



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

STEIGERUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ IN DER BACK- STEINPRODUKTION

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Jörg-Peter Wurche, Kiefer + Partners AG

Weberstrasse 10, 8004 Zürich | peter.wurche@kieferpartners.ch | www.kieferpartners.ch

Christian Gubler, Ziegelei Fisibach AG

Postfach, 8494 Bauma | christian.gubler@fbb.ch | www.fbb.ch

Impressum

Datum: 31. August 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Verfahrenstechnische Prozesse VTP

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Bereichsleiter, martin.stettler@bfe.admin.ch

Projektnummer: 101176

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | Zusammenfassung | 3 |
| 2 | Abstract | 4 |
| 3 | Ausgangslage | 5 |
| 4 | Ziele der Arbeit | 6 |
| 4.1 | Erstes Hauptziel | 6 |
| 4.2 | Zweites Hauptziel | 6 |
| 4.3 | Drittes Hauptziel | 6 |
| 5 | Grundlagen | 7 |
| 5.1 | Der Backsteinproduktionsprozess | 7 |
| 5.1.1 | Rohstoffgewinnung | 7 |
| 5.1.2 | Rohstofflager und Mischung | 7 |
| 5.1.3 | Rohstoffaufbereitung | 7 |
| 5.1.4 | Formgebung | 8 |
| 5.1.5 | Trocknen | 9 |
| 5.1.6 | Brennen | 11 |
| 6 | Energiehaushalt Tunnelofen | 14 |
| 6.1 | Energiebilanz | 14 |
| 6.1.1 | Fossil zugeführter Energiestrom (Brennstoffwärme) | 17 |
| 6.1.2 | Reaktionsenergie / Brennkurve | 17 |
| 6.1.3 | Wärmeverluste Ofenhülle | 19 |
| 6.1.4 | Energiestrom zum Trockner | 19 |
| 6.1.5 | Abgasenergie | 19 |
| 6.1.6 | Sturzkühlung | 20 |
| 6.1.7 | Wärmetransport mit Tunnelofenwagen | 20 |
| 6.1.8 | Wärmetransport mit Brenngut | 20 |
| 7 | Messtechnische Untersuchung Tunnelofen | 21 |
| 7.1 | Untersuchungen Wiederkehr | 21 |
| 7.2 | Messungen Firma Keller HCW | 22 |
| 7.3 | Vergleichende Analyse der Messungen | 23 |
| 7.4 | Fazit Messungen | 23 |
| 8 | Entwicklung Simulationsumgebung | 24 |
| 9 | Überlegungen bezüglich der prozesstechnischen Einsparpotenziale | 25 |
| 9.1 | Optimierung Wärmeverbund Tunnelofen - Trockner | 25 |
| 9.2 | Anpassung Brennkurve an Auslastung | 25 |
| 9.3 | Abschaltung einzelner Produktionslinien innerhalb eines Marktgebiets | 26 |
| 9.4 | Anpassung Luftdurchsatz an theoretischen Wert | 26 |
| 9.5 | Wahl des Porosierungsmittels | 26 |
| 10 | Gesamtbeurteilung und Schlussfolgerungen | 28 |
| 11 | Messungen HSR | 31 |
| 11.1 | Zielsetzung | 31 |
| 11.2 | Messungen | 31 |
| 11.3 | Messanleitung und Bemerkungen | 31 |
| 11.3.1 | Bemerkung zum Messtag vom 10.06.2005 | 31 |
| 11.3.2 | Oberflächentemperatur | 31 |
| 11.3.3 | Feuchtigkeit | 32 |
| 11.3.4 | Geschwindigkeit und Temperatur | 32 |
| 11.3.5 | Messpositionen am Trockner | 32 |
| 11.3.6 | Messpositionen am Tunnelofen | 39 |
| 11.4 | Bilanzgebiete der Messungen | 42 |
| 11.4.1 | Trocknungsprozess | 42 |
| 11.4.2 | Tunnelofen | 43 |
| 11.5 | Messergebnisse | 44 |
| 11.5.1 | Trockner | 44 |
| 11.5.2 | Tunnelofen | 49 |
| 11.6 | Auswertung der Messergebnisse | 58 |
| 11.6.1 | Trockner | 58 |
| 11.6.2 | Tunnelofen | 60 |

| | | |
|--------|--|----|
| 11.7 | Messdaten vom 12.05.2005 - Massenbilanz (I) | 62 |
| 11.7.1 | Tunnelofen | 63 |
| 11.7.2 | Trockner | 63 |
| 11.8 | Messdaten vom 10.06.2005 - Massenbilanz (II) und (III) | 64 |
| 11.8.1 | Tunnelofen | 65 |
| 11.8.2 | Trockner | 66 |
| 12 | Verzeichnis der Graphiken | 70 |
| 13 | Verzeichnis der Bilder | 71 |
| 14 | Verzeichnis der Tabellen | 72 |
| 15 | Verzeichnis der Formeln | 73 |
| 16 | Literaturverzeichnis | 74 |

1 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojektes wurden drei Hauptziele verfolgt:

- Erarbeitung eines möglichst allgemeinen Konzepts für die Analyse älterer Backsteinproduktionsanlagen hinsichtlich noch nicht genutzter Einsparpotenziale;
- Untersuchung der Fragestellung, inwieweit sich durch einen Anlagenverbund im gleichen Marktgebiet ein energetischer Nutzen ergibt;
- Schaffung eines EDV-Tools, mit dessen Hilfe die energetischen Auswirkungen von effizienzsteigernden Massnahmen vorgängig abgeschätzt werden können.

Um die Ziele erreichen zu können, war eine theoretische Auseinandersetzung mit den Prozessen erforderlich. Um die theoretischen Überlegungen absichern zu können wurde nach einem auf die Bedürfnisse der mittelständisch geprägten Schweizer Backsteinindustrie abgestimmten Messkonzept gesucht. Beide Aufgabengebiete wurden massgeblich durch Studierende der HSR Hochschule für Technik Rapperswil bearbeitet.

Der Brennprozess von Backsteinen lässt sich in der Theorie auf instationäre Wärmeleitungsvorgänge zurückführen. Deren mathematische Modellierung ist äusserst kompliziert und während des Projektes aus zeitlichen Gründen nur im Ansatz gelungen. Breiten Raum nahmen die Bemühungen ein, für die Verifikation theoretischer Aussagen ein überzeugendes Messkonzept zu entwickeln. Auch dabei stiess das Projektteam auf erhebliche praktische Schwierigkeiten. Die wesentliche Erkenntnis bei dieser Teilaufgabe bestand darin, dass die gut reproduzierbare Messung von Gasgeschwindigkeiten, aus denen sich Energieströme errechnen lassen in existierenden Produktionsanlagen der Backsteinindustrie absolut nicht trivial ist. Insgesamt konnten daher die formulierten Projektziele nicht erreicht werden. Allerdings wurden durch die intensive Auseinandersetzung mit der Thematik sehr wertvolle Optimierungsansätze gefunden, die erhebliche Einsparpotenziale versprechen. Es wird empfohlen, die diesbezüglichen Forschungsaktivitäten in die folgende Richtung zu lenken:

- Hinterfragung des heute gängigen Wärmeverbunds Tunnelofen – Trockner und Entwicklung von Analyseinstrumenten, mit denen es vor Ort einfach möglich wird, zu überprüfen, ob tatsächlich nur die unbedingt notwendige Wärmemenge vom Tunnelofen in den Trockner fliesst.
- Untersuchung, ob sich die Nachteile bei der energetisch vorzuziehenden Nutzung der Abwärme des Tunnelofens zur Verbrennungsluftvorwärmung mit moderner Prozessleittechnik neutralisieren lassen.

2 ABSTRACT

The main goals of this research project were:

- Definition of a universal valid concept for the systematic analysis of potentials for reduction of the energy consumption of older production devices for bricks.
- Discussion of the question, in how far the coordination of production devices, that deliver into one and the same geographical segmented market, results in an energetically advantage;
- Creation of an IT-tool, that enables the simulation of the effect, new actions in order to save energy provide.

One important element of the project was the theoretical penetration of the production processes. In order to underpin theoretical conclusions it became necessary, to develop a concept for measuring energy flows, that takes into consideration the needs of the small scaled Swiss industry for brickwork. Both mentioned tasks were mainly handled by students of technical sciences at the HSR Hochschule für Technik Rapperswil (Switzerland).

From the theoretical point of view the burning-process of brickwork bases on unsteady heat transport mechanism. Due to the fact that the mathematical modelling of this is very complicate the project team succeeded only partly on this field. The most time was consumed by developing a concept for repeatable measures. These tasks also offered many practical problems to the project team. It is absolutely not trivial, to measure in existing older production devices velocities of gases, which are essential for the calculation of energy flows. Generally speaking it was not possible, to cope with the project-goals. On the other hand due to the intensive penetration of the processes, some important approaches for energetically optimization in the small scaled brickwork industry could be found. The project-team advices the federal administration of Switzerland, to put more emphasis on the following aspects:

- Analysis of the today broadly used heat-pipe (tunnel furnace / dryer) and the development of tools, which enable an easy on-site-check, whether really only the necessary mount of heat is transferred between the two components of the installation.
- Research concerning the question, whether the disadvantages incorporated in the internal use of recovered heat in the tunnel furnace can be neutralised by modern process control systems.

3 AUSGANGSLAGE

Die Produktion von Backsteinen erfolgt im Rahmen eines sehr energieintensiven Prozesses. Das feuchte, in Form gepresste Rohmaterial (aufbereiteter Lehm) muss zunächst getrocknet und später bei hohen Temperaturen (um die 1100°C) über etliche Stunden gebrannt werden. Der dafür erforderliche Brennofen wird vor allem mit fossilen Brennstoffen beheizt. Da die für die Trocknung der Rohlinge benötigte Wärme in der Regel über ein Wärmeverschiebungssystem aus der Abwärme des Brennofens (häufig auch aufgrund der Bauform als Tunnelofen bezeichnet) bereitgestellt wird, dominiert die für den Ofen benötigte Primärenergie den gesamten Energiebedarf der Backsteinproduktion. Technisch bedingt lässt sich der Energiebedarf eines älteren Tunnelofens im Teillastzustand in adäquater Weise kaum reduzieren. Es muss daher festgehalten werden, dass Produktionsanlagen, die nicht bei maximaler Auslastung arbeiten, tendenziell einen schlechteren Wirkungsgrad aufweisen. Betriebswirtschaftlich kann dies durch eine effektive Marktbearbeitung abgefangen werden. Volkswirtschaftlich jedoch resultiert aus dieser Tatsache in Zeiten schwacher Nachfrage ein – bisweilen deutlich - über den technischen Notwendigkeiten liegender Energiebedarf. Weil in der Schweizer Backsteinindustrie durchaus eine grössere Anzahl älterer Tunnelöfen betrieben wird und Neubauten sich in der Regel wirtschaftlich nicht darstellen lassen, sind daher aus Sicht des Bundes Massnahmen gefragt, wie sich unter diesen Randbedingungen Energie einsparen lässt.

Die Schweizer Backsteinindustrie ist stark mittelständisch geprägt. Allerdings ist in den letzten Jahren eine starke Konzentration zu beobachten, die dazu geführt hat, dass sich die vor 20 Jahren noch weit verbreitete Situation – viele Einzelanlagen – fundamental gewandelt hat. Heute beläuft sich die Anzahl der in der Schweiz produzierenden Unternehmen auf ungefähr 10. Meistens befinden sich dadurch zwei, drei oder auch vier Anlagen in der Verantwortung eines Unternehmens. Teilweise bedienen die so unternehmerisch gebündelten Produktionskapazitäten sogar sich überschneidende Marktgebiete. Marktgebiete können in diesem Zusammenhang als geografische Räume definiert werden, in denen der Transport zwischen Produktionsanlage und Verbrauchsort noch wirtschaftlich ist. Auch die Unternehmensgruppe FBB verfügt mit den Anlagen in Fisibach und Inwil über zwei, das gleiche Marktgebiet beliefernde, Produktionslinien. Eine Möglichkeit, gesamtschweizerisch Energie einzusparen ist aufgrund dieser Ausgangslage in der gezielten Abschaltung einzelner Anlagen während nachfrageschwacher Zeiten zu vermuten. Das Ab- und Anfahren eines Tunnelofens dauert jedoch mehrere Wochen, wobei dieser Zeitraum nicht zu 100% produktiv genutzt werden kann. Wenn ein Unternehmen über mehr als eine Produktionslinie verfügt, macht es insofern Sinn, Abschaltungen ins Betriebskonzept einzubeziehen. Denn mehrere schlecht ausgelastete Öfen weisen gesamthaft eine geringere Energieeffizienz auf, als eine gut ausgelastete Anlage. Da jedoch Fehleinschätzungen in der Zeit des sehr harten Wettbewerbes gravierende Konsequenzen mit sich bringen können, benötigt die Branche eine wissenschaftlich abgesicherte Optimierungsstrategie. Damit eine Abschaltung wirtschaftlich begründet werden kann, muss somit eine zuverlässige Prognose der Absatzentwicklung für die nächsten Monate unter Einbezug der Lagerkapazitäten und Ausweichproduktionsstätten erstellt werden. Gerade mittelständische Unternehmen müssen sich dabei heute oftmals auf ihre Erfahrungen und den gesunden Menschenverstand verlassen, weil die Beschäftigung eines eigens für die permanente Betriebsoptimierung zuständigen Ingenieurs in der Regel aus wirtschaftlichen Gründen nicht darstellbar ist.

Eine zweite Chance, in der Backsteinindustrie Energie einzusparen wird darin gesehen, dass die oftmals älteren Anlagen, historisch bedingt, eher auf eine maximale Qualität des Produktes als auf einen möglichst geringen Energiebedarf optimiert sind. Das Potenzial wird darin vermutet, die Brennparameter soweit in Richtung eines niedrigeren Energiebedarfs zu verändern, dass die Produktqualität gerade noch den Marktanforderungen genügt. An dieser Schraube zu drehen, ist allerdings erst dann möglich, wenn die Konsequenzen einer veränderten Prozessführung möglichst genau abgeschätzt werden können. Dies bedingt eine tiefgehende theoretische Durchdringung der Prozesse, wie sie heute nur bei international agierenden Grosskonzernen und da auch nur teilweise auszumachen ist.

Das hier beschriebene Forschungsvorhaben wurde mit genau dieser doppelten Zielsetzung gestartet. Von vorneherein war klar, dass im Rahmen der zur Verfügung stehenden finanziellen Ressourcen nur dann brauchbare Resultate erzielt werden können, wenn massiv auf die Mitarbeit von Hochschulen gesetzt wird. Das Projekt wurde deswegen so strukturiert, dass Studenten der HSR Hochschule für Technik Rapperswil den Hauptanteil der erforderlichen Überlegungen angestellt haben. Begleitet wurden diese Aktivitäten vom Steuerungsteam, bestehend aus einem Projektleiter, dem wissenschaftlichen Fachbegleiter sowie dem Industriepartner, der ganz wesentliche Unterstützung in vielen Detailspekten geboten hat.

Im vorliegenden Bericht haben die Autoren die von zwei Studenten der HSR im Rahmen von insgesamt drei Semester- und Diplomarbeiten gewonnenen Erkenntnisse aufgegriffen und interpretiert.

4 ZIELE DER ARBEIT

4.1 ERSTES HAUPTZIEL

Im Rahmen dieses Projektes soll ein für Backsteinproduzenten anwendbares Konzept erarbeitet werden, mit dessen Hilfe das Management die eigene Anlagentechnik objektiv hinsichtlich verborgener Optimierungspotenziale analysieren kann. Die theoretischen Überlegungen sollen anschliessend an den konkreten Beispielen der Ziegelei Fisibach AG (5467 Fisibach) und der Ziegelei Ineichen AG (6034 Inwil) – beides Unternehmen der FBB Gruppe – verifiziert werden. Darauf basierend werden Vorschläge erarbeitet, durch welche Massnahmen sich auf wirtschaftliche Weise die Energieeffizienz in der Backsteinproduktion erhöhen lässt.

4.2 ZWEITES HAUPTZIEL

Die oben genannten Anlagen bedienen betriebswirtschaftlich gesehen ein und dasselbe Marktgebiet und können daher als eine Produktionseinheit betrachtet werden. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieses Projektes auch die Frage näher untersucht, welcher energetische Nutzen sich aus einem solchen Anlagenverbund ergeben könnte.

4.3 DRITTES HAUPTZIEL

Da in der Backsteinproduktion der Wärmebedarf primär aus fossilen Energieträgern erzeugt wird, geht mit der Erhöhung der Energieeffizienz zwangsläufig auch eine Senkung der CO₂-Intensität einher. Um die erarbeiteten Erkenntnisse auf eine möglichst grosse Anzahl von Unternehmen übertragen zu können, besteht das dritte Hauptziel der Arbeiten darin, ein einfach zu bedienendes EDV-Tool zu schaffen, mit dem energetische Auswirkungen der identifizierten Massnahmen durch das Management abgeschätzt werden können und somit eine Entscheidungsgrundlage zugunsten niedrigerer spezifischer Energieverbräuche zu schaffen.

5 GRUNDLAGEN

5.1 DER BACKSTEINPRODUKTIONSPROZESS

5.1.1 Rohstoffgewinnung

Rohmaterialien für die Herstellung von Backsteinprodukten sind die in der Natur vorkommenden Tone, die zusammen mit Mergel und Sanden das Grundmaterial Lehm ergeben. Die Eigenschaften sind je nach Gehalt an Kalk und Eisenhydroxyden verschieden (Farbe, Struktur des Fertigproduktes).

Die Gewinnung der Rohmaterialien erfolgt maschinell mittels Radlader und Raupenbagger im Tagbau (Darstellung der Lehmgrube Fisibach im unten aufgeführten Bild). Die aus verschiedenen Schichten oder Gruben stammenden Komponenten werden in die Ziegelei transportiert und dort dosiert der Aufbereitung zugeführt.

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.



Bild 1 Lehmgrube

5.1.2 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.



Bild 2 Sumpfhaus

5.1.3 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 das Rohmaterial plastisch und verformbar zu machen, wird je nach Ziegelei mehr oder weniger Anmachwasser in Form von Wasser oder Dampf 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.



Bild 3 Siebrundbesicker

5.1.4 Formgebung

Die Formgebung der Backsteine erfolgt mittels Strangpressen, in welcher Ton mit hohem Druck durch ein Mundstück gepresst wird. Dieses ist für die Form, die Grösse und die Lochgebung bestimmend und deshalb für jede Backsteinsorte unterschiedlich. Die Formgebung beeinflusst die spezifischen Eigenschaften am stärksten. Die Art der Lochung ist entscheidend für den Verwendungszweck des Backsteins. Stark gelochte Backsteine mit komplex angeordneten Schlitzlöchern dienen der Wärmedämmung, wenig gelochte Backsteine sind für schalldämmende Wände oder statisch beanspruchte Bauteile wesentlich.



Bild 4 Schneckepresse



Bild 5 Harfenschneider

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

5.1.5 Trocknen

Für das unmittelbare Brennen nach der Formgebung ist der Wassergehalt des Rohlings zu hoch. Das enthaltene 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 von rund 90 °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
- 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 kcal/m²K.

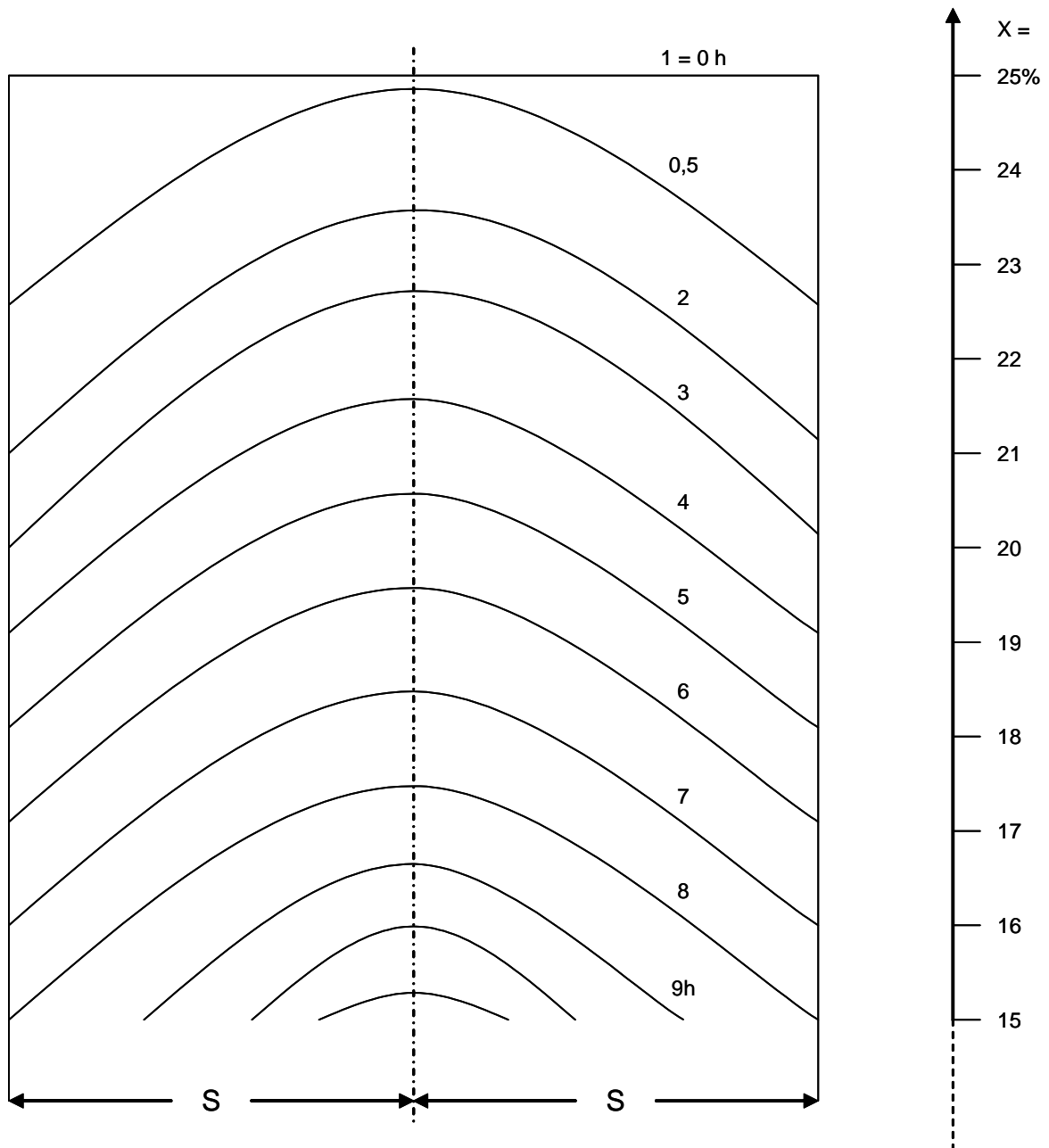
Der spezifische Wärmebedarf ist somit eine Funktion aus den Komponenten:

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

Die Steinart beeinflusst insbesondere die unten beschriebene Kapillarwirkung (Backsteine mit einem sehr geringen Lochanteil 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 trockener 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),

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

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 Trockenausblüfung 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.

5.1.6 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 Quarzprung (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.

3

Mündliche Angaben von Herrn Karl Thoma (Firma Innovatherm)

| Temperatur | Beschreibung der chemischen Reaktion |
|-------------|--|
| 150 - 450°C | Bei diesen Temperaturen entweichen die Schwelgase aus der Organik, welche im Ton allein oder im zugefügten Porosierungsmittel vorhanden sind |
| 400°C | Pyritzerersetzung ($\text{FeS}_2 \rightarrow \text{S} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) |
| 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 | Sulfatzerersetzung (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

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 |

Tabelle 2 Energiebedarf der Teilprozesse

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.

⁴ Mündliche Angaben der Firma Keller HCW

⁵ Mündliche Angaben der Firma Keller HCW

- 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.

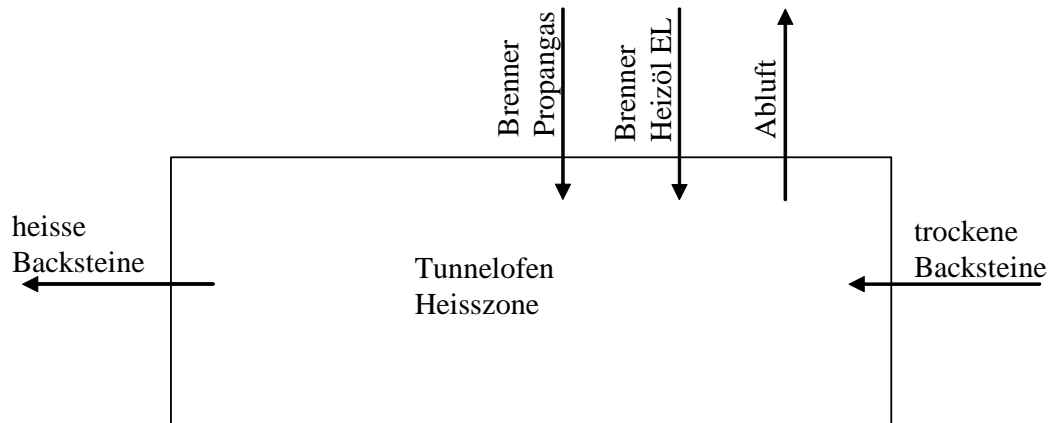
⁶ Mündliche Angaben von Herrn Karl Thoma (Firma Innovatherm)

6 ENERGIEHAUSHALT TUNNELOFEN

Bereits in den vorherigen Kapiteln wurde ausführlich dargelegt, dass der Wärmebedarf im Brenn- oder Tunnelofen den Energieverbrauch in der Backsteinproduktion klar dominiert. Um den Energiehaushalt des Brennofens analysieren zu können, ist die Definition eines geeigneten Bilanzgebietes und die dafür geltende Energiebilanzgleichung unabdingbare Voraussetzung. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde am IET der HSR von Studenten ein theoretischer Bilanzierungsansatz erarbeitet, welcher hier vorgestellt wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Modell am konkreten Beispiel der Ziegelei Fisi-bach entwickelt wurde. Das Grundprinzip darf aber für die schweizerische Backsteinindustrie als allgemeingültig bezeichnet werden. In diesem Bericht erfolgt die Darstellung der Zusammenhänge rein qualitativ, da es um die Entwicklung eines Modells geht. In den zugrunde liegenden Semester- und Diplomarbeiten der Herren Wiederkehr (Semester⁷- sowie Diplomarbeit⁸) und Ulrich⁹ (Semesterarbeit) finden sich die detaillierten mathematischen Herleitungen und auch quantitative Aussagen bezüglich der untersuchten Anlage.

6.1 ENERGIEBILANZ

Der Tunnelofen besteht nach Wiederkehr¹⁰ aus einer Heisszone und einer Kühlzone.



Graphik 2 Bilanzgebiet Heisszone Tunnelofen

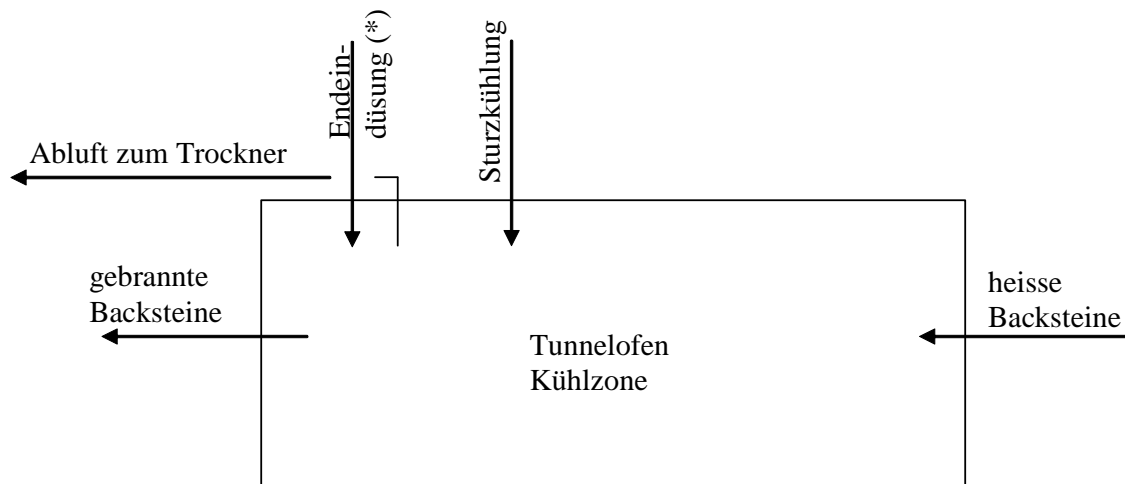
In der Heisszone wird der Brennstoff (bei der untersuchten Anlage sind es konkret Propangas und Heizöl extra leicht) zusammen mit der Verbrennungsluft zugeführt und verbrannt. Die Verbrennungsluftgebläse fördern allerdings nur einen Teil der in der Heisszone benötigten Luft. Der weitaus grössere Teil kommt über das im Endbereich des Tunnelofens (der Kühlzone) angeordnete Schubluftgebläse. Das Rauchgas strömt dann im Gegenstrom entlang des Brenngutes und verlässt das System über den Abgaskamin (Abluft). Dieser ist am Eingang des Ofens angebracht. Die Strömung wird sowohl durch den Saugzugventilator als auch die Verbrennungsluftgebläse aufrechterhalten. Die heissen Backsteine verlassen die Heisszone mit der gespeicherten Wärmeenergie und treten in die Kühlzone ein.

