

# Pressure loss and flow distribution on brick settings

## Druckverlust und Strömungsverteilung an Ziegelbesätzen

Vogt, St.; Beckmann, M.: Druckverlust und Strömungsverteilung an Ziegelbesätzen (Teil 1). In: Zeitschrift Zi Ziegelindustrie International 60 (2008), Nr. 8, S. 20-31. Konvektiver Wärmeübergang an Ziegelbesätzen (Teil 2). In: Zeitschrift Zi Ziegelindustrie International 60 (2008), Nr. 9, S. 34-49

**This paper is the first of four articles dealing with the subjects of pressure loss and flow distribution, the convective heat transfer on brick settings, the optimum design of brick settings as well as innovative fast firing kilns for brick firing [1].**

**Der vorliegende Beitrag ist der erste von vier Artikeln, welche sich mit den Themen Druckverlust und Strömungsverteilung, dem konvektiven Wärmeübergang an Ziegelbesätzen, der optimalen Gestaltung von Ziegelbesätzen sowie neuartigen Schnellbrandöfen für den Ziegelbrand beschäftigen [1].**

### 1 Introduction

The dimensioning of industrial kilns has been the subject of research since the middle of the last century. Modelling for pre-calculation of important kiln parameters has reached a comprehensive status to date. However the relatively expensive investigations on pressure loss, flow distribution and heat transfer on brick settings were carried out almost exclusively in the 1950s to 1980s on settings made up of the then common small-sized masonry bricks. Since then, the brick formats used and the setting patterns in the kilns have changed fundamentally, so that the existing model approaches can only be applied to a limited extent. To date there are no specific calculation models for large-format vertically perforated bricks and roofing tiles.

The previous method of procedure, in which the investigations on pressure loss and heat transfer are carried out on scaled-down physical models, is hardly practicable on account of the large number of possible brick formats and setting patterns. For this reason it is more sensible if the characteristic flow areas and related flow phenomena on the settings are investigated and made accessible to a calculation. With this method of procedure, many of the setting constellations that are conceivable in future can then also be calculated. Such general approaches for calculation of the pressure loss and of the convective heat transfer on brick settings are lacking so far.

For this reason the computer-aided models already in existence since the late 1980s for simulation of the temperature curves of the setting flow and gas flow in the firing channel of the kiln can be applied exclusively with estimated heat transfer coefficients. Because of this unsatisfactory situation, these models are hardly used in practice for optimization of the temperature curves. The calculations for flow distribution and for heat transfer by means of the finite elements method or volume, which have been possible for several years, are too time-consuming and expensive so far for practical application, above all for optimization calculations.

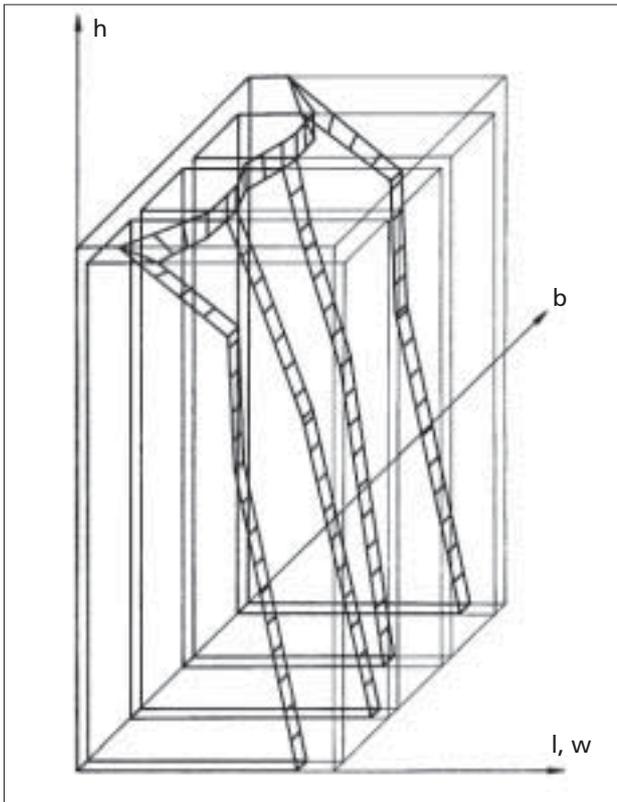
Kilns that are newly built in the brick and tile industry are therefore designed mainly on an empirical basis. Since no

### 1 Einleitung

Die Dimensionierung von Industrieöfen ist seit Mitte des letzten Jahrhunderts Gegenstand der Forschung. Die Modellbildung zur Vorausberechnung von wichtigen Ofenparametern hat bis heute einen umfangreichen Stand erreicht. Die relativ aufwändigen Untersuchungen zum Druckverlust, zur Strömungsverteilung und zum Wärmeübergang an Ziegelbesätzen wurden jedoch nahezu ausschließlich in den 50er- bis 80er-Jahren des letzten Jahrhunderts an Besätzen aus den damals gebräuchlichen kleinformatigen Mauerziegeln durchgeführt. Seitdem haben sich die verwendeten Ziegelformate und Besatzgestaltungen in den Öfen grundlegend geändert, sodass die vorhandenen Modellansätze nur eingeschränkt anzuwenden sind. Bis heute gibt es keine spezifischen Berechnungsmodelle für großformatige Hochlochziegel und Dachziegel.

Die bisherige Vorgehensweise, bei der die Untersuchungen zum Druckverlust und Wärmeübergang an maßstäblich verkleinerten physikalischen Modellen vorgenommen werden, ist wegen der Vielzahl der möglichen Ziegelformate und Besatzgestaltungen wenig praktikabel. Aus diesem Grund ist es sinnvoller, wenn die charakteristischen Strömungsgebiete und die damit verbundenen Strömungsphänomene an den Besätzen untersucht und einer Berechnung zugänglich gemacht werden. Mit dieser Vorgehensweise können dann auch viele der in Zukunft denkbaren Besatzkonstellationen berechnet werden. Derartige allgemeine Ansätze für die Berechnung des Druckverlustes und des konvektiven Wärmeübergangs an Ziegelbesätzen fehlen bisher.

Aus diesem Grund können die bereits seit Ende der 1980er-Jahre vorhandenen computergestützten Modelle zur Simulation der Temperaturverläufe von Besatz- und Gasstrom im Brennkanal des Ofens ausschließlich mit geschätzten Wärmeübergangszahlen angewendet werden. Aufgrund dieser unbefriedigenden Situation werden diese Modelle zur Optimierung der Temperaturverläufe in der Praxis wenig genutzt. Die seit einigen Jahren möglichen Berech-



»1 Flow speed distribution in the channels of a test model (measurement according to Hoyer [2, 3])

»1 Strömungsgeschwindigkeitsverteilung in den Kanälen eines Versuchsmodells (Messung nach Hoyer [2, 3])

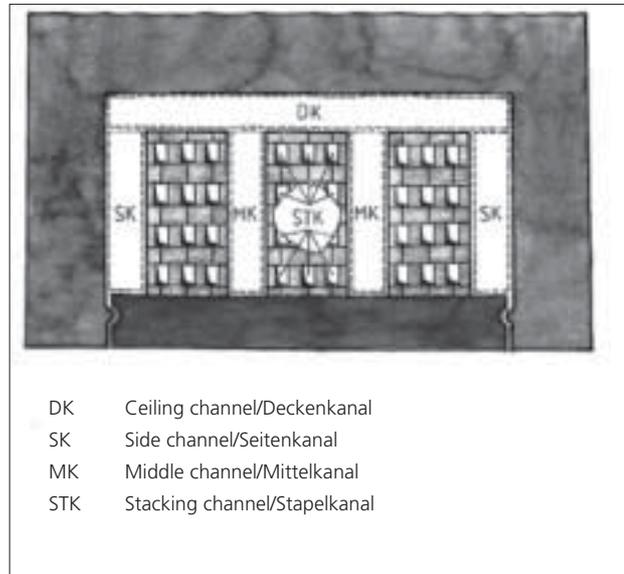
universal thermal engineering calculation bases are available, statements on the optimal dimensioning and operating method of a kiln are currently based on estimates or measurements. Comprehensive measurements on kilns regarding the operating conditions are also time-consuming and cost-intensive and are therefore carried out too little.

