

Messung von Luftenergieströmen in der Ziegelindustrie

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (TU) Jens Amberg, Geschäftsführer Luftmeister GmbH

In nahezu allen Ziegelwerken werden große Luftmengen bewegt. Deren Überprüfung wird dabei aber meist nur im Zuge der Abnahme vorgenommen, nicht aber im weiteren Betrieb. Hier setzt die Messlösung Luftmeister® an. Basierend auf einer präzisen Volumen- und Massenstrommessung in der Luftleitung wird nicht nur die durchströmte Luftmenge aufaddiert. Mit Hilfe von Enthalpie- oder Temperaturfühlern wird zudem die thermische Energie bestimmt, die über die Luftleitung übertragen wird. Auf Grundlage dieser ständig vorliegenden Verbrauchs- und Energieflussinformationen kann die gesamte Lufttechnik und insbesondere deren Wärmerückgewinnung in das betriebliche Energiemanagement einbezogen werden.

Produzierende Unternehmen der Ziegelindustrie haben in den letzten Jahren weitgehend ein Energiemanagement-System implementiert. Unabhängig davon, ob man sich dabei an die führende Energiemanagement-Norm DIN EN 50001 anlehnt (ab 2016 für große Unternehmen verpflichtend) oder eher aus der Richtung einer Umwelt-zertifizierung kommt (DIN EN 14001/EMAS etc.):



Abb. 1: mit freundlicher Genehmigung der Röben Tonbaustoffe GmbH

Abb. 1: In modernen Ziegelwerken (hier das Werk Bannberscheid der Fa. Röben) werden sehr große Energiemengen über Luftleitungen übertragen – höchst relevant für das betriebliche Energiemanagement

Zentrales Ziel ist es, Medien- und Energieverbräuche zu reduzieren und Einsparungen nachzuweisen. Dieses Reduzierungsziel folgt drei sich ergänzenden Motivationen:

- die Betriebskosten sollen gesenkt werden
- ein positiver, nachhaltiger Umweltbeitrag soll erbracht werden
- Kostenerleichterungen (Subventionen) wie die EEG-Umlagebefreiung sollen erzielt bzw. beibehalten werden

Seit Jahren „ernten“ Energiemanagement-Beauftragte die „niedrig hängenden Früchte“ und erzielen bei der Ziegelproduktion Einsparerfolge etwa durch Spitzenlastmanagement, Kraft-Kälte-Kopplung und Reduzierung der Druckluftleckagen. Doch auch in den kommenden Jahren müssen substantielle Einsparungen nachgewiesen werden! So rücken auch in der Ziegelindustrie die energie- und kostenintensiven Medien Klimaluft und Prozessluft in den Fokus.

Die luftseitigen Energieflüsse innerhalb von Ziegelwerken sind recht komplex. Abbildung 2 zeigt schematisch den Zusammenhang: Der Ofenprozess liefert über die Luftleitungen Energien, die direkt oder indirekt (Wärmerückgewinnung) dem Trocknungsprozess zugeführt werden können. Entscheidend für die Effizienz der Abwärmenutzung (grüne Pfeile) sind dabei die richtige Technologiewahl bei der Wärmerückgewinnung sowie die passende Luftleitungs-Dämmung. Ebenfalls effizienzsteigernd wirkt sich eine Gleichzeitigkeit der Wärmeabgabe (Tunnelofen) und des Wärmebedarfs (Trockner) aus. Zur Erhöhung der Gleichzeitigkeit können dabei ggf. Methoden der Wärmespeicherung eingesetzt werden.