⁷ Roland Wiederkehr (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion, 11. Juli 2005

⁸ Roland Wiederkehr (Diplomarbeit): Energie- und CO₂-Einsparung in einer Ziegelei durch Optimierung der Betriebsabläufe, 16. Dezember 2005

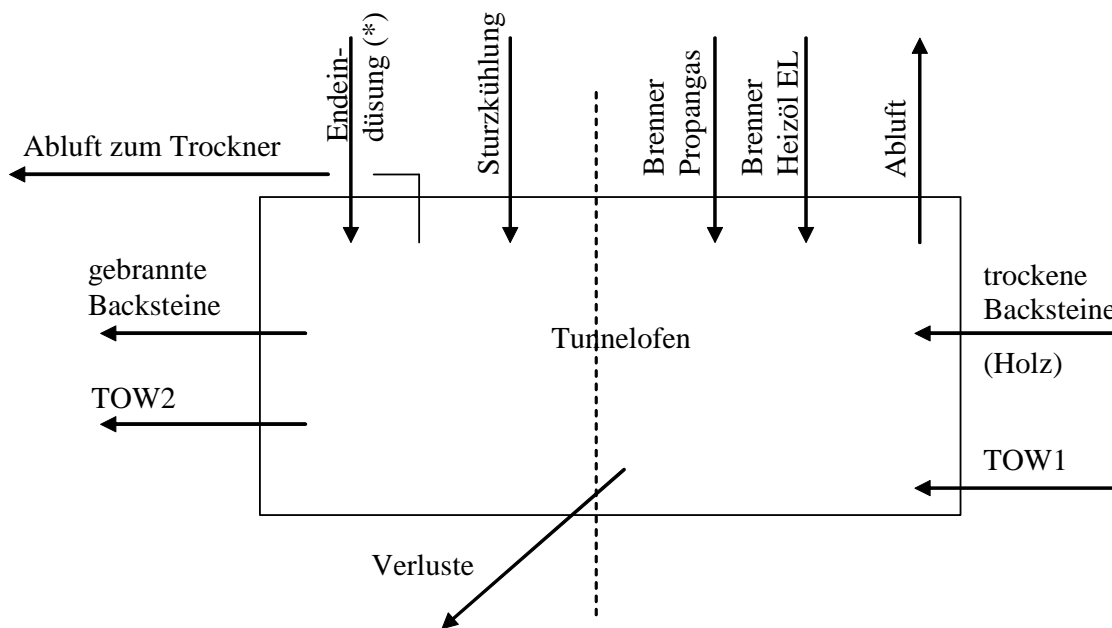
⁹ Daniel Ulrich (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion (2), 07. Juli 2006

¹⁰ Roland Wiederkehr (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion, 11. Juli 2005



Graphik 3 Bilanzgebiet Kühlzone Tunnelofen (*) dieser Massenstrom wurde nicht berücksichtigt)

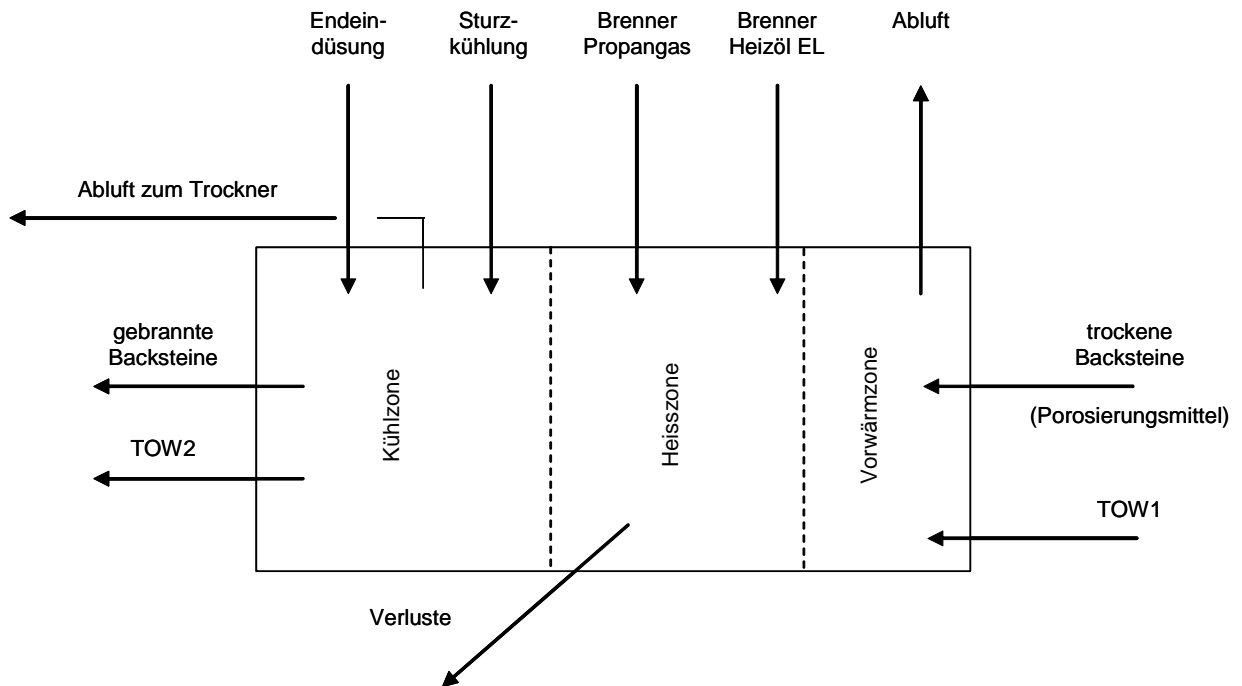
Die Funktion der Kühlzone besteht darin, die im Backstein sowie dem Tunnelofenwagen gespeicherte Wärme an die aus der Sturzkühlung stammende Luft zu übertragen. Die so erhitzte Luft wird anschließend über ein Wärmeverschiebesystem dem Trockner zugänglich gemacht (Abluft zum Trockner). Die gebrannten Backsteine verlassen den Ofen mit nur noch geringer Temperatur (handwarm). Der Tunnelofen wird also nach Wiederkehr¹¹ in zwei verfahrenstechnisch zu unterscheidende Wärmetauscher aufgeteilt. Insgesamt ergeben sich für das Bilanzgebiet Tunnelofen demnach die folgenden Energieströme.



Graphik 4 Bilanzgebiet Tunnelofen (*) dieser Energiestrom wurde nicht berücksichtigt)

¹¹ Roland Wiederkehr (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion, 11. Juli 2005 – Seite 33

Gemäss Firma Keller¹² sollte das Modell um eine dritte Zone, der Vorwärmzone, verfeinert werden. Die Vorwärmzone stellt denjenigen Teil der Heisszone (nach Wiederkehr¹³) dar, in der kein Wärmeeintrag über Brenner in das Bilanzgebiet erfolgt. Das Zonenmodell präsentiert sich dann schematisch wie folgt:



Graphik 5 Bilanzmodell Tunnelofen (Ziegelei Fisibach)

Rein qualitativ lässt sich basierend auf Überlegungen von Wiederkehr¹⁴ und Ulrich¹⁵ über das System Tunnelofen folgende Bilanzgleichung aufstellen:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{fossil_zu} + \dot{H}_{Sturzkühlung} + \dot{H}_{TOW_ein} + \dot{H}_{Brenngut_ein} \\ = \\ \dot{H}_{reakt} + \dot{Q}_{Wand} + \dot{H}_{Trockner} + \dot{H}_{Abgas} + \dot{H}_{TOW_aus} + \dot{H}_{Brenngut_aus} \end{aligned}$$

Formel 1 Bilanzgleichung Tunnelofen

mit:

- \dot{H}_{fossil_zu} = zuzuführender fossiler Energiestrom
- \dot{H}_{reakt} = für die bleibende Strukturveränderung des Brennguts erforderlicher Energiestrom
- \dot{Q}_{Wand} = Wärmeverlust über die Ofenhülle (Konvektion und Strahlung)
- $\dot{H}_{Trockner}$ = Energiestrom zum Trockner
- $\dot{H}_{Sturzkühlung}$ = Energiestrom der zuzuführenden Kühlluft für die Sturzkühlung
- \dot{H}_{Abgas} = Energiestrom der Abgase

¹² Mündliche Angaben der Firma Keller HCW

¹³ Roland Wiederkehr (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion, 11. Juli 2005 – Seite 33

¹⁴ Roland Wiederkehr (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion, 11. Juli 2005 / Roland Wiederkehr (Diplomarbeit): Energie- und CO₂-Einsparung in einer Ziegelei durch Optimierung der Betriebsabläufe, 11. Dezember 2005

¹⁵ Daniel Ulrich (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion (2), 07. Juli 2006

| | |
|---------------------------|---|
| \dot{H}_{TOW_aus} | = mit dem Tunnelofenwagen aus dem System gelangender Energiestrom |
| \dot{H}_{TOW_ein} | = mit dem Tunnelofenwagen in das System gelangender Energiestrom |
| $\dot{H}_{Brenngut_aus}$ | = mit dem Brenngut aus dem System gelangender Energiestrom |
| $\dot{H}_{Brenngut_ein}$ | = mit dem Brenngut in das System gelangender Energiestrom |

Die einzelnen Terme der Bilanzgleichung werden nun näher beschrieben.

6.1.1 Fossil zugeführter Energiestrom (Brennstoffwärme)

Dieser Teilterm der Bilanzgleichung stellt die Energiemenge dar, welche dem Brennprozess in der Heisszone des Tunnelofens zugeführt werden muss, damit der lediglich getrocknete Backsteinrohling letztlich als stabiler Mauerstein die Anlage verlässt. In der Regel wird diese Energie in den Schweizer Anlagen durch fossile Brennstoffe aufgebracht. In Fisibach kommen konkret Propangas und Heizöl extra leicht zum Einsatz. Wiederkehr¹⁶ berücksichtigt neben dem Heizwert der Brennstoffe auch noch die mit der Verbrennungsluft eingetragene Energie.

6.1.2 Reaktionsenergie / Brennkurve

Der Teilterm repräsentiert den in der Praxis durch die so genannte Brennkurve beschriebenen Energiebedarf. Eine Formel zu dessen exakter Berechnung wurde nicht gefunden, allerdings lassen sich die grundsätzlichen Abhängigkeiten beschreiben.

Einen ganz wesentlichen Einfluss auf die Höhe der erforderlichen Reaktionsenergie hat die chemische Zusammensetzung des Brenngutes. In diesem Zusammenhang ist der Kalkgehalt im Rohstoff (Lehm) ausschlaggebend. Nach Angaben von Thoma¹⁷, bzw. Firma Keller¹⁸ nimmt der Energiebedarf je Prozent Kalkgehalt im getrockneten Rohbackstein um 14.6 kJ/kg (3.5 kcal/kg) zu, um die so genannte „Kalkentsäuerung“ zu ermöglichen. Das heisst also, dass die Nutzung einer kalkhaltigen Tongrube in jedem Fall einen erhöhten Energieaufwand im Produktionsprozess nach sich zieht.

Um die erforderliche Reaktionsenergie in das Brenngut einzutragen, durchläuft der Tunnelofenwagen bepackt mit dem Brenngutstapel die so genannte Heisszone im Brennofen. Dort wird die Reaktionsenergie nach den Gesetzen des Wärmeübergangs sowohl durch Strahlung als auch konvektiv auf das Brenngut übertragen. Die dazu erforderliche Verweilzeit in der Brennzone ist aus thermodynamischen Gründen umso länger, je niedriger die Temperatur der Ofenatmosphäre ist. Um den anlagentechnischen Aufwand, sprich: die Tunnelofenlänge, minimieren zu können, wäre es also von Interesse, in der Brennzone möglichst hohe Temperaturen einzustellen. Umgekehrt kann man aus dieser Erkenntnis auch die Vermutung ableiten, dass bei gegebener Tunnelofengeometrie der maximal mögliche Mengendurchsatz mit zunehmender Brenntemperatur steigt.

Um unerwünschte Eigenschaften des Produktes durch Überhitzung an der Materialoberfläche zu vermeiden darf die erforderliche Reaktionsenergie jedoch nicht mit beliebig hoher Temperatur auf das Brenngut übertragen werden. Die maximal zulässige Temperatur muss durch Versuche individuell ermittelt werden. Da nun aber jeder Bereich innerhalb eines Backsteins – also auch das Innerste – mit der erforderlichen Reaktionsenergie versorgt werden muss, ist die Wärmeleitung innerhalb des Materials sowie des auf dem Tunnelofenwagen aufgeschichteten Brenngutstapels von grosser Bedeutung für den zeitlichen Verlauf des Brennprozesses. Im Regelfall dauert es bei der maximal zulässigen Ofentemperatur mehrere Stunden, bis der Energiestrom alle Stellen im Brenngutstapel erreicht hat.

Einen weiteren wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Reaktionsenergie hat der Wassergehalt im Brenngut. Dieses muss zunächst in einer endothermen Reaktion verdampft werden. Das wiederum bedingt die Notwendigkeit eine nicht zu schnelle Aufheizung des Brennguts, um Risse im gebrannten Mauerziegel durch plötzlich verdampfendes Restwasser zu vermeiden.

Das Porosierungsmittel stellt aufgrund seines Kohlenstoffgehalts schliesslich den dritten wichtigen Einflussfaktor auf die Reaktionsenergie dar. Es wird, eingeschlossen im Rohling, beim Durchlaufen der Vorwärmzone des Tunnelofens zunächst erwärmt und dann im Rahmen einer exothermen Reaktion vollständig verbrannt. Dieser Effekt führt zu einer Verminderung der erforderlichen Reaktionsenergie. Aller-

¹⁶ Roland Wiederkehr (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion, 11. Juli 2005

¹⁷ Mündliche Angaben von Herrn Karl Thoma (Firma Innovatherm)

¹⁸ Mündliche Angaben der Firma Keller HCW

dings zeigt die Erfahrung, dass die hier beschriebene Reaktion leicht zu einer Materialüberhitzung in der Aufwärmzone führen kann, wenn nämlich die Energiefreisetzung zu früh erfolgt. In der Praxis wird zudem nur mit einer 50%-Ausnutzung der so eingetragenen chemischen Energie gerechnet. Als Grund dafür wird aufgeführt, dass der dabei freiwerdende Enthalpiestrom zur Hälfte unmittelbar in die Abgasverluste eingeht. Dies stellt jedoch in den Augen der Autoren zurzeit keine stimmige Erklärung dar. Aus diesem Grund sollte der Sachverhalt in einer späteren Phase weiter untersucht werden. Nach Thoma¹⁹ und Firma Keller²⁰ werden je zusätzlichem Gewichtsprozent Kohlenstoff im getrockneten Rohbackstein ungefähr 335 kJ/kg (80 kcal/kg) an Energie in das System eingetragen, von denen dann ca. 167 kJ/kg (40 kcal/kg) auch in der Praxis nutzbar sind. Junge²¹ geht sogar soweit, die energetische Nutzung von Zusatzmitteln (Porosierungsmittel) als nur sehr eingeschränkt möglich zu definieren.

Die erforderliche Reaktionsenergie lässt sich somit rein qualitativ als folgender funktionaler Zusammenhang definieren:

$$\dot{\Delta H}_{\text{reakt}} = f(\text{Kalkgehalt, Wassergehalt, Porosierungsmittel})$$

Formel 2 Funktion der Reaktionsenergie

Die Zeitdauer, während der der Brenngutstapel der maximal zulässigen Brenntemperatur ausgesetzt werden muss, ergibt sich im Wesentlichen aus den Wärmeübergangsbedingungen in der Brennzone. Diese werden von der Geometrie des Backsteins, des Brenngutstapels sowie den sich durch die Tunnelofengeometrie einstellenden Strahlungs- und Konvektionsbedingungen beeinflusst. Wiederkehr²² hat in seiner Diplomarbeit den Versuch unternommen, ein geeignetes mathematisches Modell zu definieren, welches später noch eingehender vorgestellt wird. Aufbauend auf die dabei gewonnenen Erkenntnisse hat Ulrich²³ dann ein Modell erarbeitet, mit dem der Temperaturverlauf im Tunnelofen simuliert werden kann.

Das für jede Brennofen/Brenngut-Paarung erforderliche Temperatur-Zeit-Profil wird als Brennkurve bezeichnet. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde für den in der Anlage Fisibach zum Einsatz kommenden Ton eine solche Brennkurve durch eine Fachfirma im Labor ermittelt. Damit wurde das Ziel verfolgt, herauszufinden, ob die in der Praxis gewählten Brennstoffparameter mit den labortechnisch zu empfehlenden Einstellungen in Einklang stehen. Dieser Ansatz ist jedoch mit dem Problem behaftet, dass nicht der reale Brennofen für die Bestimmung des zeitlichen Verlaufs zugrunde gelegt wurde. Die maximal zulässige Ofentemperatur kann jedoch mit einer solchen Laboranalyse recht gut bestimmt werden. Zumindest bildet das Ergebnis ein guter Startwert für die anlagenspezifische Optimierung der Verweilzeit. In der folgenden Abbildung wird eine typische Brennkurve für Hintermauerziegel dargestellt:

¹⁹ Mündliche Angaben von Herrn Karl Thoma (Firma Innovatherm)

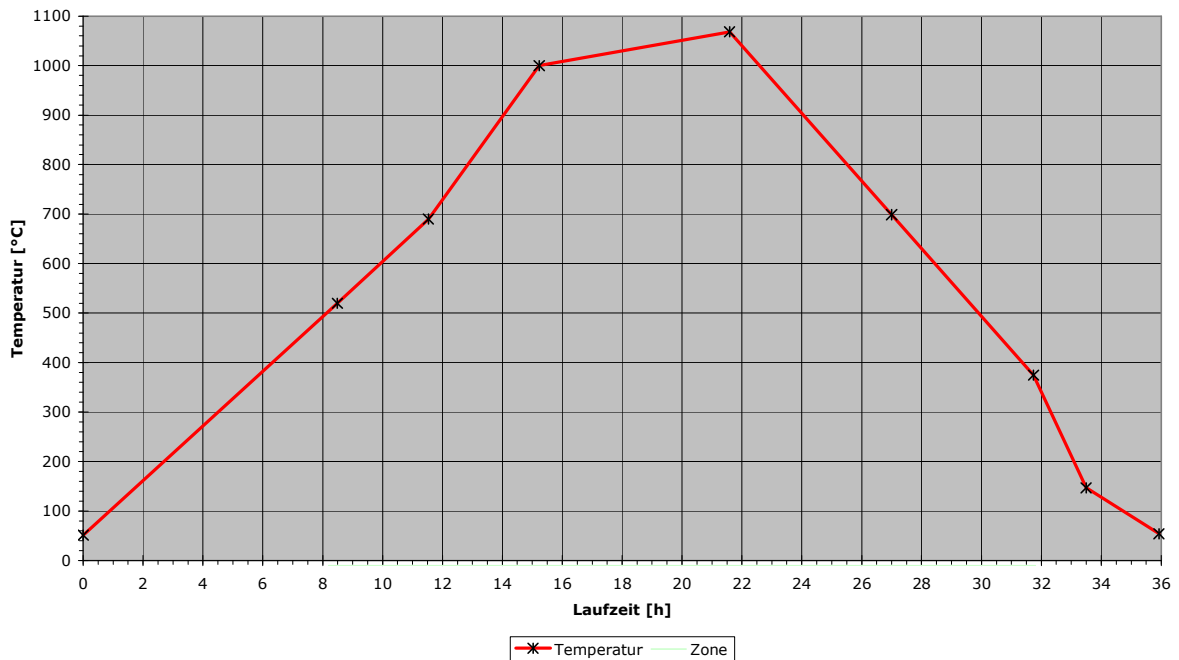
²⁰ Mündliche Angaben der Firma Keller HCW

²¹ Dr. Karsten Junge (Institut für Ziegelforschung Essen e.V.)

²² Roland Wiederkehr (Diplomarbeit): Energie- und CO₂-Einsparung in einer Ziegelei durch Optimierung der Betriebsabläufe, 11. Dezember 2005

²³ Daniel Ulrich (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion (2), 07. Juli 2006

Beispiel Brennkurve Backsteinproduktion



Graphik 6 typische Brennkurve

6.1.3 Wärmeverluste Ofenhülle

Die Wärmeverluste über die Oberfläche der Ofenhülle ergeben sich sowohl durch konvektiven Wärmeübergang als auch durch Strahlung. Die Verluste errechnen sich nach den entsprechenden Standardformeln.

6.1.4 Energiestrom zum Trockner

Nach dem Verlassen der Heisszone haben die gebrannten Steine gemäss Junge²⁴ eine gespeicherte Energie von ca. 1005 kJ/kg (240 kcal/kg), die sich aus der Annahme ergibt, dass ein gebrannter Mauerstein, diese Zone mit ungefähr 1000°C verlässt. Die in den Steinen enthaltene Energie wird in der Kühlzone an einen Kühlluftstrom (Sturzkühlung) übertragen, der somit als Zwischenspeicher für diese Energiemenge betrachtet werden kann. Es gibt verschiedene Ansätze, wie dieser Enthalpiestrom nun wieder in den Prozess eingekoppelt werden kann. Zum einen besteht die Möglichkeit der Vorwärmung der Verbrennungsluft für die Tunnelofenbrenner, zum anderen kann die Energie in den Trockner transportiert werden. In der Mehrzahl der Fälle ist die zweite Option realisiert. Dies ist insofern etwas erstaunlich, da der apparative Aufwand in Form eines Wärmeverschiebungssystems zum Trockner beträchtlich erscheint, im Vergleich zu einem Gas/Luft-Wärmetauscher am Tunnelofen. Tatsächlich haben ältere Tunnelöfen auch in ähnlicher Art und Weise funktioniert. Bei ihnen gab es kein Wärmeverschiebungssystem zum Trockner und die erwärmte Luft aus der Kühlzone gelangte direkt in die Heisszone. Nachteilig an diesem System war jedoch die damit einhergehende Problematik, die Aufheizkurve nicht exakt genug steuern zu können, was schliesslich dazu führte, dass heutige Tunnelöfen nicht mehr eine interne Nutzung der in der Kühlzone zurück gewonnenen Energie aufweisen. Mit heute verfügbarer Prozessleittechnik könnte sich dieser Nachteil jedoch möglicherweise kompensieren lassen. Aus volkswirtschaftlicher Sichtweise erscheint es daher durchaus lohnend, die Verbrennungsluftvorwärmung im Rahmen von Forschungsvorhaben erneut gründlich zu analysieren.

6.1.5 Abgasenergie

Mit dem Abgasstrom wird aus dem Tunnelofen ein bedeutender Energiestrom abgeführt. Im Idealfall wird der Abgasmassenstrom lediglich aus den stöchiometrisch möglichst optimal in den Brennern erzeugten

²⁴ Dr. Karsten Junge (Institut für Ziegelforschung Essen e.V.)

Brenn gasen gespeist, die vor dem Eintritt in den Kamin ihre Wärmeenergie auf das Brenngut übertragen haben. Da die Heisszone des Tunnelofens einen Gegenstromwärmetauscher darstellt, sollte die Abgas-temperatur möglichst nahe am Kondensationspunkt (Verhinderung von Korrosion am Kamin sowie Bildung von Kondensaten) liegen. In der Praxis jedoch werden – dies gilt ganz besonders für ältere Öfen – in den Brennern stark überstöchiometrische Verhältnisse angetroffen und zudem nicht unerhebliche Falschluf tmengen von unterhalb des Tunnelofens angesaugt. Diese Verhältnisse sind teilweise aus ver-fahrenstechnischen Gründen sogar erwünscht, denn die sich daraus ergebenden Turbulenzen im Ofen verbessern den Wärmeübergang auf das Brenngut und ermöglichen somit bei gegebener Brennkurve, respektive Ofenlänge, das ausreichende Eindringen der erforderlichen Wärmeenergie in das Innerste des Brennstapels. Das in der für den Brennprozess überflüssigen Luft enthaltene Inertgas sowie der nicht zur Reaktion gelangende Sauerstoff müssen dann zusätzlich auf Abgastemperatur aufgewärmt werden und vergrössern somit die Anlagenverluste.

6.1.6 Sturzkühlung

Die Zuführung grosser Mengen von Umgebungsluft in der Kühlzone (Sturzkühlung) ermöglicht es, die in den gebrannten Backsteinen enthaltene Wärmeenergie gezielt wieder in den Prozess einzukoppeln. Im Weiteren wird durch diese ein ganz wesentlicher Teil der in der Heisszone umgesetzten Verbrennungsluft in das System eingebracht.

6.1.7 Wärmetransport mit Tunnelofenwagen

Der Tunnelofenwagen besteht aus hitzebeständigem Material und muss aus rein statischen Gründen sehr massiv gebaut werden. Er verfügt je nach Bauart über eine mehr oder weniger ausgeprägte Wärme-speicherfähigkeit, welche Wärme über die Bilanzgrenzen transportiert.

6.1.8 Wärmetransport mit Brenngut

Auch das Brenngut transportiert Wärme über die Bilanzgrenzen.

7 MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG TUNNELOFEN

Die im vorherigen Kapitel Energiehaushalt Tunnelofen ausführlich vorgestellte Energiebilanz stellt den Schlüssel für Einsparmassnahmen in der Backsteinproduktion dar. Sie stellt auch die Basis für ein mathematisches Modell dar, mit welchem die Verhältnisse im Tunnelofen simuliert werden können. Wie un-schwer zu erkennen ist, steht somit aber auch eine Vielzahl von Parametern für eine Optimierung des Energieverbrauchs zur Verfügung. Ziel des Forschungsvorhabens war es, für die mittelständisch gepräg-te Schweizer Backsteinindustrie geeignete Wege aufzuzeigen, wie gerade auch bei älteren Anlagen E-nergie eingespart werden könnte, selbstverständlich unter der Prämisse, dass damit keine Qualitätsein-bussen einhergehen. Unverzichtbar für ein wissenschaftliches Vorhaben ist es, dass die theoretischen Überlegungen durch praktische Messungen verifiziert werden können. Es war daher ein ganz wesentli-cher Bestandteil des Projektes, den Produktionsprozess messtechnisch zu erfassen, um für das später vorgestellte mathematische Modell die erforderlichen Grundlagen zu schaffen. Dabei stand die Frage, wie sich gut reproduzierbare Messungen bewerkstelligen lassen und welche Glaubwürdigkeit die Resultate aufweisen, über weite Strecken des Projektes im Zentrum des Interesses. Um dieser Fragestellung auf den Grund gehen zu können, wurden auf der Anlage Fisibach insgesamt zwei umfassende Messkam-pagnen durchgeführt. Zum einen widmete sich ein Student der HSR, zum anderen ein kommerzieller Anbieter, die Firma Keller HCW aus Deutschland, dieser Aufgabe. Schliesslich übernahm dann ein weiter-er Student an der HSR die Aufgabe beide Messansätze vergleichend zu analysieren.

7.1 UNTERSUCHUNGEN WIEDERKEHR

Wiederkehr²⁵ hat im Rahmen einer Semesterarbeit am IET der HSR sowohl den Trockner als auch den Tunnelofen der Anlage Fisibach messtechnisch untersucht. Dabei wurde folgende Vorgehensweise ge-wählt:

- Aufstellung von Gleichungen für Masse- und Energiebilanz für die Teilsysteme
- Messung der in die einzelnen Terme der Bilanzgleichungen eingehenden physikalischen Grössen
- Ermittlung der Massenbilanzen
- Ermittlung der Energiebilanzen

An dieser Stelle wird auf eine ausführliche Darstellung der Semesterarbeit verzichtet und nur auf die we-sentlichen Ergebnisse eingegangen. Es hat sich gezeigt, dass die Massenbilanzen bei den insgesamt durchgeführten drei Messkampagnen nicht aufgehen. Die gemessenen Abströme waren in allen Fällen deutlich grösser als die Zuströme.