## 2 Flow distribution

Knowledge of the influence of the setting pattern on the pressure loss and flow distribution is of fundamental importance for the calculability of the heat transfer processes in kilns. Two theoretical approaches can be used to describe the flow processes around the settings or, if channels inside the settings are present, also within the settings. On the one hand the setting can be regarded as a heap with air through-flow and on the other hand as a paralleling of different channels.

For the heap with air through-flow a characteristic average speed is used as a rule. In the brick setting, however, in connection with different sized channels around the setting or within the setting, widely differing speeds can occur locally. For this reason the introduction of an average speed as in the heap is not appropriate for brick settings.

The flow speeds measured at different points around a compact setting are shown as an example in »1. It is conspicuous that zones with similar flow speeds develop in the individual gaps around the setting. If these zones are localized, several channels arise, in which in each case the speeds at the individual measuring points do not deviate essentially from the average speed in the channel. The obvious division of the flow channels in a tunnel kiln is shown in »2.



»2 Subdivision of the flow cross-section into channels with approximately the same flow speeds

»2 Unterteilung des Strömungsquerschnittes in Kanäle mit annähernd gleichen Strömungsgeschwindigkeiten

nungen zur Strömungsverteilung und zum Wärmeübergang mittels der Methode der finiten Elemente oder Volumen sind für die praktische Anwendung vor allem für Optimierungsberechnungen bisher zu zeit- und kostenaufwändig.

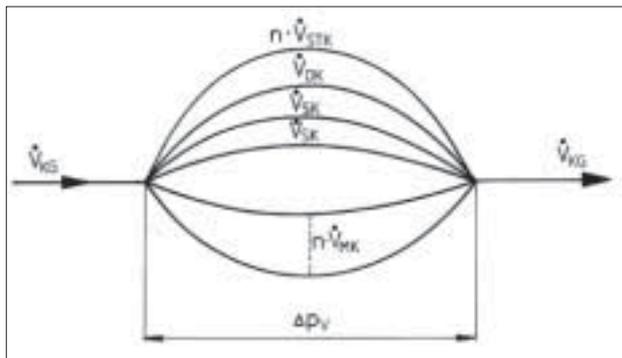
Neu zu bauende Öfen der Ziegelindustrie werden daher vorwiegend auf empirischer Grundlage konzipiert. Da keine durchgängigen wärmetechnischen Berechnungsgrundlagen zur Verfügung stehen, basieren derzeit Aussagen zur optimalen Ofendimensionierung und -betriebsweise auf Schätzungen oder Messungen. Umfassende Messungen zu den Betriebszuständen an Öfen sind ebenfalls zeit- und kostenintensiv und werden darum zu wenig durchgeführt.

## 2 Strömungsverteilung

Die Kenntnis des Einflusses der Besatzgestaltung auf den Druckverlust und die Strömungsverteilung ist für die Berechenbarkeit der Wärmeübergangsvorgänge in Öfen von fundamentaler Bedeutung. Zur Beschreibung der Strömungsvorgänge um die Besätze bzw. beim Vorhandensein von besatzinternen Kanälen, auch innerhalb der Besätze, lassen sich zwei theoretische Ansätze verwenden. Zum einen kann der Besatz als durchströmtes Haufwerk und zum anderen als Parallelschaltung verschiedener Kanäle betrachtet werden.

Beim durchströmten Haufwerk wird in der Regel eine charakteristische mittlere Geschwindigkeit verwendet. Im Ziegelbesatz können jedoch, verbunden mit unterschiedlich großen Kanälen um den Besatz herum bzw. innerhalb des Besatzes, lokal stark unterschiedliche Geschwindigkeiten auftreten. Die Einführung einer mittleren Geschwindigkeit wie im Haufwerk ist bei Ziegelbesätzen aus diesem Grund nicht sinnvoll.

In »1 sind exemplarisch die um einen Kompaktbesatz an verschiedenen Punkten gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt. Auffällig ist, dass sich in den einzelnen Spalten um den Besatz herum Zonen mit ähnlichen Strömungsgeschwindigkeiten ausbilden. Werden diese Zonen eingegrenzt, so entstehen mehrere Kanäle, in denen jeweils die Geschwindigkeiten an den einzelnen Messpunkten nicht wesentlich von der mittleren Geschwindigkeit in dem Kanal



»3 Partitioning of the total volume flow onto the setting channels  
 »3 Aufteilung des Gesamtvolumenstromes auf die Besatzkanäle

Starting from the fire lane in front of the setting – referred to the direction of flow – the total gas volume flow in the tunnel kiln branches into the individual setting channels and, after flowing through the channels, reunites as the total gas volume flow in the following fire lane (»3).

With the introduction of the equivalent diameter  $d_{GL}$  for non-circular flow channels:

$$d_{GL} = \frac{4 \cdot A}{U} \quad (1)$$

the partitioning of the total volume flow onto separate channels gives the possibility of comparing all flow processes in the channels with those of the relatively widely researched pipe flow. In the fire lanes an equalization of pressure occurs. From this, the assumption can be derived [3–6] that the pressure loss is the same over all setting channels (»3):

$$\Delta p_{SK} = \Delta p_{MK} = \Delta p_{DK} = \Delta p_{STK} = \Delta p_V \quad (2)$$

With this basic assumption, from the formulation for the pressure loss  $\Delta p_V$  in pipe flows subject to friction:

$$\Delta p_V = \xi \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (3)$$

with

$$\xi = \lambda \cdot \frac{l_k}{d_{GL}} \quad (4)$$

the following relation can be set up for two channel sections with different equivalent diameters and drag coefficients  $\xi$ :

$$\xi_1 \cdot \frac{\rho_1}{2} \cdot w_1^2 = \xi_2 \cdot \frac{\rho_2}{2} \cdot w_2^2 \quad (5)$$

If by way of simplification one proceeds from isothermal flow conditions, in which the densities of the fluids are the same in both channels, the equation (5) is reduced to:

$$\frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{\xi_2}{\xi_1}} \quad (6)$$

The speed ratio  $w_1/w_2$  of both channels therefore behaves like the square root of the reciprocal ratio of the drag coefficients of the channels. Since the channels in and on the setting have the same lengths, the equation (6), with the use of equation (4), can be transformed to:

$$\frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{\lambda_2 \cdot d_{GL,1}}{\lambda_1 \cdot d_{GL,2}}} \quad (7)$$

abweichen. Die dabei naheliegende Einteilung der Strömungskanäle in einem Tunnelofen ist in »2 dargestellt.

Der gesamte Gasvolumenstrom im Tunnelofen verzweigt sich, ausgehend von der Feuergasse vor dem Besatz – bezogen auf die Strömungsrichtung – in die einzelnen Besatzkanäle und vereinigt sich nach dem Durchströmen der Kanäle in der nachfolgenden Feuergasse wieder zum Gesamtvolumenstrom (»3).

Die Aufteilung des Gesamtvolumenstromes auf separate Kanäle gibt bei Einführung des gleichwertigen Durchmessers  $d_{GL}$  für nicht kreisrunde Strömungskanäle:

$$d_{GL} = \frac{4 \cdot A}{U} \quad (1)$$

die Möglichkeit, alle strömungstechnischen Vorgänge in den Kanälen mit denen der relativ weit erforschten Rohrströmung zu vergleichen. In den Feuergassen kommt es zum Druckausgleich. Daraus lässt sich die Annahme ableiten [3–6], dass der Druckverlust über allen Besatzkanälen gleich ist (»3):

$$\Delta p_{SK} = \Delta p_{MK} = \Delta p_{DK} = \Delta p_{STK} = \Delta p_V \quad (2)$$

Mit dieser Grundannahme lässt sich aus dem Ansatz für den Druckverlust  $\Delta p_V$  in reibungsbehafteten Rohrströmungen:

$$\Delta p_V = \xi \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (3)$$

mit

$$\xi = \lambda \cdot \frac{l_k}{d_{GL}} \quad (4)$$

folgende Beziehung für zwei Kanalabschnitte mit unterschiedlichen gleichwertigen Durchmessern und Widerstandsbeiwerten  $\xi$  aufstellen:

$$\xi_1 \cdot \frac{\rho_1}{2} \cdot w_1^2 = \xi_2 \cdot \frac{\rho_2}{2} \cdot w_2^2 \quad (5)$$

Wenn man vereinfachend von isothermen Strömungsverhältnissen ausgeht, bei denen die Dichten der Fluide in beiden Kanälen gleich sind, vereinfacht sich die Gleichung (5) zu:

$$\frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{\xi_2}{\xi_1}} \quad (6)$$