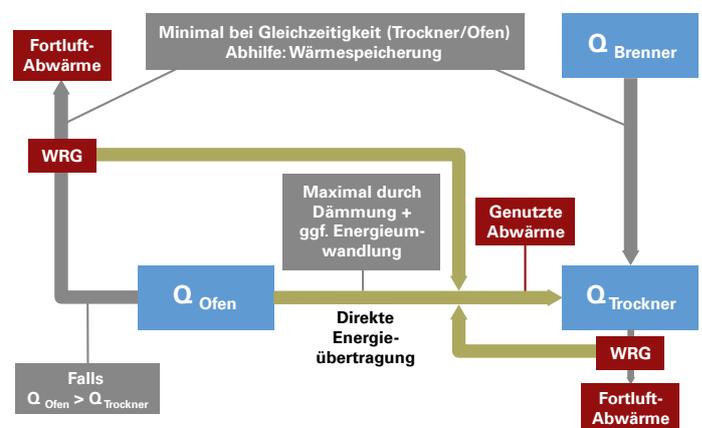


Abb. 2: Lufttechnische Abwärmenutzung im Ziegelwerk (schematische Darstellung)

In der Praxis wird die Zuführung der Abwärme zum Verbraucher typischerweise durch drei verschiedene Methoden umgesetzt:

1. Direkte Zuführung von Luftströmen: So kann beispielsweise an einer Stelle des Tunnelofens 500°C heiße Luft abgeführt und über eine Bypass-Luftleitung an geeigneter Stelle desselben Tunnelofens wieder zugeführt werden.
2. Wärmerückgewinnung durch indirekte Wärmeübertragung (Plattenwärmeübertrager oder Kreislaufverbundsysteme): Dem Rauchgas oder auch anderer Fortluft kann meist in nennenswertem Umfang Wärme entzogen werden, womit dann in einem sekundären Kreis z.B. Frischluft für den Trocknungsprozess vortemperiert werden kann.
3. Ringleitung: Sammlung und Mischung von Ofen-Abluftströmen verschiedenster Temperaturstufen. Dadurch wird dem Trocknungsprozess in großem Umfang thermische Energie zugeführt.

Wie aber können diese Energieflüsse gemessen, geregelt und nachgewiesen werden? Bislang wird diese Messaufgabe in der Regel nur punktuell mit Hilfe von Handgeräten angegangen. Neben einer Temperaturmessung wird dabei zur Durchflussmessung auf Prandtl'sche Staurohre oder auch Hochtemperatur-Flügelräder zurückgegriffen. Hierdurch ergeben sich jedoch die folgenden Nachteile:

1. Es handelt sich lediglich um eine Zeitpunkt-bezogene Messung. Unklar ist, ob damit eine repräsentative Messung vorliegt – schließlich kann nur ein einziger Betriebszustand erfasst werden. Vor allem aber ist es nicht möglich, den Prozess dauerhaft zu überwachen oder gar auf diese Messgröße zu überwachen oder zu regeln.
2. Die Messung der Strömung erfolgt lediglich in der Mitte der Luftleitung. Bei optimalem Strömungsprofil kann dies zu brauchbaren Messergebnissen führen. In der Praxis sind die Profile jedoch nur selten symmetrisch, da

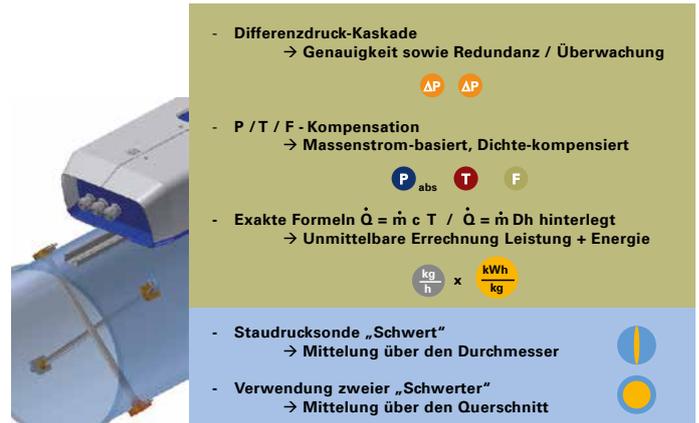


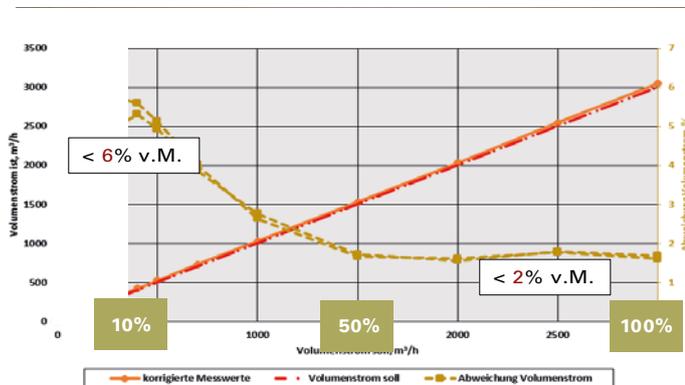
Abb. 3: Die Massenstrom-Messung des Luftmeister® kombiniert optimale Staudrucksonden mit einer ausgeklügelten Multi-Sensorik