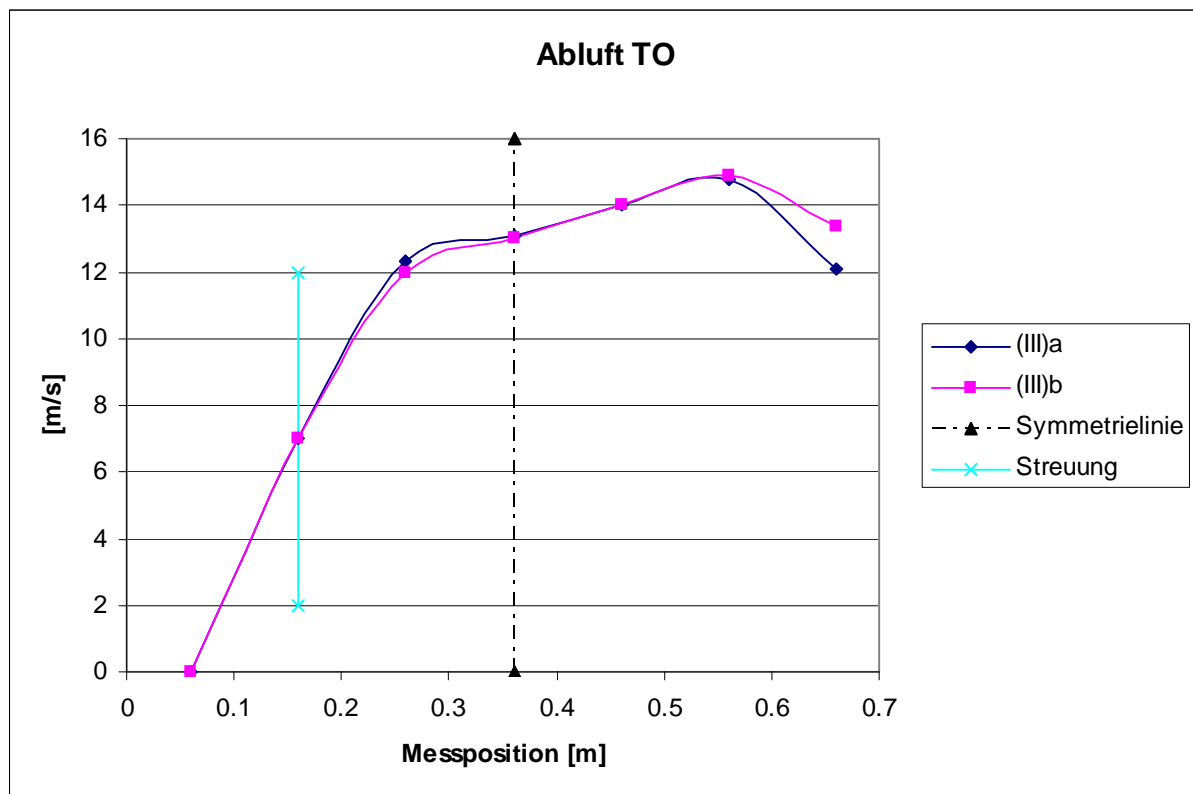
Folgende Ursachen kommen für die Abweichungen in Betracht:

- Die Messung der in die Formeln eingehenden physikalischen Grössen (insbesondere Gasge-schwindigkeiten) war mit Fehler behaftet;
- Turbulenzen und Schwingungen in der Anlage;
- Es wurden einzelne Ströme überhaupt nicht erfasst (eine Inspektion des Tunnelofens von Innen konn-te nicht durchgeführt werden und es lagen nur Teile des nicht permanent nachgeführten Plansatzes des Tunnelofens vor);
- Das Ein- und Ausfahren der Tunnelofenwagen bewirkt ein instationäres Verhalten der Anlage;
- Die Anlage weist nicht identifizierbare und somit nicht berücksichtigbare bzw. behebbare Leckagen auf (Leckströme);
- Es bestehen Falschströme innerhalb der Anlage (z.B. beim völlig verrosteten Wärmeaustauscher über dem Trockner).

Die Nichterfassung einzelner Zuströme ist realistisch. Einerseits wurde im Bereich der Kühlzone eine zusätzliche Lufteinblasung messtechnisch nicht erfasst, zum anderen ist – auch aufgrund von Hinweisen in der Fachliteratur - von deutlichen Falschlufmengen auszugehen, die messtechnisch nicht erfasst wur-den und deren Erfassung in der Praxis auch sehr aufwändig und fehlerbehaftet wäre. Das diese fehlen-den Massenströme allerdings derartige Grössenordnungen annehmen, ist eher als unwahrscheinlich einzustufen. Damit bleibt als Erklärung nur der erst genannte Punkt. In der Tat stützte sich die Massen-stromberechnung in den Gasen auf eine Geschwindigkeitsmessung im Strömungsquerschnitt und der Annahme, dass die Messung in der Symmetrieachse des Kanals das Geschwindigkeitsmaximum einer voll ausgebildeten Strömung darstellt. Teilweise befanden sich die zugänglichen Messpositionen jedoch in Bereichen (z.B.: unmittelbar hinter Krümmern), wo diese Annahmen mit Sicherheit nicht voll zutreffend

²⁵ Roland Wiederkehr (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion, 11. Juli 2005

waren. Die Abweichung von der Theorie wird aus der grafischen Darstellung der Geschwindigkeitsmessungen im Abgaskanal des Tunnelofens verständlich.



Graphik 7 Gemessener Verlauf der Geschwindigkeit im Abgaskanal des Tunnelofens

Auch der Möglichkeit, dass das verwendete Messgerät fehlerhaft sein könnte, wurde nachgegangen. Das Gerät wurde nach der ersten Messkampagne vom Hersteller neu kalibriert. Allerdings hat sich dadurch keine signifikante Veränderung bei den Messresultaten ergeben, so dass letztlich festgehalten werden muss:

Eine plausible Messung der Massen- und damit auch Energieströme ist nicht gelungen. Die Ursachen liegen mit grosser Wahrscheinlichkeit in der schwierigen Zugänglichkeit, bzw. dem Fehlen geeigneter Messstrecken und nicht messbarer Falschlufteinbrüche.

7.2 MESSUNGEN FIRMA KELLER HCW

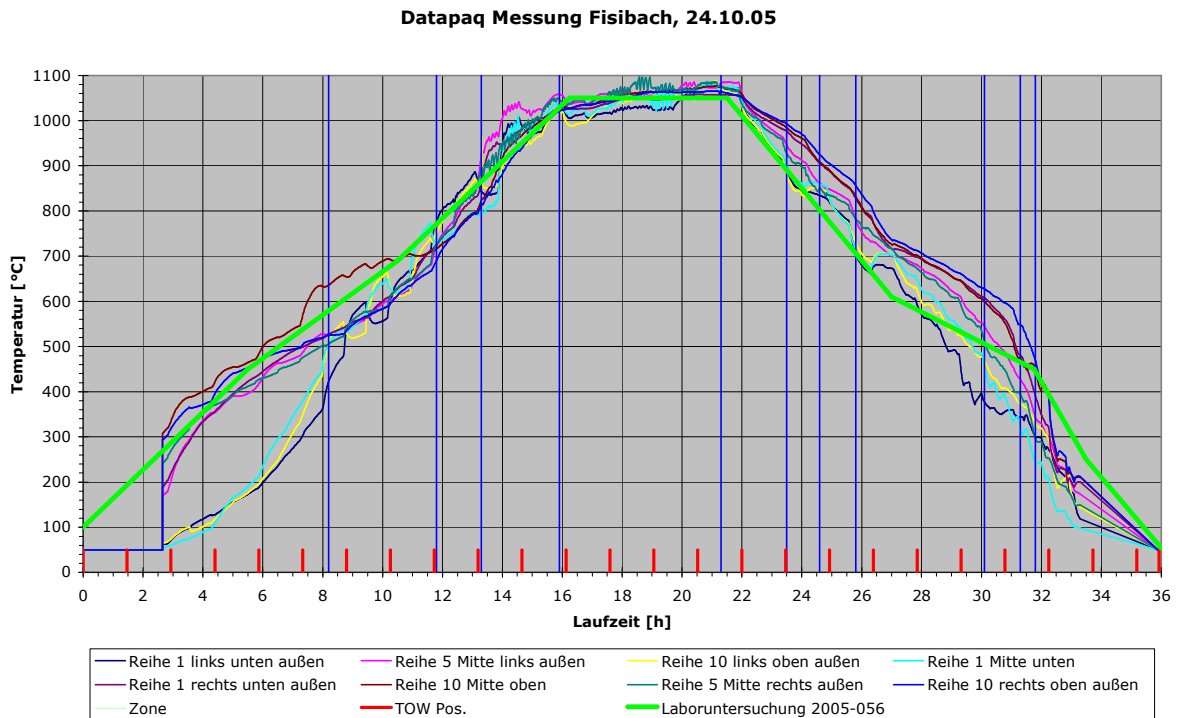
Während sich Wiederkehr²⁶ mit der Messbarkeit von Energieströmen in der Ziegelei Fisibach auseinandersetzte, wurde die Firma Keller HCW, D-Ibbsbüren damit beauftragt, die tatsächliche Brennkurve im Tunnelofen Fisibach zu bestimmen. Parallel dazu wurde im Keramiklabor der gleichen Firma das Rohmaterial chemisch analysiert und eine theoretisch optimale Brennkurve im Laborofen ermittelt. Das Ziel dieses Projektschrittes lag darin, die in der mittelständischen Backsteinindustrie häufig anzutreffende „traditionelle“ Brennkurve kritisch zu hinterfragen. Dies war deswegen angezeigt, weil sich im Verlauf des Vorhabens klar die Erkenntnis herauskristallisierte, dass der Energieverbrauch massgeblich durch eine günstige Veränderung der Brennkurvenparameter Temperatur und/oder Verweilzeit beeinflussbar ist.

Die Firma Keller HCW hat bei ihren Messungen vor Ort einem so genannten Datapaq zum Einsatz gebracht. Dabei wird ein normal besetzter Tunnelofenwagen mit einer grösseren Anzahl von Messelementen ausgerüstet und dann durch den Ofen geschickt. Im Ergebnis zeichnet das Gerät die Temperaturverläufe im Tunnelofen für die verschiedenen Messstellen auf. Darüber hinaus hat auch die Firma Keller HCW die Aufgabe gehabt, die Energiebilanz des Tunnelofens zu verifizieren.

Die theoretisch für das zum Einsatz kommende Ton-/Lehmgemisch erforderliche Brennkurve wurde im firmeneigenen Labor ermittelt. Bei dieser Untersuchungen stellte sich heraus, dass die theoretische

²⁶ Roland Wiederkehr (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion, 11. Juli 2005

Brennkurve in der den Energieverbrauch dominierenden Heisszone mit der tatsächlichen recht gut übereinstimmt.



Graphik 8 Vergleich der gemessenen Brennkurve mit der theoretischen Brennkurve der Anlage Fisibach

Die durch die Firma Keller HCW gemessene Energie- und Massenbilanz hingegen war ebenfalls nicht plausibel. Zur Erklärung wurde auch von dieser Seite aus die schwierige Zugänglichkeit, bzw. das Nichtvorhandensein von geeigneten Messstellen genannt.

7.3 VERGLEICHENDE ANALYSE DER MESSUNGEN

Ulrich²⁷ hat im Rahmen seiner Semesterarbeit am IET der HSR beide vorgestellten Messkampagnen einer vergleichenden Analyse unterzogen. Im Wesentlichen kommt der Autor zu folgenden Schlüssen: Bedingt durch die unterschiedliche Messtechnik sind bei den erfassten Geschwindigkeitsprofilen ganz erhebliche Differenzen auszumachen, die sich dann auch in den abgeleiteten, berechneten Daten fortplanzen. Auch verzichtet die Firma Keller HCW bei ihrer Auswertung darauf, den Einfluss der Luftfeuchtigkeit zu berücksichtigen, da sie diesen für vernachlässigbar einstuft. Wiederkehr²⁸ hat sich hingegen dafür entschieden, diesen Parameter einzubeziehen. Offensichtlich ist der daraus resultierende Einfluss jedoch als gering einzustufen. Weitere Abweichungen ergeben sich bei der Berechnung der Strömungsquerschnitte in den Kanälen. Es kann jedoch bisher nicht beurteilt werden, welcher Messaufbau als fehlerärmer einzustufen ist.

7.4 FAZIT MESSUNGEN

Die messtechnische Analyse einer Ziegelei erfordert erheblichen apparativen, zeitlichen und damit auch finanziellen Aufwand. Die während des Projektes gemachten Erfahrungen lassen keinen anderen Schluss zu, als das für die Erstellung eines Messaufbaus, der in einer typischen Schweizer Ziegelei reproduzierbare und fehlerarme Resultate liefert mit einem Investment von CHF 50'000 gerechnet werden sollte. Bedingt durch die räumlichen Verhältnisse ist die Zugänglichkeit geeigneter Messstellen nicht immer gegeben und dadurch bedingt die Ermittlung reproduzierbarer Messresultate erschwert und teilweise sogar unmöglich. Diese Erkenntnis stellt natürlich einen herben Rückschlag in Bezug auf die formulierten Projektziele des Forschungsvorhabens dar.

²⁷ Daniel Ulrich (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion (2), 07. Juli 2006

²⁸ Roland Wiederkehr (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion, 11. Juli 2005

8 ENTWICKLUNG SIMULATIONSUMGEBUNG

In das Forschungsvorhaben sollte die Entwicklung einer computergestützten Simulationsumgebung eingebettet sein. Mit dieser soll es einmal gelingen, möglichst jede Produktionsanlage individuell abbilden zu können und durch gezielte Variation der Parameter Energiesparpotenziale zu identifizieren. Bei der Entwicklung eines solchen Tools war folgende Vorgehensweise beabsichtigt:

- Mathematische Modellierung der Vorgänge im Tunnelofen
- Verifikation des mathematischen Modells anhand von konkreten Messdaten
- Programmierung eines EDV-Instruments
- EDV-gestützte Prozessanalyse (Identifikation Einsparpotenziale an konkreten Anlagen)

Die von Ulrich²⁹ vorgeschlagene mathematische Modellierung und deren Umsetzung in ein Excel Instrument muss als erste Stufe in einem ausführlicheren Entwicklungsprozess betrachtet werden, da es die instationären Verhältnisse bei der Wärmedurchdringung der Backsteine nicht berücksichtigt. Das Modell erweist sich als eine Plausibilitätsprüfung von gemessenen Temperaturverläufen, ist jedoch in der vorliegenden Form noch nicht als Simulationsinstrument nutzbar. Aus dem genannten Grund konnte auch die EDV-gestützte Prozessanalyse im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr stattfinden

²⁹ Daniel Ulrich (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion (2), 07. Juli 2006

9 ÜBERLEGUNGEN BEZÜGLICH DER PROZESSTECHNISCHEN EINSARPOTENZIALE

Nachdem im Verlaufe der Aktivitäten zunächst die theoretischen Zusammenhänge durchdrungen wurden und dann die Messbarkeit von prozesstechnischen Parametern hinterfragt wurde, sollen abschliessend die sich während der Arbeiten konkret herauskristallisierten Einsparpotenziale diskutiert werden.

9.1 OPTIMIERUNG WÄRMEVERBUND TUNNELOFEN - TROCKNER

Die meisten Tunnelöfen - auch derjenige in Fisibach - verfügen heute über eine Wärmeauskopplung in der Kühlzone, die zur Beheizung des Trockners genutzt wird. Man spricht oft auch vom „Wärmeverbund“. Die in den gebrannten Backsteinen gespeicherte Wärmeenergie stellt dabei das maximal bereitebbare Wärmepotenzial dar. Junge³⁰ beziffert dieses unter Berücksichtigung der diversen Verluste im Tunnelofen mit maximal 500 kJ/kg (120 kcal/kg). Thoma³¹ gibt je Tonne Backstein einen Ausgangswassergehalt vor der Trocknung von ca. 20 % an, der im Trockner sinnvollerweise auf etwa 5 % reduziert werden sollte. Um ein Kilogramm gebrannten Backstein zu erhalten müssen - unter Einbeziehung eines mittleren Glühverlusts von 5 % - ungefähr 1,35 kg Rohsubstanz dem Trockner zugeführt werden, wovon ca. 0,3 kg Wasser darstellen. Eine weitere Reduktion ist deswegen nicht empfehlenswert, weil der Rohling bis zur Einfahrt in den Tunnelofen bei einem derartig geringen Wassergehalt erneut Feuchte aus der Umgebungsluft ziehen würde. Der Trocknungsvorgang erfordert somit wiederum nach Thoma³² bei gebräuchlichen Trocknern einen Energiestrom von ungefähr 4000 kJ/kg Wasser. Um die je kg Rohsubstanz enthaltenen 0,3 kg Wasser zu verdampfen werden also 1200 kJ/kg benötigt, wovon der Tunnelofen aber eben nur maximal 500 kJ/kg beisteuern kann. Im Gegenteil, die Zusatzfeuerung in der Trockneranlage müsste somit mehr als 50% der benötigten Energie bereitstellen. Insofern dürfte unter normalen Umständen in keiner kontinuierlich betriebenen Ziegelei das Problem auftreten, dass im Trockner zu wenig Wärme angefordert wird. Im heute regelmässig diskontinuierlichen Betrieb (Wochenenden, Feiertage) kann es allerdings vorkommen, dass manuell zu be- und entladende Trockner nicht in Betrieb sind, obwohl der Tunnelofen einen Wärmestrom liefert. In diesem Fall ist zu prüfen, ob die Prozesssynchronisation optimal gestaltet ist. Diese sollte immer dazu führen, dass die Abwärme aus dem Tunnelofen möglichst zu keinem Zeitpunkt verworfen werden muss. Ist dies doch der Fall, so muss geprüft werden, ob sich das Betriebsprogramm ändern lässt oder aber, ob in diesem Fall der Wärmestrom aus der Kühlzone in andere betriebsinterne oder auch externe Wärmesenken geleitet werden kann. Die hier gewonnene Erkenntnis lässt sich in der Praxis aber auch anders interpretieren. Optimierte Verhältnisse würden am Trockner dazu führen, dass annähernd 60 % des für die Trocknung erforderlichen Energiebedarfs durch die Stützbrenner im Trockner erzeugt werden müssen. Als einfache Faustregel wird vorgeschlagen, die Betriebszeiten der Stützfeuerung ins Verhältnis zur Gesamttrocknungsdauer zu setzen. Liegt der sich daraus ergebende Wert deutlich unter 60 %, spricht dies dafür, dass entweder

- der Tunnelofen bei zu hohen Temperaturen betrieben wird; oder
- im Tunnelofen zu hohe Gasmengen abgesaugt werden (zum Beispiel durch Undichtigkeiten in der Deckenkühlung); oder
- die Restfeuchte der Rohlinge nach der Trocknung deutlich über 5 % liegt

Alle Konsequenzen wirken sich letztlich negativ auf den Energieverbrauch der Produktionskette aus und sollten nach Möglichkeit abgestellt werden. Es war im Rahmen des Forschungsprojektes aus Gründen der verfügbaren Ressourcen allerdings nicht möglich, dieser Frage im Detail nach zu gehen. Für Interessierte sei auf die umfangreiche Fachliteratur zu diesem Thema verwiesen.

9.2 ANPASSUNG BRENNKURVE AN AUSLASTUNG

Die Brennkurve stellt den Zusammenhang zwischen Temperatur und Zeit während des Garbrandes im Tunnelofen her. Wie oben dargelegt, ist die Verweilzeit umso kürzer, je schneller die für die Gefügeumwandlung erforderliche Energie bis ins Innerste des Materials vorgedrungen ist. Würde man im Rahmen eines Gedankenexperiments einen einzigen gebrannten Mauerstein bei gegebener Vorschubgeschwindigkeit durch einen Tunnelofen schicken, so wäre dieser bereits deutlich vor dem Ende der Brennzone durchgebrannt. Ohne Qualitätseinbusse könnten die im weiteren Verlauf dieser Ofenzone angebrachten Brenner abgeschaltet werden, was zu einer dort reduzierten Temperatur und natürlich zu einer Brennstoffeinsparung führen würde. Auch die Aufheizzone sowie die Kühlzone könnten kürzer ausfallen und

³⁰ Dr. Karsten Junge (Institut für Ziegelforschung Essen e.V.)

³¹ Mündliche Angaben von Herrn Karl Thoma (Firma Innovatherm)

³² Mündliche Angaben von Herrn Karl Thoma (Firma Innovatherm)

auch die für die Wärmeübertragung erforderlichen Gasmengen würden zu reduzierten Gebläseleistungen führen. Aus diesen Überlegungen heraus wird klar, dass die Brennkurve eine Funktion des Anlagen-durchsatzes ist. In der Praxis ist, bedingt durch die gegebene Geometrie des Tunnelofens, eine solche Anpassung der Zonenlängen nur eingeschränkt möglich. Sie kann dadurch geschehen, dass bei reduzierter Beladung sowie konstanter Vorschubgeschwindigkeit des Tunnelofenwagen (Teillast):

- die Länge der Brennzzone durch Abschaltung einzelner Brennergruppen gezielt gestaucht wird oder
- die Temperatur in der Brennzzone abgesenkt wird.

Beide Optionen erscheinen lohnende Alternativen, die jedoch noch sorgfältig gegeneinander abzuwägen sind. In diesem Zusammenhang wird es erforderlich, den Eindringvorgang der Energie in das Brenngut mathematisch zu analysieren. Man gelangt dadurch zu Fragestellungen der instationären Wärmeleitung, wobei die Ofenatmosphäre als Heizmedium und das Brenngut als zu heizendes Medium fungieren. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde diese Teilaufgabe an der am IET der HSR durch den Diplomanden R. Wiederkehr angegangen. Erarbeitet wurden dabei erste Ansätze (Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten) für ein mathematisches Modell in der Aufheizzone. Des Weiteren wurde vom Autor der Diplomarbeit ein Berechnungsprogramm des Instituts für Ziegelforschung Essen e.V. (D-Essen) vorgestellt und ersten Tests unterzogen. Die gewaltige Komplexität der Zusammenhänge hat es jedoch bisher verunmöglicht, ein geschlossenes mathematisches Modell zu definieren, welches dann die Grundlage für ein leicht zu handhabendes Simulationstool ist. Das von Ulrich³³ entwickelte, gut handhabbare mathematische Modell des Tunnelofens könnte sich als gut geeignete Grundlage für die Zielerreichung erweisen.

9.3 ABSCHALTUNG EINZELNER PRODUKTIONSLINIEN INNERHALB EINES MARKTGEBIETS

Aus den Überlegungen des vorherigen Abschnitts lässt sich eine weitere Einsparstrategie ableiten. Dann nämlich, wenn ein und dasselbe Marktgebiet mit mehr als einer Produktionslinie (sprich: Trockner – Tunnelofen – Kombination) bedient werden kann. In diesem Fall könnte es Sinn machen, in Zeiten schwacher Nachfrage, einen Ofen temporär komplett still zu legen und somit den Auslastungsgrad der übrigen Anlagen im Marktgebiet zu stabilisieren. Dies würde die Anpassung der Brennkurve an den Materialdurchsatz überflüssig machen. Es ist bekannt, dass internationale Grosskonzerne tatsächlich eine solche Strategie verfolgen und es wäre sicherlich hochinteressant, diese Fragestellung ebenfalls für die Schweizer Backsteinindustrie näher zu betrachten. Jedoch ist auch zur Beurteilung dieses Aspektes wieder das noch fehlende, ausreichend auf seine Praxistauglichkeit untersuchte, Simulationsmodell nötig, so dass an dieser Stelle lediglich auf weiteren Entwicklungsbedarf hingewiesen werden kann.

9.4 ANPASSUNG LUFTDURCHSATZ AN THEORETISCHEN WERT

Die bereits mehrfach angesprochene Energiebilanzgleichung für den Tunnelofen lässt auch die rein qualitative Schlussfolgerung zu, dass die unerwünschten Abgasverluste umso geringer ausfallen, je kleiner die Rauchgasmenge (und notabene: die Abgastemperatur) ist. Die Rauchgasmenge ihrerseits ergibt sich via Verbrennungsrechnung aus der dem Tunnelofen zugeführten Verbrennungsluft zuzüglich der nicht leicht quantifizierbaren Falschlufmengen. Um lediglich die gewünschten Temperaturen einzuregulieren, würde es genügen, alle Brenner stöchiometrisch ideal, also mit minimalem Luftüberschuss zu betreiben. Das würde allerdings - bedingt durch die geringen Rauchgasmengen - auch zu minimal turbulenten Verhältnissen in der Ofenatmosphäre führen. Damit einhergehend reduziert sich die Wärmeeindringgeschwindigkeit in das Brenngut, was wiederum zu einer Verlängerung der erforderlichen Verweilzeiten in den einzelnen Zonen führt. Das Problem vieler Tunnelöfen besteht darin, dass die tatsächlichen Verbrennungsluftmengen stark über dem aus thermischen Gründen erforderlichen Wert gewählt werden müssen, um auf diese Weise eine ausreichende Turbulenz im Ofen zu generieren.

9.5 WAHL DES POROSIERUNGSMITTELS

Die derzeit in der Ziegelindustrie genutzten oder nutzbaren Zusatzstoffe dienen dem Zweck, durch Gaseinschlüsse im gebrannten Material dessen Wärmeleitfähigkeit, respektive Isolationswirkung günstig zu beeinflussen. Gleichzeitig bieten sie aber auch den angenehmen Zusatznutzen, dass sie Kohlenstoff als brennbare Substanz in den Tunnelofen eintragen. Junge³⁴ führt dazu folgendes aus: „Da der Ziegelbrand ein relativ langsamer Vorgang ist, bei dem die Ware mehrere Stunden bei etwa 1000 °C in sauerstoffhaltiger Atmosphäre verharrt, kann sicher davon ausgegangen werden, dass keine unverbrannten Reste der

³³ Daniel Ulrich (Semesterarbeit): Energieeffizienz der Backsteinproduktion (2), 07. Juli 2006

³⁴ Dr. Karsten Junge (Institut für Ziegelforschung Essen e.V.)

Zusatzstoffe im Backstein verbleiben. Das bedeutet, dass annähernd der komplette Heizwert des Zusatzes beim Brand freigesetzt wird. Somit substituieren diese Stoffe einen Teil des Brennstoffes, der für die Aufrechterhaltung der notwendigen Temperaturen im Ofen erforderlich ist“. Als gängige Vertreter der Porosierungsmittel sind zu nennen:

- Gruppe der Holzabfälle
- Stroh
- Olivenkerne, Trester, Treber und ähnliche pflanzliche Rohstoffe
- Kohlereste und -stäube
- Papierfangstoff
- Recyclingstyropor

Junge³⁵ limitiert die maximal über Porosierungsstoffe dem Ofen zuführbare Enthalpie auf 1000 kJ/kg (bezogen auf gebrannte Mauersteine). Dies bedeutet für das häufig verwendete Porosierungsmittel Holz mit einem repräsentativen Heizwert von 12000 kJ/kg einen maximalen Gewichtsanteil von 8.3 % (bezogen auf gebrannte Mauersteine). Darüber hinausgehende Anteile können zu einer energetischen Überversorgung in der Aufwärmzone führen, was aus Gründen der Produktqualität nicht wünschenswert ist. Thoma³⁶ bezeichnet Kohle als das - energetisch betrachtet - ideale Porosierungsmittel, welches seine chemisch gebundene Energie erst in der Brennzzone freisetzt. Allerdings führt Kohle zu einer schlechten Porosierung und damit zu ungünstigen bauphysikalischen Eigenschaften des Backsteins. Die Produktion auf der Anlage Fisibach erfolgt unter Zugabe von Sägemehl (Holzabfall). Der Gewichtsanteil wird im Rahmen eines Energiemonitoring derzeit systematisch variiert. Eine endgültige Aussage bezüglich des erzielbaren Einspareffekts wird erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich, wenn ausreichend Vergleichsdaten zur Verfügung stehen.

³⁵ Dr. Karsten Junge (Institut für Ziegelforschung Essen e.V.)

³⁶ Mündliche Angaben von Herrn Karl Thoma (Firma Innovatherm)

10 GESAMTBEURTEILUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Während der 18-monatigen Projektdauer wurden, wie eingangs erläutert, drei wesentliche Hauptziele verfolgt:

- Konzept für die Analyse älterer Backsteinproduktionsanlagen hinsichtlich noch nicht genutzter Einsparpotenziale
- Untersuchung der Fragestellung, inwieweit sich durch einen Anlagenverbund im gleichen Marktgebiet ein energetischer Nutzen ergibt
- Schaffung eines EDV-Tools, mit dessen Hilfe die energetischen Auswirkungen von effizienzsteigernden Massnahmen vorgängig abgeschätzt werden können.

Das Projekt war so angelegt, dass es sich sehr stark auf die am IET der HSR erarbeiteten drei Semester-, respektive Diplomarbeiten von Studierenden der Fachrichtung Maschinenbau abstützt. Die theoretischen Überlegungen wurden durch umfangreiche Messungen auf der Anlage Fisibach überprüft.