Das Geschwindigkeitsverhältnis  $w_1/w_2$  beider Kanäle verhält sich also wie die Quadratwurzel aus dem reziproken Verhältnis der Widerstandsbeiwerte der Kanäle. Da die Kanäle im und am Besatz die gleichen Längen aufweisen, lässt sich die Gleichung (6) unter Nutzung von Gleichung (4) umformen zu:

$$\frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{\lambda_2 \cdot d_{GL,1}}{\lambda_1 \cdot d_{GL,2}}} \quad (7)$$

Die Ermittlung der in Gleichung (7) enthaltenen Reibungsbeiwerte  $\lambda$  erfolgt meistens empirisch aus Experimenten an Versuchsmodellen [4, 5, 7–14]. Die dabei erhaltenen Messwerte werden in der Regel in folgender Potenzfunktion mit den jeweiligen Gültigkeitsbereichen zusammengefasst:

$$\lambda = C_1 \cdot Re^{-m} \quad (8)$$

in der die Reynolds-Zahl  $Re$  enthalten ist. Die Reynolds-Zahl beschreibt als dimensionslose Ähnlichkeitskennzahl das Ver-

Anzeige Beralmar

The determination of the coefficients of friction  $\lambda$  contained in equation (7) is done mostly empirically from experiments on test models [4, 5, 7–14]. The measured values obtained are combined as a rule in the following exponential function with the respective regions of validity:

$$\lambda = C_1 \cdot \text{Re}^{-m} \quad (8)$$

in which the Reynolds number  $\text{Re}$  is contained. The Reynolds number as a non-dimensional similarity index describes the ratio of inertia forces to frictional forces and is used further in the following form:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d_{\text{GL}}}{\nu} \quad (9)$$

Taking into account that the coefficients of friction of two channels to be compared can be described with the same constants and exponents of the exponential formulation from equation (8), after putting equation (8) in equation (7) and after some transformation the equation (7) can also be shown as an exponential function [5]:

$$\frac{w_1}{w_2} = \left( \frac{d_{\text{GL},1}}{d_{\text{GL},2}} \right)^n \quad (10)$$

with

$$n = \frac{1+m}{2-m} \quad (11)$$

With equation (10), with knowledge of the equivalent diameters the speed ratio between two channels can be calculated in a simple way.

From the coefficients of friction contained in the literature, the values shown in »Table 1 are derived for the exponent  $n$  given in equation (10), depending on the type of setting. For lattice settings the exponent  $n$  ranges accordingly in equation (10) between values of  $0.5 < n < 0.65$ . For compact settings the value of the exponent  $n$  lies somewhat higher at  $n = 0.714$ . In [1] an iterative way of calculation is introduced, which delivers more exact results than according to the relation (10).

### 3 Pressure loss

The coefficients of friction  $\lambda$  contained in the equation (7) make clear the relationship between flow distribution and pressure loss. Illustrated in »4 are the coefficients of friction  $\lambda$  of different authors for the calculation example of a lattice setting with the lattice dimensions  $a/b = b/c = a/c = 1$  [16]. The through-flow of the setting lattice shown in »4 took place in the investigations of Kistner and Langhans [quoted in 10, 12] in vertical direction and for the investigations [4–9, 13, 14] in horizontal direction.

In the comparison of the pipe flow to the brick setting flow, the following statements can be made:

hältnis von Trägheits- zu Reibungskräften und wird im Weiteren in folgender Form verwendet:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d_{\text{GL}}}{\nu} \quad (9)$$

Unter Berücksichtigung, dass sich die Reibungsbeiwerte zweier zu vergleichender Kanäle mit den gleichen Konstanten und Exponenten des Potenzansatzes aus Gleichung (8) beschreiben lassen, kann nach Einsetzen der Gleichung (8) in Gleichung (7) und einigem Umformen die Gleichung (7) ebenfalls als Potenzfunktion dargestellt werden [5]:

$$\frac{w_1}{w_2} = \left( \frac{d_{\text{GL},1}}{d_{\text{GL},2}} \right)^n \quad (10)$$

mit 
$$n = \frac{1+m}{2-m} \quad (11)$$

Mit Gleichung (10) lässt sich bei Kenntnis der gleichwertigen Durchmesser auf einfache Weise das Geschwindigkeitsverhältnis zwischen zwei Kanälen berechnen.

Aus den in der Literatur enthaltenen Reibungsbeiwerten leiten sich für den in der Gleichung (10) angegebenen Exponenten  $n$  je nach Besatzart die in »Tabelle 1 dargestellten Werte ab. Für Gitterbesätze bewegt sich der Exponent  $n$  danach in Gleichung (10) zwischen Werten von  $0,5 < n < 0,65$ . Bei Kompaktbesätzen liegt der Wert des Exponenten  $n$  etwas höher bei  $n = 0,714$ . In [1] wird ein iterativer Berechnungsweg vorgestellt, welcher genauere Ergebnisse als nach der Beziehung (10) liefert.

### 3 Druckverlust

Die in der Gleichung (7) enthaltenen Reibungsbeiwerte  $\lambda$  machen den Zusammenhang zwischen Strömungsverteilung und Druckverlust deutlich. In »4 sind die Reibungsbeiwerte  $\lambda$  verschiedener Autoren für das Berechnungsbeispiel eines Gitterbesatzes mit den Gitterabmessungen  $a/b = b/c = a/c = 1$  dargestellt [16]. Die Durchströmung des in »4 dargestellten Besatzgitters erfolgte in den Untersuchungen von Kistner und Langhans [zitiert in 10, 12] in senkrechter und für die Untersuchungen [4–9, 13, 14] in horizontaler Richtung.

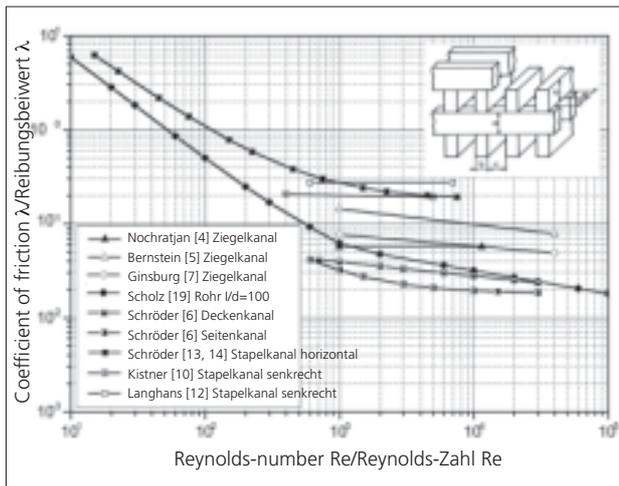
Im Vergleich von der Rohr- zur Ziegelbesatzströmung können folgende Aussagen getroffen werden:

- › Im Prinzip ähneln sich die Kurvenverläufe von Rohr- und Ziegelbesatzströmung. Es gibt einen laminaren Bereich, in dem der Reibungsbeiwert umgekehrt proportional zur Reynolds-Zahl abnimmt
- › Im Unterschied zur Rohrströmung gibt es in »4, wie bei unregelmäßigen (technischen) Rauigkeiten üblich [17], keinen plötzlichen Anstieg des Reibungsbeiwertes  $\lambda$  beim Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung
- › Die empirisch ermittelten Reibungsbeiwerte  $\lambda$  an Regenera-

» Table 1 Comparison of the exponents  $n$  from equation (10) by various authors

» Tabelle 1 Vergleich der Exponenten  $n$  aus Gleichung (10) von verschiedenen Autoren

Author/Autor	Setting type/Besatzart	Exponent $n$
Ginsburg [7]	Lattice setting/Gitterbesatz	0.596
Nochratjan [4]	Lattice setting/Gitterbesatz	0.5
Bernstein [8]	Lattice setting/Gitterbesatz	0.634
Bernstein [5]	Compact setting/Kompaktbesatz	0.714
Hoyer [2]	Compact and lattice setting/Kompakt- und Gitterbesatz	0.52
Abbakumow [15]	Compact setting/Kompaktbesatz	0.714



