

M. Beckmann, S. Großgebauer, W. Hanke, H. Aschoff

## **Optimierung des Trocknungsprozesses von Dachziegeln in einem industriellen Kammertrockner durch mathematische Modellierung und experimentelle Untersuchungen**

### **1 Zusammenfassung**

Für die Optimierung der Strömungsverhältnisse im Kammertrockner der Fa. JACOBI Tonwerke GmbH wurden verschiedene Trocknungsversuche durchgeführt. Parallel zu diesen Messungen wurden CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) für den stationären Fall erarbeitet. Die errechneten Strömungsgeschwindigkeiten dieser Simulation wurden als Grundlage für die Berechnung der Trocknungsgeschwindigkeit verwendet.

Die CFD-Simulation bietet hierbei einerseits bei der Analyse des Strömungsverlaufes und der Temperaturverteilung des Ist-Zustandes und andererseits bei der konstruktiven Verbesserung der Strömungsführung eine kostengünstige und wertvolle Unterstützung.

Durch den Einbau von Leiteinrichtungen zur Umleitung des eingebrachten Trocknungsmittels und den Umbau der Heißgaszuführung konnte eine Vergleichmäßigung der Strömungs- und Temperaturverhältnisse innerhalb der Kammer erzielt werden. Somit kann eine annähernd gleiche Trocknungszeit für alle Ziegel in der Kammer erreicht werden.

Nach der Vergleichmäßigung der Strömungsverhältnisse wurde das Trocknungsregime an den Trocknungsverlauf der Ziegel angepasst. Durch die Optimierungsmaßnahmen (Vergleichmäßigung der Strömungs- und Temperaturverhältnisse und Anpassung des Trocknungsregimes) konnte die Trocknungszeit der Ziegel in dem beschriebenen Kammertrockner von ca. 48 Stunden im Ist-Zustand auf ca. 36 Stunden im optimierten Zustand ohne Beeinträchtigung der Qualität der Trocknung (Verkrümmungen oder Rissbildung) abgesenkt werden. Gleichzeitig führt die Verkürzung der Trocknungszeit zur Einsparung von Energie und somit auch zur spezifischen Kostensenkung in der Produktherstellung.

### **2 Zielstellung**

Das Ziel des Forschungsvorhabens /1/ insgesamt bestand in der Erhöhung des Durchsatzes und/oder der Verringerung der Durchlaufzeit im Trockner und Ofen bei gleicher Qualität der keramischen Erzeugnisse durch Optimierung der Strömungsverhältnisse.

Mit der Verkürzung der Dauer der thermischen Behandlung sind eine Reduzierung des Primärenergieverbrauches, eine Steigerung der Effektivität und eine Senkung der Kosten verbunden.

### 3 Anlagenbeschreibung – Beschreibung des Kammertrockners

Im Werk 3 Bilshausen der Firma JACOBI Tonwerke GmbH werden Dachziegel und Zubehör hergestellt. Der Umfang der Produktion im Werk 3 beträgt ca. 200.000 t/a. Die Untersuchungen des Forschungsvorhabens wurden an einem Kammertrockner, der im Chargenbetrieb arbeitet im Werk 3 durchgeführt. Untersucht wurde vom Kammerblock 2 die Kammer 8, die als Einzelkammer betrieben wird. In Abb. 1 ist die Draufsicht des untersuchten Kammertrockner schematisch dargestellt.

