

Zwischenbericht 2005, 11. November 2005

Steigerung der Energieeffizienz in der Backsteinproduktion

Autor und Koautoren	Christian Gubler / Jörg-Peter Wurche
Institution	Ziegelei Fisibach AG
Adresse	Postfach – 8494 Bauma
Telefon, Internetadresse	052 / 397 40 40 / www.fbb.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	101176
Dauer des Projekts (von – bis)	1. März 2005 bis voraussichtlich 30. April 2006

ZUSAMMENFASSUNG

Es soll ein EDV Tool geschaffen werden, dass es ermöglicht, den Produktionsprozess für Backsteine in Abhängigkeit relevanter Parameter unter Berücksichtigung anlagenspezifischer Gegebenheiten zu simulieren, um daraus technische als auch betriebswirtschaftliche Optimierungsansätze abzuleiten.

Das Projektteam, bestehend aus den Herren Gubler (fachliche Unterstützung), Prof. Dr. Kopp (Experte Thermodynamik), Wurche (Projektleiter) hat zunächst gemeinsam mit den Industriefirmen Innovatherm Prof. Dr. Leisenberg GmbH (D, Spezialfirma für Backsteintrocknung) und Keller HCW GmbH (D, Spezialfirma für Tunnelofenbau) die gesamte Prozesskette analysiert. Parallel dazu wurde im Rahmen einer Semesterarbeit an der Hochschule für Technik (Rapperswil) ein Messkonzept erarbeitet und in der Ziegelei Fisibach (AG) intensiv getestet.

Die Prozesskette bei der Backsteinproduktion setzt sich aus den wesentlichen Hauptkomponenten: Rohstoffgewinnung/-aufbereitung – Formgebung – Trocknung – Brennen zusammen. Die Analyse hat ergeben, dass der Energieverbrauch der Ziegelproduktion primär vom Teilprozess Brennen (im Tunnelofen ablaufend) abhängt. Die Backsteine speichern nach ihrer Fertigstellung im Tunnelofen noch eine grosse Wärmemenge, durch deren maximale Rückgewinnung und prozessinterne Nutzung sich die Energieeffizienz der Gesamtanlage optimieren lässt. Weiterhin ist es vom Rohmaterial (Ton) abhängig, auf welchem Temperaturniveau (Brennkurve) das Brenngut den Tunnelofen passieren muss.

Aus der theoretischen Analyse konnten folgende wesentliche Erkenntnisse für die Erreichung einer optimalen Energieeffizienz gewonnen werden:

- Die Optimierung muss im Tunnelofen ansetzen. Der zweite wesentliche Wärmeverbraucher einer Ziegelproduktionsanlage, der Trockner, kann mit der Abwärme des Tunnelofens betrieben werden (Stand der Technik).
- Die Brennkurve (das Temperaturniveau in den verschiedenen Zonen des Tunnelofens) kann optimiert (Wahl minimaler Temperaturen) werden, wenn das Rohmaterial in gleichmässiger und bekannter Zusammensetzung zugeführt wird.
- Im Teillastbereich sollten die Betriebsparameter (Brennkurve, Vorschubgeschwindigkeit, Schubluftmenge) den Erfordernissen angepasst werden, um einen energieeffizienten Betrieb zu erreichen. Im Produktionsverbund FBB bestätigt sich die Vermutung, dass es notwendig ist, zukünftig die Produktionssteuerung so vorzunehmen, dass immer eine Anlage in Maximallast fährt, während die zweite Anlage (innerhalb des gleichen Absatzgebietes) auf Teillast optimiert werden sollte.
- Die im Trockner erforderliche Prozesswärme kann unter optimalen Verhältnissen nahezu vollständig aus der Abwärme des Tunnelofens zurück gewonnen werden.

Es hat sich gezeigt, dass bei der messtechnischen Untersuchung einer Ziegelei mit einer Vielzahl von Schwierigkeiten zu kämpfen ist, die im Rahmen einer Semesterarbeit nicht vollständig gelöst werden können. Die durchgeführten Messungen wurden einer Plausibilitätsprüfung (Massenbilanz) unterworfen, die zutage förderte, dass eine deutliche Verfeinerung des Messkonzeptes notwendig ist, um für das geplante Simulationsmodell belastbare Daten zu generieren.

Das Projektteam hat sich deswegen dazu entschlossen, ab Mitte Oktober 2005 Spezial-Messungen am Tunnelofen durch die Firma Keller HCW GmbH durchführen zu lassen. Die Ergebnisse dieser Analyse müssen ausgewertet werden, ehe ein allgemein gültiges Simulationsmodell erarbeitet werden kann. Aus diesem Grund kann sich der Abschluss des Forschungsprojektes leicht verzögern, was jedoch im Hinblick auf die Qualität der Ergebnisse als das kleinere Übel angesehen wird.

Zusammenfassung.....	2
Projektziele	4
Projektorganisation	6
Durchgeführte Arbeiten – Prozesszerlegung.....	7
Durchgeführte Arbeiten - Messungen der <i>Ziegelei Fisibach AG</i>	13
Ergebnisse – Konsequenzen für die nächsten Schritte	17
Anhang	18
Verzeichnis der Graphiken	19
Tabellenverzeichnis.....	20
Literaturverzeichnis	21

PROJEKTZIELE

Die Produktion von Backsteinen ist sehr energieintensiv. Vor dem Hintergrund stetig steigender Energiekosten nimmt die Maximierung der Energieeffizienz einen immer höheren Stellenwert ein.

Das feuchte, in Form gepresste Rohmaterial muss zunächst getrocknet und später bei hohen Temperaturen gebrannt werden. Der dafür erforderliche Tunnelofen wird mit fossilen Brennstoffen beheizt und dominiert den Energieverbrauch eines Ziegeleiwerkes. Stand der Technik ist es deshalb, die Abwärme des Tunnelofens über ein Wärmeverschiebungssystem in den Trocknungskammern zu nutzen, wobei der Einsparungsgrad ganz klar vom Grad der Prozesssynchronisation abhängt. Die Isolation des Tunnelofens spielt, wenngleich nicht vernachlässigbar, keine allzu dominierende Rolle. Viele weitere prozesstechnische Massnahmen, die hier nicht separat aufgelistet werden, spielen ebenfalls nur eine untergeordnete Rolle und es erscheint aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll, bei diesen anzusetzen.