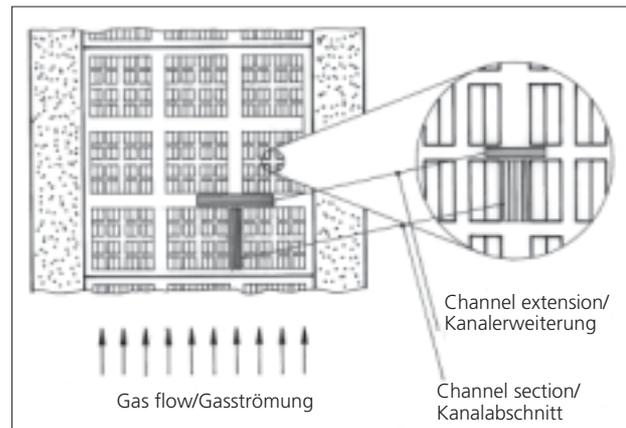
- »4 Coefficients of friction  $\lambda$  for different channel types on brick settings, based on the example of a lattice setting with  $a/b = a/c = b/c = 1$  [16]
- »4 Reibungsbeiwerte  $\lambda$  für verschiedene Kanalarten an Ziegelbesätzen am Beispiel eines Gitterbesatzes mit  $a/b = a/c = b/c = 1$  [16]

- › In principle the curve gradients of pipe flow and brick setting flow are similar. There is a laminar area, in which the coefficient of friction decreases inversely proportionally to the Reynolds number
- › Unlike the pipe flow, in »4 – as is usual for irregular (technical) roughnesses [17] – there is no sudden increase of the coefficient of friction  $\lambda$  at the transition from the laminar to the turbulent flow
- › The empirically determined coefficients of friction  $\lambda$  on regenerator lattices can, with vertical through-flow as in the turbulent, hydraulically rough area of the pipe flow, already become independent of  $Re$  with Reynolds numbers of  $600 < Re < 1000$  [10, 12]. In this case the coefficients of friction  $\lambda$  are partly several times larger than according to the models with horizontal through-flow [4–9, 13, 14]
- › Even in a comparison of the models for the horizontal through-flow of stacking channels and side and ceiling channels according to [13, 14], the coefficients of friction  $\lambda$  for the stacking channel are about 8 to 10 times greater than for the side and ceiling channel

Therefore in the lattice there must be a flow process which strongly influences the coefficient of friction  $\lambda$ . This process occurs above all in the lattices with vertical through-flow, in which there are no channel sections bordered on four sides. Furthermore, the coefficient of friction  $\lambda$  reaches a maximum with certain geometrical conditions of the setting lattice with vertical through-flow [12].

### 3.1 Division of characteristic flow spaces on brick settings

In order to approach the phenomenon of the partly large coefficient of friction  $\lambda$  in stacking channels, it makes sense to look at the characteristic flow spaces on brick settings. Shown in »5 are the two characteristic flow spaces recurring in lattice and compact settings on different scales. On the one hand this concerns the channel section, which is bordered at least on three sides. On the other hand, between two channel sections arranged in alignment there is as a rule a sudden cross-section extension, which forms chamber-like flow spaces to the left and right of the channel section.



- »5 Characteristic flow spaces recurring on different scales on a lattice setting shown as a top view [18]

- »5 Auf verschiedenen Skalen wiederkehrende charakteristische Strömungsräume an einem in der Draufsicht dargestellten Gitterbesatz [18]

- torgittern können bei senkrechter Durchströmung wie im turbulenten hydraulisch rauen Bereich der Rohrströmung bereits bei Reynolds-Zahlen von  $600 < Re < 1000$  unabhängig von  $Re$  werden [10, 12]. Die Reibungsbeiwerte  $\lambda$  sind in diesem Fall teilweise um ein Mehrfaches größer als nach den Modellen mit horizontaler Durchströmung [4–9, 13, 14]
- › Auch beim Vergleich der Modelle für die horizontale Durchströmung von Stapelkanälen und Seiten- und Deckenkanälen nach [13, 14] sind die Reibungsbeiwerte  $\lambda$  für den Stapelkanal etwa 8- bis 10-mal größer als für den Seiten- und Deckenkanal

Es muss also im Gitter einen Strömungsvorgang geben, welcher den Reibungsbeiwert  $\lambda$  stark beeinflusst. Dieser Vorgang tritt vor allem in den senkrecht durchströmten Gittern auf, in denen keine von vier Seiten begrenzten Kanalabschnitte vorhanden sind. Der Reibungsbeiwert  $\lambda$  erreicht zudem bei bestimmten geometrischen Verhältnissen des senkrecht durchströmten Besatzgitters ein Maximum [12].

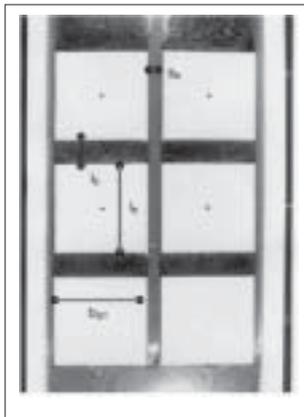
### 3.1 Einteilung charakteristischer Strömungsräume an Ziegelbesätzen

Um dem Phänomen des teilweise großen Reibungsbeiwertes  $\lambda$  in Stapelkanälen näher zu kommen, ist ein Blick auf die charakteristischen Strömungsräume an Ziegelbesätzen sinnvoll. In »5 sind die in Gitter- und Kompaktbesätzen auf verschiedenen Skalen wiederkehrenden zwei charakteristischen Strömungsräume dargestellt. Dies betrifft einmal den Kanalabschnitt, welcher mindestens von drei Seiten begrenzt wird. Zum anderen befindet sich in der Regel zwischen zwei fluchtend angeordneten Kanalabschnitten eine plötzliche Querschnittserweiterung, die links und rechts vom Kanalabschnitt kammerartige Strömungsräume bildet.

### 3.2 Untersuchungen von Ziegelbesätzen im Wasserkanal

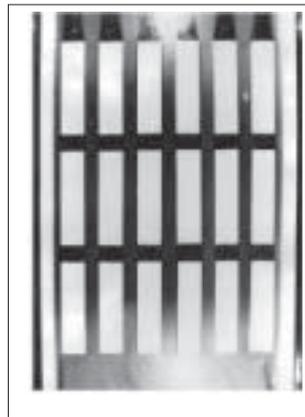
Die elementaren Strömungsphänomene in diesen charakteristischen Strömungsräumen können in Wasserkanaluntersuchungen anschaulich gemacht werden [13, 17]. Hoyer [2] hat verschiedene gitterförmige und kompakte Besatzkonfigurationen im Wasserkanal untersucht (»6 bis »9).

In Auswertung der Untersuchungen von Hoyer lassen sich folgende Feststellungen treffen:



»6 Block setting in the water channel [2]

»6 Blockbesatz im Wasserkanal [2]



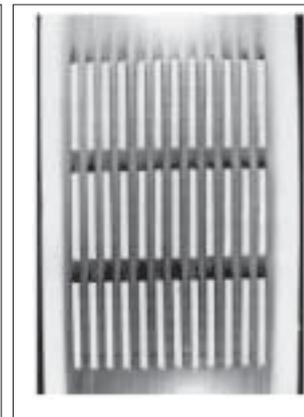
»7 Blade setting in the water channel [2]

»7 Scheibenbesatz im Wasserkanal [2]



»8 Bonder course of a lattice setting in the water channel [2]

»8 Binderschicht eines Gitterbesatzes im Wasserkanal [2]



»9 Stretcher course of a lattice setting in the water channel [2]

»9 Läufer-schicht eines Gitterbesatzes im Wasserkanal [2]

### 3.2 Investigations on brick settings in the water channel

The elementary flow phenomena in these characteristic flow spaces can be illustrated in water channel investigations [13, 17]. Hoyer [2] has examined different lattice and compact setting configurations in the water channel (»6 to »9).

Evaluating the investigations by Hoyer, the following statements can be made:

- › The characteristic flow phenomena have developed already one setting pack after the inlet flow into the model
- › Directed cross-flows to the axial main flow do not occur
- › A change of speed in the direction of the axial main flow is not verified. This means that the frictional drag of the channel sections is low. The larger pressure loss in setting lattices already indicated in the paragraph 3.1 is therefore mainly attributable to the sudden extensions

For the extension as a function of the ratio  $l_e/b_k$  of length of the extension  $l_e$  to the channel width  $b_k$ , the analysis of the water channel investigations results in the different flow phenomena described in »Table 2 (see also length specifications in »6).