- Vorstörungen vorliegen (Krümmer, Klappen etc.),
- nur kurze Ein- und Auslaufstrecken verfügbar sind und
- Teillast-Situationen auftreten, indem der Volumenstrom im Betrieb vermindert wird, z.B. über Frequenzumrichter am Ventilator.

Alle drei aufgeführten Punkte beeinträchtigen eine symmetrische Ausbildung des Strömungsprofils. Hohe Messfehler im deutlich zweistelligen Prozentbereich sind die Folge.

3. Um die thermische Leistung zu bestimmen (aus deren Aufsummierung dann der Energiebeitrag folgt), muss der Volumenstrom über eine Dichtekorrekturen zum Massenstrom umgerechnet und dann sowohl mit der (temperaturabhängigen) spezifischen Wärmekapazität als auch mit der Temperatur multipliziert werden. Dies erfolgt heute i.d.R. manuell durch Eingabe in Tabellenkalkulationsprogramme; ein aufwändiger und fehleranfälliger Ablauf.

Auf Basis all dieser Praxiserfahrungen wurde Luftmeister® entwickelt, der im Herbst 2016 Marktreife erlangt. Dabei handelt es sich um den weltweit ersten



- Genauigkeit bei Vorstörungen, 2xD Einlauf und 10% Teillast: <math>< 6\% v.M.</math>
- Genauigkeit bei Vorstörungen, 2xD Einlauf und Vollast: <math>< 2\% v.M.</math>

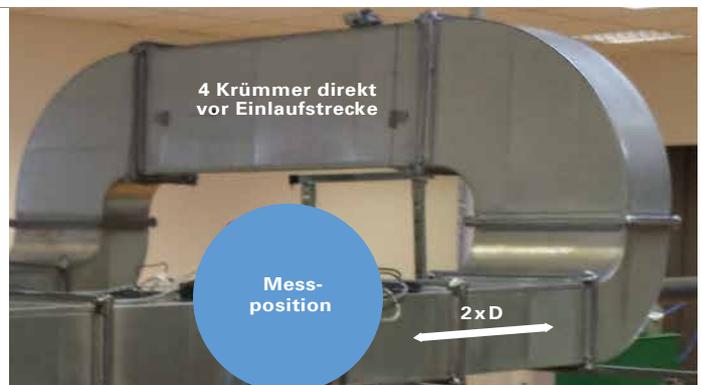
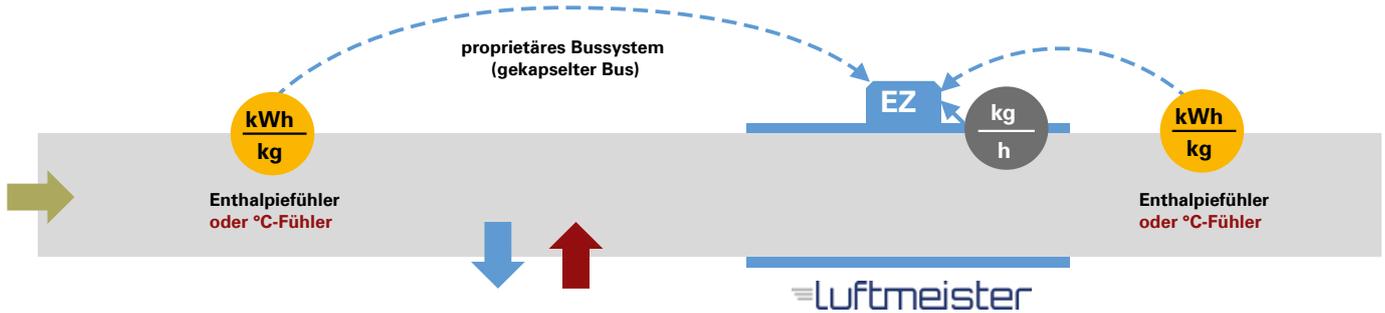