Einen entscheidenden Einfluss auf den spezifischen Energieverbrauch der Backsteinproduktion hat weiterhin die Auslastung der Anlage und zwar speziell deren zeitlicher Verlauf. Das Ab- und Anfahren eines Tunnelofens dauert mehr als vier Wochen, ohne dass dieser Zeitraum zu 100% produktiv genutzt werden kann. Damit eine Abschaltung wirtschaftlich begründet werden kann, muss eine zuverlässige Prognose der Absatzentwicklung für die nächsten Monate unter Einbezug der Lagerkapazitäten und Ausweichproduktionsstätten erstellt werden. Gerade mittelständische Unternehmen müssen sich hier oftmals auf ihre Erfahrungen und den gesunden Menschenverstand verlassen. Auf der anderen Seite macht es aber insbesondere dann, wenn ein Unternehmen über mehr als eine Produktionslinie verfügt, definitiv Sinn, Abschaltungen ins Betriebskonzept einzubeziehen, denn mehrere schlecht ausgelastete Öfen weisen eine geringere Energieeffizienz auf, als eine gut ausgelastete Anlage.

Weil in der heutigen Zeit des sehr harten Wettbewerbes jedoch Fehleinschätzungen gravierende Nachteile mit sich bringen können, benötigt die Branche eine wissenschaftlich abgesicherte Optimierungsstrategie.

Im Rahmen dieses Projektes soll daher am Beispiel der *FBB Unternehmen* ein für mittelständische Schweizer Backsteinproduzenten anwendbares EDV-Tool erarbeitet werden, mit dessen Hilfe das Management die eigene Anlagentechnik objektiv hinsichtlich verborgener Optimierungspotenziale analysieren kann.

Das wesentliche Ziel des vorliegenden Projektes besteht darin, anhand der *Ziegelei Fisibach AG* und der *Ziegelei Ineichen AG* – beides Unternehmen der *FBB Gruppe* – aufzuzeigen, durch welche Massnahmen sich auf wirtschaftliche Weise die Energieeffizienz in der Backsteinproduktion erhöhen lässt.

Da in der Backsteinproduktion der Wärmebedarf primär mit fossilen Energieträgern gedeckt wird, geht mit der Erhöhung der Energieeffizienz zwangsläufig auch eine Senkung der CO₂-Intensität einher. Hauptstossrichtungen des Projektes sind:

- Optimierung der Energieeffizienz der einzelnen Teilprozesse
- Optimierung der Prozesssynchronisation
- Optimierung der Anlagenauslastung
- Methodik

Zur Erreichung der oben erwähnten Projektziele wird folgende Vorgehensweise gewählt:

BENCHMARK

Vorgängig wird durch Auswertung vorhandener Quellen (Desktop-Research) der international gültige Benchmark für den Wärmebedarf je Tonne Backstein (Energieeffizienz) ermittelt. Die für das Forschungsvorhaben ausgewählten Anlagen werden in Bezug auf den Benchmark bewertet.

OPTIMIERUNG ENERGIEEFFIZIENZ DER TEILPROZESSE

Gemeinsam mit der *Hochschule für Technik Rapperswil (HSR)* sollen die energetisch relevanten Glieder der Prozesskette (Trockenkammern, Tunnelofen, Anteil regenerativer Zusatzbrennstoff im Rohmaterial, etc.) hinsichtlich ihres Energiebedarfs im laufenden Betrieb und – wo dies relevant war – auch im reinen Leerlaufbetrieb analysiert werden.

Darauf aufbauend werden in einem nächsten Schritt technische Massnahmen vorgeschlagen, die den spezifischen Energieverbrauch bei laufendem Betrieb sowie denjenigen im Leerlauf senken. Dabei steht allein die technische Machbarkeit im Vordergrund. Erst zu einem späteren Zeitpunkt wird die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Massnahmen ermittelt und über die definitive Realisierung entschieden. Durch diese systematische Vorgehensweise soll vermieden werden, dass geeignete Massnahmen vorzeitig bzw. ungerechtfertigt ausgeschlossen werden.

Die Aktivitäten der Projektphase "Optimierung Energieeffizienz der Teilprozess" präsentieren sich zusammengefasst wie folgt:

- Systematische Zerlegung der Prozesskette
- Erstellung eines Messkonzeptes für die Aufnahme der spezifischen Energieverbräuche in den untersuchten Anlagen sowie Durchführung einer Messkampagne
- Auswertung der Messkampagne

MODELLIERUNG, SIMULATION UND ABLEITUNG EINER OPTIMALEN BETRIEBSFÜHRUNGSSTRATEGIE

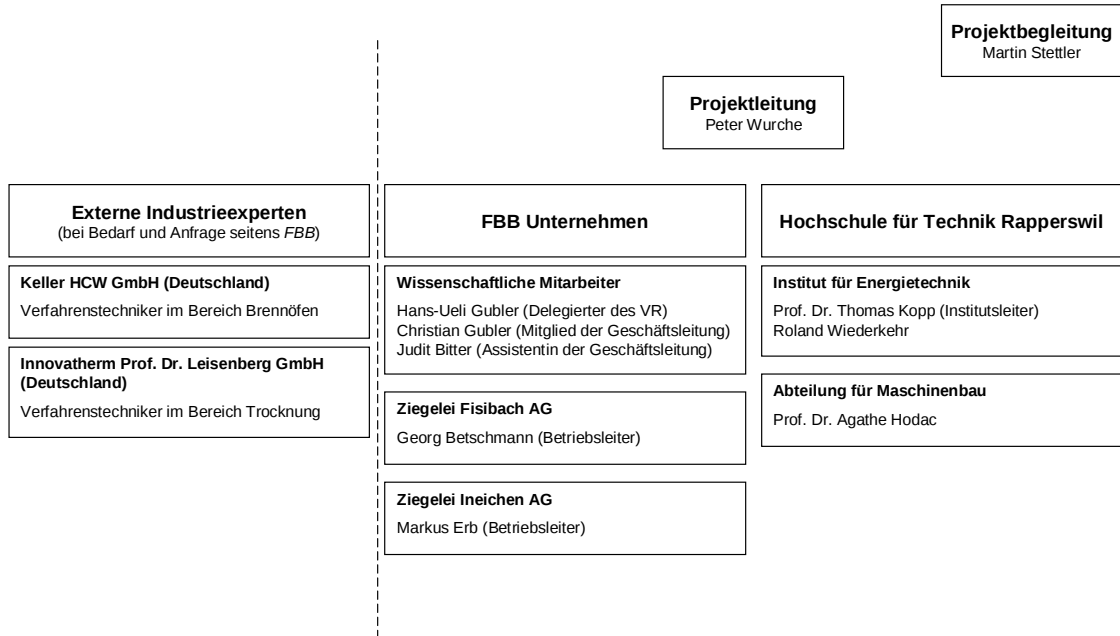
Nachdem im Projektschritt "Optimierung Energieeffizienz der Teilprozess" die wesentlichen Einflussparameter für den Energiebedarf ermittelt wurden, steht in diesem Projektschritt die Erstellung eines mathematischen Prognose- und Optimierungsmodell im Vordergrund. In diesem fliessen sowohl durch die Ziegeleien beeinflussbare Parameter, als auch extern gegebene Parameter ein.

