

When an industrial process/a reactor is to be pneumatically fed with a solid material via several, simultaneously supplied feed points, one of the requirements is uniform distribution of the solids mass flows. To enable a precise calculation of the individual flows and total flows, numerous parameters are required.

TEXT Prof. Dipl.-Ing Peter Hilgraf, Dipl.-Ing. Marieke Moka, Claudius Peters Projects GmbH, Buxtehude/Germany

Bei der pneumatischen Beschickung eines industriellen Prozesses/eines Reaktors mit einem Feststoff über mehrere, gleichzeitig zu versorgende, Aufgabestellen wird i.A. eine Gleichverteilung der Feststoffmassenströme verlangt. Für eine genaue Berechnung der Einzel- und Gesamtströme ist eine Vielzahl von Parametern erforderlich.

Distribution station for a reactor feed

Verteilerstation für eine Reaktorbeschickung

CLAUDIUS PETERS

Simplified method of feed pipe balancing at pneumatic reactor feed

Vereinfachte Methode des Leitungsabgleichs bei der pneumatischen Reaktorbeschickung

1 Introduction

Various industrial processes are supplied with solid material via parallel pneumatic conveying pipes from several injection points. Normally, it is required that the individual solid material flows are distributed uniformly to the different injection points. The accuracy of this uniform distribution has to be guaranteed. One example for such a process is the feeding of coal dust into blast furnaces for hot iron production. Depending on the capacity of the furnace, the coal dust is pneumatically fed through up to 40 individual lances arranged around the periphery of the furnace/opening of the tuyère. It has to be pneumatically injected as a continuous flow against the furnace pressure (which can be several bar).

1 Einleitung

Diverse industrielle Prozesse werden parallel über mehrere Aufgabepunkte mittels pneumatischer Förderung mit Feststoff versorgt. Üblicherweise wird eine Gleichverteilung der einzelnen Feststoffströme auf die verschiedenen Injektionsstellen gefordert. Die Güte dieser Gleichverteilung muss garantiert werden. Beispiel eines derartigen Prozesses ist die Beschickung von Hochöfen zur Roheisenerzeugung mit Kohlenstaub. Dieser wird, je nach Ofendurchsatz, über bis zu ca. 40 entlang des Ofenumfangs/der Windform angeordnete Einzellanzen pneumatisch gegen den Ofendruck (i.a. mehrere Bar) kontinuierlich eingeblasen.

Zwei mögliche Systeme zur Realisierung einer solchen Aufgabenstellung sind schematisch im **Bild 1** dargestellt:

Two possible systems for fulfilling this requirement are schematically depicted in Fig. 1: Section 1a shows a distributor, which splits the pneumatically delivered gas/solids mixture $\dot{M}_{\text{tot}} = (\dot{M}_F + \dot{M}_S)$ to N outgoing parallel pipes, while section 1b shows the distribution to the N pipes in a fluidized/suitably aerated pressure vessel. Although it is in principle also possible to feed the conveying gas/solids mixture via individual conveying systems, this quickly leads to substantial capital cost when a larger number of pipes is involved. In the following, it is assumed that the individual parallel pipes all have an identical inside diameter D_R .

As can be seen from Fig. 1, the same pressure difference $\Delta p_{D,C} = (p_D - p_C)$ exists across all the parallel pipes, with: p_D being the pressure in the distributor/pressure vessel and p_C being the pressure in the reactor/receiver. In view of the fact that there are differences in both the lengths and the spatial routing of the pipes to their feeding points at the reactor, so that their specific flow resistances also differ, there are different mass flows $\dot{M}_{\text{tot},j}$ of the conveyed gas-solids mixture in the individual pipes. The smallest mass flow passes through the pipe with the largest specific resistance, and vice versa. For this reason, uniform distribution has to be imposed by installing additional conveying pipe elements – straight pipe sections, bends etc. – in the various pipes, i.e. by equalizing the individual specific resistances. Fig. 2 shows the practical implementation of such an equalization station for feeding a blast furnace.

