nachfolgend noch einmal aufgeführt:

- Eine maximale Öffnung der Klappe zum Trockner führt zu einem Zusammenbruch des Druckniveaus vor der Klappe und damit zu einer Umkehr der Luftförder-Richtung zu/von den Nebenaggregaten (aus Druckströmungen werden Zugströmungen).
- Betroffen davon sind das Tonsilo, der Vorwärmer und die Raumheizung. Die Frischluft-Zufuhr an der Zusatzheizung des Trockners ist davon ebenfalls betroffen, da hier gegen einen erhöhten Systemdruck aus der SL gefördert wird, sodass die Frischluft-Menge reduziert wird.
- Die vorgenommene praxisgerechte Lösung zur Gewährleistung der Versorgung aller Abnehmer mit Abwärme erfolgte, indem zunächst der statische Druck zum besonders sensiblen Tonsilo bei einem gut funktionierenden Ist-Zustand erfasst wurde. Hier muss insbesondere die Verklumpung von Ton bei Kondensation im Tonsilo prozesssicher vermieden werden.
- Anschließend wurde die Klappe zur Raumheizung geschlossen, wodurch in der Zuführung zum Tonsilo ein starker Druckanstieg von 180 Pa auf ca. 500 Pa eintrat. Der Frequenzumformer von Ofen 1 regelte daraufhin auf 57 Hz hoch, was die zuverlässige Sicherung des Solldrucks im Ofen bestätigte.
- Anschließend wurde die Klappe in der SL zum Trockner so weit geöffnet, bis an der Messstelle zum Tonsilo der vorher ermittelte Solldruck wieder erreicht war (200 Pa). Der Frequenzumformer von Ofen 1 regelte daraufhin wieder auf 50 Hz zurück. Die **Luftmenge zum Trockner** konnte durch dieses Öffnen der Klappe in der Sammelleitung zum Trockner **verdreifacht** werden.
- Um eine weitere Vereinfachung der Einstellungen des Systemdrucks zu gewährleisten, wurde am Verstellmechanismus der Klappe zum Trockner eine Druckanzeige angebracht. Diese wird sehr bald in Zusammenarbeit mit dem FGK eine Markierung beim Solldruck des Tonsilos erhalten. Bei Verstellungen der Klappe zum Trockner oder von Nebenaggregaten kann diese Markierung zur einfachen Einstellung des Solldrucks im System genutzt werden, sodass insbesondere die Versorgung des Tonsilos, aber auch aller anderen Verbraucher gewährleistet ist. Die Druckanzeige am Tonsilo dient dann lediglich zur Kontrolle für diesen sensiblen Abnehmer.

Dieser **Solldruck** gilt somit als Maß für alle Veränderungen in den Einstellungen, die die Abwärme in der **Sammelleitung** betreffen. Somit können in Zukunft notwendige Einstellungen wie z. B. die saisonbedingte Nutzung von Abwärme für die Raumbeheizung und die damit erforderliche Änderung durch Schließen der Klappe zum Trockner, oder

auch sonstige Änderungen im System wie das Zu- und Abschalten eines Ofens, oder die Zufuhr von Frischluft und Zuschalten der Zusatzbeheizung des Trockners, durch Regulieren dieser Klappe eingestellt und der notwendige Solldruck in der Sammelleitung bequem kontrolliert werden (Druckmessdose in Augenhöhe neben der Bedienung der Klappe zum Trockner).

Diese Regulierung kann damit auch von Mitarbeitern vorgenommen werden, die das komplexe System nicht bis ins Detail kennen. Eine entsprechende eindeutige und einfache **Arbeitsanweisung** wurde seitens FGK erstellt und wird an der Messstelle vor der Klappe zum Trockner angebracht.

Insgesamt ist durch die systematische Statuserfassung und die anschließend bereits durchgeführten Einzelmaßnahmen bereits eine sehr praxisgerechte Stabilisierung des Gesamtsystems gelungen. Dadurch, dass die Druckverhältnisse in den Endbereichen der Öfen konstant sind, Nebenaggregate auch bei Änderungen im System mit konstanten Druckmengen versorgt werden, kommen Änderungen der Luftmengen lediglich am Trockner zum Tragen. Diese können, wie bereits in der Vergangenheit, über den Einsatz der Zusatzheizung kompensiert werden, jedoch ohne Auswirkungen auf die übrigen Abnehmer im System in Kauf nehmen zu müssen.