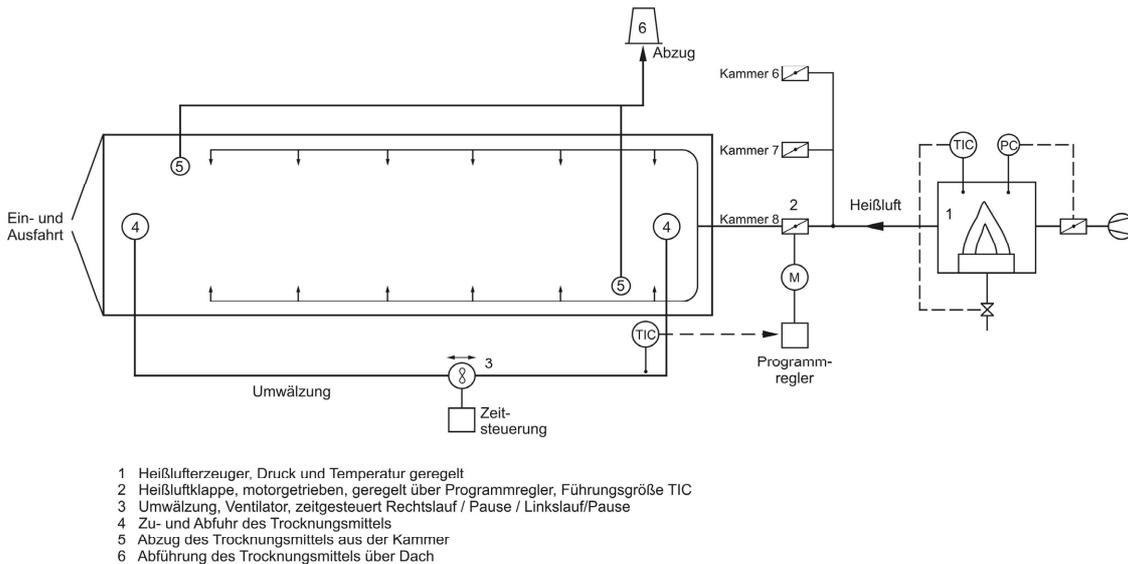


Abb. 1: Schematische Darstellung des Kammertrockners (Draufsicht).

Die Zu- und Abführung des Trocknungsmittels erfolgt jeweils im Bereich der Decke im vorderen und hinteren Kammerteil durch Umwälzung des Trocknungsmittels mittels eines Axialventilators, der über der Kammer angeordnet ist. Der Ventilator wird reverrierend mit Pause in Vor- und Rückwärtsrichtung betrieben (Linkslauf, Pause, Rechtslauf, Pause). Überschüssiges Trocknungsmittel kann über zwei freie Abzüge in der Kammerdecke nach außen entweichen.

Die Heißluft wird durch Verbrennung von Erdgas und der Mischung mit Frischluft (Nr. 1 in Abb. 1) erzeugt und durch zwei geschlitzte Rohre im Bodenbereich der Kammer eingebracht. Ein programmiertes Trocknungsregime gibt die Temperatur vor, welche über eine bestimmte Zeit im Trockner vorherrschen soll. Um diese Solltemperatur zu halten, wird die Heißluftzufuhr durch Öffnen bzw. Schließen einer Klappe (Nr. 2 in Abb. 1) geregelt. Als Regelgröße hierfür dient die Temperatur in der Umwälzleitung (Pt100-Fühler).

Das Trockengut liegt auf Holzrahmen, die auf Stahlprofilen (Länge entsprechend der Kammerbreite) befestigt sind und in neun Stapeln hintereinander und 17 Etagen übereinander mit einem Absetzwagen in den Trockner eingefahren werden. Sieben Dachziegel nebeneinander bilden eine Reihe. Abb. 2 zeigt die Innenansicht des teilweise befüllten



Abb. 2: Ansicht teilbefüllte Kammer mit installierter Messtechnik.

Kammertrockners.

**Technische Daten:**

**Kammer:**

Breite:	1,45 m
Länge:	10,74 m
Höhe:	3,38 m
Etagenabstand:	16,5 cm
Abstand oben:	21,5 cm
Abstand unten:	36,0 cm

**Stöße:**

Anzahl der i.d.R. 9 Stk.  
Etagen: i.d.R. 17 Stk.