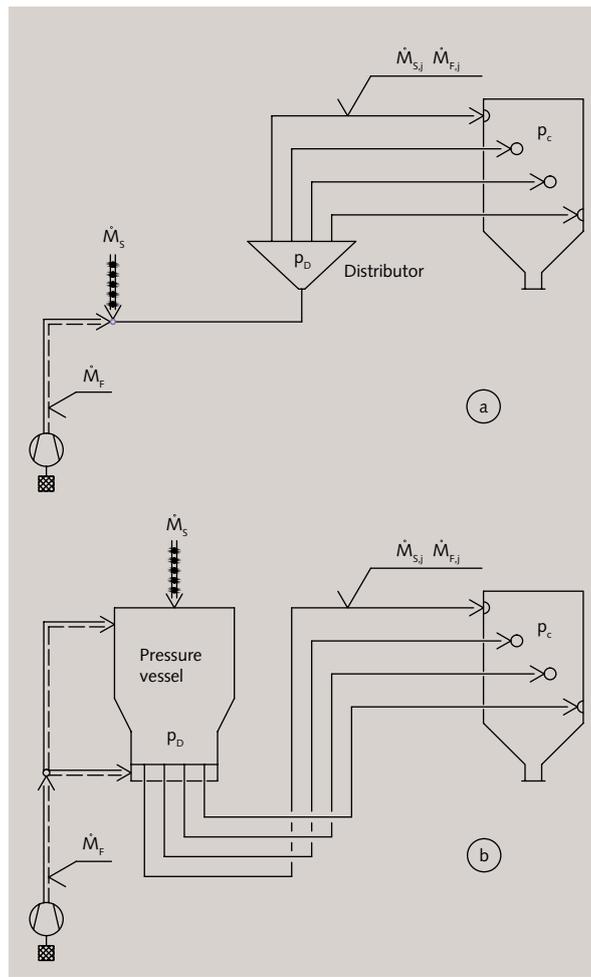
2 Uniform distribution through feed pipe balancing

The system under consideration here has to assure uniform distribution of a solids mass flow \dot{M}_S to N parallel individual pipes. The thereby occurring conveying gas distribution is unclear. However, it must be known for the purpose of conveying system calculation and is also of significance for cases in which the gas is simultaneously used as a reaction partner, e.g. in systems supplying coal dust burners with air. For the further considerations it is assumed that when the solid material is uniformly distributed the gas is also uniformly distributed.

The equations: $\mu = (\dot{M}_S/\dot{M}_F) = \mu_j = (\dot{M}_{S,j}/\dot{M}_{F,j}) = \text{const.}$ and $\dot{M}_{\text{tot},j} = (\dot{M}_{\text{tot}}/N) = \text{const.}$ thus apply for the $j = 1 \dots N$ parallel pipes. This approach appears plausible because the gas has a higher velocity than the solid material and thus flows relative to a column of material, whose high resistance forces a uniform distribution to all the pipes.

2.1 Precise calculation

For designing a distribution system for feeding a reactor, CPP uses the program “Regsi”. To ensure correct calculation of the two-phase flow through the parallel individual pipes, this program requires the sequential entry of all the piping elements of all conveying routes from the distributor to the reactor, i.e. the lengths, positions and spatial orientation of straight pipe sections, the bends including their deflection angles and radii, the valves including their opening cross-sections etc. all have to be specified. The program then uses the known pressures