Um ein letztlich gut handhabbares Modell generieren zu können, muss die theoretisch relevante Schar von Parametern auf ein vernünftiges Mass reduziert werden. Mit dem Prognosemodell soll es gelingen, die intern beeinflussbaren Parameter zukünftig so zu gestalten, dass jederzeit ein optimaler Energieverbrauch resultiert. Es wird dabei im speziellen die Auswirkung der zentralen Führung der zwei räumlich und rechtlich verbundenen Standorte miteinbezogen.

Die Aktivitäten der Projektphase "Modellierung, Simulation und Ableitung einer optimalen Betriebsführungsstrategie" präsentieren sich zusammengefasst wie folgt:

- Erstellung eines mathematischen Modells (Computersimulation) für die Prognose des Energiebedarfs unter Einbezug der relevanten intern beeinflussbaren sowie extern gegebenen Parameter.
- Verifikation des Modells anhand der Messdaten.
- Auf Simulationen abgestützter Entwurf eines Betriebskonzeptes, welches geeignet ist, bei zentraler Führung von mehr als einer Anlage den spezifischen Energieverbrauch möglichst dicht an den Optimalwert anzunähern.

PROJEKTORGANISATION



DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN – PROZESSZERLEGUNG

ALLGEMEINE DARSTELLUNG DES BACKSTEINPRODUKTIONSPROZESSES

ROHSTOFFGEWINNUNG

Die Gewinnung des Rohmaterials Lehm geschieht im Tagbau. Da aus ökonomischen wie auch ökologischen Gründen die Transportdistanz zwischen der Tongrube und dem Ziegelwerk kurz zu halten ist, liegen die Ziegeleien bei, oder in unmittelbarer Nähe der Gruben. Der eigentliche Abbau erfolgt mittels Radlader und Raupenbagger.

ROHSTOFFLAGER UND MISCHUNG

Der Rohstoff wird zur Zwischenlagerung in das "Sumpfhaus" oder den "Maukturm" gebracht. In diesen Lagerhallen wird der Ton zwecks Durchmischung horizontal mittels Förderbänder eingebracht.

ROHSTOFFAUFBEREITUNG

Die mechanische Aufbereitung, insbesondere das Mischen und Zerkleinern, erfolgt mit verschiedenen Walzvorgängen.

Gegebenfalls können so genannte Porosierungsmittel wie etwa Sägemehl, Papierschlamm oder Kohlenstaub beigemischt werden. Durch diese Zusätze soll unter anderem die Rissbildung während des Trocknungsprozesses, die Verminderung der im Tunnelofen einzusetzenden Brennstoffmenge, als auch die spezifischen Eigenschaften des Backsteines (Wärmedämmung, Schallschutz) positiv beeinflusst werden.

Um eine kompakte Formgebung des Rohlings zu ermöglichen, wird je nach Ziegelei mehr oder weniger Anmachwasser während der Rohstoffaufbereitung (zum Beispiel im Siebrundbesicker) zugegeben. Ziel ist es, sämtliche einzelne Tonteilchen von allen Seiten mit Wasser zu umschließen. "Der mittlere Anmachwassergehalt beträgt in der Ziegelindustrie ungefähr 25 %"¹.

FORMGEBUNG

Die Formgebung der Ziegel erfolgt mittels Strangpressen. Das Mundstück am Ende der Pressen ist für die Form, das Volumen und die Lochgebung verantwortlich und ist deshalb für jede Backsteinsorte verschieden. Die Formgebung beeinflusst die spezifischen Eigenschaften am stärksten. Einerseits bestimmt das Volumen bzw. die Form des Backsteins die Tragfähigkeit des Mauerwerks, andererseits beeinflusst der Lochgehalt die einander diametral entgegen gesetzten Eigenschaften Schall- und Wärmedämmung.

TROCKNEN

Für das unmittelbare Brennen nach der Formgebung ist der Wassergehalt des Rohlings zu hoch. Das enthaltende Wasser würde im bis zu 1'000 °C heißen Tunnelofen so schnell verdampfen, dass der Rohling reißen würde. Aus diesem Grund werden die feuchten Rohlinge vor dem Brennen bei einer Temperatur zwischen 70 - 180 °C getrocknet.

Der Gesamtenergiebedarf für den Trocknungsprozess ergibt sich aus der Summe folgender Komponenten:

- Energie zur Aufheizung der Backsteine
- Energie zur Aufheizung des Anmachwassers und des im angeführten Lehm bereits vorhandene Wassers

¹ Dr. Ing. F.R. Stupperich: Trocknungstechnik in der Ziegelindustrie, aus Ziegelei Technisches Jahrbuch, Jahrgang 1976 Seite 202

- Energie Verdampfung des Anmachwassers und des im angeführten Lehm bereits vorhandene Wassers
- Energie zur Kompensation der Wand- und Leitungsverluste in der Warmluftanlage. Der Leitungsverlust im Wärmeverschiebungssystem ist bei jeder Anlage sehr unterschiedlich. Der Wärmeverlust über die Trockneraussenwände beträgt ca. $1 \text{ kcal/m}^2, \text{K}$ ($4.2 \text{ kJ/m}^2, \text{K}$).

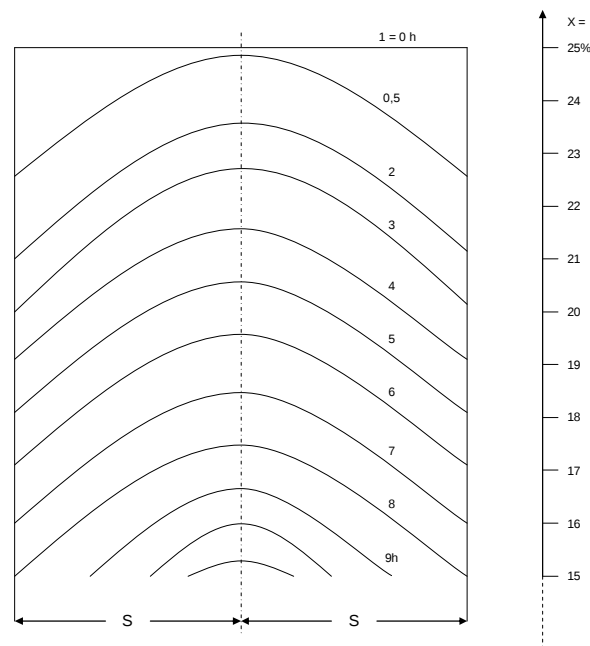
Der spezifische Wärmebedarf ist somit eine Funktion aus den Komponenten:

- Anzahl der Kammern
- Mischkammertemperatur
- Feuchte der Rohlinge
- Verteilung der zugeführten Luft im Trockner
- Steinart

Die Steinart beeinflusst insbesondere die unten beschriebene Kapillarwirkung (Vollziegel sind demnach am schwierigsten zu trocknen).