**Umwälzung:**

messer:	Rohrdurchmesser: 0,63 m
strom:	Volumen- 15 000 m <sup>3</sup> /h
unterschied:	Gesamtdruck- 74 mm WS

**Abzug des Trocknungsmittels:**

Rohrdurchmesser: 0,25 m

**Heißluftzufuhr:**

ca. 150 °C

**Programmregler:**

Eurotherm

**4 Berechnung der Trocknungsgeschwindigkeit**

Der Trockenprozess kann allgemein in zwei Abschnitte unterteilt werden. Die Trocknung im I. Trocknungsabschnitt verläuft einher mit der Schwindung des Trockengutes. Wenn die Schwindung des Trockengutes zu schnell oder ungleichmäßig abläuft, treten Verkrümmungen oder Risse am Trockengut auf. Um diese Qualitätsverschlechterungen zu vermeiden, darf im I. Trocknungsabschnitt die kritische Trocknungsgeschwindigkeit, die material- und geometrieabhängig ist, nicht überschritten werden. Das Ende des I. Trocknungsabschnittes, so genannter Knickpunkt, wird bei Dachziegeln mit Beendigung der Schwindung erreicht. Danach kann im II. Trocknungsabschnitt aggressiv bei hohen Temperaturen ohne Qualitätseinbußen getrocknet werden. Die Trocknungsgeschwindigkeit  $\dot{m}_{D,I}^*$  im I. Trocknungsabschnitt kann mit dem bekannten Zusammenhang /2/ berechnet werden:

$$\dot{m}_{D,l}^* = \frac{\beta_h}{R_D \cdot T_L} \cdot (p_{D,O} - p_{D,L}) \quad \frac{\alpha}{\beta_h} = \sqrt{\rho_f \cdot c_{p,f} \cdot \frac{D}{\lambda_f} \cdot \frac{p - (p_{D,M})_{\dot{U}}}{p}}$$

Die Trocknungsgeschwindigkeit  $\dot{m}_{D,l}^*$  ist abhängig von der Temperatur, der Feuchte und der Anströmgeschwindigkeit des Trocknungsmittels. Die Feuchte des Trocknungsmittels hat hierbei direkten Einfluss auf die Dampfpartialdruckdifferenz von Trocknungsmittel (Luft) und Trockengutoberfläche ( $p_{D,O} - p_{D,L}$ ). Der Stoffübergangskoeffizient  $\beta$  und der Wärmeübertragungskoeffizient  $\alpha$  sind über den gekoppelten Stoff- und Wärmeaustausch miteinander verbunden und werden u.a. durch die Anströmgeschwindigkeit und die Temperatur beeinflusst /3/. Die Temperatur wird bei der Berechnung der Stoffwerte des Trocknungsmittels berücksichtigt /4/.

Die Trocknungsgeschwindigkeit wird experimentell an drei Stellen im oberen, mittleren und unteren Bereich (siehe Abb. 3) der Kammer durch Auswiegen der Ziegel bestimmt. Die Berechnung der Trocknungsgeschwindigkeit erfolgt an den drei Stellen (oben, Mitte, unten in Abb. 3) auf Grundlage der mittels CFD-Simulation berechneten Strömungsgeschwindigkeiten. Dabei dienen die Messwerte von Temperatur und Feuchte an diesen drei Stellen zur Berechnung der Stoffwerte des Trocknungsmittels.

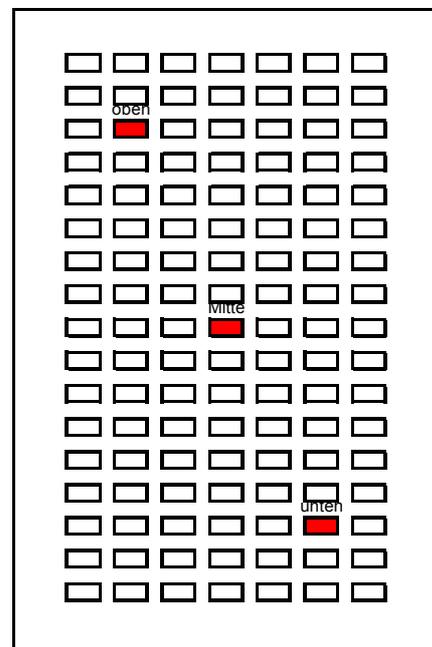


Abb. 3: Positionen der Temperatur- und Feuchtemessung sowie der Bestimmung der Trocknungsgeschwindigkeit.