Im Rahmen jeder Analyse ist es unabdingbar, ein schlüssiges Messkonzept zu definieren. Dies nahm daher auch breiten Raum in diesem Projekt ein. Dabei stellte sich alsbald heraus, dass die Aufnahme von plausiblen und jederzeit gut reproduzierbaren Messwerten in einer mittelständischen Ziegelei eine nicht zu unterschätzende Herausforderung darstellt. Hauptschwierigkeit dabei ist die Platzierung geeigneter Messstellen für Gase. Zum einen ist dies sehr stark von den zu erwartenden Strömungsverhältnissen in den Kanälen abhängig. Ebenfalls komplex präsentieren sich die aus den hohen Temperaturen resultierenden Anforderungen an die Messtechnik. Schliesslich ist die Falschlufmenge bei einem grossen Bauwerk, wie es ein Tunnelofen nun mal ist, nur äusserst schwierig in komplettem Umfang erfassbar. Die durchgeführten Messungen der HSR wurden unverzüglich einem Plausibilitätscheck (Massenbilanzen) unterzogen, der zutage förderte, dass die erhobenen Messdaten noch mit ganz erheblichen Vorbehalten zu geniessen sind. Diese Erkenntnis konnte auch durch die anschliessend hinzugezogene Fachfirma nicht widerlegt werden. Um jedoch später einmal ein brauchbares Simulationsmodell für die Abschätzung von effizienzsteigernden Massnahmen zur Verfügung stellen zu können, sind exakte und reproduzierbare Messungen unabdingbar. Für die zukünftige Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet lässt sich daher festhalten, dass Mittel und Ressourcen zunächst in Konzepte und Technologien investiert werden sollten, welche die fehlerarme Erfassung von

- Gasgeschwindigkeiten in heisser Ofenatmosphäre
- Gas- und Steintemperaturen
- Falschlufmengen

ermöglichen. Hier drängt es sich auf, die Zusammenarbeit mit Spezialfirmen zu suchen, deren Messtechnik und -philosophie jedoch kritisch auf ihre Tauglichkeit für die Aufgabenstellung zu prüfen ist. Zu überlegen ist in diesem Zusammenhang, ob an einer Fachhochschule in Zusammenarbeit mit der Schweizer Backsteinindustrie spezielle Versuchsanlagen aufgebaut werden, mit denen solche Messkonzepte entwickelt werden können.

Aufgrund der nur bedingt aussagekräftigen Messungen fällt es auch schwer, im Rahmen dieser Arbeit einen fertigen Leitfaden für die standardisierte Anlagenanalyse zur Verfügung zu stellen. Durchaus nicht unerhebliche Potenziale sind nach Durchführung des Projektes zwar zu vermuten, aber durch Simulation und Messungen belegbar sind sie bisher noch nicht. Immerhin konnten einige Ansätze für die Optimierungsanalyse erarbeitet werden (siehe Kapitel Überlegungen bezüglich der prozesstechnischen Einsparpotenziale), welche im Rahmen von Anschlussprojekten systematisch fortgeführt werden sollten. So böte es sich beispielsweise an, an einer Fachhochschule eine Arbeit anfertigen zu lassen, die die einzelnen Optimierungsansätze systematisch weiterverfolgt und aufzeigt, wie mit den in der Regel vorhandenen Messmitteln einer älteren Backsteinproduktionsanlage die Ursache für ineffiziente Energieverwendung festgestellt werden kann. Das könnte dann zum Beispiel so ablaufen, dass eine Checkliste erarbeitet wird, die es ermöglicht, den Energieverbrauch im Trockner ins Verhältnis zum Energieverbrauch im Tunnelofen zu setzen. Durch Auswertung einer solchen Checkliste könnte dann die Frage beantwortet werden, ob der dringende Verdacht besteht, dass mehr Abwärme im Trockner genutzt wird, als diese für die Kühlung der Steine nach dem Brennprozess eigentlich erforderlich wäre. Ergänzt um Hinweise, woran dies liegen könnte und wie die tatsächliche Ursache herausgefunden werden kann, hätte der Anlagenbetreiber dann konkrete Hinweise für seine individuelle Optimierungsstrategie.

An der involvierten Fachhochschule in Rapperswil konnte eine erste theoretische Durchdringung des komplexen Brennprozesses von Backsteinen geleistet werden. Möglich wurde dies durch die Vergabe von Semester- und Diplomarbeiten. Da diese im Rahmen vorgegebener Zeitbudgets erarbeitet werden müssen, ist die Tiefe der theoretischen Durchdringung im Vorfeld schwierig abschätzbar. Im konkreten

Fall war sie nicht tief genug, um ein durchgängiges Modell für den gesamten Prozess entwerfen zu können. Es sind gute erste Ansätze entstanden, die aufgegriffen werden sollten. Wegen der Komplexität der Vorgänge im Tunnelofen (strömungsmechanisch und thermodynamisch) muss an dieser Stelle empfohlen werden, für diese Aspekte die Zusammenarbeit mit einer ETH zu suchen. Vor dem Hintergrund des, volkswirtschaftlich betrachtet, doch bedeutsamen Energieverbrauchs in diesem Energiezweig müsste sogar überlegt werden, inwieweit die Erforschung der Verhältnisse in der keramischen Industrie zum Schwerpunkt eines Fachgebiets gemacht werden kann, um so eine kontinuierliche Verbesserung der Wissensbasis zu sichern. Alternativ ist eine Forcierung der Zusammenarbeit mit dem deutschen Institut für Ziegelforschung Essen e.V. in Essen zu erwägen.

Erst, wenn sowohl die messtechnische als auch die theoretische Basis ausreichend weiterentwickelt worden sind, kann die Erarbeitung eines praxistauglichen EDV-Tools für die Simulation der Energieverhältnisse in diesem Industriezweig realisiert werden. Die im Rahmen des vorliegenden Projekts erarbeiteten Grundüberlegungen sind wertvoll, reichen aber einstweilen noch nicht aus.

Es drängt sich der Verdacht auf, dass die heute gängige Verschiebung der in der in der Kühlluftmenge des Tunnelofens zwischengespeicherten Wärme im Trockner, nicht energieoptimiert erfolgt. Vermutlich in gar nicht wenigen Fällen wird erheblich mehr Wärme im Tunnelofen abgezogen, um diese im Trockner zu verwerten. Da der Wärmetransport jedoch verlustbehaftet ist und die Erzeugung von Wärme im Tunnelofen wegen der hohen Abgasmengen einen schlechteren Wirkungsgrad aufweist als im Trockner, ist dies als ungünstig zu bewerten. Hier schlummert ein nicht zu unterschätzendes Energieeinsparpotenzial. Vorgeschlagen wird daher eine vergleichende Analyse der Situation über möglichst viele Anlagen in der Schweiz. Parallel dazu wäre es erforderlich, zu untersuchen, ob moderne Prozessleittechnik die energetisch betrachtet, vorzuziehende Verwertung dieser zurückgewonnenen Wärme für die Verbrennungsluft wieder ermöglicht, was letztlich zu einem Verschwinden der mit Zusatzverlusten behafteten Wärmever-schiebung in den Trockner führen könnte.

Abschliessend lässt sich noch festhalten, dass bei der im Zentrum der Untersuchungen stehenden Anlage Fisibach auch von den hinzugezogenen verschiedenen externen Experten keine einfach zu identifizierenden Optimierungspotenziale festgestellt werden konnten. Es hat sich herausgestellt, dass vermutlich die im Tunnelofen durchgesetzten Gasmengen deutlich über dem Normalwert liegen und dafür verschiedene Ursachen in Betracht kommen. Für den Projektpartner FBB ist dieses zu vermutende, deutliche Einsparpotenzial Anlass genug, die tatsächlichen Gründe durch systematisches Engineering herauszufinden und abzustellen. Ohne die Teilnahme am Forschungsprojekt wäre das Phänomen wohl erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt erkannt worden. Es ist stark davon auszugehen, dass sich auch in anderen vergleichbaren Produktionsanlagen versteckte Einsparpotenziale finden lassen, wenngleich offen gesagt werden muss, dass der Aufwand für deren Bestimmung nicht unerheblich ist.

ANHANG ZUM SCHLUSSBERICHT

Steigerung der Energieeffizienz in der Backsteinproduktion

11 MESSUNGEN HSR

Die unter diesem Kapitel gemachten Ausführungen sind Auszüge aus der der Semesterarbeit an der HSR von Herrn Wiederkehr

11.1 ZIELSETZUNG

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

11.2 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 könnte man einen Mittelwert ableiten, welcher repräsentativ für die Anlage ist.

Für die jeweiligen Messungen wurden die folgenden Geräte eingesetzt:

| Messpunkt | Eingesetztes Messgerät |
|-------------------------------|---|
| Temperatur in den Luftkanälen | Thermoelement Typ K - Thermocoax/Thermocontrol – Bereich von-200°C bis 1 000°C – Genauigkeit der Klasse 2 sowie Fluke 50D K/J Thermometer |
| Wandtemperaturen: | Infrarot Thermometer THI-500 |
| Geschwindigkeit: | Flügelradanemometer |
| Relative Feuchte: | Hygrolog-D - Rotronic AG |

Tabelle 3 Eingesetzte Messgeräte

11.3 MESSANLEITUNG UND BEMERKUNGEN

11.3.1 Bemerkung zum Messtag vom 10.06.2005

Während die Messungen durchgeführt wurden, standen beim Trockner immer die gleichen Tore offen (mehr als 4 Stunden). Dadurch wurde die gesamte Restwärme des vorangegangenen Trocknungsprozesses an die Hallenluft abgegeben und verfälschte das entsprechende Messresultat.

11.3.2 Oberflächentemperatur

Die Oberflächentemperatur wurde mit dem Infrarot-Messgerät immer direkt an der erwünschten Stelle gemessen. Das Messgerät musste immer mit einem bestimmten Abstand zur Wand gehalten werden. Um eine optimale Messgenauigkeit zu erreichen braucht dieses Messgerät eine schwarze Fläche. Da die entsprechenden Flächen nicht schwarz angesprayed werden durften, sind die Messungen direkt auf dem

jeweiligen Grund (z.B. direkt auf einer Wand oder dem Ziegel) vorgenommen worden. Die entsprechenden Ergebnisse sind mit Vorsicht zu interpretieren.

11.3.3 Feuchtigkeit

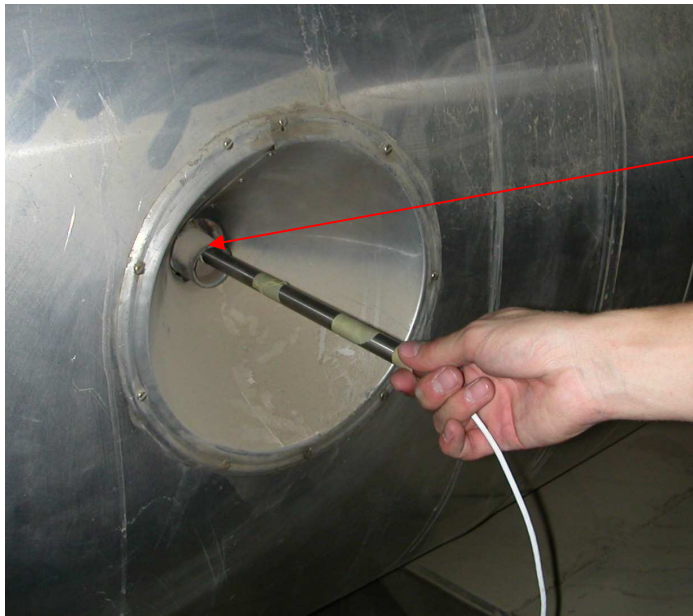
Das Feuchtigkeitsmessgerät wurde immer in der Nähe der entsprechenden Ansaugstelle positioniert. Dadurch konnte einerseits die relative Feuchte, als auch die Temperatur der angesaugten Luft gemessen werden.

Das Feuchtigkeitsmessgerät musste teilweise mehrmals ein- und ausgeschaltet werden, bevor es die Messwerte anzeigte. Aus diesem Grund sind diese Messwerte mit Vorsicht zu verwenden.

11.3.4 Geschwindigkeit und Temperatur

An den vorhandenen Messstutzen konnte das Flügelradanemometer sowie der Thermofühler in die Strömung gehalten werden. Im unten aufgeführten Bild ist ersichtlich, dass für die Bestimmung eines Geschwindigkeitsprofils die Messpositionen mit Klebeband markiert wurden.

Die Messgeräte mussten von Hand in die richtige Position gebracht werden. Die Angaben der Messposition bei der Geschwindigkeitsprofilaufnahme beziehen sich immer auf die Distanz zwischen dem Messort zur Aussenkante des Messstutzens. Falls für die Messung kein Messstutzen vorhanden war, musste mittels Bohrung eine geeignete Öffnung erzeugt werden. Die Messungen an solchen Stellen wurden in der gleichen Art und Weise durchgeführt, als wenn ein Messstutzen vorgefunden worden wäre.



Aussenkante Messstutzen

Bild 6 Profilmessung an einem Messstutzen

11.3.5 Messpositionen am Trockner

Die **Abluft zum Trockner** (Abwärmestrom vom Tunnelofen) wurde oberhalb des Trockners gemessen. Die Messöffnung ist unverschlossen. Die Messstelle ist so gelegen, dass die Strömung unbeeinflusst von Störeinflüssen ist. Damit entsprechen die gemessenen Werte auch mit hoher Wahrscheinlichkeit der Wirklichkeit. Diese Vermutung lässt sich auch am Geschwindigkeitsprofil der entsprechenden Messung verifizieren.



Bild 7 Tunnelofenabluft zum Trockner

Bei der ersten Messung der **Frischluf**t wurde eine Seitenplatte entfernt, was die Erfassung der Werte nach der Ansaugstelle ermöglichte. Die Messungen wurden jedoch verfälscht, da durch die zusätzliche Öffnung Falschluft angesaugt wurde und ausserdem extreme Turbulenzen im Kanal auftraten, welche durch die Konstruktion des Ansaugkanals bedingt sind. Aus diesem Grund wurde bei der zweiten Messung die Messstelle in die Mitte des Lufteintrittes verlegt. Dies hat jedoch zur Folge, dass der kleine Luft-einlass nicht berücksichtigt werden konnte.



Bild 8 Frischluft erste Messung



Bild 9 Messpunkt der Frischluftzufuhr bei der zweiten Messung



Bild 10 Luft einlass welcher nicht gemessen wurde

Bei einer zukünftigen Messung müssten sowohl das horizontale als auch das vertikale Strömungsprofil des Ansaugkanals gemessen werden. Zudem sollte auch die nicht berücksichtigte Öffnung einbezogen werden. Da bei dieser konstruktionsbedingt keine einheitliche Strömung vorliegt, müsste auch hier ein Geschwindigkeitsprofil gemessen werden.

Im **Abluftammelkanal** wurde sowohl die Temperatur (erste und zweite Messung) als auch die relative Feuchtigkeit (nur in der zweiten Messung – gemessener Wert 85 %) direkt im geschlossenen Kanal gemessen (ca. 5 Minuten), was die Bestimmung des Wassergehaltes der Luft ermöglichte. Im Weiteren wurde über den Wasserverlust der Rohlinge der Wasseranteil in der Abluft errechnet (erhaltener Wert 92.5 %). Der Vergleich des errechneten mit dem gemessenen Wert lässt den Schluss zu, dass die Berechnung der Feuchtigkeit die Realität mit relativ hoher Genauigkeit widerspiegelt.

Eine Ungenauigkeit der gewählten Messstelle besteht möglicherweise darin, dass diese nicht direkt am Eintrittspunkt der Abluft in den Wärmetauscher liegt und somit unter Umständen nicht alle Trocknungskammern berücksichtigt.



Bild 11 Abluftsammelkanal

Die angesaugte **Brennerluft** für das Stützfeuer wurde direkt in der Mitte der Ansaugfläche gemessen. Auf dem Typenschild ist ein maximaler Volumenstrom von 60 m³/min verzeichnet, gemessen wurden jedoch lediglich 36 m³/min. Dies bedeutet, dass entweder der Motor nicht im Bestpunkt läuft, oder die gemessene Geschwindigkeit nicht repräsentativ für diese Messstelle ist. Aus diesem Grund sollte bei einer nächsten Messung ein Geschwindigkeitsprofil gemessen werden.



Bild 12 Ansaugung Brennerluft

Da in den Leitungen der **Abluft** keine zugängliche Öffnung vorhanden war, wurde eine Messstelle mittels Bohrung erstellt. Die so erstellte Messstelle lag direkt nach einem Diffuser und vor einer 90°-Krümmung. Um dies zu berücksichtigen wurde zur Bestimmung eines repräsentativen Wertes das Strömungsprofil gemessen. Aus den erhaltenen Daten geht hervor, dass der Luftzug stark von den Störstellen beeinflusst wird. Um einen noch repräsentativeren Messwert zu erhalten, müsste das horizontale sowie auch das vertikale Strömungsprofil gemessen werden. Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung des Energiestromes besteht darin, die Temperatur vor dem Wärmetauscher zu messen und die Massenströme nach diesem zu erfassen (keine Beeinflussung durch Wärmetauscher).



Bild 13 Abluft aus dem Trockner



Bild 14 Störeinflüsse



Bild 15 Bohrung zur Messung der Abluft

Die Messung der **Wandtemperaturen** des Trocknungsraumes wurden jeweils 2 m über dem Boden an diversen Stellen vorgenommen. Je nach Wetterbedingungen wird ein Teil der hinteren sowie die rechte Seitenwand von der Sonne bestrahlt bzw. von der Aussentemperatur beeinflusst. Bei der rechten Seitenwand im Inneren der Halle war eine deutlich fühlbare Zugluft vorhanden, wodurch diese Seitenwand zu-

sätzlich gekühlt wird. Um diese Einflussfaktoren zu berücksichtigen, wurden verschiedene Messungen durchgeführt und die erhaltenen Messwerte gemittelt.



Bild 16 Hintere Trocknungskammerwand, ein Teil ist in der Halle und ein Teil an der frischen Luft



Bild 17 Hintere Trocknungskammerwand, ein Teil der Wand steht hinter einem anderen Gebäude



Bild 18 Hintere Trocknungskammerwand und linke Seitenwand in der Halle

Die Messung der Temperatur der **Tore der Kammertrockner** wurde an den schwarzen Beschriftungstafeln vorgenommen. Da auf einem schwarzen Untergrund gemessen werden konnte, waren ideale messtechnischen Voraussetzungen gegeben. Die Messposition liegt jedoch nicht in der Mitte der Tore, sondern in der unteren Hälfte. Aus diesem Grund liegt die effektive Tortemperatur etwas höher als die gemessene. Dieser Einfluss kann jedoch als gering betrachtet werden.



Bild 19 Ein Tor der Trocknungskammern

11.3.6 Messpositionen am Tunnelofen

Für die Messung der Hallenluft wurde ein Schlauch zwischen dem Kanal und dem Tunnelofen entfernt, was die Messung ermöglichte. Sie wurde an beiden Messtagen an derselben Stelle durchgeführt. Die Öffnung entsprach gerade dem Flügelradanemometer, so dass die gemessene Geschwindigkeit der mittleren Geschwindigkeit entspricht.



Bild 20 Sturzkühlung auf dem Tunnelofen

Zur Versorgung der **Brenner mit Luft** gibt es zwei Ansaugöffnungen. In beiden Fällen wurde in der Mitte der Ansaugöffnung gemessen. Der Motor zur Versorgung der Heisszone mit Luft (mehrere Brenner) ist mit einem Typenschild versehen. Diesem konnte der maximale Volumenstrom von 42 m³/min entnommen werden. Aus den gemessenen Daten wurde ein Volumenstrom von 27.4 m³/min ermittelt. Dies bedeutet, dass entweder der Motor nicht im Bestpunkt läuft, oder die gemessene Geschwindigkeit nicht repräsentativ für diese Messstelle ist. Aus diesem Grund sollte bei einer nächsten Messung ein Geschwindigkeitsprofil gemessen werden. Beim anderen Motor ist kein Typenschild vorhanden.

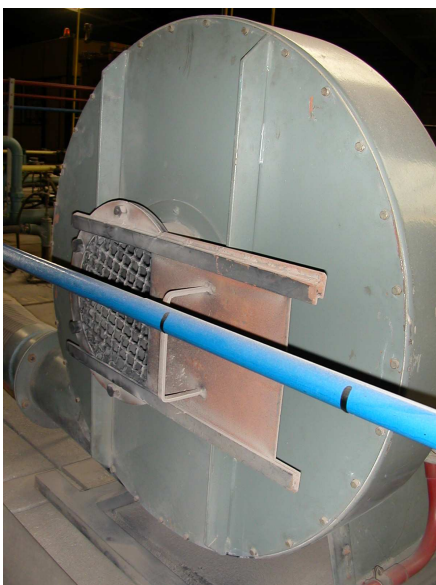


Bild 21 Luft für die Brenner in der Heisszone



Bild 22 Luft für die Brennerin der Vorwärmzone

Die **Ofenabluft** wurde an dem Stutzen gemessen, in welchem der Abluftquerschnitt noch rechteckig ist. Da die Profilauswertung eine stark variierende Geschwindigkeit zeigte, sollte bei einer nächsten Messung evt. direkt bei der Abluftöffnung (Kamin) gemessen werden. An dieser Stelle sollten geringere Störeinflüsse auftreten. Auf dem Bild 9 ist erkennbar, wie die zuströmende Luft kurz vor der Messstelle umgelenkt wird, was für das stark variierende Geschwindigkeitsprofil an der Messstelle verantwortlich ist.

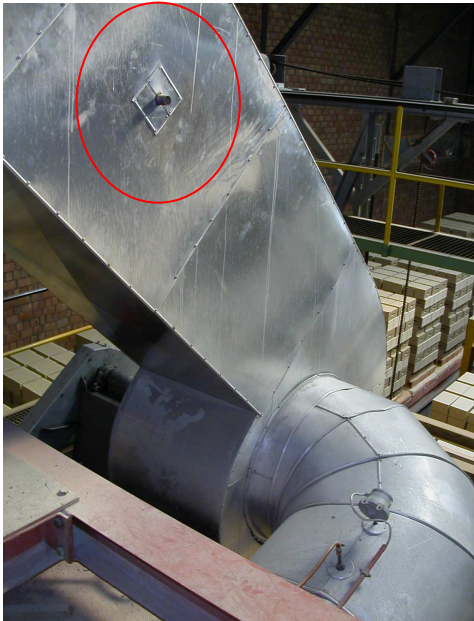


Bild 23 Messposition der Tunnelofenabluft

Die Messung der Abluft zum Trockner wurde am Stutzen gemäss Bild durchgeführt. Die Umlenkung der Abluft zum Trockner unmittelbar vor der Messposition übte einen grossen Störeinfluss aus. Bei der zweiten Messung wurde daher unmittelbar vor dem Trockner gemessen.



Bild 24 Messposition der Abluft zum Trockner

Die genauen Messpositionen für die Wand- und Tortemperaturen befinden sich im Messprotokoll. Die Messhöhe an den Seitenwänden betrug immer die Hälfte der Tunnelofenhöhe. Die Tortemperaturen wurden an den Torseiten gemessen. Eine Messung in der Mitte der Tore war technisch nicht möglich.



Bild 25 Eingang zum Tunnelofen

Die nicht ausgeglichenen Massen- und Energiebilanzen beruhen zum grössten Teil auf unkontrollierten Lufteinblasungen. Da auch nach der zweiten Messung die Massenbilanz nicht stimmte, wurde eine weitere Überprüfung der Ziegelei Fisibach AG vorgenommen. Dabei wurde ein nicht erfasster Frischluftzustrom entdeckt. Dieser befindet sich am Ende des Tunnelofens und kühlt die Backsteine ab kurz bevor sie den TO verlassen. Aus einer Schätzung des Massenstromes ist dieser Zustrom jedoch nicht gross genug, um die Differenz zwischen ein- und ausströmender Masse zu begleichen. Es ist jedoch wichtig, dass dieser Strom bei einer nächsten Messung berücksichtigt wird. Die Ansaugung wird im unten aufgeführten Bild dargestellt.



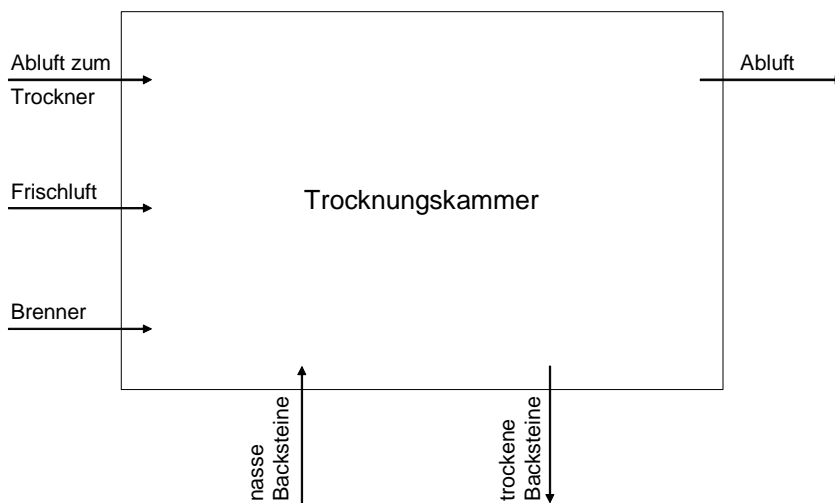
Bild 26 Endeinblasung

11.4 BILANZGEBIETE DER MESSUNGEN

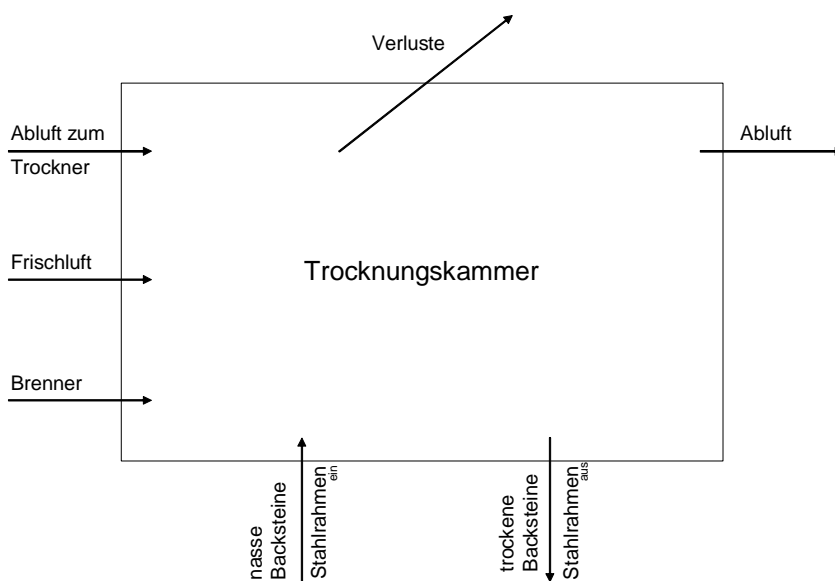
11.4.1 Trocknungsprozess

Die Fisibach AG verwendet zum Trocknen der Backsteine 6 Doppelrockungskammern. 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.



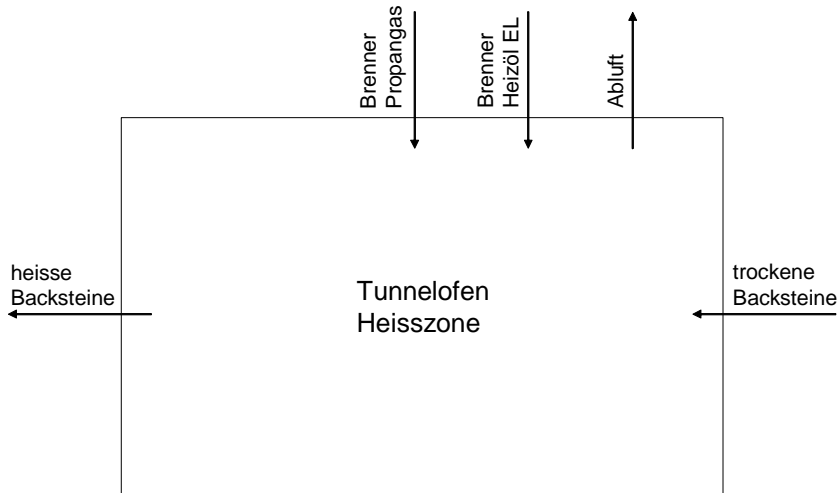
Graphik 9 Bilanzgebiet der Massenbilanz Trocknungskammer



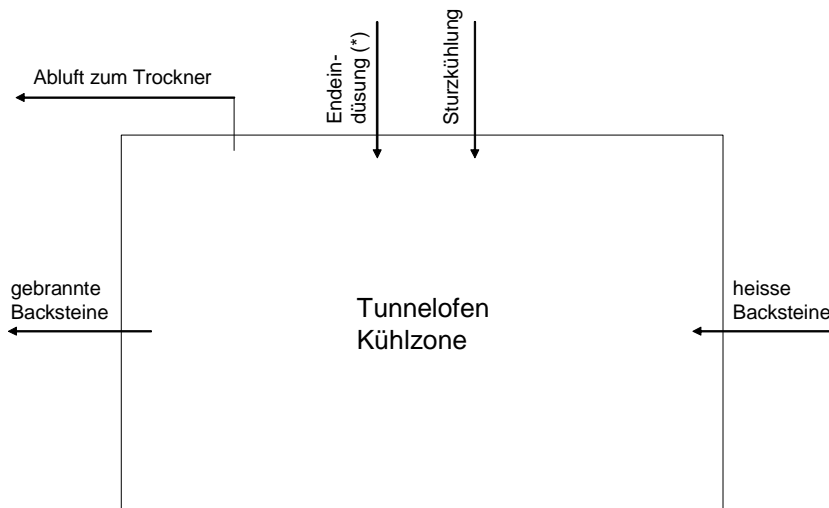
Graphik 10 Bilanzgebiet der Energiebilanz Trocknungskammer

11.4.2 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.