Während des Trocknungsprozesses treten keine chemischen Reaktionen auf. Es wird lediglich das im angeführten Lehm bereits vorhandene Wasser sowie das im Lehmaufbereitungsprozess beigefügte Anmachwasser dem Rohling entzogen.

Zu Trocknungsbeginn ist der Wassergehalt gleichmässig im ganzen Formling verteilt. Sobald die Verdunstung eingesetzt hat, bewirken Kapillarkräfte das stetige Nachströmen des im Rohling enthaltenen Wassers. Erst nach einer so genannten Anlaufzeit stellt sich unter der Bedingung einer konstanten Trocknungsgeschwindigkeit an der Rohlingsoberfläche ein unten dargestelltes parabelförmiges Wassergehaltsprofil über die Formlingsstärke ein, welches sich mit zunehmender Trocknungszeit relativ gleichmässig nach unten schiebt.



Graphik 1 Verlauf des Wassergehaltes X als Funktion des halben Durchmessers und der Zeit

Nach einer gewissen Zeit sind die Kapillarkräfte, die im Innern des Formlings wirken, nicht mehr in der Lage, für einen gleichmässigen Wassertransport aus dem Rohlingsinnern an die Oberfläche zu sorgen. Dies führt dazu, dass die Oberfläche nicht mehr feucht bleibt. Der Wassergehalt, bei dem der Übergang von feuchter zu trockner Oberfläche stattfindet, wird als Knickpunkt bezeichnet und bezeichnet den Übergang vom so genannten ersten Trocknungsabschnitt zum zweiten Trocknungsabschnitt. Dieser zeichnet sich durch Überlagerung von Wasserleitung und Dampfdiffusion

in den äusseren Schichten des Rohlings aus. Wird die Trocknung unendlich lange durchgeführt, so stellt sich schliesslich ein Gleichgewichtszustand des Wassers innerhalb des Steines ein².

Durch die Reduktion des Wasseranteils rücken die Tonteilchen näher zusammen, bis sie sich gegenseitig berühren. Dieses Näherücken wird als Schwinden bezeichnet. Aus dem Schwinden resultiert somit einerseits ein Volumenverlust andererseits jedoch eine Verfestigung des Rohlings. Durch den oben erwähnten Wasserunterschied zwischen der Oberfläche des Rohlings und dem Gutinneren, läuft der Volumenverlust innerhalb eines einzelnen Rohlings nicht parallel ab (so genannte Schwindungsdifferenzen), welche eine Ursache für die Rissgefährdung sein können. Je langsamer man trocknet, desto kleiner wird das Risiko der Rissgefährdung. Der Wassergehaltsunterschied während des Trocknens bildet somit den limitierenden Zeitfaktor im Trocknungsprozess.

Die Trockenausblühung bildet eine weitere Gefahr beim Trocknen. Verursacht wird diese durch Calciumsulfat, welches im Anmachwasser gelöst ist. Während des Trocknens wird wie oben erwähnt das Wasser in Richtung Rohlingsoberfläche transportiert. Durch Abgabe des Wassers an den Trocknungsraum entsteht eine Konzentration an Salz-Ionen nahe der Rohlingsoberfläche und somit kommt es zu einem Ungleichgewicht des Salz-Ionengehaltes des Wassers innerhalb des Rohlings. Das Ungleichgewicht bewirkt eine Rückdiffusion der Salz-Ionen in das Rohlingsinnere. Mit dem Fortschreiten des Trocknungsprozesses steht dem Wasser jedoch immer weniger Weg innerhalb des Rohlings zur Verfügung. Da die Trocknungsgeschwindigkeit konstant bleibt, tritt bei diesen verbleibenden Wegen eine sehr hohe Strömungsgeschwindigkeit Richtung Rohlingsoberfläche auf. Dies erschwert die Rückdiffusion der Calcium-Ionen. Durch die verhinderte Rückdiffusion bilden sich Salzablagerungen an den Austrittsöffnungen der verbliebenen Poren.

Der Verlauf des Trocknungsprozesses kann sehr gut mit der so genannten Trocknungskurve dargestellt werden. Dabei wird die sich in der Kammer einstellende Temperatur über der Zeit aufgetragen. Zunächst steigt die Kammertemperatur kontinuierlich an, bis das Trockengut und das in ihm eingelagerte Wasser auf die Solltemperatur gebracht wurden. Dann beginnt an der Oberfläche die Wasserverdampfung, bei der physikalisch gesehen, die Verdampfungsenthalpie aufzuwenden ist. Solange der beschriebene Prozess der Wasserverdampfung stattfindet, bei dem aus dem Inneren des Backsteins jeweils genau die Wassermenge nach diffundiert, die an der Oberfläche verdampft wird, bleibt die Temperatur in etwa konstant. Man spricht vom Beharrungszustand. Kommt dieser Verdampfungsprozess zum Erliegen, gilt der Backstein als technisch trocken. Physikalisch macht sich dies dadurch bemerkbar, dass die Kammertemperatur ansteigen würde, wenn die Energiezufuhr nicht durch eine Temperaturregelung gedrosselt würde.

Im Rahmen der Benchmark-Ermittlung konnten einige typische Kennzahlen für Trockenkammern herausgefunden werden³:

- Das Nassgewicht des Formlings beträgt ca. 135 % des Produktgewichtes (nach dem Brennen). Der Gewichtsverlust geht zu 20 % - 22 % auf das Anmachwasser zurück, während der Rest dem so genannten Glühverlust, also den im Verlauf des Produktionsprozesses verbrennenden Bestandteilen, zuzurechnen ist.
- Der tatsächliche Wärmebedarf beträgt in durchschnittlichen Trocknern ca. 4186 kJ/kg (1000 kcal/kg). Daraus lässt sich ein ungefährender Wirkungsgrad von 62 % ableiten. Manche perfekt optimierte Anlagen kommen auf Werte von bis zu 80 %. Dabei ist zu beachten, dass Trockner in Ziegeleien in der Regel mit Abwärme aus dem Tunnelofen betrieben werden können und die Zufuhr weiterer Energie in den Trockner, beispielsweise mittels fossiler Brennstoffe nur in geringem Masse erforderlich ist. In den seltensten Fällen wird also der Wirkungsgrad des Trockners für eine Anlagenoptimierung bestimmend sein. Häufig ist es sogar so, dass der Trockner gar nicht das gesamte Energieangebot der Abluft aus dem Tunnelofen verwerten kann, da er zum Beispiel wegen der Wochenendruhe nicht mehr im Beharrungszustand verweilt und die Temperaturregelung daher die Wärmezufuhr drosselt.

Nach dem Trocknen bleibt in den Backsteinen eine Restfeuchte von ca. 2% zurück.