## 5 Untersuchung des Ist-Zustandes

Die Untersuchungen des Ist-Zustandes zeigen, dass die Strömungs- und Klimaverhältnisse in der Kammer über die einzelnen Etagen sehr unterschiedlich sind. Im unteren Bereich der Kammer sind die Strömungsgeschwindigkeiten wesentlich höher als im oberen Bereich. Weiterhin werden aufgrund der Heißluftzufuhr von unten im unteren Bereich der Kammer höhere Temperaturen und geringere Feuchtigkeiten gemessen.

Diese Unterschiede im Trocknungsklima und bei den Strömungsverhältnissen führen zu entsprechenden Unterschieden in der Trocknungsgeschwindigkeit (I. Trocknungsabschnitt bis zum Knickpunkt) über der Höhe der Kammer. Der Trocknungsfortschritt der Ziegel im unteren Bereich der Kammer verläuft somit deutlich schneller als im oberen Bereich.

Parallel zu den durchgeführten Trocknungsversuchen wurden mit Hilfe der Strömungssimulationssoftware FLUENT 5.4 CFD-Simulationen zum Strömungs- und Temperaturverlauf während des Ventilatorbetriebes durchgeführt. Es wurde hierfür unter Abstrahierung der Trockner- und Ziegelgeometrie ein dreidimensionales Modell des

Trockners angefertigt. Die sieben Ziegel einer Reihe wurden dabei vereinfacht als ein Quader angenommen. Alle Simulationen wurden für stationäre Verhältnisse berechnet.

Abb. 4 und Abb. 5 zeigen das berechnete Geschwindigkeitsprofil für den wie im Ist-Zustand befüllten Trockner im Vor- und Rückwärtsbetrieb sowie Abb. 6 das Temperaturprofil im Rückwärtsbetrieb bei geöffneter Heißluftklappe. Abb. 4 und Abb. 5 zeigen den Längsschnitt in der Mitte des Kammertrockners, Abb. 6 den Längsschnitt über der Heißluftzufuhr.

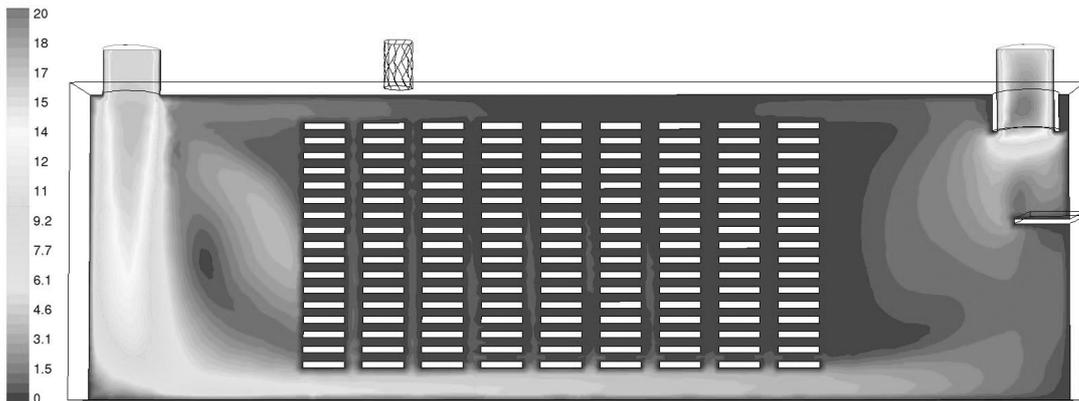


Abb. 4: Ist-Zustand, Geschwindigkeitsprofil in [m/s], Längsschnitt Kammer, Vorwärtsbetrieb.