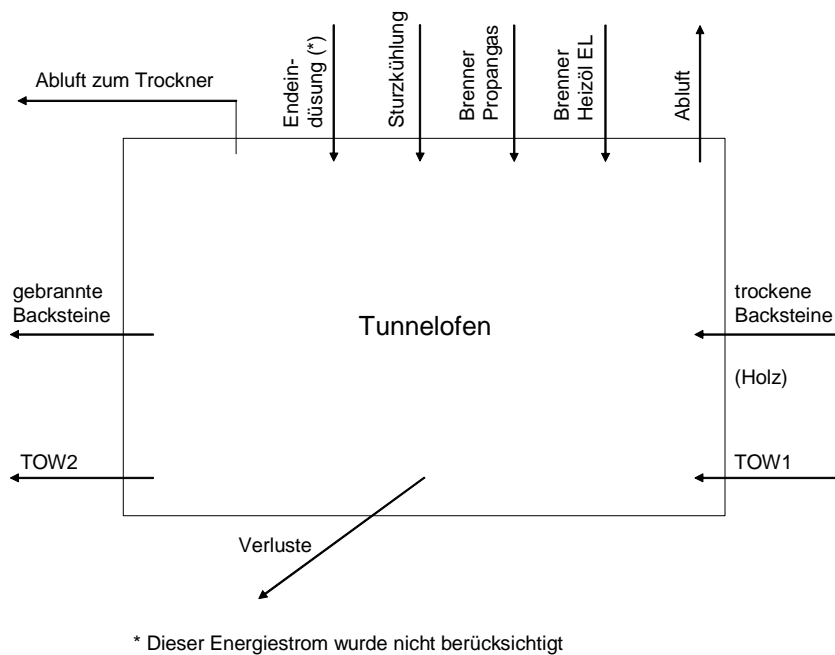
Graphik 11 Bilanzgebiet Massenbilanz Heisszone Tunnelofen



* Dieser Massenstrom wurde nicht berücksichtigt

Graphik 12 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.



Graphik 13 Bilanzgebiet Energiebilanz Tunnelofens

11.5 MESSERGEBNISSE

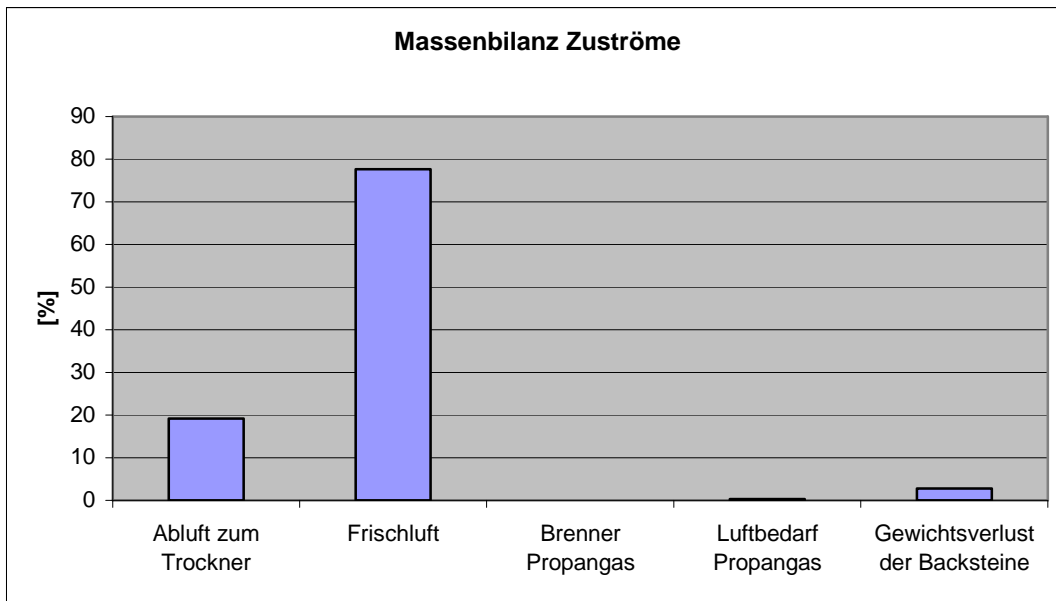
Es sind folgende Daten vorhanden: Aus der ersten Messung vom 12.05.2005 eine Massenbilanz (I) und daraus abgeleitet eine Energiebilanz (I). Am zweiten Messtag, welcher am 10.06.2005 stattfand, wurden zwei Massenbilanzen berechnet, die erste am Morgen (Massenbilanz II) und die zweite am Nachmittag (Massenbilanz III).

Es ist zu berücksichtigen, dass am ersten Messtag die Vorschubgeschwindigkeit eines Tunnelofenwagens bei 100 min lag, jedoch am zweiten Messtag bei 88 min.

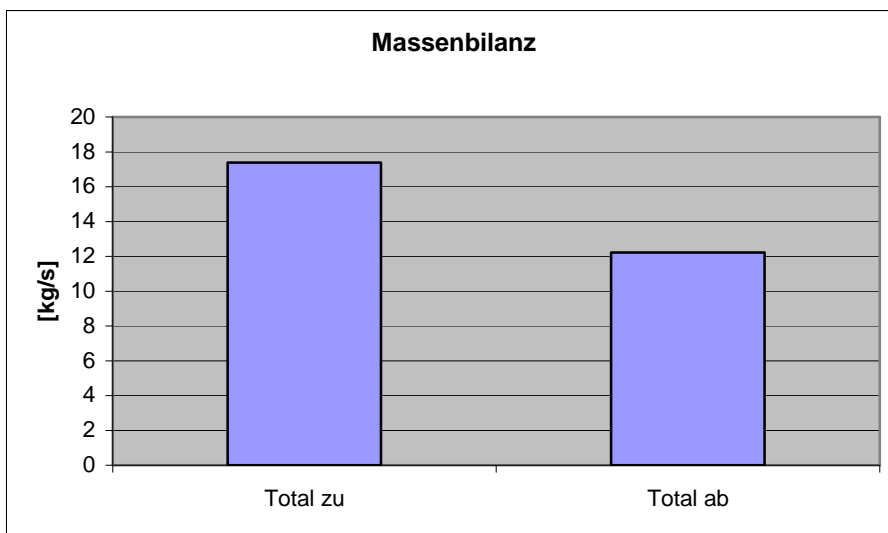
Für die Berechnung der Energieströme, wurde die Referenztemperatur 0°C gewählt. Dies stimmt mit dem Mollier-hx-Diagramm überein. Bei der Berechnung mittels der spezifischen Wärmekapazität wurde aus diesem Grund die Temperatur in °C eingesetzt. Das einzige Problem bestand darin, dass bei der Berechnung des Heizwertes des Propangases, des Heizöles EL und Holzes, die Referenztemperatur bei 25°C lag. Aus diesem Grund können die berechneten Werte nur mit Vorsicht interpretiert werden. Die Anpassung der Referenztemperatur ist kein leichtes Unterfangen und daher wurde darauf verzichtet.

11.5.1 Trockner

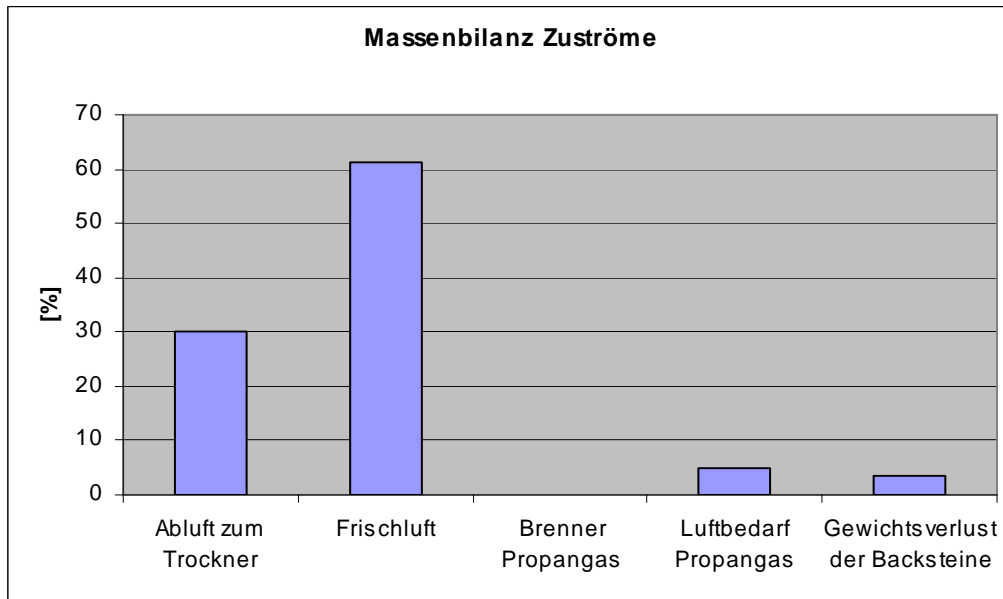
Bei der Berechnung der **Massenbilanzen** wurde die Luftfeuchtigkeit nicht berücksichtigt. Ebenfalls hat man auf eine graphische Darstellung der Abströme aus den Trocknungskammern verzichtet, da es nur einen solchen Strom gibt.



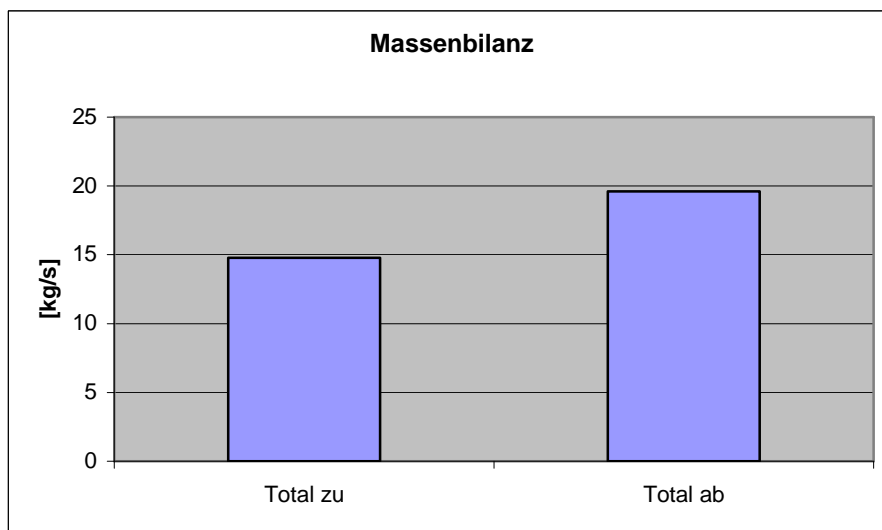
Graphik 14 Graphische Darstellung der Trockner Zuströme - Massenbilanz (l)



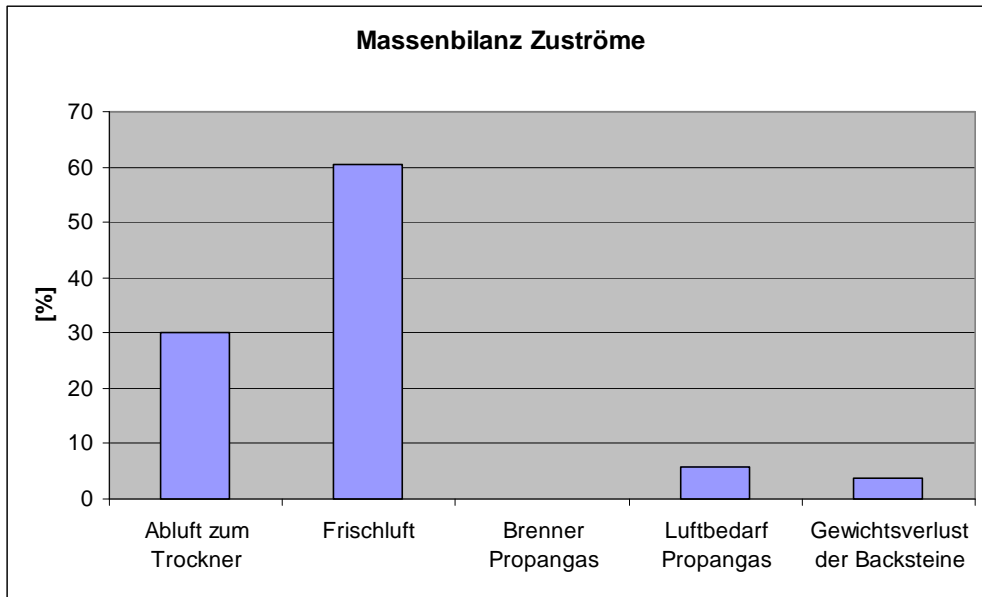
Graphik 15 Gegenüberstellung der zu- und der abströmenden Masse im Trockner - Massenbilanz (l)



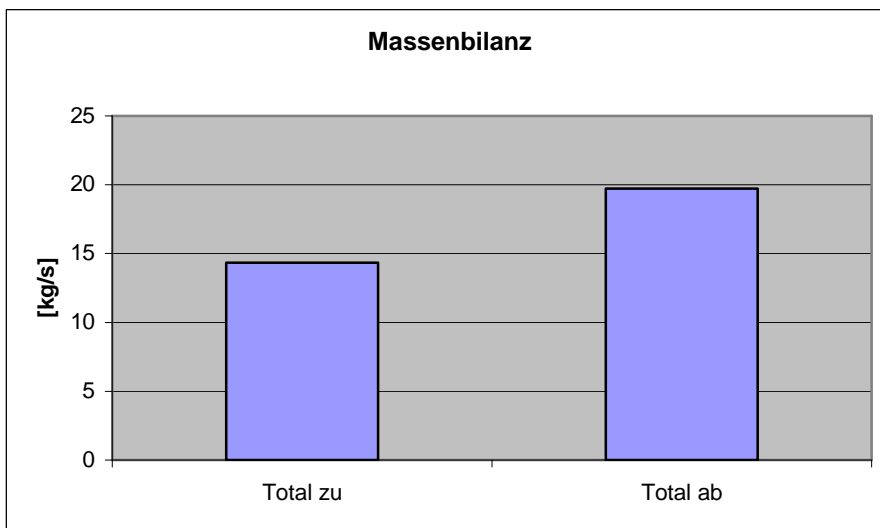
Graphik 16 Graphische Darstellung der Trockner Zuströme - Massenbilanz (II)



Graphik 17 Gegenüberstellung der zu- und der abströmenden Masse im Trockner - Massenbilanz (II)

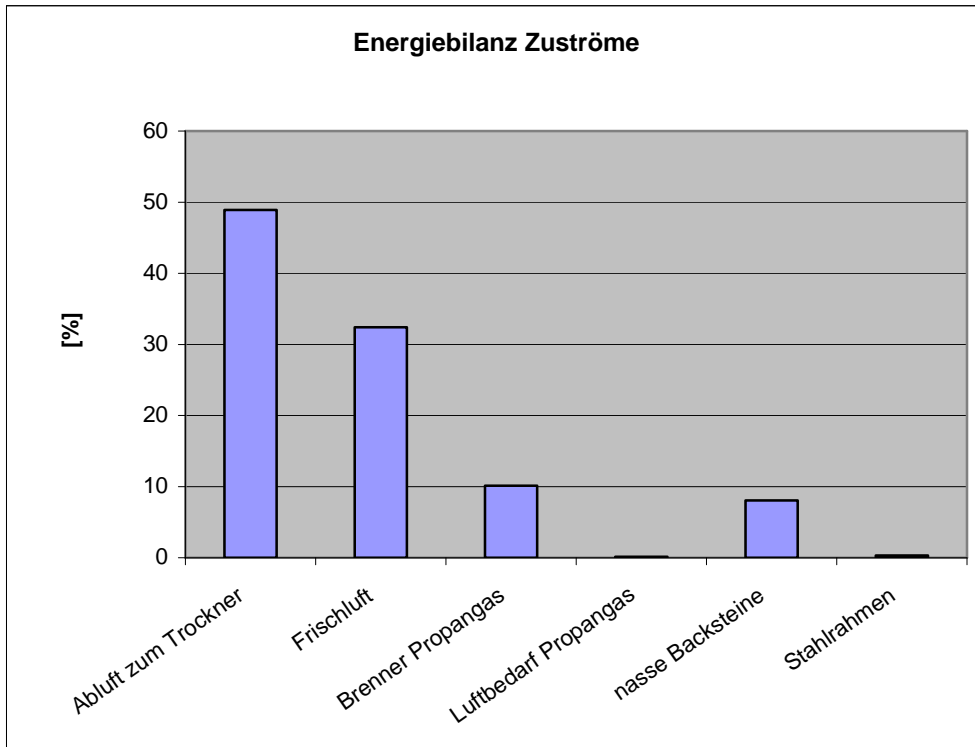


Graphik 18 Graphische Darstellung der Trockner Zuströme - Massenbilanz (III)

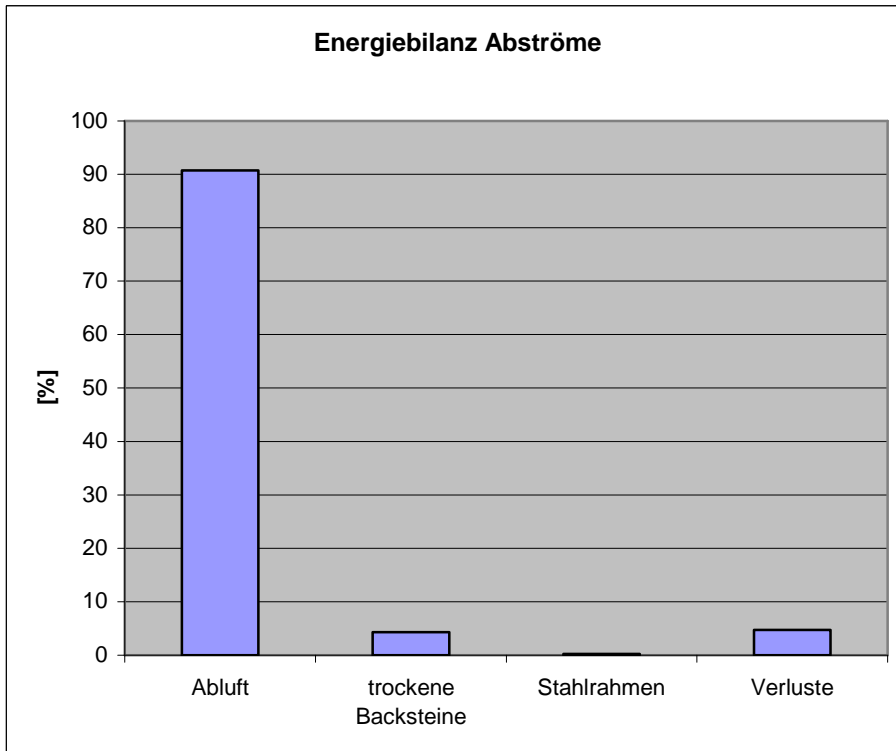


Graphik 19 Gegenüberstellung der zu- und der abströmenden Masse im Trockner - Massenbilanz (III)

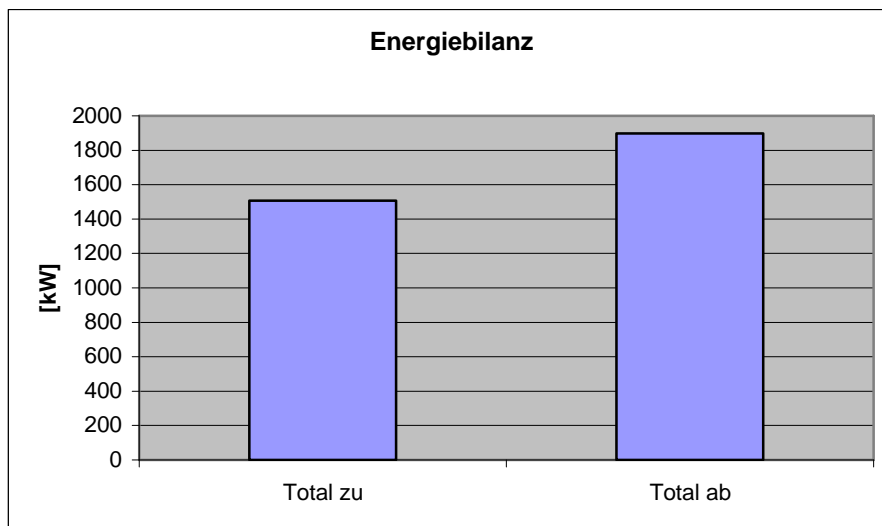
Die **Energiebilanz** des Trocknungsprozesses wurde nur bei der ersten Messung ermittelt, die zugrunde gelegte Massenbilanz ist die Massenbilanz (I). Es ist zu beachten, dass diese Massenbilanz nicht aufging. Aus diesem Grund sind die berechneten Werte der Energiebilanz mit Vorsicht zu genießen. Auf die erneute Erstellung einer Energiebilanz wurde am zweiten Messtag verzichtet, da auch bei dieser Messung die Massenbilanzen unterschiedliche Gesamtwerte für die Zu- und Abströme aufwiesen. Bei der Berechnung der Energiebilanz wurde die Luftfeuchtigkeit berücksichtigt.



Graphik 20 Zuströmende Energie zum Trockner



Graphik 21 Abströmende Energie vom Trockner

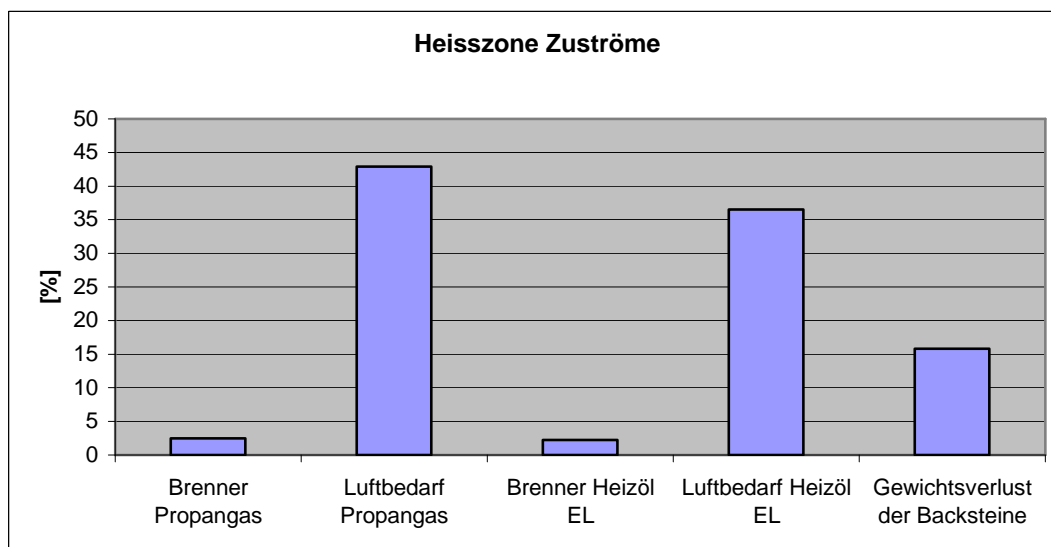


Graphik 22 Vergleich der zu- und abströmenden Energien des Trockners

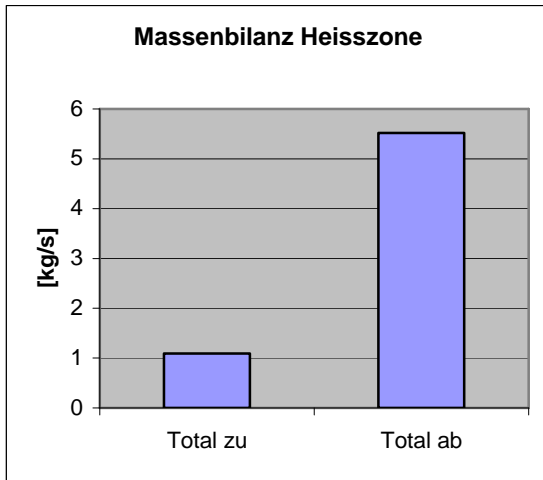
11.5.2 Tunnelofen

Wie oben erwähnt, wurde der Tunnelofen in zwei Teilbereiche unterteilt (Heiss- und Kühlzone). Ebenfalls wurde die Massenbilanz über den gesamten Tunnelofen berechnet.

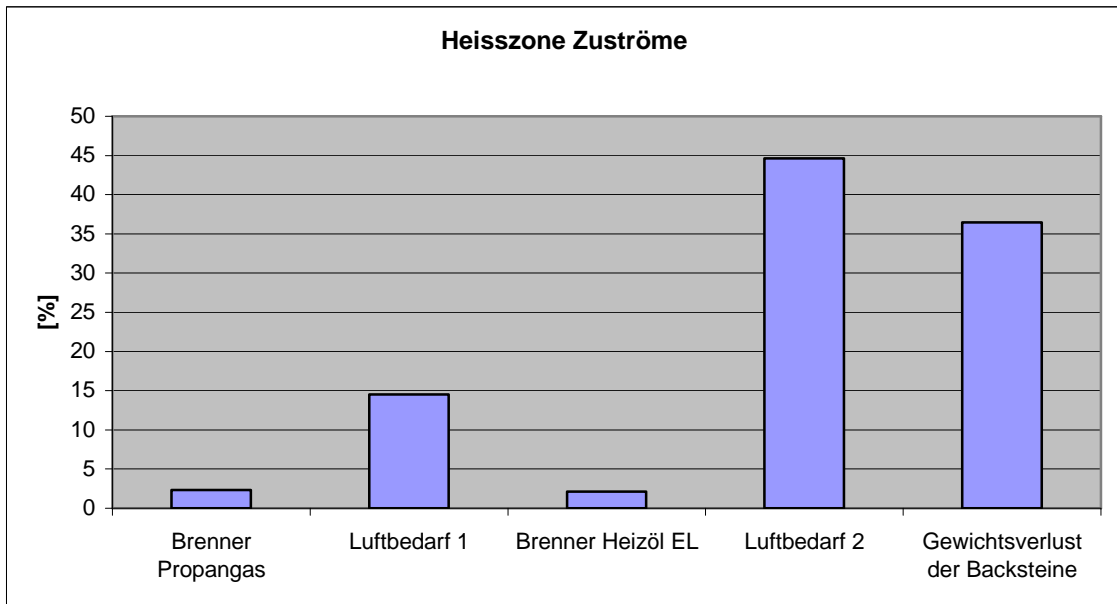
Bei der Berechnung der Massenbilanzen wurde die Luftfeuchtigkeit nicht berücksichtigt. Ebenfalls hat man auf eine graphische Darstellung der Abströme aus dem Tunnelofen verzichtet, da es nur einen solchen Strom gibt.