6. Ausblick

Mögliches zusätzliches Einsparpotential im Bezug auf Energie und Ausschuss

Um die Wirtschaftlichkeit der denkbaren Maßnahmen beurteilen zu können, wäre die Quantifizierung der möglichen zusätzlichen Wärmemengen aus Ofen 3 und der Einsparungen bei optimiertem Trockner erforderlich. Dies ist nur durch weitere Messkampagnen und Betriebsversuche möglich.

Die bis heute durchgeführten Untersuchungen am Trockner haben aber bereits gezeigt, dass ohne den Einbau von Türen auf der Auslaufseite der Trocknerkanäle und der damit verbundenen Verhinderung der Ausströmverluste in den Schiebebühnenbereich, eine Trocknung ohne Zusatzenergie mit der vorhandenen Heißluftmenge nicht möglich erscheint. Um dieses Ziel zu erreichen, muss über die Investition zum Einbau der Türen am Trockner und die dadurch notwendige Anpassung des Be- und Entlade-systems entschieden werden. Der Effekt dieser Maßnahme auf den Energieverbrauch und die Ausschussquote kann erst nach erfolgtem Umbau sicher quantifiziert werden.

Die Höhe des voraussichtlichen Überschusses an Abwärme nach Ausschöpfung aller möglichen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz nach prozesssicherem Verbrauch an allen nachgeschalteten Anlagen ist derzeit nicht abschätzbar. Diese Quantifizierung sollte nach und nach durch schrittweise Veränderungen zunächst der wirtschaftlich einfachsten Maßnahmen etwa in folgender Reihenfolge ermöglicht werden:

Maßnahmen zur Anlagenoptimierung Trockner mit geringem Investitionsaufwand:

- Leitbleche im Trockner ausrichten
 - Undichtigkeiten am gemauerten Verteilerkanal auf dem Trockner dauerhaft abdichten
 - Heißluftdruck in der Leitung von Ofen 3 anheben. Derzeit keine Einspeisung wegen zu geringem Druck in die Sammelleitung möglich (evtl. Ventilator austauschen). Luft geht derzeit zum Vorwärmer.
 - Absaugmenge Heißluft aus Endkühlung Ofen 3 erhöhen. Mit neuem Ventilator über vorhandene Druckregelung durch einfache Einstellung durchführbar (heiße Schiebeluft drückt derzeit stärker als üblich aus dem Ofenausgang; diese Luftmenge steht dann nicht für die SL zur Verfügung).
 - Nassluftabsaugung im Trocknereinlauf weiter reduzieren. Beide Ventilatoren in der Drehzahl reduzieren (Einstellung Frequenzumformer) oder einen Ventilator abschalten. Durch Druckanstieg im Einfahrbereich des Trockners kann Falschlufteintritt beim Einlauf der Setzgestelle reduziert werden und die Luftfeuchte als auch die Temperatur automatisch erhöht werden.
 - Definierte Heißluftmenge in den Nassluftkanal einleiten (wird nach Reduzierung der abgesaugten Nassluftmenge (s.o.) möglich, da die Luftfeuchte im Einlaufbereich des Trockners an den Absaugstellen der Nassluft steigt). Dazu müsste das Thermoelement in der Nassluftaufheizung hinter den Einspeisepunkt Heißluft versetzt werden. Damit ist eine deutliche Reduzierung des Gasverbrauchs zur Nassluftaufheizung möglich. Diese Änderung muss allerdings sehr vorsichtig erprobt werden, da die HL für diese Trocknungsphase zunächst viel zu trocken und zu heiß ist. Diese Maßnahme könnte über eine Feuchtigkeitsregelung kontrolliert und gesteuert werden.
 - Luftmenge zum Vorwärmer durch Verstellung vorhandener Drosselklappen reduzieren und dem Durchlauftrockner zuführen.
-

Maßnahmen zur Anlagenoptimierung Trockner mit erhöhtem Investitionsaufwand:

- Einbau von Türen am Ende der Trockenkanäle mit Auslaufsteuerung einbauen (deutliche Verlängerung der Trocknungsstrecke mit erhöhter Temperatur und Reduzierung der Wärmeverluste am Kanalausgang).
- Einbau einer druckgesteuerten Drosselklappe in der Sammelleitung vor dem Frischluftregister am Durchlauftrockner (Verlegung der Druck-/Saugzone in die Nähe des Trockners im Nebenraum zur Realisierung einer kurzen Verbindungsleitung).
- Einbau einer Heißluftleitung mit gesteuerter Absperrklappe von der Sammelleitung vor der neuen Drosselklappe zum Formteil-Trockner im Nebenraum bzw. zum Ausfahrgeleis des Trockners (Nutzung der Überschusswärme am Wochenende).
- Umwälzventilatoren in den Trockenkanälen durch Schnellläufer mit erhöhter Luftleistung zur Erhöhung der Konvektion ersetzen.