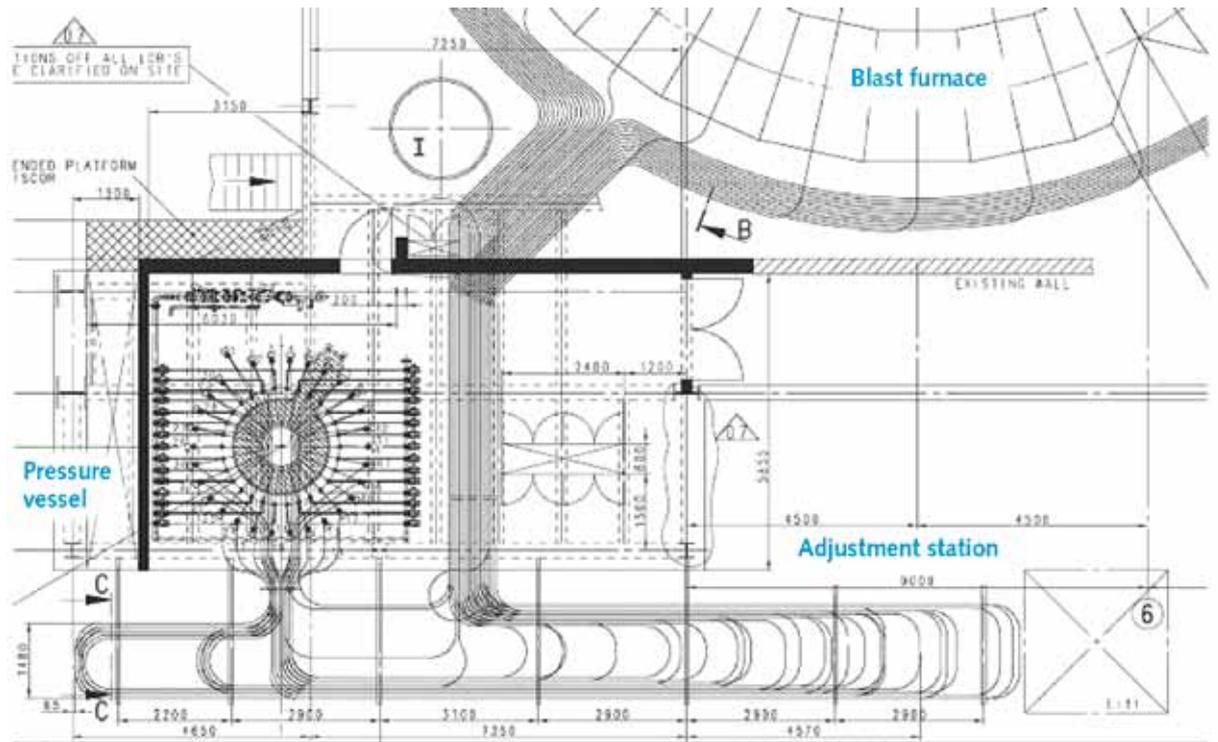


Der Bildteil 1a zeigt einen Verteiler, der ein pneumatisch zugeführtes Gas/Feststoff-Gemisch $\dot{M}_{\text{tot}} = (\dot{M}_F + \dot{M}_S)$ auf N abgehende parallele Leitungen aufteilt, während im Bildteil 1b die Aufteilung auf die N Leitungen in einem fluidisierten/geeignet belüfteten Druckgefäß erfolgt. Die im Prinzip auch mögliche Einzelversorgung der Leitungen mit Fördergas und Feststoff führt mit zunehmender Leitungsanzahl schnell zu erheblichen Investitionskosten. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Paralleleitungen einen identischen Innendurchmesser D_R aufweisen.

Bild 1 ist zu entnehmen, dass an allen parallelen Einzelleitungen die gleiche Druckdifferenz $\Delta p_{D,C} = (p_D - p_C)$, mit: $p_D =$ Druck im Verteiler/Sender, $p_C =$ Druck im Reaktor/Empfänger, anliegt. Da i.a. sowohl die Längen als auch die räumlichen Verläufe dieser Leitungen zu ihren Aufgabepunkten am Reaktor und somit auch ihre spezifischen Strömungswiderstände verschieden sind, stellen sich in den Einzelleitungen unterschiedliche Massenströme $\dot{M}_{\text{tot},j}$ des geförderten Gas/Feststoff-Gemischs ein. Durch die Leitung mit dem größten spezifischen Widerstand strömt der kleinste Massenstrom und umgekehrt. Eine Gleichverteilung muss durch die Installation zusätzlicher Förderrohrelemente – gerade Rohrstücke, Bögen, usw. – in den verschiedenen Leitungen erzwungen werden, d.h. durch die Angleichung der einzelnen spezifischen Widerstände. Bild 2 zeigt die praktische Ausführung einer solchen Abgleichstation zur Beschickung eines Hochofens.

2 Example of a calibration station

Beispiel einer Abgleichstation



(p_D , p_C) and the relevant characteristic values of the gas and bulk material to calculate the solids and gas mass flows (\dot{M}_{Sj} , \dot{M}_{Fj}) occurring in the individual pipes. On the basis of these data the required feed pipe balancing can be carried out by entering diverse additional piping elements. In order to take account of the real boundary and execution conditions of the respective system, the specification of type and position of these elements is done manually. The subsequent computation results in the new distribution, which can then be continuously improved step by step by means of further entries.

The computing program contains all the equations that are required for calculating the individual elements and their interactions. These equations have been checked, adapted and improved in the course of comprehensive trials in the CPP test plant facility. The measured and the computed solid material distribution precisions differ by less than $RF = \pm 2\%$ by mass. A computational balancing to $RF < \pm 0.5\%$ by mass does not make sense because of the occurring manufacturing inaccuracies, pipe tolerances etc.. Details are provided in [1-4].

From the foregoing, it is understandable that usage of this program is time-consuming. The following sections will therefore propose a simplified method of feed pipe balancing.