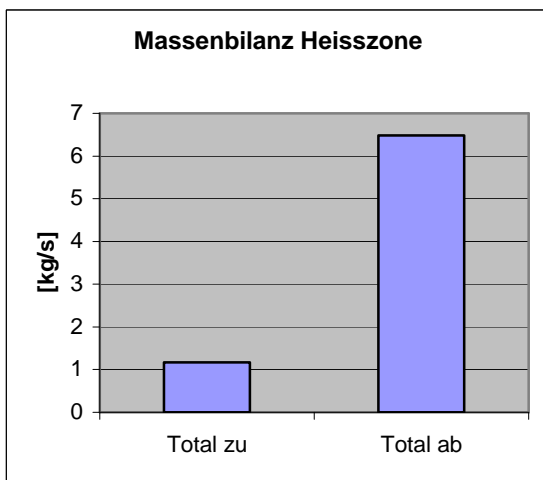
Graphik 23 Graphische Darstellung der Zuströme Abschnitt Heisszone - Massenbilanz (I)



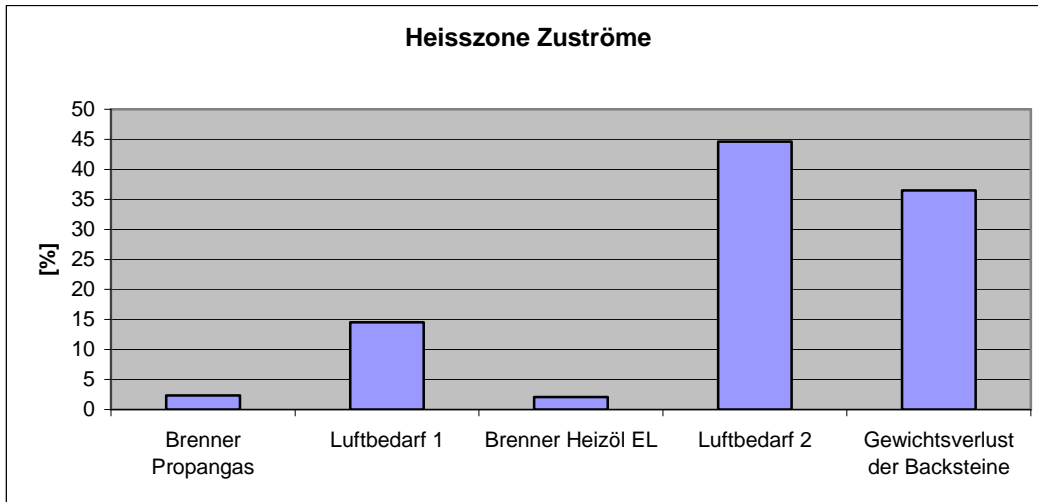
Graphik 24 Gegenüberstellung der zu- und der abströmenden Masse im Abschnitt Heisszone – Massenbilanz (I)



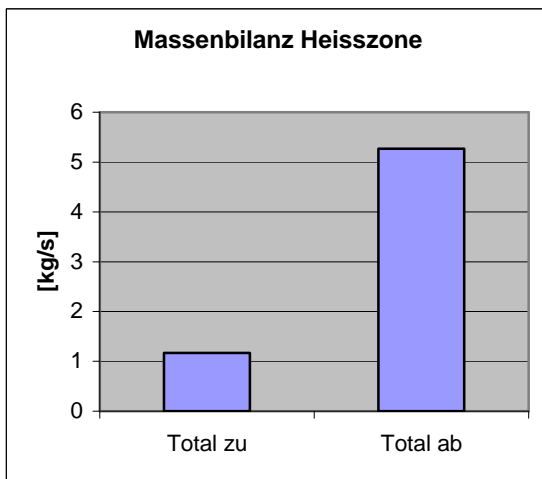
Graphik 25 Graphische Darstellung der Zuströme Abschnitt Heisszone - Massenbilanz (II)



Graphik 26 Gegenüberstellung der zu- und der abströmenden Masse im Abschnitt Heisszone – Massenbilanz (II)

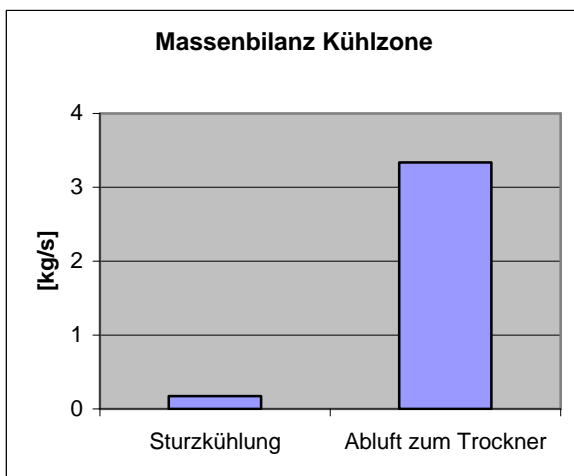


Graphik 27 Graphische Darstellung der Zuströme Abschnitt Heisszone - Massenbilanz (III)

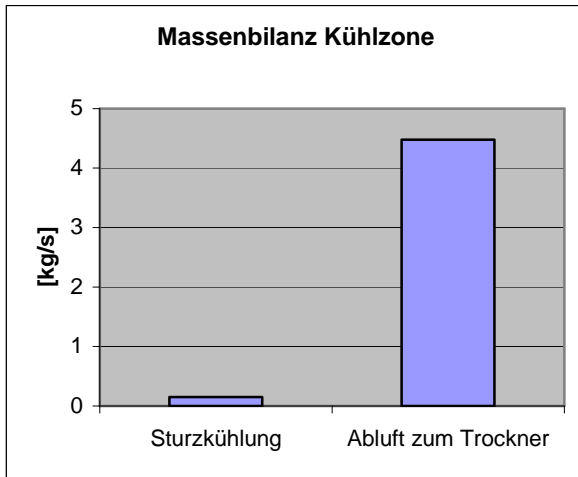


Graphik 28 Gegenüberstellung der zu- und der abströmenden Masse im Abschnitt Heisszone – Massenbilanz (II)

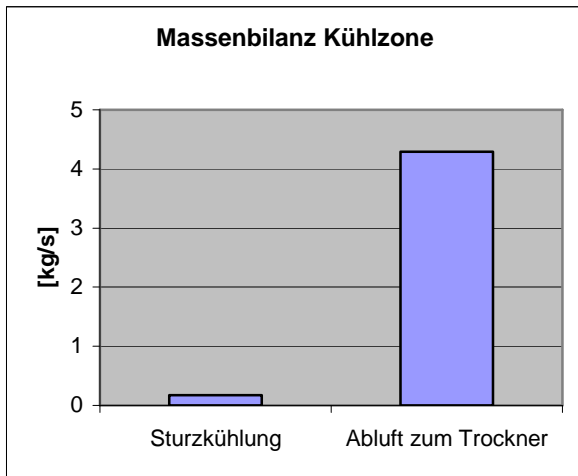
Alle zuströmenden und abströmenden Massen in der Kühlzone sind unten dargestellt. Die Sturzkühlung wird zugeführt und die Abluft zum Trockner wird abgeführt.



Graphik 29 Graphische Darstellung der Zuströme Abschnitt Kühlzone - Massenbilanz (I)

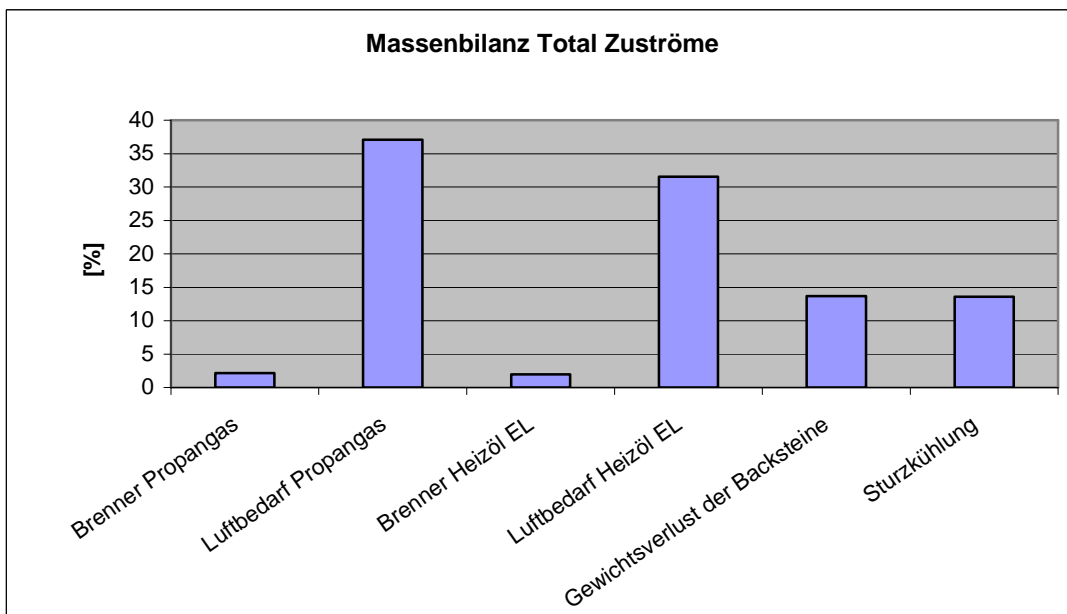


Graphik 30 Graphische Darstellung der Zuströme Abschnitt Kühlzone - Massenbilanz (II)

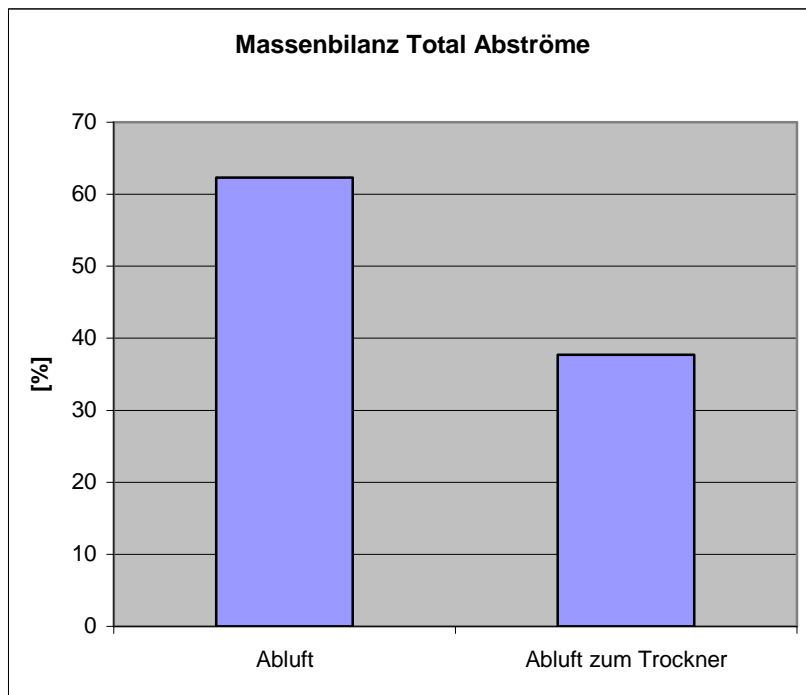


Graphik 31 Graphische Darstellung der Zuströme Abschnitt Kühlzone - Massenbilanz (III)

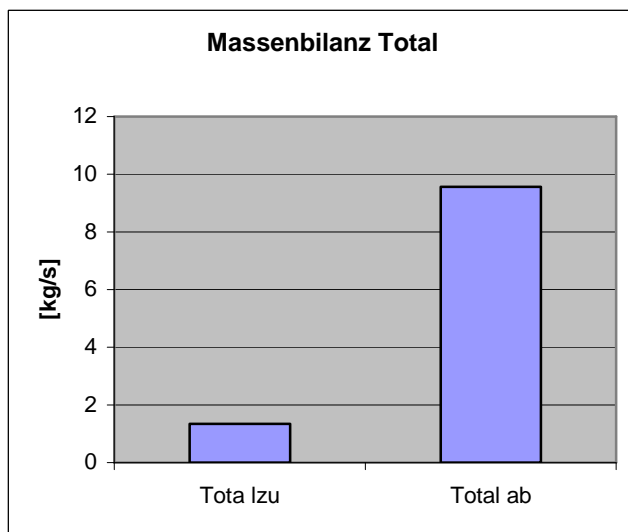
Die Massenbilanz des gesamten Tunnelofens setzt sich aus den Bilanzen der Heiss- und der Kühlzone zusammen.



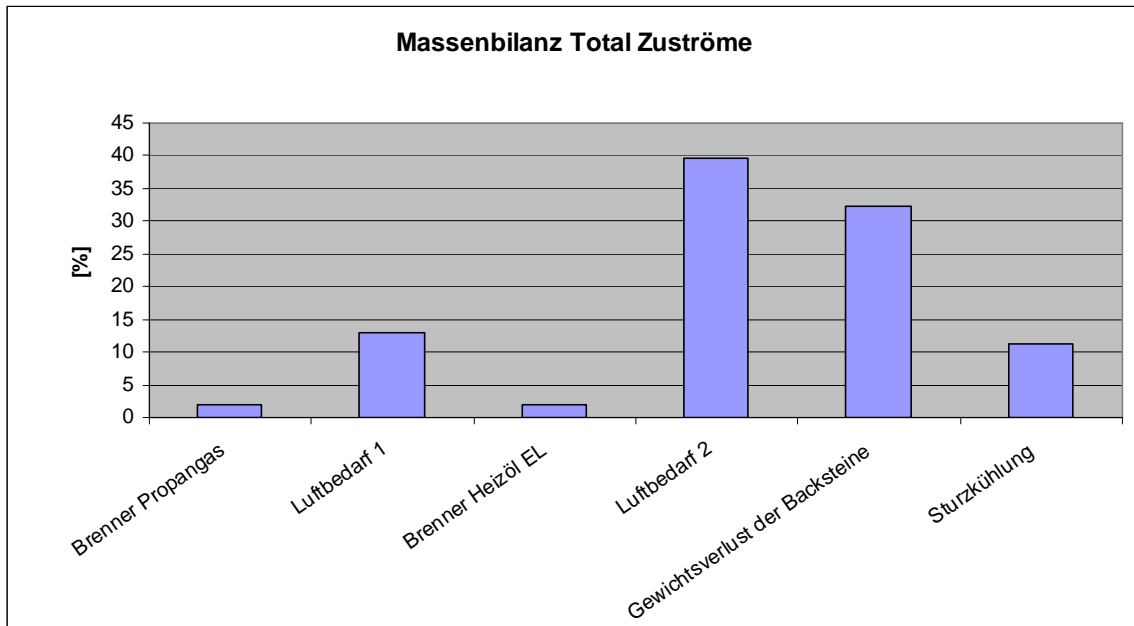
Graphik 32 Graphische Darstellung aller Zuströme des Tunnelofens - Massenbilanz (I)



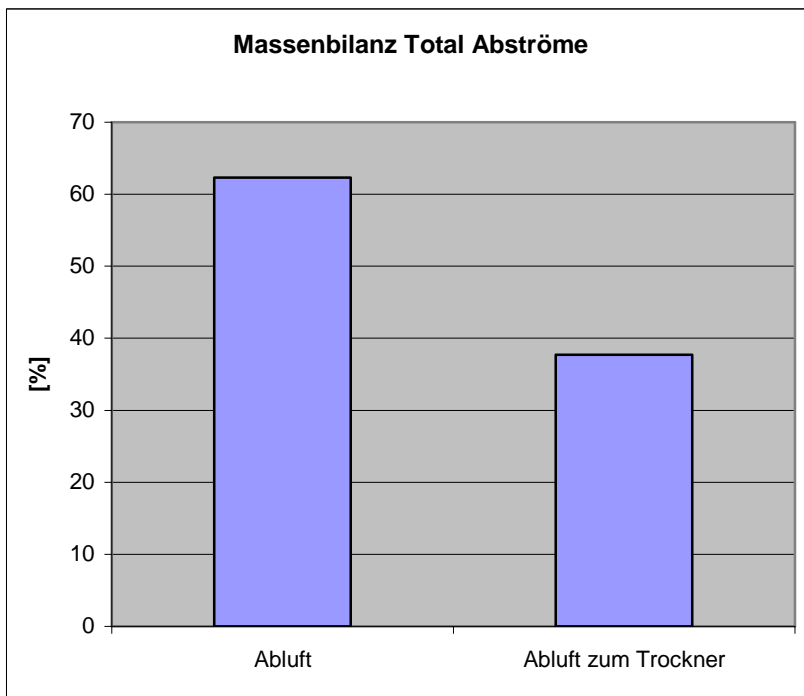
Graphik 33 Graphische Darstellung aller Abströme des Tunnelofens - Massenbilanz (I)



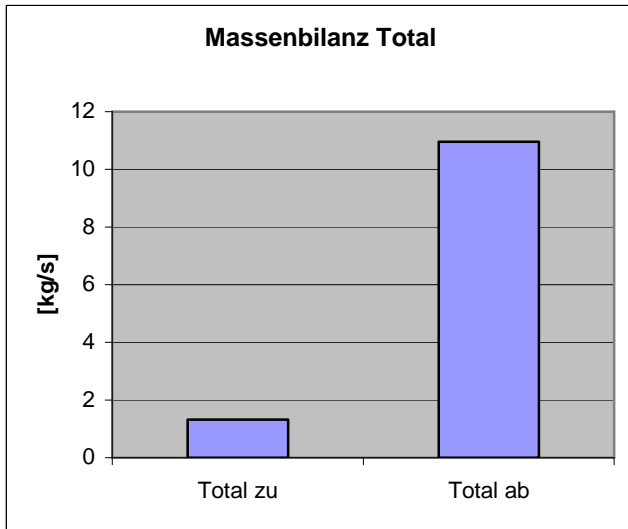
Graphik 34 Massenbilanz des gesamten Tunnelofens - Massenbilanz (I)



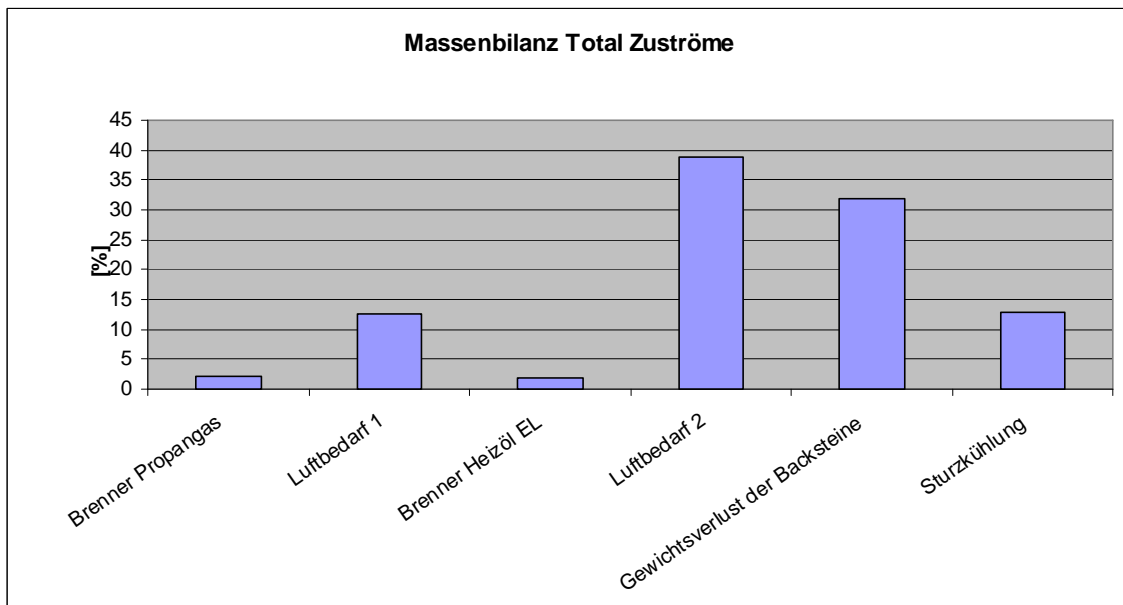
Graphik 35 Graphische Darstellung aller Zuströme des Tunnelofens - Massenbilanz (II)



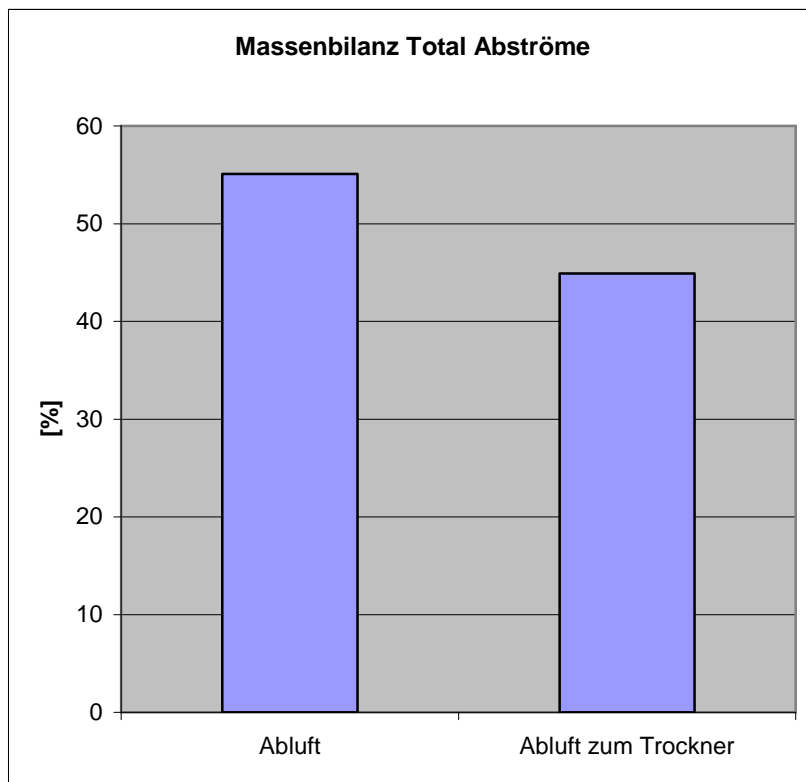
Graphik 36 Graphische Darstellung aller Abströme des Tunnelofens - Massenbilanz (II)



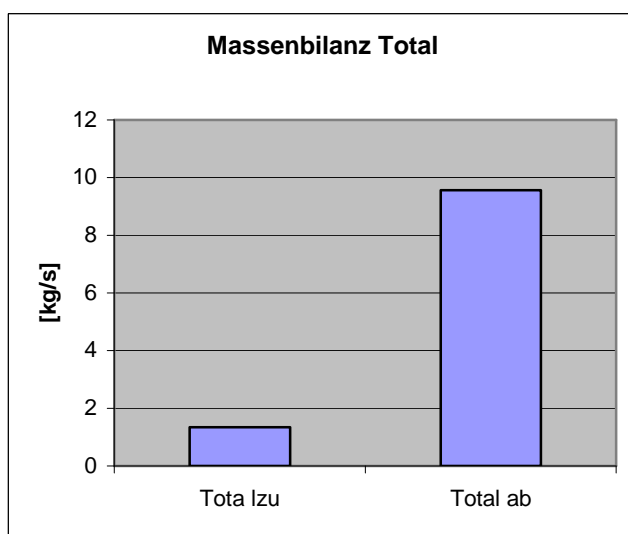
Graphik 37 Massenbilanz des gesamten Tunnelofens - Massenbilanz (II)



Graphik 38 Graphische Darstellung aller Zuströme des Tunnelofens - Massenbilanz (III)



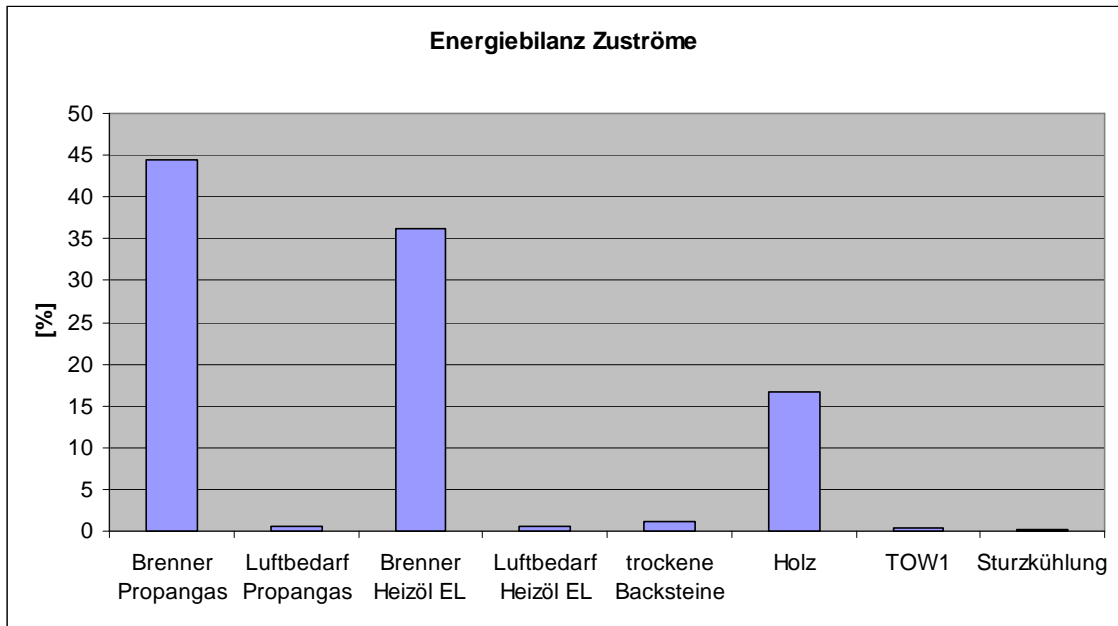
Graphik 39 Graphische Darstellung aller Abströme des Tunnelofens - Massenbilanz (III)



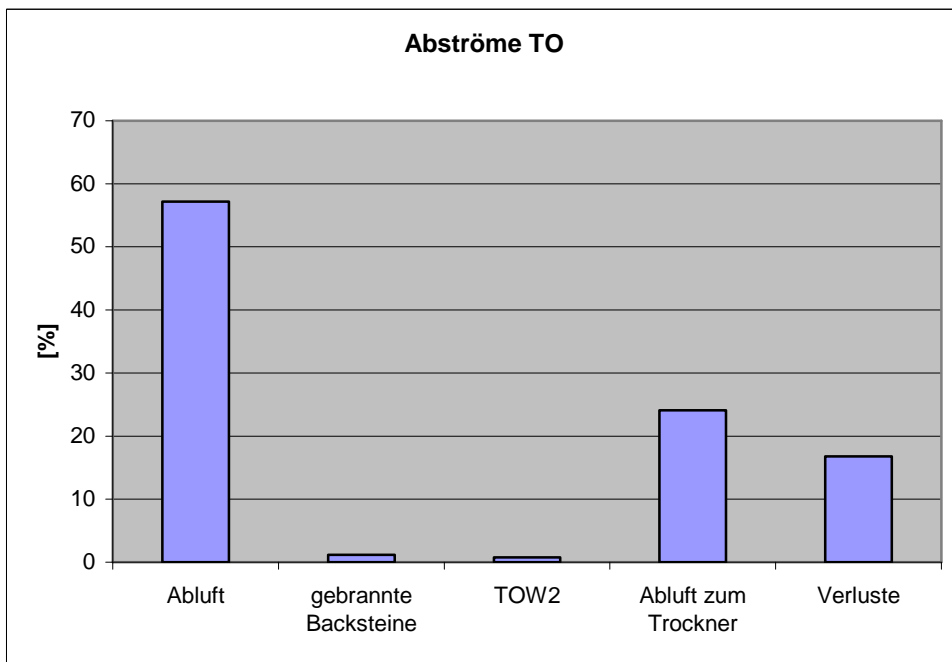
Graphik 40 Massenbilanz des gesamten Tunnelofens - Massenbilanz (III)

Die **Energiebilanz** des Tunnelofens wurde nur bei der ersten Messung ermittelt, die zugrunde liegende Massenbilanz ist die Massenbilanz (I). Es ist zu beachten, dass diese Massenbilanz nicht aufging. Aus diesem Grund sind die berechneten Werte der Energiebilanz mit Vorsicht zu genießen.

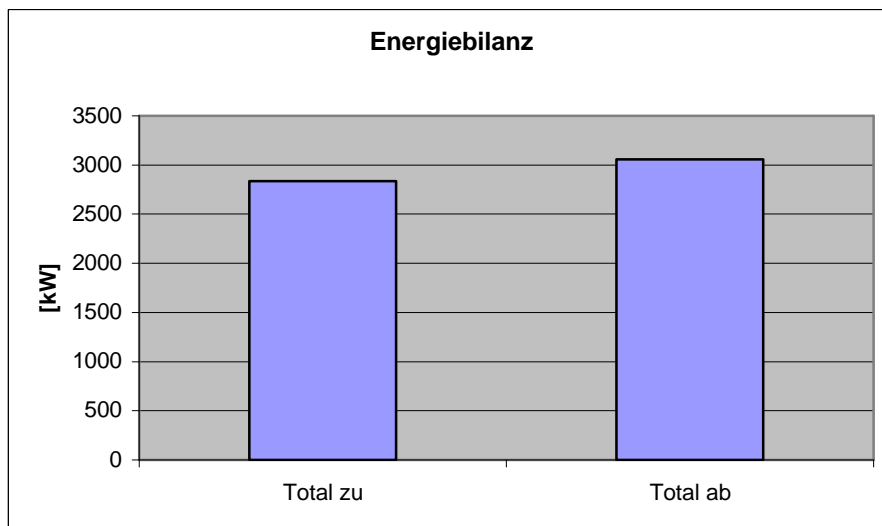
Bei der Berechnung der Energiebilanz wurde die Luftfeuchtigkeit berücksichtigt.