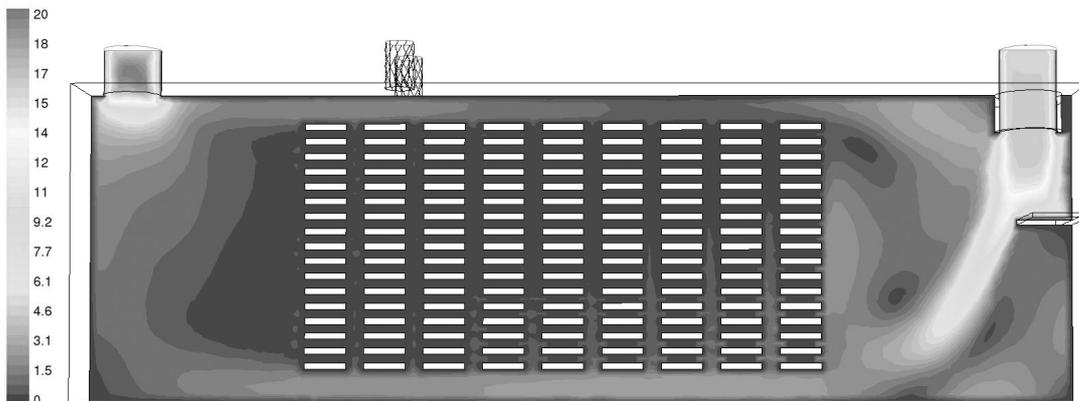


Abb. 5: Ist-Zustand, Geschwindigkeitsprofil in [m/s], Längsschnitt Kammer, Rückwärtsbetrieb.

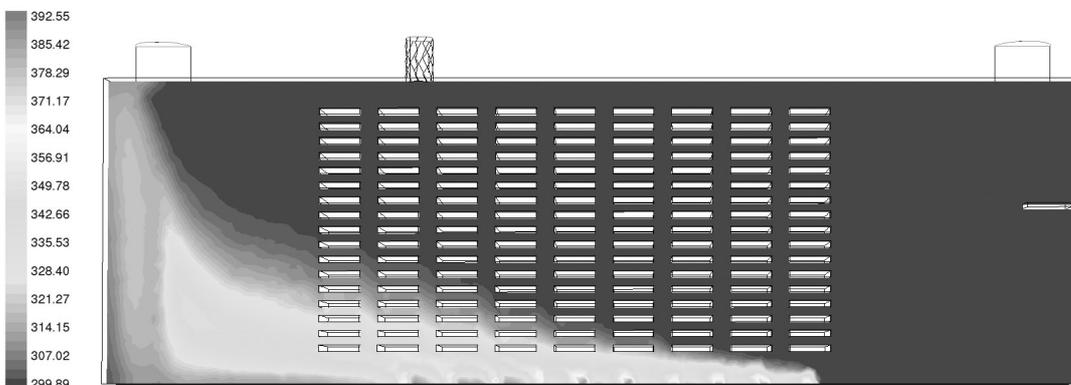


Abb. 6: Ist-Zustand, Temperaturprofil in [K], Längsschnitt Kammer, Rückwärtsbetrieb.

In den Abbildungen ist zu erkennen, dass der Hauptstrom des Trocknungsmittels zwischen Boden und unterster Ziegelreihe verläuft, was zusammen mit der ungleichmäßigen Temperaturverteilung den unterschiedlichen Trocknungsverlauf in vertikaler Richtung erklärt. Das horizontal eingebaute Leitblech im hinteren Bereich der Kammer (s. Abb. 5) trägt ebenfalls nicht zur Umlenkung des Luftstromes durch die Ziegelreihen bei, sondern führt lediglich zur Dissipation der Strömungsenergie.