Accordingly, the area of  $0.5 < l_e/b_k < 2.5$  is of particular significance for the pressure loss in the extensions, because outside this area in the pictures hardly any interactions (induced drags) can be recognized between the flow from the channel with the side chambers in the extension. An analysis of brick settings used today results in ratios of  $2.0 < l_e/b_k < 30$  in the fire lanes and of  $1.0 < l_e/b_k < 5.0$  in the extensions within the setting stack. Thus induced drags occur above all in the flow within the setting.

The induced drags are evoked from the axial main flow by friction. They lead to a clearly visible flow within the extensions. The induced drags are maintained undiminished even with a very great enlargement of the flow chambers as in »8. For this reason the pressure loss will increase with increasing enlargement of the extensions. The shape of most induced drags is circular. That means, the cell in which the induced drag moves has the same length and width in the top view of the setting.

#### 3.3 Geometrical similarity indices used

Of particular significance for the description of the complicatedly shaped brick settings are the non-dimensional geometrical similarity indices, which are defined differently by the respective authors. The non-dimensional similarity indi-

- › Die charakteristischen Strömungsphänomene haben bereits ein Besatzpaket nach der Einlaufströmung in das Modell ausgebildet
- › Gerichtete Querströmungen zur axialen Hauptströmung treten nicht auf
- › Eine Geschwindigkeitsänderung in Richtung der axialen Hauptströmung ist nicht nachzuweisen. Das bedeutet, dass der Reibungswiderstand der Kanalabschnitte gering ist. Der bereits in Punkt 3.1 angedeutete größere Druckverlust in Besatzgittern ist deswegen vorrangig auf die plötzlichen Erweiterungen zurückzuführen

Die Analyse der Wasserkanaluntersuchungen ergibt für die Erweiterung in Abhängigkeit des Verhältnisses  $l_e/b_k$  von Länge der Erweiterung  $l_e$  zur Kanalbreite  $b_k$  die in »Tabelle 2 beschriebenen unterschiedlichen Strömungsphänomene (s.a. Längenangaben in »6).

Der Bereich von  $0,5 < l_e/b_k < 2,5$  ist danach für den Druckverlust in den Erweiterungen von besonderer Bedeutung, da außerhalb dieses Bereiches in den Bildern kaum Wechselwirkungen (Wirbelwalzen) zwischen der Strömung aus dem Kanal mit den seitlichen Kammern in der Erweiterung zu erkennen sind. Eine Analyse heute verwendeter Ziegelbesätze ergibt Verhältnisse von  $2,0 < l_e/b_k < 30$  in den Feuergassen und von  $1,0 < l_e/b_k < 5,0$  in den Erweiterungen innerhalb der Besatzstapel. Damit treten Wirbelwalzen vor allem in der Strömung innerhalb des Besatzes auf.

Die Wirbelwalzen werden aus der axialen Hauptströmung durch Reibung hervorgerufen. Sie führen zu einer deutlich sichtbaren Strömung innerhalb der Erweiterungen. Die Wirbelwalzen werden auch bei einer sehr großen Ausweitung der Strömungskammern wie in »8 unvermindert aufrechterhalten. Der Druckverlust wird aus diesem Grund mit zunehmender Ausdehnung der Erweiterungen ansteigen. Die Form der meisten Wirbelwalzen ist kreisrund. Das heißt, die Zelle, in der sich die Wirbelwalze bewegt, hat in der Besatzdraufsicht die gleiche Länge und Breite.

#### 3.3 Verwendete geometrische Ähnlichkeitskennzahlen

Von besonderer Bedeutung für die Beschreibung der kompliziert geformten Ziegelbesätze sind die dimensionslosen geometrischen Ähnlichkeitskennzahlen, welche von den jeweiligen Autoren unterschiedlich definiert werden. Im Weiteren kommen die in vielen Versuchsreihen bei der Untersuchung der Rohrströmung bereits bestätigten dimensionslosen Ähn-

»Table 2 Description of the flow phenomena in extensions of brick settings

»Tabelle 2 Beschreibung der Strömungsphänomene in Erweiterungen von Ziegelbesätzen

Ratio Verhältnis $l_E/b_K$	Description of the flow phenomena	Beschreibung der Strömungsphänomene
< 0.5	No visible flow phenomena	keine sichtbaren Strömungsphänomene
0.5 to/bis 2.5	No expansion of the jet emerging from the channel, formation of induced drags at the edge of the jet, the induced drags occur almost independently of the spatial extent of the extensions (»6 to »8)	keine Ausweitung des aus dem Kanal austretenden Strahles, Bildung von Wirbelwalzen am Strahlrand, die Wirbelwalzen treten nahezu unabhängig von der räumlichen Ausdehnung der Erweiterungen auf (»6 bis »8)
2.5 to/bis 8.0	The jet from the channel expands to an rectangular jet, as a result diffuse turbulence areas develop above all at the front of the setting blown by the open jet (»9)	Der Strahl aus dem Kanal weitet sich zum ebenen Freistrahls aus, dadurch bilden sich diffuse Wirbelgebiete vor allem an der von Freistrahls angeströmten Besatzvorderseite aus (»9)
> 8.0	The directed flow from the channel disperses (»9 top) and must build up again on streaming into the following channel (stream-in process)	Die gerichtete Strömung aus dem Kanal löst sich auf (»9 oben) und muss sich beim Einströmen in den darauf folgenden Kanal erst wieder anlegen (Einströmvorgang)

ces already confirmed in many test series for the investigation of the pipe flow are applied in the following. This relates to the non-dimensional channel length (»10):

$$G_1 = \frac{l_k}{d_{GL}} \quad (12)$$

the non-dimensional length of the extension (»6):

$$G_2 = \frac{l_E}{d_{GL}} \quad (13)$$

and the non-dimensional area ratio of the channel section to the extension (»10):

$$G_3 = \frac{A_K}{A_E} \quad (14)$$

### 3.4 Pressure loss in channels

The division into channel section and extension also requires

lichkeitskennzahlen zur Anwendung. Dies betrifft die dimensionslose Kanallänge (»10):

$$G_1 = \frac{l_k}{d_{GL}} \quad (12)$$

die dimensionslose Länge der Erweiterung (»6):

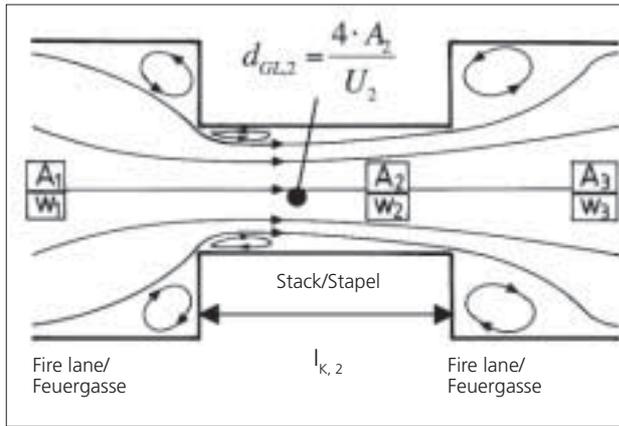
$$G_2 = \frac{l_E}{d_{GL}} \quad (13)$$

sowie das dimensionslose Flächenverhältnis vom Kanalabschnitt zur Erweiterung (»10):

$$G_3 = \frac{A_K}{A_E} \quad (14)$$

### 3.4 Druckverlust in Kanälen

Die Aufteilung in Kanalabschnitt und Erweiterung erfordert auch eine getrennte Berechnung der Reibungsbeiwerte  $\lambda$



- »10 Inlet and outlet flow on a setting stack (combination of cross-section contraction and extension)
- »10 Einlauf- und Auslaufströmung an einem Besatzstapel (Kombination aus Querschnittsverengung und -erweiterung)

a separate calculation of the coefficients of friction  $\lambda$  of the two characteristic flow spaces. In »4 the coefficients of friction  $\lambda$  are still composed of the respective coefficient of friction for the channel section and the extension. The flow in the channels is most likely to be compared with the pipe inlet flow or the flow in short pipe sections (»10).