Graphik 41 Zuströmende Energie zum Tunnelofen



Graphik 42 Abströmende Energie vom Tunnelofen



Graphik 43 Vergleich der zu- und abströmenden Energien des Tunnelofens

11.6 AUSWERTUNG DER MESSERGEBNISSE

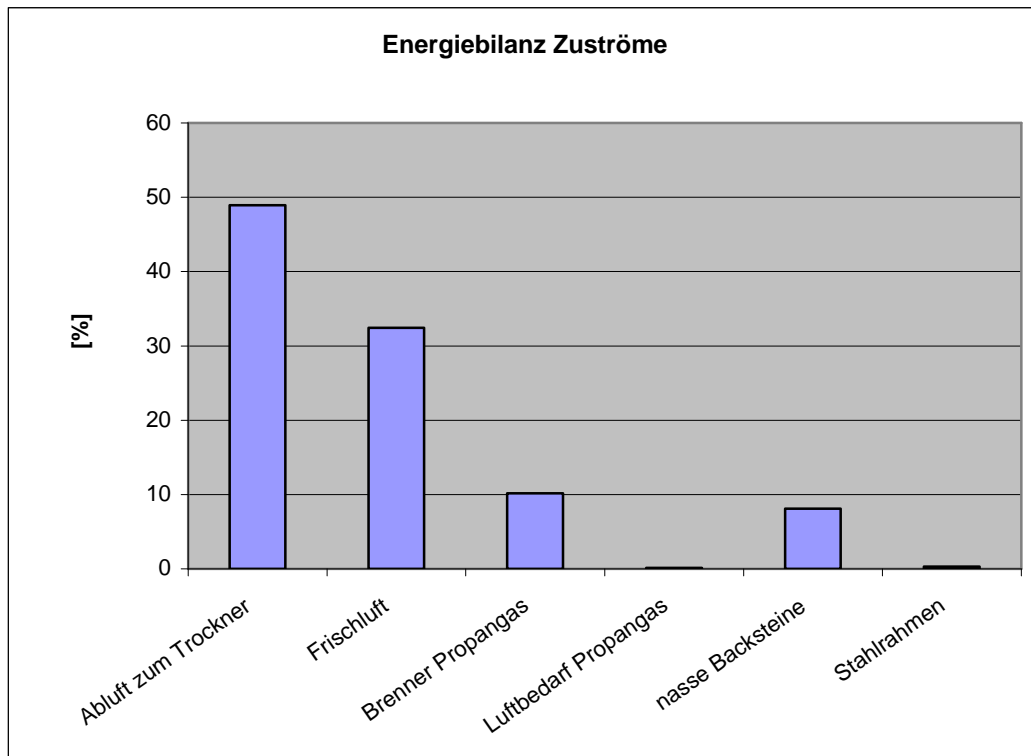
Die Messwerte der verschiedenen Messtage sind nicht direkt vergleichbar. Der Grund dafür liegt darin, dass die Anlage am 12.05.2005 (Massenbilanz I und Energiebilanz) mit der Leistungsstufe 5 (Vorschub im Tunnelofen alle 50 min) und bei der Messung am 10.06.2005 (Massenbilanz II und III) mit der Leistungsstufe 8 (Vorschub im Tunnelofen alle 44 min) gefahren wurde.

11.6.1 Trockner

Die Differenz der Zu- und Abströme in der **Massenbilanz des Trockners** liegt bei allen Messungen zwischen 25 - 30%. Es ist zu beachten, dass bei der ersten Messung die Zuströme grösser als die Abströme und bei der zweiten und dritten Messung die Abströme grösser als die Zuströme waren. Wie zu erwarten war, nahm die Differenz der Zu- und Abströme ab, je genauer die Geschwindigkeitsprofile gemessen wurden.

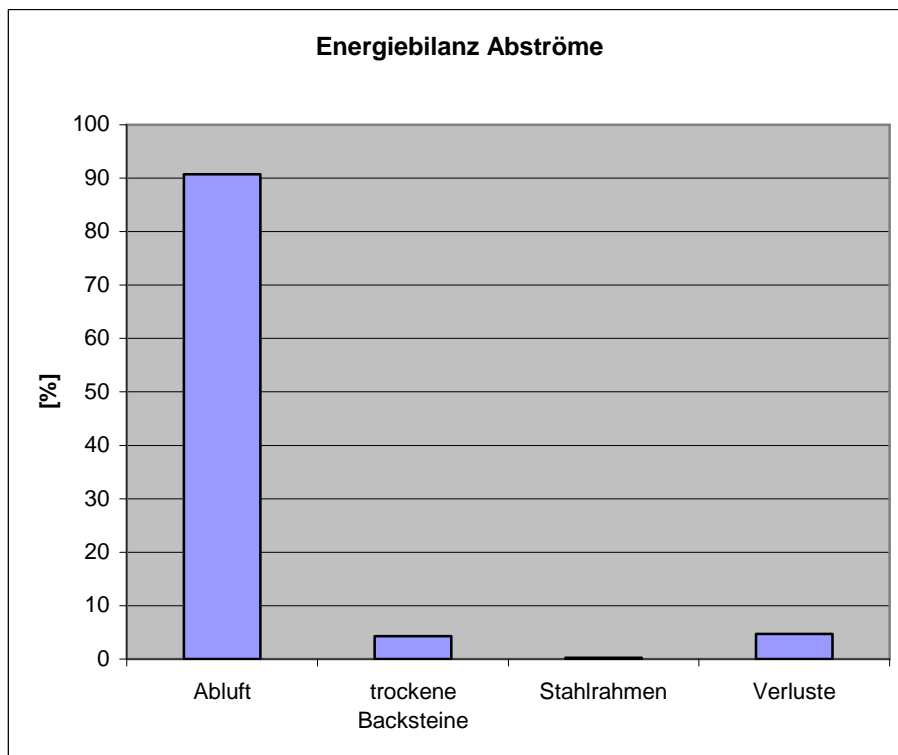
Bei der Berechnung der **Energiebilanz des Trockners** ist anzumerken, dass bei einer falschen Massenbilanz auch die Energiebilanz nicht stimmen kann. Bei der Massenbilanz (I) waren jedoch die Zuströme grösser und bei der Energiebilanz sind die Abströme grösser. Ein möglicher Fehler kann in der Berechnung der Feuchtigkeit der Abluft liegen, da diese nicht als gesamtes gemessen, sondern die einzelnen Wassergehalte aufsummiert wurden. Schon eine geringe Menge Wasser kann den Energieinhalt der Luft deutlich steigern oder senken. Die Differenz der zu- und abströmenden Energie beträgt 20%.

Der grösste Anteil der benötigten Energie wird über die Abluft aus dem Tunnelofen zugeführt (49% der gesamten Energie). Es ist zu beachten, dass die Stützfeuerung nur einen sehr geringen Energieanteil liefert (ca. 10%), welcher nur 2% über der Energie liegt, welche über die Rohlinge (nasse Backsteine) eingebracht werden.



Graphik 44 Prozentualer Anteil der Energiezuströme zum Trockner

Über die Abluft wird 91% der **Energie aus dem Trockner abgeführt**. Die Verluste über Wärmebrücken betragen lediglich 5%. Die restlichen 4% der Energie werden in den getrockneten Backsteinen ausgebracht. Die Ausfahrverluste der Stahlrahmen sind vernachlässigbar klein.



Graphik 45 Prozentualer Anteil der Energieabströme aus dem Trockner

11.6.2 Tunnelofen

Die gesamte **Massenbilanz des Tunnelofens** ist nicht ausgeglichen. Laut den Messungen wird viel mehr Masse aus dem Tunnelofen aus- als eingeführt, was physikalisch nicht möglich ist. Die Differenz der Ein- und Austrittsmasse beim Tunnelofen beträgt bei allen drei Messungen 85 - 88%.

Die Differenz ist durch folgende Gründe erklärbar:

- es wurde ein wesentlicherer Massenstrom nicht erfasst
- das Geschwindigkeitsprofil der Kanäle ist nicht symmetrisch und somit die gemessenen Strömungsprofile nicht repräsentativ
- es entstand ein Rechenfehler.

Bei der ersten Messung wurde ein zuführender Massenstrom (Endeinblasung) nicht berücksichtigt, dessen Einfluss ist jedoch aufgrund von Schätzungen zu klein, um die Differenz der Massenbilanz zu erklären.

Der Hauptanteil der **zugeführten Masse zum Tunnelofen** stammt aus der Luftzugabe für die Brenner (50 - 70 % der zugeführten Masse). Im Gegensatz dazu ist der Einfluss der Sturzkühlung eher gering, er beträgt lediglich 11 – 14 % der gesamten Masse. Je nach Backsteinsorte variiert der Gewichtsverlust der Backsteine stark. Trotzdem kann gesagt werden, dass dieser Verlust mit 13 – 33 % der insgesamt zugeführten Masse den zweitgrössten Posten der Bilanz ausmacht.

Die Brennstoffmenge, welche verwendet wird, ist vernachlässigbar klein.

Bei allen Messungen hat sich ergeben, dass die aus dem Tunnelofen zum Trockner **abgeleitete Masse** kleiner ist als diejenige, welche über den Rauchgaskamin an die Umgebung abgegeben wird. Bei der ersten (ungenaueren) Messung war das Verhältnis 1.6:1. Bei der genaueren Messung lediglich noch 1.2:1. Aus diesem Trend lässt sich vermuten, dass diese zwei Ströme in etwa gleich gross sind. Ob diese Behauptung stimmt, lässt sich nur mit einer weiteren, noch genaueren, Messung eruieren.

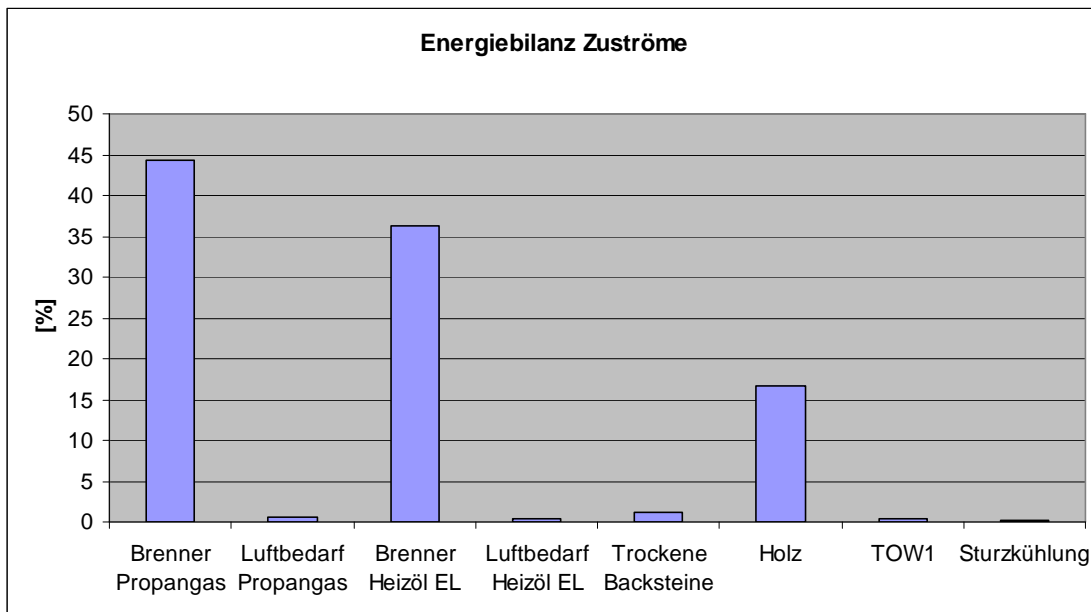
Bei der Messung der Tunnelofenabluft wurde bei der Profilmessung (Massenbilanz III) an einer Messposition eine grosse Streuung der Messwerte beobachtet. Bei der Berechnung für die Massenbilanz wurde der Mittelwert verwendet. Falls nun mit den beiden Extremwerten an dieser Stelle die Massenbilanz bestimmt wird, stellt sich heraus, dass sich die Differenz zwischen Zu- und Abströme nicht stark ändert. Sie bewegt sich immer noch im Bereich von 85% bis 88%. Dies bedeutet, dass die Differenz zwischen den Massenbilanzen bei der Berechnung (III) genau so stark variiert, wie beim Vergleich der drei Messungen (I, II, III).

Bei der zweiten Messung (Massenbilanz II) wurde der maximal mögliche Volumenstrom gemäss Typenschild des Motors berücksichtigt. Es ist nicht bekannt, ob der Motor im optimalen Arbeitspunkt läuft. Beim Vergleich des gemessenen Volumenstroms mit dem maximalen hat sich herausgestellt, dass dieser ca. 150% des gemessenen ausmacht. Jedoch, wenn die gesamte Massenbilanz betrachtet wird, hat dies nur einen Einfluss von 2.5%. Da die Abweichung aber grösser als 85% ist, hat dies keinen starken Einfluss. Ebenfalls darf nicht einfach angenommen werden, dass der Ansaugmotor im Bestpunkt läuft, solange dies nicht bewiesen ist.

Da bei der Berechnung der **Energiebilanz des Tunnelofens** die Daten aus der Massenbilanz (I) genommen wurden, ist anzumerken, dass bei einer falschen Massenbilanz auch die Energiebilanz nicht stimmen kann. Wie in der Massenbilanz wird auch bei der Energiebilanz mehr aus dem Tunnelofen aus- als zugeführt. Die Differenz liegt bei ca. 7.2 %.

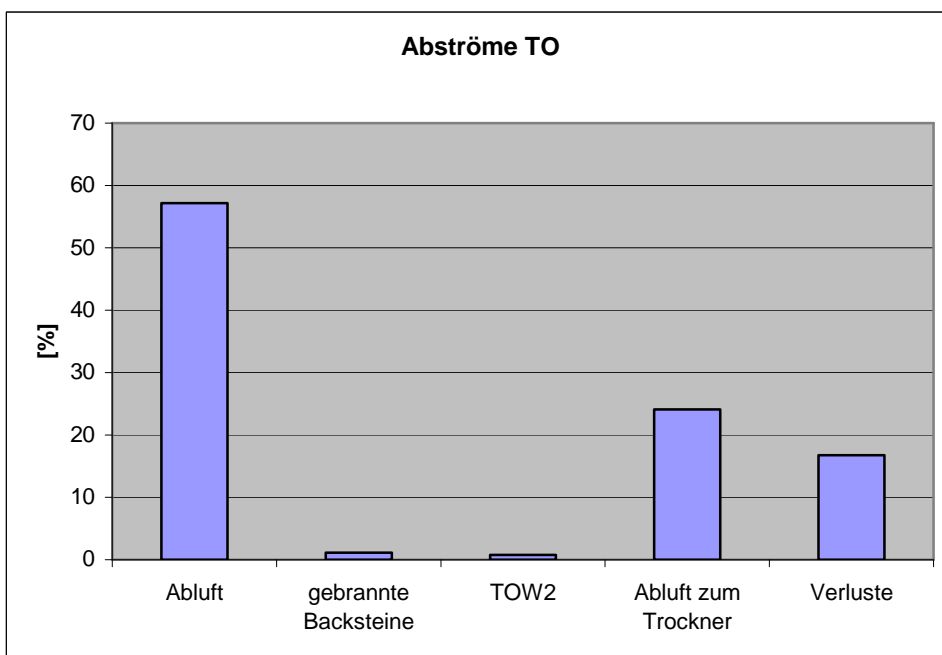
Da die Massenbilanz eine grössere Abweichung zwischen den eintretenden und austretenden Strömungen hat als die Energiebilanz, lässt sich daraus ableiten, dass, falls ein Massenstrom nicht gemessen wurde, dieser eine grosse Masse mit einer geringen Energie aufweisen müsste. Der Verdacht fällt also auf Einbrüche kalter Hallenluft.

Wie zu erwarten war, machen die Heizöl- und Propangasbrenner rund 80% der **zugeführten Energie in Tunnelofen** aus. Das zugegebene Porosierungsmittel (Sägemehl) liefert einen Energieanteil von 16 % bis 17 %. Die restliche Energie kommt aus der Sturzkühlung, dem Luftbedarf der Brenner, der inneren Energie der Backsteine und den Tunnelofenwagen.



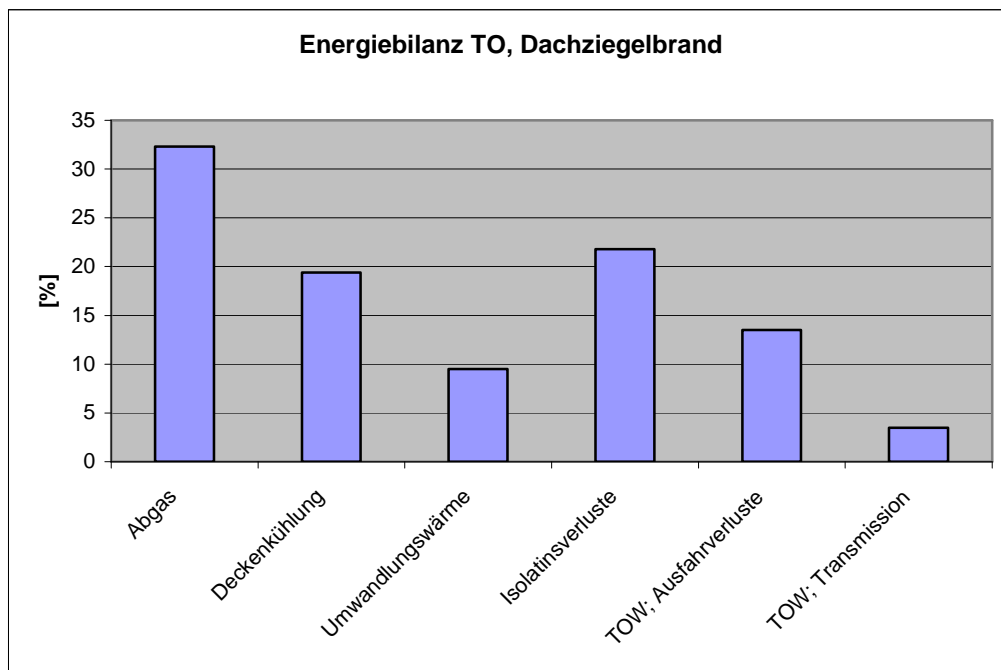
Graphik 46 Prozentualer Anteil der Energieabströme in den Tunnelofen

Erstaunlicherweise zeigte sich, dass die Rauchgasabluft, welche direkt an die Umgebung abgegeben wird, den grössten Energieinhalt aufweist (57 %). Die Abluft, welche zum Trockner geleitet wird, macht hingegen nur ca. 24% der Gesamtenergie aus. Ebenfalls machen sich die Verluste mit ca. 17% auch stark bemerkbar. Die Energie, welche die gebrannten Backsteine sowie der Tunnelofenwagen aus dem System nehmen, beträgt zusammen nur gerade ca. 2%.

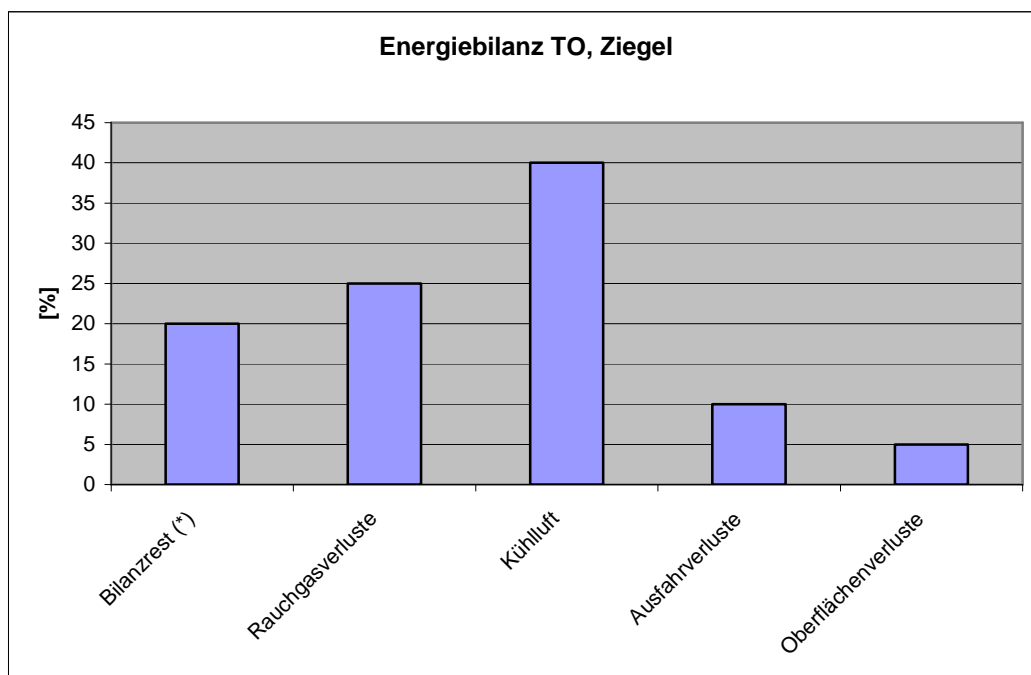


Graphik 47 Prozentualer Anteil der Energieabströme aus dem Tunnelofen

Die folgenden zwei Grafiken zeigen eine ähnliche Verteilung der Tunnelofen Abströme auf, wie der untersuchte Tunnelofen.



Graphik 48 Abströme eines Tunnelofens für den Dachziegelbrand³⁷



Graphik 49 Abströme eines Tunnelofens für den Ziegelbrand ((* Stoffumlagerungen)³⁸

11.7 MESSDATEN VOM 12.05.2005 - MASSENILANZ (I)

Wenn die Messung mehrmals durchgeführt wurde, stehen alle gemessenen Werte in den Tabellen. Für die weitere Berechnung wurde immer der Mittelwert dieser Werte verwendet. Das Feuchtigkeitsmessgerät musste teilweise mehrmals ein- und ausgeschaltet werden, bevor es die Messwerte anzeigte. Aus

³⁷ Hajo Hagens – Wärmetechnisches Verhalten von Tunnelofenwagen und Einfluss auf den Energiehaushalt des Brennprozesses

³⁸ ww.co2ncept.net – Massnahmen zur CO₂-emissionsminderung im Emissionshandel

diesem Grund sind diese Messwerte mit Vorsicht zu verwenden. Die Geschwindigkeit in einem Kanal wurde immer in dessen Mitte gemessen.

Der Luftdruck am Messtag betrug laut Internet (www.wetter.com) 1017 hPa.

11.7.1 Tunnelofen

Produktionsstufe 5 (Vorschub im Tunnelofen alle 50 min), wobei zur Messzeit 12.5-er und 15-er Module gebrannt wurden.

| | | |
|---|---------------------|---------------------------|
| Temperatur der trockenen Backsteine (12.5-er) | Temperatur | 23 °C |
| Temperatur der gebrannten Backsteine (15-er) | Temperatur | 34 °C |
| Tunnelofenwagen bei der Einfahrt | Temperatur | 23 °C |
| Tunnelofenwagen bei der Ausfahrt | Temperatur | 60 °C |
| Tunnelofen Eingangstor | Temperatur | 39.5 °C |
| Tunnelofen Ausgangstor | Temperatur | 43.0 °C |
| Sturzkühlung | Windgeschwindigkeit | 17.0 m/s |
| | Durchmesser | 0.037 m |
| | Temperatur | 23.6 °C / φ = 24% |
| | Temperatur | 24.0 °C / φ = 23% |
| | Temperatur | 24.0 °C / φ = 23% |
| Abluft | Windgeschwindigkeit | 12.0 m/s |
| | Temperatur | 134.0 °C |
| | Länge | 0.64 m |
| | Breite | 1.0 m |
| Abluft zum Trockner | | w = 9 m/s |
| | Temperatur | 207.0 °C |
| | Durchmesser | 0.88 m |
| Tunnelofendecke | Messstelle 4 | 35.8 °C |
| | Messstelle 10 | 52.5 °C |
| | Messstelle 22 | 48.2 °C |
| | Messstelle 32 | 34.0 °C |
| Tunnelofenunterseite | Brennergruppe 4 | 31.5 °C |
| | Brennergruppe 5 | 50.0 °C |
| | Brennergruppe 6 | 63.0 °C |
| | Brennergruppe 7 | 68.0 °C |
| | Brennergruppe 8 | 100.0 °C |
| | Sturzkühlung | 135.0 °C |
| | Ende | 115.0 °C |
| Tunnelofenseitenwände | Anfang | 40.0 °C |
| | Messstelle 5 | 27.0 °C |
| | Messstelle 12 | 37.5 °C |
| | Brennergruppe 8 | 37.0 °C |
| | Vorsturzkühlung | 50.0 °C |
| | Ende | 30.0 °C |

11.7.2 Trockner

In vier Kammern wurden 12.5-er Backsteine und in acht Kammern 15-er getrocknet.

| | | |
|---------------------|-----------------------|--------------------|
| Abluft zum Trockner | Windgeschwindigkeit | 10 m/s |
| | Temperatur | 215 °C |
| | Durchmesser Rohrkanal | 0.88 m |
| Frischlufte | Windgeschwindigkeit | 11 m/s |
| | Temperatur | 26 °C |
| | Breite | 1.12 m |
| | Länge | 1.12 m |
| | | φ = 17.8 % |

Da bei Messstelle für die Frischluftzufuhr eine manngrosse Seitenwand abgeschraubt wurde, können die Messdaten verfälscht sein.

| | | |
|------------------------------|---------------------|---------|
| Nasse Backsteine | Temperatur | 24.0 °C |
| Trockene Backsteine | Temperatur | 28.0 °C |
| Stahlrahmen bei der Einfahrt | Temperatur | 25.0 °C |
| Stahlrahmen bei der Ausfahrt | Temperatur | 28.0 °C |
| Abluft | Windgeschwindigkeit | 8.5 m/s |
| | Temperatur | 40.0 °C |
| | Durchmesser | 1.4 m |

| | | |
|------------------|--------------------------------|-------|
| Trocknungskammer | Sicherheitstemperatur Kammer 1 | 81 °C |
| | Sicherheitstemperatur Kammer 2 | 79 °C |
| | Sicherheitstemperatur Kammer 3 | 48 °C |
| | Sicherheitstemperatur Kammer 4 | 46 °C |
| | Sicherheitstemperatur Kammer 5 | 42 °C |
| | Sicherheitstemperatur Kammer 6 | 66 °C |
| | Steuerungstemperatur Kammer 1 | 84 °C |
| | Steuerungstemperatur Kammer 2 | 79 °C |
| | Steuerungstemperatur Kammer 3 | 44 °C |
| | Steuerungstemperatur Kammer 4 | 48 °C |
| | Steuerungstemperatur Kammer 5 | 40 °C |
| | Steuerungstemperatur Kammer 6 | 69 °C |

Die Austrittstemperatur kann aufgrund unterschiedlicher Abkühlverweildauer im Trockner stark variieren.

| | | |
|----------------------------|----------------|----------|
| Tore der Trocknungskammer | Tor A Kammer 1 | 24.7 °C |
| | Tor B Kammer 1 | 26.9 °C |
| | Tor A Kammer 2 | 30.4 °C |
| | Tor B Kammer 2 | 30.4 °C |
| | Tor A Kammer 3 | 26.8 °C |
| | Tor B Kammer 3 | 26.9 °C |
| | Tor A Kammer 4 | 27.0 °C |
| | Tor B Kammer 4 | 26.1 °C |
| | Tor A Kammer 5 | 27.8 °C |
| | Tor B Kammer 5 | offen °C |
| | Tor A Kammer 6 | offen °C |
| | Tor B Kammer 6 | 28.4 °C |
| Decke Trockner | Messstelle 1 | 25.0 °C |
| | Messstelle 2 | 26.0 °C |
| | Messstelle 3 | 24.6 °C |
| | Messstelle 4 | 24.7 °C |
| | Messstelle 5 | 25.2 °C |
| | Messstelle 6 | 24.2 °C |
| Seitenwand Trockner links | Messstelle 1 | 19.8 °C |
| | Messstelle 2 | 20.2 °C |
| | Messstelle 3 | 15.7 °C |
| Seitenwand Trockner rechts | Messstelle 1 | 14.7 °C |
| | Messstelle 2 | 14.4 °C |
| | Messstelle 3 | 14.4 °C |
| | Messstelle 4 | 15.0 °C |
| | Messstelle 5 | 14.3 °C |
| Rückwand Trockner | Messstelle 1 | 13.6 °C |
| | Messstelle 2 | 12.9 °C |
| | Messstelle 3 | 15.4 °C |
| | Messstelle 4 | 18.5 °C |
| | Messstelle 5 | 14.2 °C |
| | Messstelle 6 | 15.7 °C |
| | Messstelle 7 | 21.8 °C |

11.8 MESSDATEN VOM 10.06.2005 - MASSENILANZ (II) UND (III)

Wenn die Messung mehrmals durchgeführt wurde, stehen alle gemessenen Werte in den Tabellen. Für die weitere Berechnung wurde immer der Mittelwert dieser Werte verwendet. Die Messungen der Massenbilanz II wurden am Morgen, die Messungen für die Massenbilanz (II) wurden am Nachmittag durchgeführt.