Das Ziel der nachfolgenden strömungstechnischen Optimierungsmaßnahmen war daher die Umlenkung des Luftstromes durch die Ziegelreihen, die Vergleichmäßigung des Geschwindigkeits- und Temperaturprofils über die Höhe sowie die Reduzierung von Luftströmen in den Boden-, Decken- und Seitenspalten.

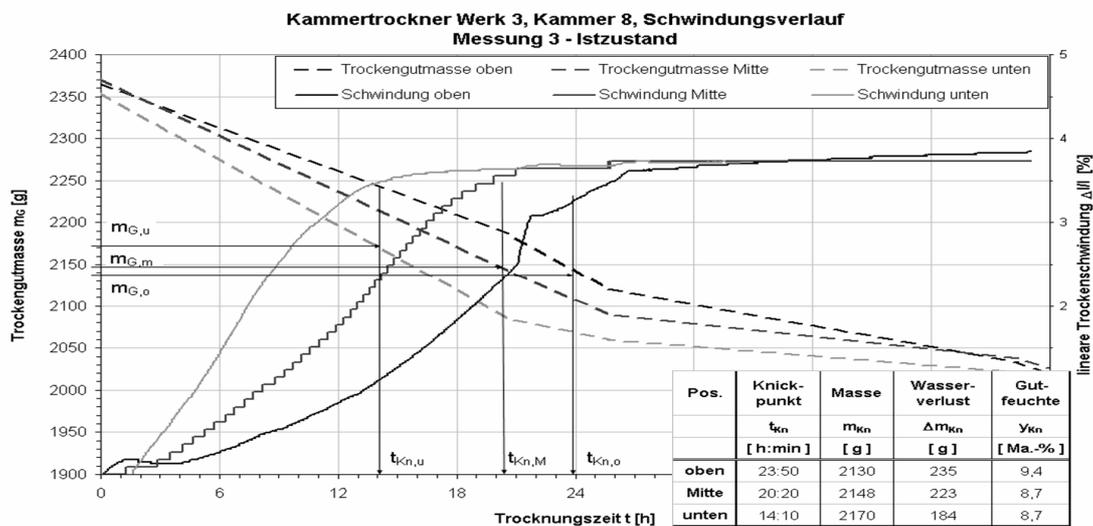


Abb. 7: Ist-Zustand, Gemessener Temperatur und Schwindungsverlauf im oberen, mittleren und unteren Bereich der Kammer.

Abb. 7 zeigt den Temperatur- und Schwindungsverlauf mit den Knickpunkten der betrachteten Ziegel im unteren, mittleren und oberen Bereich der Kammer. Die maximale Abweichung der Knickpunkte im oberen und unteren Teil der Kammer beträgt 9:40 (h:min) Stunden bei einem Knickpunkt oben nach 23:50 Stunden.

## 6 Optimierung des Kammertrockners

Ziel der mit CFD erarbeiteten Strömungssimulationen war die Vergleichmäßigung des Geschwindigkeitsprofils über der Höhe des Kammertrockners und die Reduzierung von Strömungen in den Boden-, Decken- und Seitenspalten.

Die Messungen und Berechnungen des Ist-Zustandes zeigen, dass in einem ersten Schritt einfache Maßnahmen zur Erhöhung des Strömungswiderstandes in den Decken-, Seiten- und Bodenspalten sowie eine bessere Verteilung der Luftströmung durch die Ziegeletagen erforderlich sind.

Zur Verminderung der Luftströme in den Decken- und Seitenspalten wurden vertikale Leitbleche vor und hinter den Ziegelstößen angebracht. Am Boden wurde ein 45° ge-

neigtes Leitblech eingebaut. Im hinteren Bereich können diese Leitbleche fest eingebaut werden, im vorderen Bereich sind diese Leitbleche aufgrund der Ein- und Ausfuhr der