2.2 Calculation with equivalent lengths

The pressure drop Δp_h of a gas/solid material flow through a straight, horizontal pipe of length $L_{R,h}$ can be described through the approach:

$$\Delta p_h = (\lambda_F + \mu \cdot \lambda_s) \cdot \frac{L_{R,h}}{D_R} \cdot \frac{\bar{\rho}_{Fh}}{2} \cdot \bar{u}_F^2 \quad (1)$$

with: λ_F = drag coefficient of the gas,
 λ_s = drag coefficient of the solid material,

2 Gleichverteilung durch Leitungsabgleich

Bei dem zu untersuchenden System soll ein Feststoffmassenstrom \dot{M}_s gleichmäßig auf N parallele Einzelleitungen verteilt werden. Die sich dabei einstellende Fördergasverteilung ist nicht eindeutig. Sie muss aber für die fördertechnische Berechnung bekannt sein und ist auch in den Fällen von Bedeutung, in denen das Gas gleichzeitig als Reaktionspartner agiert, z.B. bei der Beschickung von Kohlenstaubbrennern mit Luft. Für die weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass bei einer Gleichverteilung des Feststoffs sich auch das Fördergas gleich verteilt.

Somit gilt: $\mu = (\dot{M}_s/\dot{M}_F) = \mu_j = (\dot{M}_{Sj}/\dot{M}_{Fj}) = \text{const.}$ und $\dot{M}_{\text{tot},j} = (\dot{M}_{\text{tot}}/N) = \text{const.}$ für die $j = 1 \dots N$ Parallelleitungen. Dieser Ansatz erscheint plausibel, weil das Gas schneller als der Feststoff und damit quasi durch eine Schüttung strömt, deren hoher Widerstand eine Gleichverteilung auf alle Rohre erzwingt.

2.1 Genaue Berechnung

Die Auslegung eines Verteilsystems zur Reaktorbeschickung erfolgt bei CPP mittels des Programms „Regsi“. Für die fördertechnisch korrekte Berechnung der Zweiphasenströmung durch die parallelen Einzelleitungen benötigt dieses die sequentielle Eingabe aller Rohrleitungselemente der Förderstrecken jeweils vom Verteiler bis zum Reaktor, d.h. es müssen Längen, Positionen und räumliche Orientierung gerader Rohrstücke, von Umlenkungen inklusive deren Umlenkwinkel und -radien, von Armaturen inklusive deren Öffnungsquerschnitte usw. vorgegeben werden. Das Programm berechnet dann für die bekannten Drücke (p_D , p_C) mit den relevanten Gas- und Schüttgutkenngrößen die sich in den Einzelleitungen einstellenden Feststoff- und Gasmassenströme (\dot{M}_{Sj} , \dot{M}_{Fj}). Ein erforderlicher Leitungsabgleich kann, basierend auf diesen Daten, durch Eingabe diverser zusätzlicher Rohr-

$\mu = (\dot{M}_s/\dot{M}_F)$, loading, mass flow ratio of solid/gas,
 $\bar{\rho}_{F,h}$ = mean gas density,
 \bar{u}_F = mean gas velocity.

Under consideration of the continuity equation, substitution of the loading by the mass flows of gas and solid material, and definition of the total horizontal two-phase flow friction factor,

$$\lambda_{tot} = \frac{\lambda_F}{\mu} + \lambda_s \rightarrow \lambda_{tot} \cdot \mu = \lambda_F + \mu \cdot \lambda_s \quad (2)$$

it is derived from equation (1):

$$\Delta p_h = \lambda_{tot} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{R,h}}{D_R} \cdot \frac{\dot{M}_s \cdot \dot{M}_F}{A_R^2 \cdot \bar{\rho}_{F,h}} \quad (3)$$

with: $A_R = \left(\frac{\pi}{4} \cdot D_R^2\right)$, pipe cross-section area.