The flow in pipe inlets from a comparatively large space before the pipe was investigated variously. With the flow in brick settings, however, there is as a rule no inflow into the channel section from a larger flow space before the channel section, but instead directly from the preceding channel section in the direction of flow. Here the flow is not constricted, as frequently described in the literature on the pipe inlet, but after entrance immediately develops the wall boundary layer anew. For this case, on condition that the speed at the pipe entrance is the same over the entire cross-section, for any  $l/d$  ratios Scholz [19] has developed both an equation for the drag coefficient  $\xi_{lam}$  for the laminar pipe inlet flow:

$$\xi_{lam} = \left( 38,92 + 25,08 \cdot \frac{\xi_{lam} - 0,4}{\xi_{lam} + 0,4} \right) \cdot \xi_{lam}^{\left( \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\xi_{lam} - 0,47}{\xi_{lam} + 0,47} \right)} \quad (15)$$

with 
$$\xi_{lam} = \frac{l_k}{d} \cdot \frac{1}{Re} \quad (16)$$

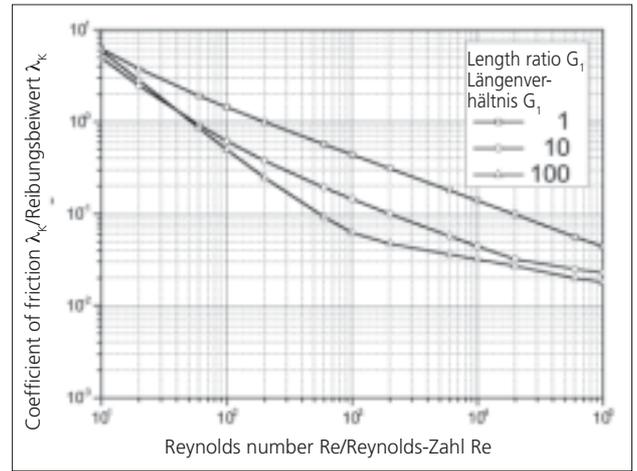
and also for the turbulent, hydraulically smooth pipe inlet flow:

$$\xi_{tur} = \left( 0,343 - 0,027 \cdot \frac{\xi_{tur} - 10}{\xi_{tur} + 10} \right) \cdot \xi_{tur}^{\left( \frac{9}{10} + \frac{1}{10} \cdot \frac{\xi_{tur} - 2}{\xi_{tur} + 2} \right)} \quad (17)$$

with 
$$\xi_{tur} = \frac{l_k}{d} \cdot \frac{1}{Re^{0,25}} \quad (18)$$

These equations have the advantage that they are valid for any non-dimensional pipe lengths and therefore describe the entire area between boundary layer flow and fully developed pipe flow.

Since – as already mentioned above – non-dimensional channel lengths  $l_k/d_{GL}$  ensue between  $2 < l_k/d_{GL} < 20$  in brick settings, the flow in brick channels ranges in the transition area between boundary layer flow and fully developed flow. The continuous curve gradient registered in »4 for the model according to Scholz was obtained from the comparison of the relation (15) and (17). In each case the equation is used, which by calculation results in the greatest drag coefficient



- »11 Coefficient of friction of the channel  $\lambda_k$  according to the equations (15) and (17) as a function of the Reynolds number and the non-dimensional channel length  $G_1$
- »11 Reibungsbeiwerte des Kanals  $\lambda_k$  nach den Gleichungen (15) und (17) in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl und der dimensionslosen Kanallänge  $G_1$

der zwei charakteristischen Strömungsräume. Im »4 setzen sich die Reibungsbeiwerte  $\lambda$  noch aus dem jeweiligen Reibungsbeiwert für den Kanalabschnitt und die Erweiterung zusammen. Die Strömung in den Kanälen ist am ehesten mit der Rohreinlaufströmung bzw. der Strömung in kurzen Rohrabschnitten zu vergleichen (»10).

Die Strömung in Rohreinläufen aus einem vergleichsweise großen Raum vor dem Rohr wurde vielfältig untersucht. Bei der Strömung in Ziegelbesätzen erfolgt jedoch in der Regel keine Einströmung in den Kanalabschnitt aus einem größeren Strömungsraum vor dem Kanalabschnitt, sondern direkt aus dem in Strömungsrichtung vorhergehenden Kanalabschnitt. Die Strömung wird dabei nicht eingeschnürt, wie häufig in der Literatur zum Rohreinlauf beschrieben, sondern bildet nach dem Eintritt sofort die Wandgrenzschicht neu aus. Für diesen Fall, unter der Voraussetzung, dass die Geschwindigkeit am Rohreintritt über den gesamten Querschnitt gleich ist, hat Scholz [19] für beliebige  $l/d$ -Verhältnisse sowohl eine Gleichung für den Widerstandsbeiwert  $\xi_{lam}$  für die laminare Rohreinlaufströmung:

$$\xi_{lam} = \left( 38,92 + 25,08 \cdot \frac{\xi_{lam} - 0,4}{\xi_{lam} + 0,4} \right) \cdot \xi_{lam}^{\left( \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\xi_{lam} - 0,47}{\xi_{lam} + 0,47} \right)} \quad (15)$$

mit 
$$\xi_{lam} = \frac{l_k}{d} \cdot \frac{1}{Re} \quad (16)$$

als auch für die turbulente hydraulisch glatte Rohreinlaufströmung:

$$\xi_{tur} = \left( 0,343 - 0,027 \cdot \frac{\xi_{tur} - 10}{\xi_{tur} + 10} \right) \cdot \xi_{tur}^{\left( \frac{9}{10} + \frac{1}{10} \cdot \frac{\xi_{tur} - 2}{\xi_{tur} + 2} \right)} \quad (17)$$

mit 
$$\xi_{tur} = \frac{l_k}{d} \cdot \frac{1}{Re^{0,25}} \quad (18)$$

entwickelt. Diese Gleichungen haben den Vorteil, dass sie für beliebige dimensionslose Rohrlängen gelten und damit den gesamten Bereich zwischen Grenzschichtströmung und voll ausgebildeter Rohrströmung beschreiben.

Da sich, wie bereits oben erwähnt, in Ziegelbesätzen dimensionslose Kanallängen  $l_k/d_{GL}$  zwischen  $2 < l_k/d_{GL} < 20$  einstellen, bewegt sich die Strömung in Ziegelkanälen im Übergangsbereich zwischen Grenzschicht- und voll ausgebildeter Strömung. Der in »4 für das Modell nach Scholz eingetra-

$\xi_{\kappa}$  with the respective Reynolds number. The development of the coefficient of friction of the channel  $\lambda_{\kappa}$  as a function of the Reynolds number and the non-dimensional channel length  $G_1$  is shown in »11.

### 3.5 Generalized equation for the pressure loss in extensions

The pressure loss in the extensions of brick settings was not investigated explicitly in the literature up to now. For this reason tests on different extensions were carried out, [1] which are explained in greater detail in [1]. Applying a method also described in [1], the following generalized relation is then obtained for calculation of the coefficient of friction of extensions  $\lambda_E$ :

$$\lambda_E = -0.4 + 0.48 \cdot (1 - \exp(-4 \cdot G_2)) \quad (19)$$

$$+ \frac{300}{G_2^{5.0} \cdot \left( \exp \left( \left( \frac{20}{G_2} - 33 \cdot G_2^{0.62} \cdot \exp(-G_2^{1.35}) \right) \cdot G_3^{(0.457 - 5.9 \cdot G_2^{0.9}) \cdot \exp(-3 \cdot G_2)} \right) - 1 \right)}$$

$$+ \left( \frac{64}{\text{Re}} \right) \cdot (0.1 + (1 - \exp(-(0.028 + (1 - \exp(-10000 \cdot G_3^{9.0})) \cdot 2.4) \cdot G_1^{4.0})) \cdot 4.4)$$

The area of application of the equation (19) extends over the following fields:

- > 30 < Re < 19 000
- > 0 <  $G_1$  < 12
- > 0.08 <  $G_2$  < 4.9
- > 0.1 <  $G_3$  < 0.67

The results obtained on the basis of the equation (19) with  $\text{Re} = 10\,000$  and  $G_1 = 10$  are shown in »12.

The coefficients of friction of the extensions  $\lambda_E$  increase to a significant degree in the area of the non-dimensional

gene durchgehende Kurvenverlauf wurde aus dem Vergleich von Beziehung (15) und (17) erhalten. Es wird jeweils die Gleichung verwendet, welche bei der jeweiligen Reynolds-Zahl rechnerisch den größten Widerstandsbeiwert  $\xi_{\kappa}$  ergibt. Die Entwicklung des Reibungsbeiwertes des Kanals  $\lambda_{\kappa}$  in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl und der dimensionslosen Kanallänge  $G_1$  zeigt »11.