² Dr. Ing. F.R. Stupperich: Trocknungstechnik in der Ziegelindustrie, aus Ziegelei Technisches Jahrbuch, Jahrgang 1976 Seite 191 bis 253

³ Quelle: Mündliche Angaben der Firma Innovatherm / Herr Karl Thoma

BRENNEN

Die eigentliche Umwandlung des Rohlings in einen gebrauchsfähigen Backstein geschieht durch das Brennen im Tunnelofen. Hier findet bei ca. 1'000°C eine chemische Entwässerung und ein chemisch-mineralischer Teilschmelzprozess statt.

Beim Brennprozess treten als Mineralumbildungen einerseits der Quarzsprung (bei ca. 573 °C) sowie der Sinterungsprozess des Rohstoffes ein. Eine exakte Darstellung der chemischen Vorgänge bildet keinen Bestandteil dieser Arbeit und soll daher nur in den Grundzügen in Form einer Tabelle mit den wichtigsten Reaktionen in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt werden.

Temperatur	Beschreibung der chemischen Reaktion
150 - 450°C	Bei diesen Temperaturen entweichen die Schwelgase, welche im Ton allein oder im zugefügten Porosierungsmittel vorhanden sind
400°C	Pyritzersetzung ($\text{FeS}_2 \rightarrow \text{S} + \text{Fe}_2\text{O}_3$)
600 - 800°C	Der restliche Kohlenstoff wird oxidiert
Ab 700°C	Entweicht das Fluor aus dem Rohstoff Entweicht das chemisch gebundene Wasser
Ab 800°C	Sulfatzersetzung (sofern im Rohstoff vorhanden) sowie Entsäuerung und Abspaltung des CO_2 aus dem Kalk (CaCO_3)

Tabelle 1 Chemische Reaktionen beim Brennprozess

Der Backstein muss im Tunnelofen verschiedene Temperaturzonen für einen vom Rohmaterial und der gewünschten Qualität des Endproduktes abhängigen Zeitraum verweilen. Um dies zu erreichen wird in den verschiedenen Zonen des Tunnelofens ein definiertes Temperaturniveau eingeregelt. Man spricht von der Brennkurve (Temperaturverlauf über die Tunnelofenlänge). Die palettierten Rohlinge werden in gleichmässigen Intervallen um jeweils einen Tunnelofenwagen weiter geschoben. Dadurch ergibt sich die korrekte Verweilzeit.

Nach Abschluss des Brennprozesses sind sowohl das Brenngut als auch der Tunnelofenwagen stark aufgeheizt und speichern somit Energie. Im Gegenstrom wird diese Wärme an die so genannte Schubluft – vom Tunnelofenende her eingeblasene Frischluft aus der Umgebung - abgegeben. Die so aufgewärmte Frischluft wird im Regelfall über ein Wärmeverschiebungssystem an den Trockner geleitet, da eine vollständige Nutzung im System Tunnelofen normalerweise nicht möglich ist.

Im Rahmen der Benchmark Ermittlung konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Es ist sehr schwierig, pauschale Aussagen für die korrekte Brennkurve und die optimale Vorschubgeschwindigkeit der Tunnelofenwagen zu machen, da eine Vielzahl auch baulicher Einflussgrößen zu berücksichtigen sind.
- Bis vor wenigen Jahren wurden die meisten Tunnelöfen von den zuständigen Werkleitern derart betrieben, dass der geforderte Produktausstoss in der gewünschten Qualität sichergestellt werden konnte. Eine Optimierung des Energieverbrauchs hatte eher untergeordnete Priorität. Durch die Energiepreissteigerungen in den letzten Jahren rückt aber auch dieser Aspekt in den Vordergrund.
- Neuerdings gelten in Deutschland Grenzwerte für die Zuführung von externer Energie im Tunnelofen:⁴
 - Hintermauerziegel: 1176 kJ/kg (281 kcal/kg)
 - Vormauerziegel: 1988 kJ/kg (475 kcal/kg) :⁵

⁴ Quelle: Mündliche Angaben der Firma Keller HCW

⁵ Quelle: Mündliche Angaben der Firma Keller HCW

- Für den Energiebedarf beim Brennen können folgende Anhaltswerte gefunden werden

Teilprozess	Energiebedarf
Gefügeumwandlung	80 – 130 kJ/kg
Ausfahrverluste	130 kJ/kg
Rauchgasverluste	330 – 420 kJ/kg
Transmissionsverluste Aussenwand	130 kJ/kg
In Kühlluft abgeführte Restwärme des gebrannten Backstein	630 – 840 kJ/kg
Kalkumwandlung	15 kJ/kg und Massenprozent bezogen auf den getrockneten Rohling
Energiefreisetzung durch Kohlenstoff	- 335 kJ/kg und Massenprozent bezogen auf den getrockneten Rohling

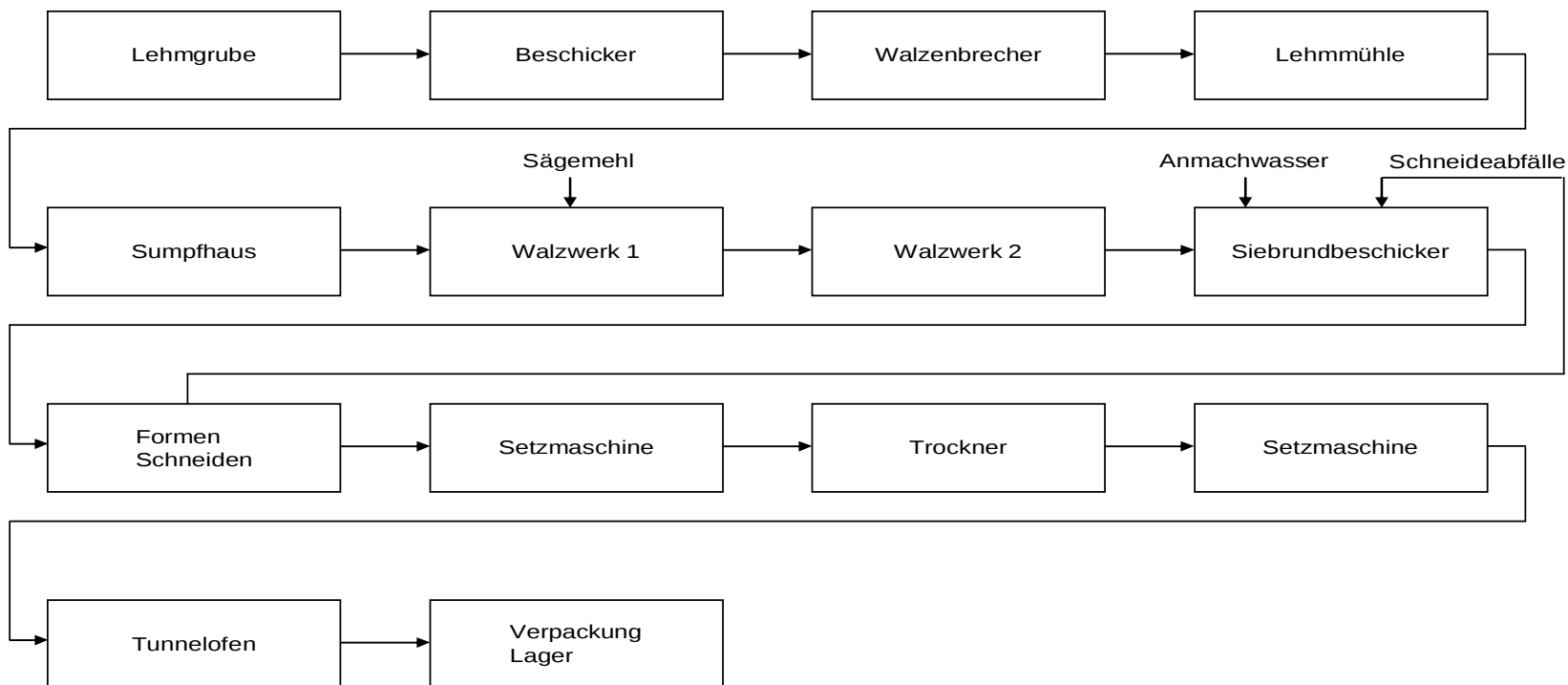
Damit wird klar, dass der korrekte, theoretische Energiebedarf (und damit indirekt auch die Brennkurve) überhaupt nur angegeben werden kann, wenn eine Analyse des Rohmaterials vorliegt.