Abb. 4: Selbst bei gravierenden Vorstörungen, kurzen Ein- und Auslaufstrecken und Teillast (vermindertem Volumenstrom) erbringt die Luftmeister®-Sensorik optimale Genauigkeiten



Leistung = $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ x $\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ minus $\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$

Energie = Über die Zeit aufsummierte Leistung

- Bei $\Delta h > 0$: kWh
- Bei $\Delta h < 0$: kWh

Abb. 5: Messkonzept des Luftmeister® zur kontinuierlichen Luftenergieerfassung

Luftenergiezähler. Ausschlaggebend für die sehr hohe Genauigkeit des Messsystems ist dabei die High-End-Massenstromsensoren, vgl. Abbildung 3. Im hauseigenen, akkreditierten Volumen- und Massenstromkalibrierlabor wurde eine strömungsoptimierte Staudrucksonden-Geometrie („Schwert“) entwickelt. Dank zweier um 180° versetzt montierter Schwerte wird nicht nur die Strömung über den ganzen Durchmesser, sondern über den gesamten Querschnitt präzise erfasst.

Um eine maximale Genauigkeit der Differenzdruck-Messung zu erzielen, wird eine Sensor-Kaskade aus zwei Sensoren genutzt. Die dadurch entstehende Redundanz verhilft zugleich zu einer ständigen Sensorüberwachung. Des Weiteren wird mit Hilfe präziser Absolutdruck- (P), Temperatur- (T) und Feuchtesensoren (F) zu jedem Zeitpunkt die korrekte Dichte ermittelt und zur (P/T/F-) Kompensation eingesetzt. Der Einsatz der Feuchtesensoren

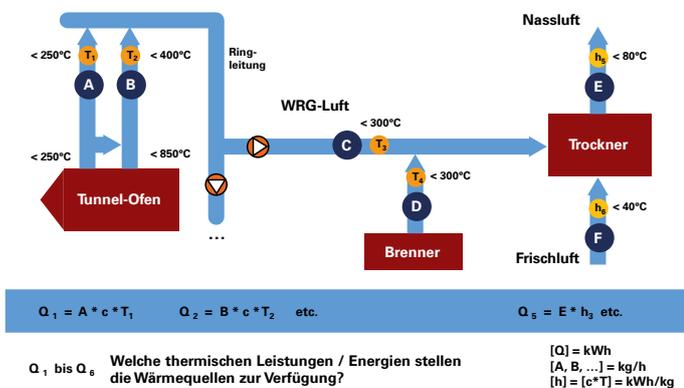


Abb. 6: Messkonzept zur Erfassung der thermischen Energieströme in Luftleitungen (Messpunktanalyse), blau: Luftmeister®, gelb: Enthalpiefühler, orange: Temperaturfühler

ist dabei für Prozesse bis 180°C vorgesehen – in Hochtemperatur-Anwendungen berücksichtigt die Dichtekompensation dann ausschließlich die aktuellen Absolutdruck- und Temperaturwerte, da die Feuchte in diesem Bereich keine Relevanz mehr besitzt.

Der auf diese Weise erzeugte Differenzdruck repräsentiert hochgenau den Volumenstrom in der Luftleitung, selbst nach Vorstörungen, bei kurzen Einlaufstrecken sowie bei Teillast (abgesenktem Volumenstrom). Abbildung 4 zeigt die auch unter den genannten, schwierigen Bedingungen resultierenden hohen Genauigkeiten im Labortest.