### 3.5 Verallgemeinerte Gleichung für den Druckverlust in Erweiterungen

Der Druckverlust in den Erweiterungen von Ziegelbesätzen wurde bisher in der Literatur nicht explizit untersucht. Aus diesem Grund wurden Versuche an verschiedenen Erweiterungen durchgeführt, welche in [1] näher erläutert werden. Unter Anwendung einer ebenfalls in [1] beschriebenen Methodik wird dann folgende verallgemeinerte Beziehung zur Berechnung des Reibungsbeiwertes von Erweiterungen  $\lambda_E$  erhalten:

$$\lambda_E = -0.4 + 0.48 \cdot (1 - \exp(-4 \cdot G_2)) \quad (19)$$

$$+ \frac{300}{G_2^{5.0} \cdot \left( \exp \left( \left( \frac{20}{G_2} - 33 \cdot G_2^{0.62} \cdot \exp(-G_2^{1.35}) \right) \cdot G_3^{(0.457 - 5.9 \cdot G_2^{0.9}) \cdot \exp(-3 \cdot G_2)} \right) - 1 \right)}$$

$$+ \left( \frac{64}{\text{Re}} \right) \cdot (0.1 + (1 - \exp(-(0.028 + (1 - \exp(-10000 \cdot G_3^{9.0})) \cdot 2.4) \cdot G_1^{4.0})) \cdot 4.4)$$

Der Geltungsbereich der Gleichung (19) erstreckt sich auf folgende Gebiete:

- > 30 < Re < 19 000
- > 0 <  $G_1$  < 12
- > 0,08 <  $G_2$  < 4,9
- > 0,1 <  $G_3$  < 0,67

length of the extension of  $0.5 < G_2 < 2.5$ . This process is intensified with decreasing area ratios (factor 16 between  $G_3=0.5$  and  $G_3=0.1$  with  $G_2=0.8$ ). In addition, with  $G_2 \approx 1$  the largest coefficient of friction develops in all setting constellations, which is due to the already described formation of induced drags in the extension. At the same time the maximum of the coefficient of friction  $\lambda_{\epsilon}$  shifts from  $G_2=0.9$  with  $G_3=0.1$  to  $G_2=1.2$  with  $G_3=0.5$ .

The coefficient of friction of the extension  $\lambda_{\epsilon}$ , which changes strongly in a narrow geometrical framework due to the influence of the area ratio  $G_3$ , is also the reason for the differences by a factor of 10 in the coefficients of friction of the setting flow determined inside and outside the lattice setting. Considerably more extensions are found in the interior of the lattice settings than around the setting. The induced drags intensively flush the areas of the extension. This effect – important for the convective heat transfer – on the setting areas not directly touched by the channel flow must be taken into account for the optimum design of the setting.

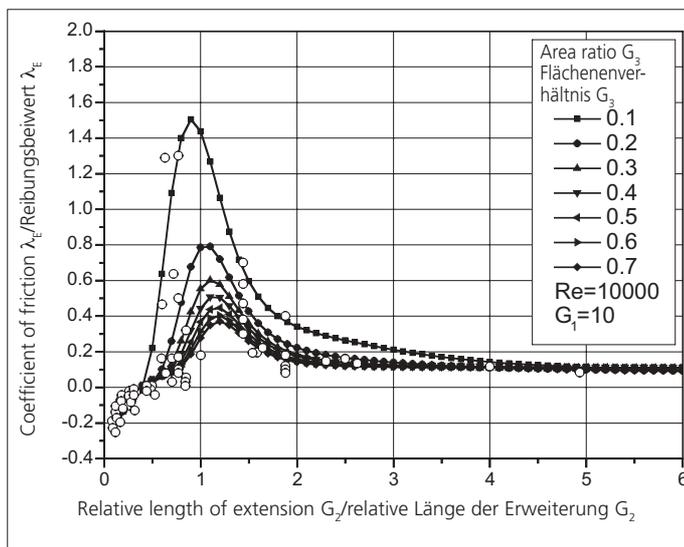
Outside the area  $0.5 < G_2 < 2.5$  there is hardly any interaction between the flow emerging from the channel and the extension. This can be recognized in the low coefficients of

Die aufgrund der Gleichung (19) bei  $Re=10000$  und  $G_1=10$  erhaltenen Ergebnisse sind in »12 dargestellt.

Die Reibungsbeiwerte der Erweiterungen  $\lambda_{\epsilon}$  steigen in bedeutendem Maße im Bereich der dimensionslosen Länge der Erweiterung von  $0,5 < G_2 < 2,5$  an. Dieser Vorgang wird bei abnehmenden Flächenverhältnissen verstärkt (Faktor 16 zwischen  $G_3=0,5$  und  $G_3=0,1$  bei  $G_2=0,8$ ). Bei  $G_2 \approx 1$  bildet sich zudem in allen Besatzkonstellationen der größte Reibungsbeiwert aus, welcher auf der bereits beschriebenen Bildung von Wirbelwalzen in der Erweiterung beruht. Das Maximum des Reibungsbeiwertes  $\lambda_{\epsilon}$  verschiebt sich dabei von  $G_2=0,9$  bei  $G_3=0,1$  zu  $G_2=1,2$  bei  $G_3=0,5$ .

Der sich in einem engen geometrischen Rahmen durch den Einfluss des Flächenverhältnisses  $G_3$  stark ändernde Reibungsbeiwert der Erweiterung  $\lambda_{\epsilon}$  ist auch die Ursache für die innerhalb und außerhalb des Gitterbesatzes um den Faktor 10 festgestellten Unterschiede in den Reibungsbeiwerten der Besatzströmung. Im Inneren der Gitterbesätze sind wesentlich mehr Erweiterungen als um den Besatz herum anzutreffen. Die Wirbelwalzen umspülen dabei intensiv die Flächen der Erweiterung. Dieser für den konvektiven Wärmeübergang wichtige Effekt an den nicht direkt von der Kanalströmung berührten Besatzflächen muss bei der optimalen Besatzgestaltung berücksichtigt werden.

Außerhalb des Bereiches  $0,5 < G_2 < 2,5$  gibt es kaum eine Wechselwirkung zwischen der aus dem Kanal austretenden Strömung und der Erweiterung. Dies ist an den eher für die Rohrströmung typischen geringen Reibungsbeiwerten bei  $G_2 > 2,5$  erkennbar. Unterhalb von  $G_2=0,5$  ist sogar ein geringer Druckgewinn – erkennbar an den negativen Reibungsbeiwerten – zu verzeichnen. Der festgestellte Druckgewinn deckt sich mit den Ergebnissen an kurzen plötzlichen Erweiterungen aus [17, Band 1, S.131].



»12 Coefficient of friction of the extension  $\lambda_{\epsilon}$  with  $Re=10000$  and  $G_1=10$  as a function of the non-dimensional length of the extension  $G_2$  and the area ratio  $G_3$  (registered measurement values with  $Re > 1000$ )

»12 Reibungsbeiwert der Erweiterung  $\lambda_{\epsilon}$  bei  $Re=10000$  und  $G_1=10$  in Abhängigkeit von der dimensionslosen Länge der Erweiterung  $G_2$  und dem Flächenverhältnis  $G_3$  (eingetragene Messwerte bei  $Re > 1000$ )

- » Register of indices
- » Verzeichnis der Indizes

Symbol	Meaning/Bedeutung
DK	Ceiling channel/Deckenkanal
E	Extension/Erweiterung
GL	Equivalent/Gleichwertig
K	Channel/Kanal
MK	Middle channel/Mittelkanal
SK	Side channel/Seitenkanal
ST	Stack/Stapel
STK	Stacking channel/Stapelkanal
lam	Laminar
tur	Turbulent

#### 4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel wird zunächst ein Berechnungsweg aufgezeigt, bei dessen Nutzung mit einfachen Mitteln die Strömungsverteilung um die oft aus mehreren einhundert Kanälen bestehenden Ziegelbesätze ermittelt werden kann. Grundlage für diese Berechnung ist die Kenntnis der sich bei verschiedenen Strömungsbedingungen einstellenden Druckverluste der Kanäle. Für die kompliziert geformten Ziegelbesätze werden zur Druckverlustberechnung zwei charakteristische Strömungsgebiete separiert: der Kanalabschnitt und die plötzliche Erweiterung. Mit der separaten Ermittlung des Druckverlustes für diese Strömungsgebiete eröffnet sich die Möglichkeit, alle Besätze mit annähernd rechteckigen Körperbegrenzungen zu berechnen. Damit wurden erstmals auch Besätze aus gelochten Hintermauersowie Dachziegeln einer Berechnung zugänglich gemacht.