- Der Energiebedarf eines Tunnelofens kann bei Teillast gesenkt werden, wenn Brennkurve, Schubgeschwindigkeit und Schubluftmenge angepasst werden. Dies kann zukünftig möglicherweise mit Hilfe komplexer Prozessleittechnik technisch realisiert werden. In älteren Anlagen mit einfacher Temperaturregelung und Wahl der Schubgeschwindigkeit durch das Bedienpersonal ist es äusserst schwierig, die optimalen Betriebsparameter zu finden.
- Die spezifische Wärmekapazität von Backsteinen liegt bei ungefähr 0.92 kJ/kg,K (0.22 kcal/kg,K).⁶
- Die mit dem Porosierungsmittel zugeführte Enthalpie kann im Regelfall nur zu 50 % genutzt werden, da sie im vorderen Bereich des Tunnelofens freigesetzt wird und bedingt durch die ofeninternen Strömungsverhältnisse relativ direkt in den Rauchgasen dem Abgaskamin zugeführt wird.
- Je nach chemischer Beschaffenheit, kommt es im Rohling zu einem unterschiedlichen Energiebedarf in den einzelnen Zonen des Tunnelofens. So können das Porosierungsmittel und der eingelagerte Kohlenstoff temporär zu einem exothermen Verhalten führen, das bei falscher Wahl von Brennkurve und Vorschubgeschwindigkeit im Extremfall zu einer unzulässig hohen Temperaturentwicklung und damit Zerstörung des Rohlings führen würde. Das ideale Porosierungsmittel wäre Braunkohle, die allerdings nur eine mässige Porosierung des Backsteins bewirkt.

⁶ Quelle: Mündliche Angaben der Firma Innovatherm / Herr Karl Thoma

BACKSTEINPRODUKTIONSPROZESS DER ZIEGELEI FISIBACH AG

Der gesamte Produktionsprozess der Ziegelei Fisibach AG lässt sich graphisch wie folgt darstellen:



KONSEQUENZEN AUS DEM BACKSTEINPRODUKTIONSPROZESS FÜR ENERGIEEINSPARPOTENTIALE

Die folgenden zwei Hauptkonsequenzen lassen sich vom bisher Gesagten ableiten:

- Von der im ganzen Backsteinprozess eingesetzten Energie werden mehr als 90 % durch fossile Energieträger zugeführt, wobei es sich beim Hauptverbraucher um den Tunnelofen handelt. Auf Grund dieser Tatsache sind bei dieser Energieart, und nicht etwa im Stromverbrauch, Energieeinsparungsmassnahmen anzusetzen.
- Nicht der Trocknungsprozess ist der bestimmende Faktor für die Menge an heisser Tunnelofenabluft, sondern der optimierte Tunnelofen bestimmt die maximale Abluft, welche dem Trocknungsprozess zugeführt werden kann. Zusätzlich benötigte Wärme (Energie) im Trocknungsprozess kann ökonomisch und ökologisch günstiger mit einem Zusatzbrenner im Trockner zugeführt werden.

DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN - MESSUNGEN DER ZIEGELEI FISIBACH AG

Bei der Projektplanung war vor der Durchführung von Messungen als erster Schritt die Erarbeitung einer fundierten Theorie durch Auswertung vorhandener Quellen (Desktop Research), sowie die Ermittlung von international gültigen Vergleichswerten für den Wärmebedarf je Tonne Backstein (Energieeffizienz) vorgesehen. Aufgrund zeitlicher Restriktionen betreffend der für das Projekt vorgesehenen Semesterarbeiten der Hochschule für Technik Rapperswil (HSR), und um ein besseres Verständnis für die Technik entwickeln zu können, wurde entschieden, zuerst Messungen durchzuführen. Im Rahmen dieses Zwischenberichtes wird daher auf die ausführliche Darstellung der theoretischen Zusammenhänge verzichtet und der Fokus auf die praktischen Erfahrungen gelegt, die bei der messtechnischen Analyse der Ziegelei Fisibach, mit den Mitteln der HSR, gewonnen wurden. Die folgenden Berichtsabschnitte stützen sich daher weitestgehend auf die Semesterarbeit des Studierenden Roland Wiederkehr [1].

Mit den Messungen wird das Ziel verfolgt, ein- und ausgehende Energieströme in den Teilsystemen Tunnelofen und Trockner zu bestimmen, um sie später mit den im Rahmen des Benchmark und theoretisch ermittelten Erwartungswerten zu vergleichen. Die Plausibilität der Messungen wird bei diesem Ansatz anhand von Energiebilanzen geprüft. Zunächst wurden also die Systemgrenzen der beiden Teilsysteme definiert. Anschliessend die Energieströme, die diese Systemgrenzen passieren. Die für Bestimmung der Energieströme erforderlichen Messgrössen sind:

- Massenstrom (Backsteinmenge)
- Temperatur
- Gasgeschwindigkeit bei gasförmigen Energieströmen
- Gasfeuchte bei gasförmigen Energieströmen
- Geometrische Abmessungen von Transportkanälen für gasförmige Energieströme
- Drücke

MESSUNGEN

Die Messungen wurden an zwei verschiedenen Tagen durchgeführt. Abweichungen der Ergebnisse von der Realität können aus den folgenden Gründen nicht ausgeschlossen werden:

- Es wurde nur über einen kleinen Zeitraum gemessen
- Die Messgeräte wurden von Hand positioniert
- Die Messorte wurden sequentiell und nicht parallel gemessen

Wenn genauere Daten gemessen werden sollten, müssten die Messgeräte fest vor Ort angebracht werden sowie die Messungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden. Nur aus derart erhobenen Werten kann man einen Mittelwert ableiten, welcher repräsentativ für die Anlage ist.