Das Feuchtigkeitsmessgerät musste teilweise mehrmals ein- und ausgeschaltet werden, bevor es die Messwerte anzeigte. Aus diesem Grund sind diese Messwerte mit Vorsicht zu verwenden.

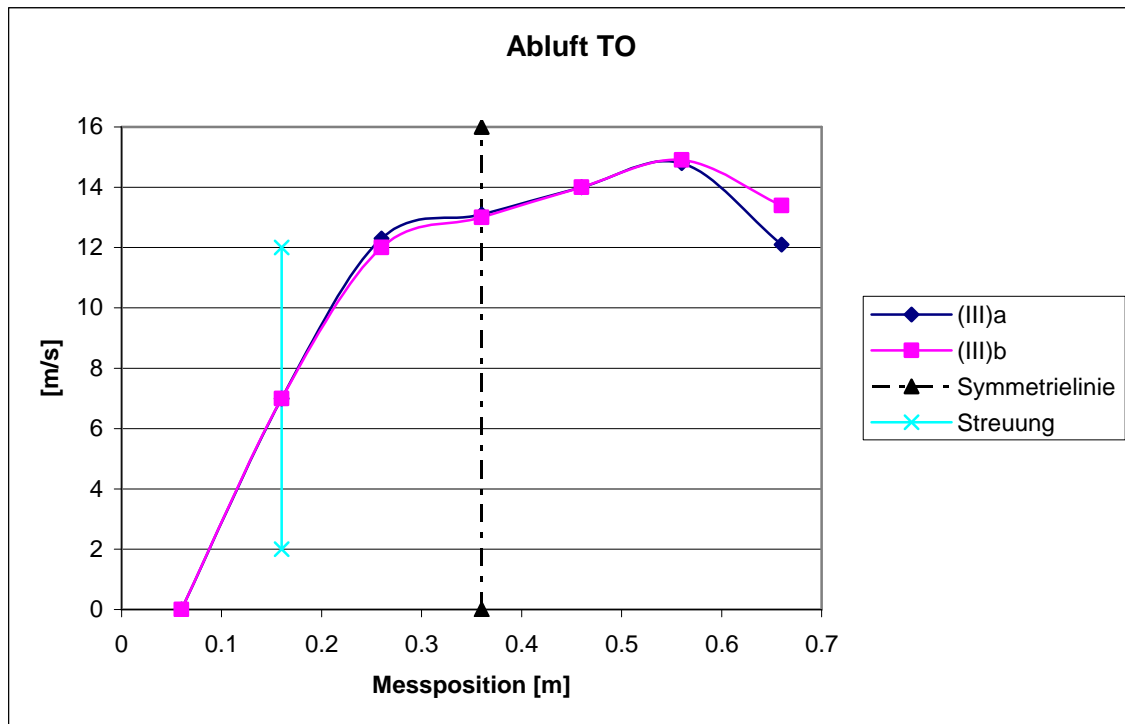
Die Geschwindigkeit in einem Profil wurde immer in dessen Mitte gemessen. Die Angaben Messposition bei der Geschwindigkeitsprofilaufnahme bezieht sich immer auf die Distanz Messort zur Aussenkante des Messstutzens.

Der Luftdruck am Messtag war laut Internet (www.wetter.com) 1021.5 hPa.

11.8.1 Tunnelofen

Produktionsstufe 8 (Vorschub im Tunnelofen alle 44 min), wobei zur Messzeit 12.5 / 29 / 19 Backsteine (14 Tunnelofenwagen) und 20 / 29 / 14 Calmo Backsteine (11 Tunnelofenwagen) gebrannt wurden.

| | | |
|----------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Trockene Backsteine | Temperatur | 21.5 °C |
| Gebrannte Backsteine | Temperatur | 47.3 °C |
| Tunnelofenwagen bei der Einfahrt | Temperatur | 23.8 °C |
| Tunnelofenwagen bei der Ausfahrt | Temperatur | 75.0 °C |
| Tunnelofen Eingangstor | Temperatur | 39.4 °C |
| Tunnelofen Ausgangstor | Temperatur | 31.0 °C |
| Sturzkühlung | Windgeschwindigkeit | 15.0 m/s |
| | Durchmesser | 0.037 m |
| | Temperatur | 33.1 °C |
| Umgebungstemperatur | | 27.2 °C / $\varphi = 26.1\%$ |
| Abluft Massenbilanz II | Windgeschwindigkeit | 14.0 m/s |
| | Temperatur | 134.7 °C |
| | Länge | 0.64 m |
| | Breite | 1.0 m |
| Abluft Massenbilanz III | Temperatur | 143.1 °C |
| | Länge | 0.64 m |
| | Breite | 1.0 m |
| Abluft Massenbilanz III A | Abluft Messpunkt 0.66 | 12.1 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.56 | 14.8 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.46 | 14.0 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.36 | 13.1 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.26 | 12.3 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.16 | 2.0 – 12.0 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.06 | 0.0 m/s |
| Abluft Massenbilanz III B | Abluft Messpunkt 0.66 | 13.4 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.56 | 14.9 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.46 | 14.0 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.36 | 13.0 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.26 | 12.0 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.16 | 2.0 – 12.0 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.06 | 0.0 m/s |
| Abluft zum Trockner | Windgeschwindigkeit | 18.5 m/s |
| | Temperatur | 207.6 °C |
| | Durchmesser | 0.88 m |
| Tunnelofendecke | Messstelle 4 | 33.1 °C |
| | Messstelle 10 | 53.4 °C |
| | Messstelle 22 | 44.6 °C |
| | Messstelle 32 | 34.1 °C |
| Tunnelofenunterseite | Tunnelofenwagen 4 | 26.2 °C |
| | Brennergruppe 3 | 31.2 °C |
| | Brennergruppe 4 | 33.2 °C |
| | Brennergruppe 6 | 65.4 °C |
| | Brennergruppe 8 | 78.0 °C |
| | Sturzkühlung | 140.0 °C |
| | Ende | 178.0 °C |
| Tunnelofenseitenwände | Anfang | 39.0 °C |
| | Messstelle 5 | 31.0 °C |
| | Messstelle 12 | 45.9 °C |
| | Messstelle 23 | 43.4 °C |
| | Vorsturzkühlung | 38.7 °C |
| | Ende | 28.3 °C |
| Luft für Brenner 1 (4 Reihen) | Geschwindigkeit | 11.5 m/s |
| | Durchmesser | 0.14 m |
| | Temperatur (II) A | 29.3 °C / $\varphi = 23.2\%$ |
| | Temperatur (II) B | 32.5 °C / $\varphi = 16.6\%$ |
| Luft für Brenner 2 (12 Reihen) | Geschwindigkeit | 15.0 m/s |
| | Durchmesser | 0.215 m |
| | Temperatur (II) A | 31.6 °C / $\varphi = 17.9\%$ |
| Angaben Typenschild | Durchsatz | 42.0 [m ³ /min] |

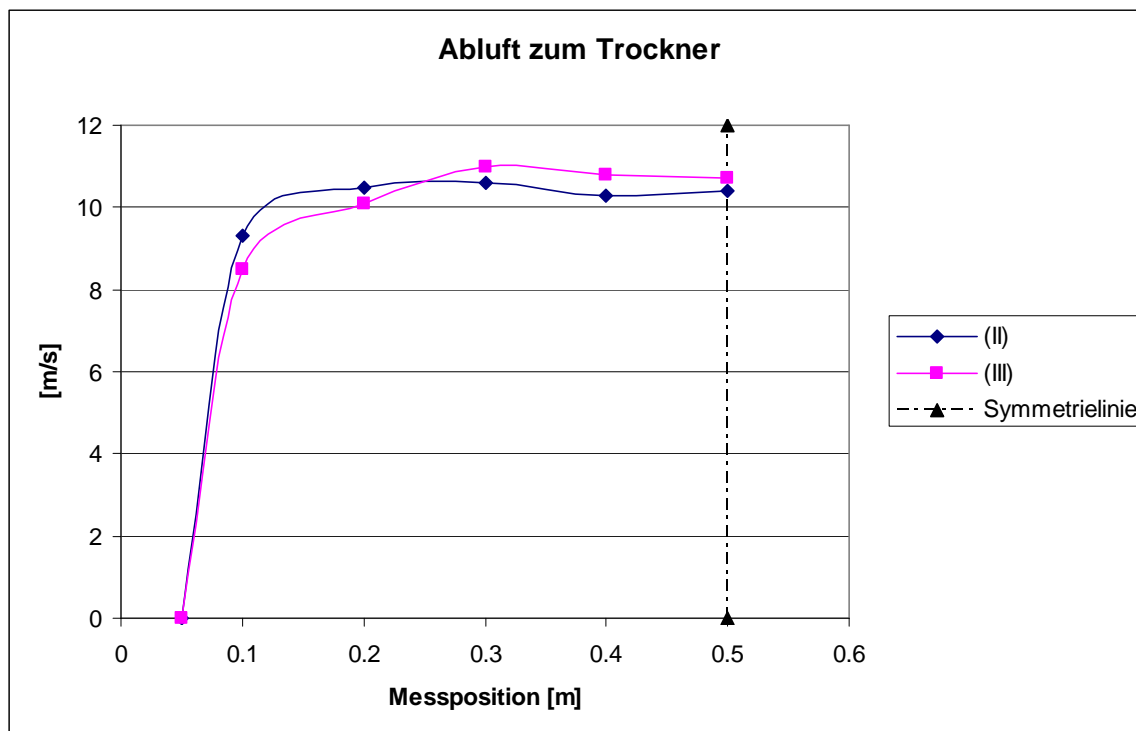


Graphik 50 Geschwindigkeitsprofil Abluft Tunnelofen

11.8.2 Trockner

In vier Kammern wurden 17.5-er Backsteine und in acht Kammern 15-er getrocknet.

| | | |
|--|-----------------------|----------|
| Abluft zum Trockner Massenbilanz (II) | Temperatur | 202.4 °C |
| | Durchmesser Rohrkanal | 0.88 m |
| Abluft zum Trockner Massenbilanz (II) | Abluft Messpunkt 0.5 | 10.4 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.4 | 10.3 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.3 | 10.6 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.2 | 10.5 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.1 | 9.3 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.06 | 0.0 m/s |
| Abluft zum Trockner Massenbilanz (III) | Temperatur | 209.6 °C |
| | Durchmesser Rohrkanal | 0.88 m |
| Abluft zum Trockner Massenbilanz (III) | Abluft Messpunkt 0.5 | 10.7 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.4 | 10.8 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.3 | 11.0 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.2 | 10.1 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.1 | 8.5 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.06 | 0.0 m/s |



Graphik 51 Geschwindigkeitsprofil der Abluft zum Trockner

| | | |
|--------------------------------|--|--------------------------------------|
| Frischlufte Massenbilanz (II) | Windgeschwindigkeit Temperatur Breite Länge | 9.5 m/s 33.2 °C 1.0 m 1.0 m |
| | | □ = 19.3 % |
| Frischlufte Massenbilanz (III) | Windgeschwindigkeit Temperatur Breite Länge | 9.1 m/s 34.1 °C 1.0 m 1.0 m |
| | | □ = 19.3 % |

Bei dieser Messung wurde aus Gründen der Messbarkeit ein geringer Frischluftstrom nicht gemessen. Dieser dringt durch eine andere Öffnung in den Kanal.

| | | |
|--|--|------------------------------|
| Luft für Stützbrenner Massenbilanz (II) | Windgeschwindigkeit Temperatur Durchmesser | 7.5 m/s 28.0 °C 0.35 m |
| | | □ = 21.7 % |
| Luft für Stützbrenner Massenbilanz (III) | Windgeschwindigkeit Temperatur Durchmesser | 9.0 m/s 29.5 °C 0.35 m |
| | | □ = 18.3 % |
| Nasse Backsteine | Temperatur | 27.2 °C |
| Trockene Backsteine | Temperatur | keiner vorhanden |
| Stahlrahmen bei der Einfahrt | Temperatur | 26.6 °C |
| Stahlrahmen bei der Ausfahrt | Temperatur | keiner vorhanden |
| Abluft Sammelkanal Massenbilanz (II) | Temperatur | 40.5 °C |
| | | □ = 84.3 % |
| Abluft Sammelkanal Massenbilanz (III) | Temperatur | 37.2 °C |
| | | □ = 87.1 % |
| Abluft Massenbilanz (II) | Temperatur | 36.6 °C |
| Abluft Massenbilanz (II) A | Durchmesser | 1.4 m |
| | Abluft Messpunkt 0.7 | 7.9 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.6 | 7.4 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.5 | 6.5 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.4 | 7.2 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.3 | 9.8 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.2 | 12.3 m/s |
| | Abluft Messpunkt 0.1 | 14.7 m/s |

Abluft Massenbilanz (II) B

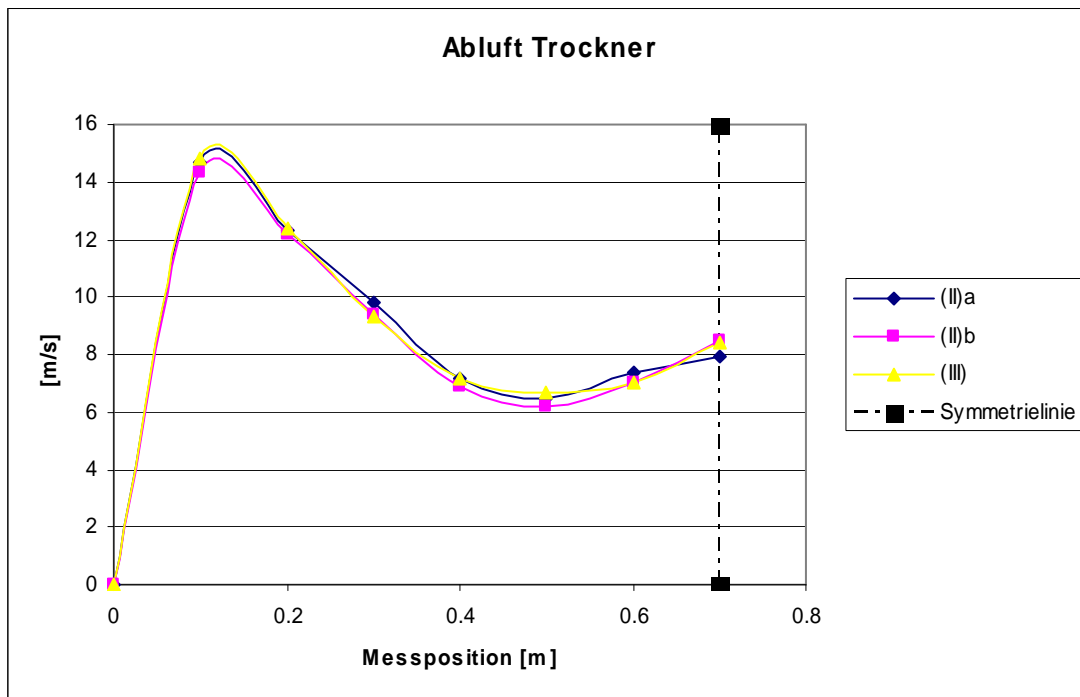
Abluft Messpunkt 0.7 8.5 m/s
 Abluft Messpunkt 0.6 7.0 m/s
 Abluft Messpunkt 0.5 6.2 m/s
 Abluft Messpunkt 0.4 6.9 m/s
 Abluft Messpunkt 0.3 9.4 m/s
 Abluft Messpunkt 0.2 12.2 m/s
 Abluft Messpunkt 0.1 14.3 m/s

Abluft Massenbilanz (III)

Temperatur 38.7 °C
 Durchmesser 1.4 m

Abluft Massenbilanz (III)

Abluft Messpunkt 0.7 8.4 m/s
 Abluft Messpunkt 0.6 7.0 m/s
 Abluft Messpunkt 0.5 6.7 m/s
 Abluft Messpunkt 0.4 7.2 m/s
 Abluft Messpunkt 0.3 9.3 m/s
 Abluft Messpunkt 0.2 12.4 m/s
 Abluft Messpunkt 0.1 14.8 m/s



Graphik 52 Geschwindigkeitsprofil der Abluft

Trocknungskammer Massenbilanz (II)

Sicherheitstemperatur Kammer 1 45.0 °C
 Sicherheitstemperatur Kammer 2 45.0 °C
 Sicherheitstemperatur Kammer 3 45.0 °C
 Sicherheitstemperatur Kammer 4 57.0 °C
 Sicherheitstemperatur Kammer 5 82.5 °C
 Sicherheitstemperatur Kammer 6 47.0 °C
 Steuerungstemperatur Kammer 1 49.0 °C
 Steuerungstemperatur Kammer 2 46.0 °C
 Steuerungstemperatur Kammer 3 40.0 °C
 Steuerungstemperatur Kammer 4 60.0 °C
 Steuerungstemperatur Kammer 5 88.0 °C
 Steuerungstemperatur Kammer 6 49.0 °C

Trocknungskammer Massenbilanz (III)

Sicherheitstemperatur Kammer 1 44.0 °C
 Sicherheitstemperatur Kammer 2 45.0 °C
 Sicherheitstemperatur Kammer 3 38.0 °C
 Sicherheitstemperatur Kammer 4 46.0 °C
 Sicherheitstemperatur Kammer 5 74.0 °C
 Sicherheitstemperatur Kammer 6 48.0 °C

Tore der Trocknungskammer

Tor A Kammer 1 27.2 °C
 Tor B Kammer 1 27.7 °C
 Tor A Kammer 2 27.2 °C
 Tor B Kammer 2 29.0 °C
 Tor A Kammer 3 28.5 °C

| | | |
|----------------------------|----------------|----------|
| | Tor B Kammer 3 | 28.4 °C |
| | Tor A Kammer 4 | 27.9 °C |
| | Tor B Kammer 4 | offen °C |
| | Tor A Kammer 5 | offen °C |
| | Tor B Kammer 5 | 30.0 °C |
| | Tor A Kammer 6 | 27.7 °C |
| | Tor B Kammer 6 | 30.8 °C |
| Decke Trockner | Messstelle 1 | 28.3 °C |
| | Messstelle 2 | 28.6 °C |
| | Messstelle 3 | 27.4 °C |
| | Messstelle 4 | 29.8 °C |
| | Messstelle 5 | 27.2 °C |
| | Messstelle 6 | 29.4 °C |
| | Messstelle 7 | 24.2 °C |
| Seitenwand Trockner links | Messstelle 1 | 24.0 °C |
| | Messstelle 2 | 22.8 °C |
| | Messstelle 3 | 21.7 °C |
| | Messstelle 4 | 21.4 °C |
| | Messstelle 5 | 19.4 °C |
| Seitenwand Trockner rechts | Messstelle 1 | 17.6 °C |
| | Messstelle 2 | 18.4 °C |
| | Messstelle 3 | 18.9 °C |
| | Messstelle 4 | 17.5 °C |
| | Messstelle 5 | 17.0 °C |
| | Messstelle 6 | 17.9 °C |
| Rückwand Trockner | Messstelle 1 | 17.5 °C |
| | Messstelle 2 | 16.8 °C |
| | Messstelle 3 | 16.1 °C |
| | Messstelle 4 | 19.9 °C |
| | Messstelle 5 | 22.0 °C |
| | Messstelle 6 | 17.8 °C |
| | Messstelle 7 | 18.2 °C |

12 VERZEICHNIS DER GRAPHIKEN

| | | |
|------------|--|----|
| Graphik 1 | Verlauf des Wassergehaltes X als Funktion des halben Durchmessers und der Zeit | 10 |
| Graphik 2 | Bilanzgebiet Heisszone Tunnelofen | 14 |
| Graphik 3 | Bilanzgebiet Kühlzone Tunnelofen (^(*) dieser Massenstrom wurde nicht berücksichtigt) | 15 |
| Graphik 4 | Bilanzgebiet Tunnelofen (^(*) dieser Energiestrom wurde nicht berücksichtigt) | 15 |
| Graphik 5 | Bilanzmodell Tunnelofen (Ziegelei Fisibach) | 16 |
| Graphik 6 | typische Brennkurve | 19 |
| Graphik 7 | Gemessener Verlauf der Geschwindigkeit im Abgaskanal des Tunnelofens | 22 |
| Graphik 8 | Vergleich der gemessenen Brennkurve mit der theoretischen Brennkurve der Anlage Fisibach | 23 |
| Graphik 9 | Bilanzgebiet der Massenbilanz Trocknungskammer | 42 |
| Graphik 10 | Bilanzgebiet der Energiebilanz Trocknungskammer | 42 |
| Graphik 11 | Bilanzgebiet Massenbilanz Heisszone Tunnelofen | 43 |
| Graphik 12 | Bilanzgebiet Massenbilanz Kühlzone des Tunnelofens | 43 |
| Graphik 13 | Bilanzgebiet Energiebilanz Tunnelofens | 44 |
| Graphik 14 | Graphische Darstellung der Trockner Zuströme - Massenbilanz (I) | 45 |
| Graphik 15 | Gegenüberstellung der zu- und der abströmenden Masse im Trockner - Massenbilanz (I) | 45 |
| Graphik 16 | Graphische Darstellung der Trockner Zuströme - Massenbilanz (II) | 46 |
| Graphik 17 | Gegenüberstellung der zu- und der abströmenden Masse im Trockner - Massenbilanz (II) | 46 |
| Graphik 18 | Graphische Darstellung der Trockner Zuströme - Massenbilanz (III) | 47 |
| Graphik 19 | Gegenüberstellung der zu- und der abströmenden Masse im Trockner - Massenbilanz (III) | 47 |
| Graphik 20 | Zuströmende Energie zum Trockner | 48 |
| Graphik 21 | Abströmende Energie vom Trockner | 48 |
| Graphik 22 | Vergleich der zu- und abströmenden Energien des Trockners | 49 |
| Graphik 23 | Graphische Darstellung der Zuströme Abschnitt Heisszone - Massenbilanz (I) | 49 |
| Graphik 24 | Gegenüberstellung der zu- und der abströmenden Masse im Abschnitt Heisszone – Massenbilanz (I) | 50 |
| Graphik 25 | Graphische Darstellung der Zuströme Abschnitt Heisszone - Massenbilanz (II) | 50 |
| Graphik 26 | Gegenüberstellung der zu- und der abströmenden Masse im Abschnitt Heisszone – Massenbilanz (II) | 50 |
| Graphik 27 | Graphische Darstellung der Zuströme Abschnitt Heisszone - Massenbilanz (III) | 51 |
| Graphik 28 | Gegenüberstellung der zu- und der abströmenden Masse im Abschnitt Heisszone – Massenbilanz (II) | 51 |
| Graphik 29 | Graphische Darstellung der Zuströme Abschnitt Kühlzone - Massenbilanz (I) | 51 |
| Graphik 30 | Graphische Darstellung der Zuströme Abschnitt Kühlzone - Massenbilanz (II) | 52 |
| Graphik 31 | Graphische Darstellung der Zuströme Abschnitt Kühlzone - Massenbilanz (III) | 52 |
| Graphik 32 | Graphische Darstellung aller Zuströme des Tunnelofens - Massenbilanz (I) | 53 |
| Graphik 33 | Graphische Darstellung aller Abströme des Tunnelofens - Massenbilanz (I) | 53 |
| Graphik 34 | Massenbilanz des gesamten Tunnelofens - Massenbilanz (I) | 53 |
| Graphik 35 | Graphische Darstellung aller Zuströme des Tunnelofens - Massenbilanz (II) | 54 |
| Graphik 36 | Graphische Darstellung aller Abströme des Tunnelofens - Massenbilanz (II) | 54 |
| Graphik 37 | Massenbilanz des gesamten Tunnelofens - Massenbilanz (II) | 55 |
| Graphik 38 | Graphische Darstellung aller Zuströme des Tunnelofens - Massenbilanz (III) | 55 |
| Graphik 39 | Graphische Darstellung aller Abströme des Tunnelofens - Massenbilanz (III) | 56 |
| Graphik 40 | Massenbilanz des gesamten Tunnelofens - Massenbilanz (III) | 56 |
| Graphik 41 | Zuströmende Energie zum Tunnelofen | 57 |
| Graphik 42 | Abströmende Energie vom Tunnelofen | 57 |
| Graphik 43 | Vergleich der zu- und abströmenden Energien des Tunnelofens | 58 |
| Graphik 44 | Prozentualer Anteil der Energiezuströme zum Trockner | 59 |
| Graphik 45 | Prozentualer Anteil der Energieabströme aus dem Trockner | 59 |
| Graphik 46 | Prozentualer Anteil der Energieabströme in den Tunnelofen | 61 |
| Graphik 47 | Prozentualer Anteil der Energieabströme aus dem Tunnelofen | 61 |
| Graphik 48 | Abströme eines Tunnelofens für den Dachziegelbrand | 62 |
| Graphik 49 | Abströme eines Tunnelofens für den Ziegelbrand (^(*) Stoffumlagerungen) | 62 |
| Graphik 50 | Geschwindigkeitsprofil Abluft Tunnelofen | 66 |
| Graphik 51 | Geschwindigkeitsprofil der Abluft zum Trockner | 67 |
| Graphik 52 | Geschwindigkeitsprofil der Abluft | 68 |

13 VERZEICHNIS DER BILDER

| | | |
|---------|---|----|
| Bild 1 | Lehmgrube | 7 |
| Bild 2 | Sumpfhaus | 7 |
| Bild 3 | Siebrundbeschicker | 8 |
| Bild 4 | Schneckenpresse Bild 5 Harfenschneider | 8 |
| Bild 6 | Profilmessung an einem Messstutzen | 32 |
| Bild 7 | Tunnelofenabluft zum Trockner | 33 |
| Bild 8 | Frischlufte erste Messung | 33 |
| Bild 9 | Messpunkt der Frischluftzufuhr bei der zweiten Messung | 34 |
| Bild 10 | Luftreinlass welcher nicht gemessen wurde | 34 |
| Bild 11 | Abluftsammelkanal | 35 |
| Bild 12 | Ansaugung Brennerluft | 35 |
| Bild 13 | Abluft aus dem Trockner | 36 |
| Bild 14 | Störeinflüsse | 36 |
| Bild 15 | Bohrung zur Messung der Abluft | 36 |
| Bild 16 | Hintere Trocknungskammerwand, ein Teil ist in der Halle und ein Teil an der frischen Luft | 37 |
| Bild 17 | Hintere Trocknungskammerwand, ein Teil der Wand steht hinter einem anderen Gebäude | 37 |
| Bild 18 | Hintere Trocknungskammerwand und linke Seitenwand in der Halle | 38 |
| Bild 19 | Ein Tor der Trocknungskammern | 38 |
| Bild 20 | Sturzkühlung auf dem Tunnelofen | 39 |
| Bild 21 | Luft für die Brenner in der Heisszone Bild 22 Luft für die Brennerin der Vorwärmszone | 39 |
| Bild 23 | Messposition der Tunnelofenabluft | 40 |
| Bild 24 | Messposition der Abluft zum Trockner | 40 |
| Bild 25 | Eingang zum Tunnelofen | 41 |
| Bild 26 | Endeinblasung | 41 |

14 VERZEICHNIS DER TABELLEN

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabelle 1 | Chemische Reaktionen beim Brennprozess | 12 |
| Tabelle 2 | Energiebedarf der Teilprozesse | 12 |
| Tabelle 3 | Eingesetzte Messgeräte | 31 |

15 VERZEICHNIS DER FORMELN

| | | |
|----------|-------------------------------|----|
| Formel 1 | Bilanzgleichung Tunnelofen | 16 |
| Formel 2 | Funktion der Reaktionsenergie | 18 |

16 LITERATURVERZEICHNIS

- Dr. Ing. F.R. Stupperich: Trocknungstechnik in der Ziegelindustrie, aus Ziegelei Technisches Jahrbuch, Jahrgang 1976 Seite 202
- Roland Wiederkehr: Semesterarbeit an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil - Energieeffizienz der Backsteinproduktion, 11. Juli 2005
- Roland Wiederkehr: Diplomarbeit an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil – Energie- und CO₂-Einsparung in einer Ziegelei durch Optimierung der Betriebsabläufe, 16. Dezember 2005
- Daniel Ulrich: Semesterarbeit an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil - Energieeffizienz der Backsteinproduktion (2), 07. Juli 2006