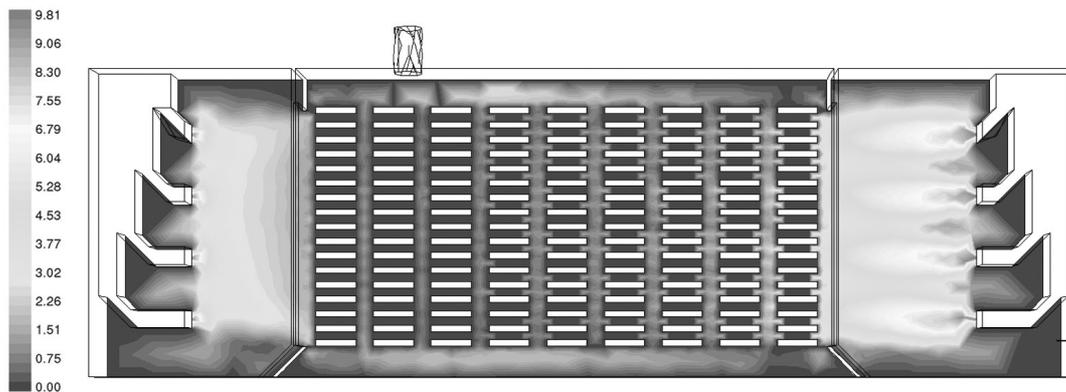


Abb. 8: Optimierung, Geschwindigkeitsprofil in [m/s], Längsschnitt Kammer, Rückwärtsbetrieb.

Ziegel abnehmbar angebracht. Die Anordnung dieser Leitbleche ist in Abb. 8 zu sehen.

Zur Vergleichmäßigung des Geschwindigkeitsprofils über der Höhe wurde ein Etagenverteiler für die Zufuhr des Trocknungsmittels konstruiert (s. Abb. 8) Diese Konstruktion sorgt einerseits für die Umlenkung des Trocknungsmittels und andererseits für dessen Aufteilung in vier Teilströme. Drei von vier Kanälen wurden jeweils mit einer Drosselklappe versehen, um in allen vier Kanälen einen gleichen Volumenstrom einstellen zu können.

Eine weitere Umbaumaßnahme stellt die Zuführung der Heißluft dar. Mit der Umsetzung der Optimierungsmaßnahme Etagenverteiler wird die Heißluft im hinteren Bereich des Kammertrockners vertikal von unten eingeblasen und somit dem umgewälzten Trocknungsmittels zugemischt.

Das Trocknungsregime (Abschnittszeiten und Solltemperaturen) wurde unter Beachtung der kritischen Trocknungsgeschwindigkeit im I. Trocknungsabschnitt, welche experimentell in einem vorangegangenen Vorhaben bestimmt wurden ist, auf 36 Stunden verkürzt.