Für die jeweiligen Messungen wurden die folgenden Geräte eingesetzt:

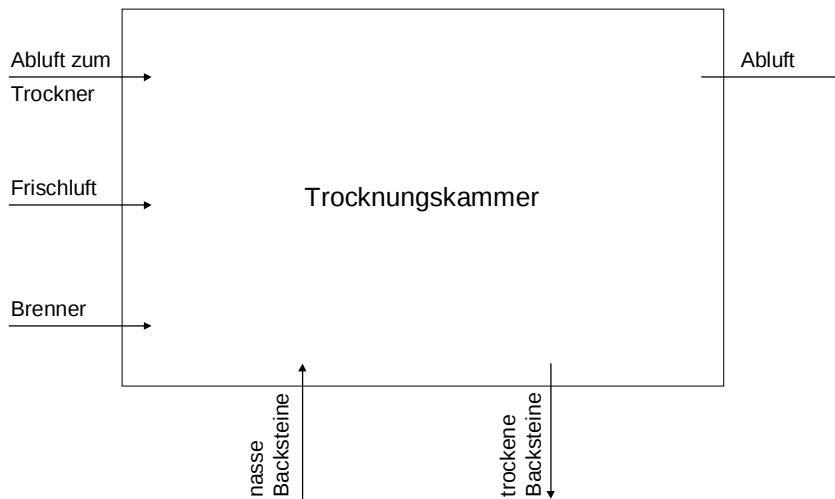
Temperatur in den Luftkanälen:	Thermoelement Typ K - Thermocoax/Thermocontrol – Bereich von -200°C bis 1000°C – Genauigkeit der Klasse 2 sowie Fluke 50D K/J Thermometer
Wandtemperaturen:	Infrared Thermometer THI-500
Geschwindigkeit:	Flügelradanemometer
Relative Feuchte:	Hygrolog-D - Rotronic AG

BILANZGEBIETE DER MESSUNGEN

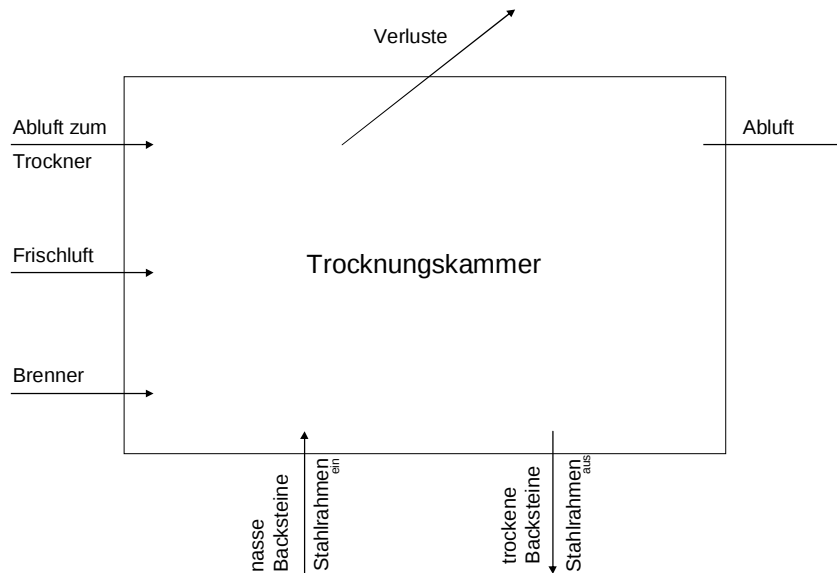
TROCKNUNGSPROZESS

Die Fisibach AG verwendet zum Trocknen der Backsteine 6 Doppeltrocknungskammern. Die eingehenden und ausgehenden Ströme wurden erfasst und ausgewertet. Im Folgenden werden die genauen Bilanzgebiete der gemessenen Ströme schematisch aufgezeigt.

Das Bilanzgebiet der Trocknungskammern wird von folgenden Massen- und Energieströmen überschritten.



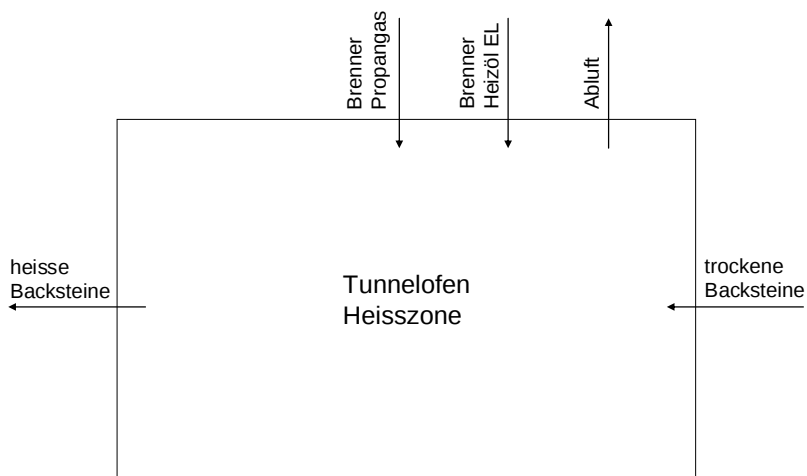
Graphik 2 Bilanzgebiet der Massenbilanz Trocknungskammer



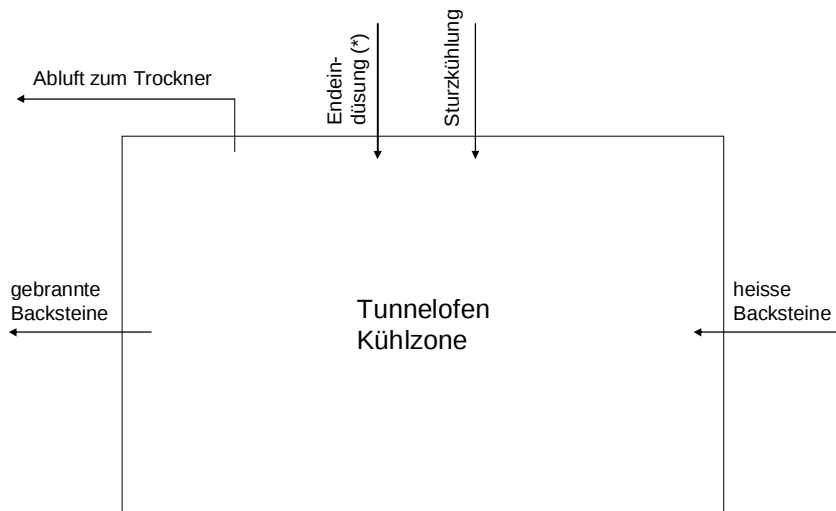
Graphik 3 Bilanzgebiet der Energiebilanz Trocknungskammer

TUNNELOFEN

Um den Tunnelofen zu untersuchen, wurde er in einem ersten Schritt in die zwei Teilbereiche Heiss- und Kühlzone unterteilt. Der Trennschnitt liegt im Bereich der Sturzkühlung. Es wurde angenommen, dass kein Wasser im Bereich der Kühlzone verdampft, somit die ganze Menge an verdampftem Wasser in der Heisszone aus dem Backgestein getrieben wird. Ebenfalls wurde ein Bilanzgebiet über den gesamten Tunnelofen gezogen.