Vorgenannte Maßnahmen dienen zur Trocknung ohne den Einsatz von Zusatzenergie beim Brand mit zwei Öfen und zur wirtschaftlichen Nutzung der Überschussenergie beim Brand von drei Öfen.

Maßnahmen zur Anlagenoptimierung Ofenwagen:

- Abdeckung aller Wagen mit einer 25 mm starken Hochtemperaturfaser mit Oberflächenbeschichtung.
- Einbau von zwei Lagen Calciumsilikat in die neuen Wagenaufbauten zur nochmaligen deutlichen Reduzierung des Wärmedurchgangs; Ermittlung der Druckfestigkeit im Dauerbetrieb.
- Erneuerung aller Wagen (jeweils mit einer oder, falls die Druckfestigkeit dann ausreichend ist, auch mit zwei Calciumsilikat-Lagen).

Maßnahmen zur Anlagenoptimierung Öfen:

- Keine Änderungen aus wirtschaftlichen Gründen vorgeschlagen.

Erst nach Durchführung einer Trockneroptimierung kann festgestellt werden, ob und wie viel weitere Abwärme aus der Sammelleitung als Überschuss für weitere Abnehmer zur Verfügung steht und ob sich der Einbau einer Leitung zur Nutzung dieser Überschusswärme rentiert.

Die durch die zusätzlichen Maßnahmen erzielbare weitere Verbesserung der Prozesssicherheit im gesamten System wird höchstwahrscheinlich zu einer weiteren Verringerung der Ausschussquoten führen. Diese ist jedoch derzeit nicht zu beziffern.

Die ersten Informationen zu den zukünftig möglichen zusätzlichen Einsparpotentialen sollen in mittelfristiger Zukunft durch eine zusätzliche Messkampagne und Betriebsversuche ermittelt werden. Zunächst wird geprüft, ob der vorhandene Heißluftventilator an Ofen 3 funktionsfähig ist.

Weiterhin soll zunächst geprüft werden, ob die vorhandene Verbindung von Nassluft zu Heißluft im Deckenbereich des Trockners – möglich durch teilweises Öffnen des dort vorhandenen Schiebers – (nach Reduktion der abgesaugten Nassluftmenge), eine Reduzierung des Energieeinsatzes für die Nassluftaufheizung ermöglicht. Dieses ist energetisch aufgrund des Betriebs aller drei Öfen und durch die bereits durchgeführte Erhöhung der Heißluftmenge nach Abschalten der Raumheizung möglich.

Neben der Energieeinsparung nach Durchführung der vorgeschlagenen Arbeiten (Maßnahmen mit geringem und erhöhten Investitionsaufwand) ist auch mit einer Verbesserung der Trocknungs- und Brennqualität zu rechnen. Damit kann die Ausschussmenge weiter reduziert werden und damit nicht nur die Materialkosten, sondern auch die Energiekosten weiter gesenkt werden.

Die Nutzung dann zusätzlich zur Verfügung stehender Abwärmemengen in anderen Bereichen der Produktionshalle kann dann je nach Wirtschaftlichkeit nachfolgend möglicherweise ebenfalls noch realisiert werden.

7. Nutzung der Ergebnisse im Branchen-Netzwerk „Umweltpartnerschaft Keramik Rheinland-Pfalz“

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden im Mai 2014 bei der dritten Veranstaltung des Netzwerkes „Umweltpartnerschaft Keramik Rheinland-Pfalz“ vom FGK einem interessierten Publikum präsentiert. Die Resonanz auf diese Informationen war besonders seitens der Industrievertreter sehr positiv. Mögliche einzelne Folgeprojekte bei verschiedenen Keramikproduzenten der Region mit ähnlichen Fragestellungen werden aktuell überprüft.

8. Schlusswort

Sämtliche Tätigkeiten für das angeführte Projekt wurden unter Berücksichtigung neuester wissenschaftlich-technischer Erkenntnisse sorgfältig nach bestem Wissen und Gewissen durchgeführt.



Prof. Dr. Ralf Diedel

Geschäftsführer

Höhr-Grenzhausen, den 03.11.2014/nor-kn



Dipl.-Min. Rita Knodt

Projektleiterin Umweltschutz

Anhang