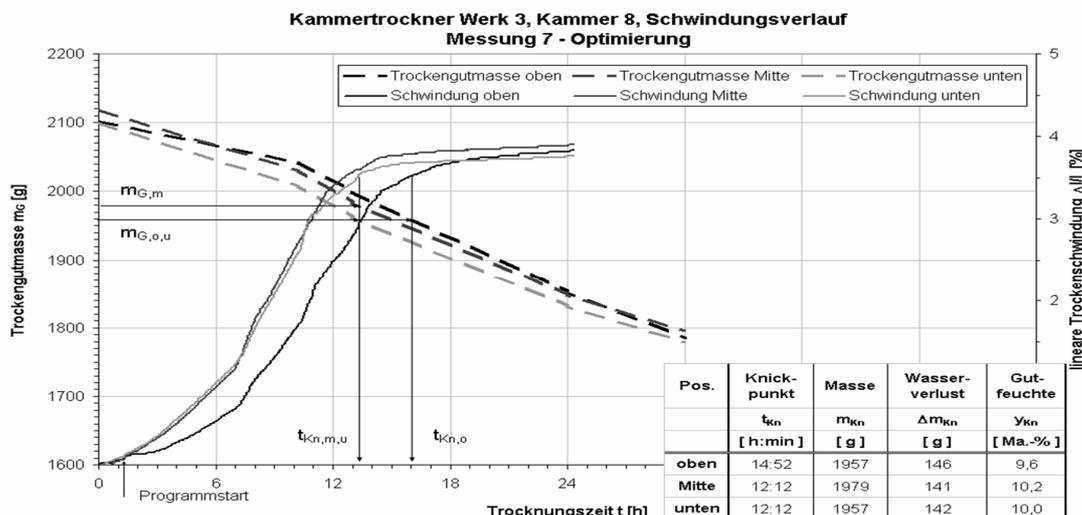


Abb. 9: Optimierung, Gemessener Temperatur- und Schwindungsverlauf im oberen, mittleren und unteren Bereich der Kammer.

Abb. 9 zeigt den Temperatur- und Schwindungsverlauf mit den Knickpunkten der betrachteten Ziegel im unteren, mittleren und oberen Bereich der Kammer. Die maximale Abweichung der Knickpunkte im oberen und unteren Teil der Kammer beträgt jetzt lediglich 2:40 (h:min) Stunden (9:40 Stunden im Ist-Zustand) bei einem Knickpunkt im oberen Bereich nach 14:52 Stunden (23:50 Stunden im Ist-Zustand).

Es ist zu erkennen, dass die beschriebenen Maßnahmen zur Optimierung der Strömungs- und Temperaturverhältnisse beigetragen haben. Die Strömungsgeschwindigkeiten, Temperaturen und Feuchten des Trocknungsmittels wurden über der Höhe der Kammer vergleichmäßig, was einerseits die Abweichungen der Trocknungszeiten der einzelnen Ziegel vermindert und andererseits zur Verkürzung der Trocknungszeiten führt (Absenkung der Zeiten bis zum Erreichen der Knickpunkte).

## 7 Schrifttum

- /1/ Großgebauer, S.; Hanke, W.; Aschoff, H.: Erarbeitung eines Modells auf der Grundlage physikalischer Kenngrößen zur Optimierung der Strömungsverhältnisse und des Wärmeüberganges in Trocknern und Öfen der keramischen Industrie. BMBF 01RK0002.
- /2/ Müller, R.: Die Annäherung der Temperaturabhängigkeit der Transportkoeffizienten von Gasen durch einen Potenzansatz. Chemie-Ing.-Techn., 40 (1968), 344-349.
- /3/ Krischer, O.; Kast, W.: Trocknungstechnik. Erster Band: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Dritte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1978. ISBN 3-540-08280-8.
- /4/ VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. Achte Auflage, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998. ISBN 3-540-14620-2(CD-ROM).

## 8 Symbole

$D$	[ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]	Diffusionskoeffizient
$R$	[ K ]	Gaskonstante
$T$	[ K ]	Temperatur
$c_p$	[ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	spez. Wärmekapazität
$m$	[ kg ]	Trockengutmasse
$\dot{m}$	[ $\text{kg s}^{-1}$ ]	Massenstrom
$p$	[ Pa ]	Druck
$\alpha$	[ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]	Wärmeübergangskoeffizient
$\beta$	[ $\text{m s}^{-1}$ ]	Stoffübergangskoeffizient
$\lambda$	[ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	[ $\text{kg m}^{-3}$ ]	Dichte
$\Delta/l$	[ % ]	Schwindung

## Indizes

D	Dampf (Wasserdampf)
G	Gut
I	im I. Trocknungsabschnitt
Kn	Knickpunkt
L	Luft
M	Mittel
O	Oberfläche
Ü	Übergang Gutsoberfläche zu Trocknungsmittel
f	feuchte Luft
h	halbdurchlässige Begrenzungswand
*	auf die Fläche bezogen
m	Mitte
o	oben
u	unten

## 9 Autoren

Prof. Dr.-Ing. M. Beckmann, Dipl.-Ing. S. Großgebauer, Dipl.-Ing. W. Hanke  
Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystr. 11C, 99423 Weimar

Dipl.-Phys. H. Aschoff  
Jacobi Tonwerke GmbH, Osterroder Str. 2, 37434 Bilshausen