Die bisher kaum untersuchten Strömungsbedingungen in den plötzlichen Erweiterungen von Ziegelbesätzen brachten einige interessante Fakten zu Tage. So kann der Druckverlust in der Erweiterung bei bestimmten geometrischen Verhältnissen im Besatz über eine Größenordnung höher als in den Kanälen sein. Hervorgerufen wird dieser große Druckverlust durch die von der Kanalströmung verursachten Wirbelwalzen in der Erweiterung. Die Wirbelwalzen umspülen dabei intensiv die von der Kanalströmung nicht direkt berührten Flächen der Erweiterung.



- » Register of formula terms and symbols  
 » Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

Symbol	Unit/ Einheit	Meaning/Bedeutung
A	m <sup>2</sup>	Area/Fläche
C	-	Constant/Konstante
G	-	Geometrical similarity index Geometrische Ähnlichkeits-Kennzahl
U	m	Circumference/Umfang
b	m	Width/Breite
d	m	Diameter/Durchmesser
h	m	Height/Höhe
l	m	Length/Länge
m	-	Exponent
n	-	Exponent
p	Pa	Pressure/Druck
w	m/s	Speed/Geschwindigkeit
Δ	-	Difference/Differenz
λ	-	Coefficient of friction/Reibungsbeiwert
ν	m <sup>2</sup> /s	Kinematic viscosity/Kinematische Viskosität
ρ	kg/m <sup>3</sup>	Density/Dichte
ξ	-	Drag coefficient/Widerstandsbeiwert
Re	-	Reynolds number/Reynolds-Zahl

friction with  $G_2 > 2.5$  which are more typical for pipe flow. Below  $G_2 = 0.5$  even a small pressure gain – recognizable by the negative coefficients of friction – is registered. The pressure gain determined coincides with the results on short sudden extensions from [17, Vol. 1, P.131].

#### 4 Summary

In this article a method of calculation is demonstrated first, with the use of which the flow distribution around brick settings often consisting of several hundred channels can be determined with simple means. The basis for this calculation is the knowledge of the pressure losses of the channels ensuing with different flow conditions. For the complicatedly shaped brick settings, two characteristic flow areas are separated for calculation of the pressure loss: the channel section and the sudden extension. With the separate determination of the pressure loss for these flow areas, there is the possibility of calculating all settings with approximately rectangular body limits. Thus for the first time, even settings made up of perforated backing bricks and clay roofing tiles are made accessible for a calculation.

The flow conditions in the sudden extensions of brick settings, which have hardly been investigated so far, brought some interesting facts to light. With certain geometrical conditions in the setting, the pressure loss in the extension can be higher by an order of magnitude than in the channels. This great pressure loss is brought about by the induced drags in the extension caused by the channel flow. Here the induced drags intensively flush the areas of the extension not directly touched by the channel flow.

**<sup>1</sup>Robert Thomas Metall- und Elektrowerke  
GmbH & Co. KG**

Hellerstraße 6 | 57290 Neunkirchen | Germany  
 T +49 (0) 27 35 78 87 51 | F +49 (0) 27 35 78 85 59  
 info@rotho.de | www.rotho.de

#### Literature/Literatur

- [1] Vogt, S.: Optimierung von Ziegelbesätzen – Experimentelle Untersuchungen und verallgemeinerte Modellansätze zum Druckverlust, zur Strömungsverteilung und zum konvektiven Wärmeübergang, Dissertation Bauhaus-Universität Weimar 2007, (Papierflieger Verlag Clausthal-Zellerfeld, ISBN 978-3-89720-939-8)
- [2] Hoyer, L.: Beitrag zur wärmetechnischen Dimensionierung von Großraum-Tunnelöfen mit Ziegelbesatz, Dissertation TH Magdeburg 1976
- [3] Vogt, S.: Modellierung der Strömungsverteilung und erzwungenen Konvektion am kompakten Scheibenbesatz im Großraum-Tunnelofen, Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar (ehemals HAB Weimar) 1988
- [4] Nochratjan, K.-A.: Aerodinamitscheskije zoprotivlenija w koltzewych i tunnelnych petschach (Aerodynamische Widerstände in Ring- und Tunnelöfen), Moskau 1957, Gos. Izd. Lit. Po stroitel'nym materialam, Kapitel 6, S. 271–285
- [5] Bernstein, R.-G.; Iwanow, C.-M.: Aerodinamitscheskoe zoprotivlenie zadki w tunnelnych petschach (Aerodynamischer Widerstand der Besätze in Tunnelöfen), Ogneupory 27(1959) H. 5, S. 201–209
- [6] Jeschar, R.; Schröder, U.; Bredehöft, R.: Einfluß des Randspaltes auf die Strömungsverteilung im Tunnelofen, Ber. der DKG 49(1972) H. 8, S. 253–257 und H. 10, S. 339–341
- [7] Ginsburg, D.-B.: Petschi i suschila silikatnoj promyshlenosti (Öfen und Trockner der Silikatindustrie und Baukeramik), Moskau 1956, Gos. Izd. Lit. Po stroitel'nym materialam
- [8] Bernstein, R.-G.; Iwanow, C.-M.: Trudy VIO (Arbeiten des VIO), 1960, Nr. 30
- [9] Jeschar, R.: Die Bedeutung der Strömungstechnik beim Ziegelbrand, Die Ziegelindustrie 12 (1960) H. 9/10, S. 331–340
- [10] Jeschar, R.; Pels Leusden, C.-O.: Der konvektive Wärmeübergang an Steingittern im Lichte der Ähnlichkeitslehre, Archiv für das Eisenhüttenwesen 32 (1961) H. 6, S. 361–368
- [11] Pels Leusden, C.-O.: Untersuchungen zur Vergleichmäßigung der Strömung in Ziegelöfen, Die Ziegelindustrie 14 (1962) H. 4, S. 110–113 u. H. 5, S. 143–145
- [12] Langhans, W.-U.: Wärmeübergang und Druckverlust in Regeneratoren mit rostgitterartiger Speichermasse, Archiv für das Eisenhüttenwesen 33 (1962) H. 6, S. 347 – 353 und H. 7, S. 441–451
- [13] Schröder, U.: Modellversuche über Druckverlust und Wärmeübergang im gitterförmigen Tunnelofenbesatz, Dissertation TU Clausthal 1971
- [14] Schröder, U.: Modellversuche über Druckverlust und Wärmeübergang in gitterförmigen Tunnelofenbesatz, Ber. der DKG 49 (1972) S. 13–17 und S. 81–86
- [15] Abbakumow, W. G.: Konvektivnyj progress nepodwischnowo sloja plastin (Konvektive Erhitzung der unbeweglichen Schicht-Platte), Inschenerno-phisitscheskij journal (1962) H.12, S. 77–79
- [16] Nover, K.: Untersuchung zum Wärmeübergang verschiedener Brenverfahren in kontinuierlich betriebenen Durchlauföfen der Ziegelindustrie, Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar (ehemals HAB Weimar) 1990
- [17] Eck, B.: Technische Strömungslehre, Band 1 und 2, Springer Verlag Berlin 1988, 9. Auflage, ISBN 3-540-18746-4
- [18] Vogt, S.; Nover, K.: Zur Anwendung von Computermodellen für die Auslegung und Optimierung von grobkeramischen Tunnelöfen, Zi-Jahrbuch 1992, S. 74–87, Bauverlag Wiesbaden
- [19] Scholz, N.: Berechnung des laminaren und turbulenten Druckabfalles im Rohreinlauf, Chemie-Ing.-Techn. 32 (1960) H. 6, S. 404–409

**<sup>2</sup>TU Dresden**

Fakultät Maschinenwesen, Institut für Energietechnik  
 Lehrstuhl Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung  
 George-Bähr-Straße 3b | 01062 Dresden | Germany  
 T +49 (0)3 51 46 33 44 93