Die fortwährende, präzise Messung der Größen Absolutdruck, Temperatur und (bis 180°C) der Feuchte dient jedoch nicht nur zur Dichtebestimmung. Vielmehr berechnet der Luftmeister® hieraus zusätzlich die spezifische Enthalpie. Multipliziert mit dem Luft-Massenstrom ergibt sich die thermische Leistung an der jeweiligen lufttechnischen Messstelle. Abbildung 5 stellt dar, wie auf dieser Basis zugeführte Energien (rot) und entnommene Energien (blau) gesondert ermittelt werden:

- In Zeiträumen der Enthalpie-Zunahme ($\Delta h > 0$) werden die Energiebeiträge dem „roten“ Energiezuführungskonto zugebucht
- In Zeiträumen der Enthalpie-Abnahme ($\Delta h < 0$) werden die Energiebeiträge dem „blauen“ Energieentnahmekonto zugebucht

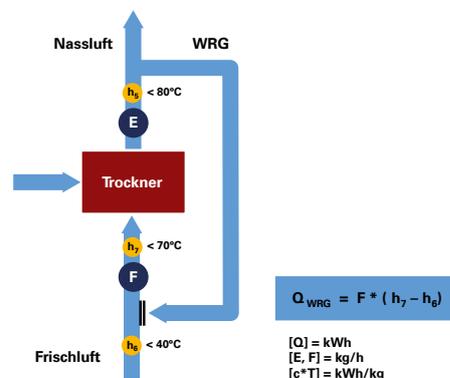


Abb. 7: Bilanzanalyse mit dem Luftmeister®: Der Energiebeitrag der Wärmerückgewinnung Q_{WRG} wird zu jedem Zeitpunkt durch Erfassung des Massenstroms (hier: F) und der Enthalpieänderung (hier: $h_7 - h_6$) ermittelt



Abb. 8: Der Luftmeister® – der weltweit erste Luftenergiezähler

Entscheidend ist, dass diese beiden Konten nicht miteinander saldiert werden. So werden unabhängig voneinander alle Energiezu- und -abflüsse erfasst.

Neben der hohen Sensor-Präzision ist die dauerhafte Messung des Volumenstroms, des Massenstroms sowie der thermischen Leistung ein entscheidender Vorteil des Luftmeister-Systems. Wie bereits dargestellt, können mit den heute verwendeten Handgeräten nur Momentaufnahmen gemacht werden – auf Basis von Annahmen wird dann ein mittlerer Energiebetrag aufaddiert. Demgegenüber liefert eine dauerhafte Messung (über mehrere Tage, Wochen oder ohne Messzeitende) für jeden Betriebszustand (Tag, Nacht, Wochenende, Teillastbetrieb etc.) exakte Werte. Nur so kann ein realistisches und verlässliches Abbild der Energieflüsse entstehen.

Konkret wird hiermit die thermische Energie bestimmt, die über eine Luftleitung übertragen wird (Messpunktanalyse, vgl. Abbildung 6). Zudem kann auch der Wärmebeitrag, den eine Wärmerückgewinnung oder eine Wärmequelle eingetragen hat (Bilanzanalyse, vgl. Abbildung 7).

Bei der in Abbildung 7 dargestellten Bilanzanalyse wird durch den Luftmeister® (hier: F) die Veränderung des Energieniveaus zwischen zwei Enthalpiemessstellen (hier: h_7 und h_8) ermittelt. Somit wird der Wärmebeitrag der Wärmerückgewinnung Q_{WRG} zu jedem Zeitpunkt sichtbar. Da insgesamt sogar bis zu fünf Enthalpie- oder Temperaturfühler auf einen Luftmeister geschaltet werden können, kann jeder Luftmeister® bis zu vier Energiebilanzen aufstellen, sofern diese durch denselben Massenstrom charakterisiert sind.

Auf Grundlage dieser ständig (über Analogsignale oder Ethernet-basierte Busse) vorliegenden Verbrauchs- und Energieflussinformationen kann nunmehr die Lufttechnik und insbesondere deren Abwärmenutzung optimal in das betriebliche Energiemanagement einbezogen werden. Einsparungen können lückenlos nachgewiesen werden. Zugleich stehen alle Messwerte auch fortwährend für Überwachungs- und Regelungszwecke zur Verfügung: Damit neben den Energieflüssen auch die auf der Lufttechnik basierende Prozessqualität jederzeit unter Kontrolle bleibt.