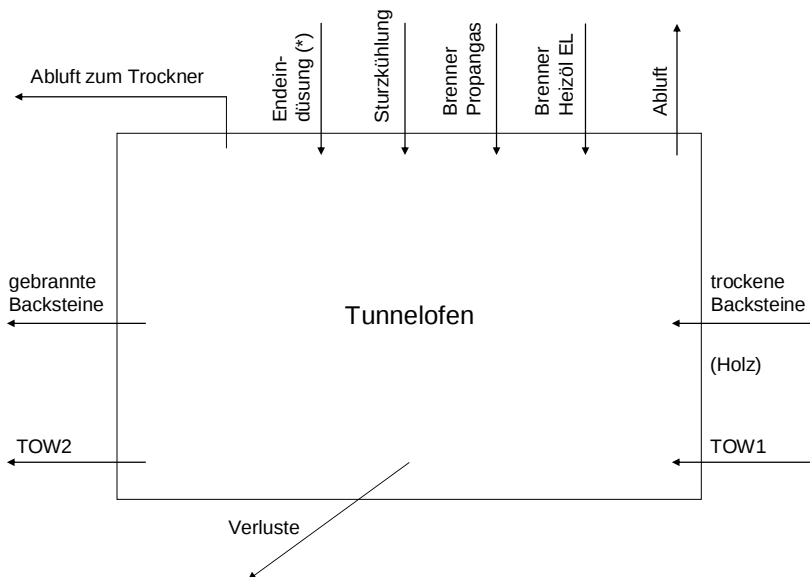
Graphik 4 Bilanzgebebiet Massenbilanz Heisszone Tunnelofen



* Dieser Massenstrom wurde nicht berücksichtigt

Graphik 5 Bilanzgebiet Massenbilanz Kühlzone des Tunnelofens

Für die Berechnung der Massenbilanz über den gesamten Tunnelofen wurden die zwei Massenbilanzen Heiss- und Kühlzone zusammengefasst. Das Schema besteht somit aus der Summe der oben gezeigten Bilanzen.



* Dieser Energiestrom wurde nicht berücksichtigt

Graphik 6 Bilanzgebiet Energiebilanz Tunnelofens

ERGEBNISSE – KONSEQUENZEN FÜR DIE NÄCHSTEN SCHRITTE

Der bisherige Projektverlauf war stark geprägt von den Bemühungen, ein geeignetes – also kostengünstiges und einfach anzuwendendes - Messkonzept für die Schweizer Backsteinindustrie zu entwickeln und zu testen. Dies im Hinblick auf die Notwendigkeit, für das geplante Simulationsmodell, anlagenspezifische Daten ermitteln zu können. Im Rahmen einer an der HSR durchgeführten Semesterarbeit wurden Tunnelofen und Trockner der Ziegelei Fisibach AG insgesamt dreimal messtechnisch erfasst. Schon der erste Schritt der Plausibilitätsprüfung, nämlich die Überprüfung der Massenbilanzen, hat jedoch gezeigt, dass das verwendete Messkonzept keine hinreichende Genauigkeit liefert. Die Gründe dafür sind vielschichtig, wie sich aus der parallelen theoretischen Annäherung an die Thematik gezeigt hat.

Zunächst einmal ist die Annahme stationärer Verhältnisse in Frage zu stellen. Da die einzelnen Messgrößen nur sequentiell aufgenommen werden konnten, können Fehler durch Schwankungen im Prozessablauf hervorgerufen sein. Eine weitere wesentliche Fehlerquelle dürften Falschlufteinbrüche darstellen. An verschiedenen Stellen der Systeme sind solche zu vermuten. Auch spielt bei der Bestimmung von Geschwindigkeiten mit dem verwendeten Messgerät die Anordnung im Strömungskanal eine wichtige Rolle. Teilweise sind optimale Messstellen schlichtweg aus Sicherheitsgründen nicht zugänglich.

Die Ableitung allgemein gültiger Daten für die Anlage Fisibach ist aufgrund der bisher durchgeführten drei Messungen noch schwierig.

Das Projektteam konnte durch die bisher durchgeführten Forschungsarbeiten seinen Wissenshorizont bereits erheblich erweitern und den Tunnelofen als die für den Energieverbrauch einer Ziegelei massgeblichen Anlagenteil verifizieren. Es wurde beschlossen, sich im weiteren Projektverlauf auf dessen Optimierung zu konzentrieren. Es ist beabsichtigt, im Herbst 2005 an der HSR eine Diplomarbeit zu vergeben, die sich primär damit auseinandersetzen soll, welchen Energieverbrauch die vorhandenen Anlagen theoretisch aufweisen müssten. Parallel dazu wird eine Fachfirma damit beauftragt, die theoretische Brennkurve für das Material der Lehmgrube Fisibach zu bestimmen und die tatsächlich gefahrene Kurve mit Spezialmessgeräten (im Durchlauf durch den Tunnelofen) zu ermitteln. Die ursprünglich für diesen Zeitraum vorgesehene Erarbeitung des mathematischen Modells muss zunächst aus Ressourcengründen etwas zurück gestellt werden. Diese Entscheidung fiel zugunsten einer sauberen Aufarbeitung der gewonnenen theoretischen und praktischen Erkenntnisse.

ANHANG

VERZEICHNIS DER GRAPHIKEN

Graphik 1	Verlauf des Wassergehaltes X als Funktion des halben Durchmessers und der Zeit	8
Graphik 2	Bilanzgebiet der Massenbilanz Trocknungskammer	14
Graphik 3	Bilanzgebiet der Energiebilanz Trocknungskammer	15
Graphik 4	Bilanzgebiet Massenbilanz Heisszone Tunnelofen	15
Graphik 5	Bilanzgebiet Massenbilanz Kühlzone des Tunnelofens	16
Graphik 6	Bilanzgebiet Energiebilanz Tunnelofens	16

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Chemische Reaktionen beim Brennprozess
-----------	--

LITERATURVERZEICHNIS

[1] Wiederkehr, Roland: Energieeffizienz der Backsteinproduktion, Semesterarbeit im Sommersemester 2005 am Institut für Energietechnik der Hochschule für Technik in Rapperswil