The total pressure drop Δp_{tot} of a conveying route is equal to the sum of the pressure drops of the individual piping elements Δp_i , i.e. it is composed of a series of resistances. They are described by means of different calculation approaches which contain not only the type of the element but also its position along the length of the conveying pipe. In the following, the resultant complex conveying pipe calculation will firstly be simplified, and the result will then be employed for the feed pipe balancing. For this purpose, the pressure drop of the respective piping element is converted to that of a straight, horizontal pipe section of equivalent length that produces the same pressure drop. This procedure is described on the basis of a single pipe bend with any desired deflection angle α_b . Its pressure drop amounts to:

$$\Delta p_b = K_b \cdot C_b \cdot \rho_{F,b} \cdot u_{F,b}^2 = \frac{K_b \cdot C_b}{A_R^2} \cdot \frac{\dot{M}_s \cdot \dot{M}_F}{\rho_{F,b}} \quad (4)$$

The factor K_b describes the relationship with α_b and with the sliding friction coefficient β_b between the bulk material and the wall of the bend. It can be evaluated with [5]:

$$K_b = 1 - \exp\left(-\beta_b \cdot \pi \cdot \frac{\alpha_b}{180^\circ}\right) \quad (5)$$

For 90° steel pipe bends, equation (5) produces: $K_b \cong 0,50$. Comparison with an equivalent horizontal pipe section then produces:

$$\Delta p_b = \lambda_{tot} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{äq},b}}{D_R} \cdot \frac{\dot{M}_s \cdot \dot{M}_F}{A_R^2 \cdot \bar{\rho}_{F,h}} = \frac{K_b \cdot C_b}{A_R^2} \cdot \frac{\dot{M}_s \cdot \dot{M}_F}{\rho_{F,b}} \quad (6)$$

With $C_b = \bar{C}$ and $\bar{\rho}_{F,h} = \rho_{F,b} = \bar{\rho}_F$, the equivalent bend length is found to be

$$L_{\text{äq},b} = K_b \cdot \frac{2 \cdot \bar{C} \cdot D_R}{\lambda_{tot}} \quad (7)$$

with: $\bar{\rho}_F$ = gas density at mean pressure
 $\bar{p} = 1/2 \cdot (p_d + p_c)$ in the conveying pipe,
 $\bar{C}, C_b = (u_s/u_F)$, velocity ratios of solid/gas.

leitungselemente vorgenommen werden. Die Vorgabe der Art und Position dieser Elemente erfolgt, um die realen Rand- und Ausführungsbedingungen der jeweiligen Anlage zu berücksichtigen, manuell. Ein sich anschließender Rechenlauf zeigt die neue Verteilung, die dann in weiteren Eingabeschritten kontinuierlich verbessert werden kann.

Im Rechenprogramm sind alle zur Berechnung der Einzelemente und deren Interaktionen notwendigen Gleichungen hinterlegt und durch umfangreiche Versuche im CPP-Technikum überprüft, angepasst und verbessert worden. Gemessene und gerechnete Feststoff-Verteilgenauigkeiten unterscheiden sich um weniger als RF = ± 2 Massen-%. Ein rechnerischer Abgleich auf RF < ± 0,5 Massen-% ist aufgrund von Herstellungsgenauigkeiten, Rohrtoleranzen usw. nicht sinnvoll. Einzelheiten sind [1-4] zu entnehmen.

Die Benutzung des Programms ist erkennbar zeitintensiv. Nachfolgend wird deshalb eine vereinfachte Methode des Leitungsabgleichs vorgeschlagen.

2.2 Berechnung mit äquivalenten Längen

Der Druckverlust Δp_h einer Gas/Feststoffströmung durch ein gerades horizontales Rohr der Länge $L_{R,h}$ kann mit dem Ansatz

$$\Delta p_h = (\lambda_F + \mu \cdot \lambda_s) \cdot \frac{L_{R,h}}{D_R} \cdot \frac{\bar{\rho}_{F,h}}{2} \cdot \bar{u}_F^2 \quad (1)$$

mit: λ_F = Widerstandsbeiwert des Gases,
 λ_s = Widerstandsbeiwert des Feststoffs,
 $\mu = (\dot{M}_s/\dot{M}_F)$, Beladung, Massenstromverhältnis Feststoff/Gas,
 $\bar{\rho}_{F,h}$ = mittlere Gasdichte,
 \bar{u}_F = mittlere Gasgeschwindigkeit,

beschrieben werden. Unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung, Ersatz der Beladung durch die Massenströme von Gas und Feststoff und Definition eines Gesamtwiderstandsbeiwerts der horizontalen Zweiphasenströmung

$$\lambda_{tot} = \frac{\lambda_F}{\mu} + \lambda_s \rightarrow \lambda_{tot} \cdot \mu = \lambda_F + \mu \cdot \lambda_s \quad (2)$$

folgt aus Gleichung (1):

$$\Delta p_h = \lambda_{tot} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{R,h}}{D_R} \cdot \frac{\dot{M}_s \cdot \dot{M}_F}{A_R^2 \cdot \bar{\rho}_{F,h}} \quad (3)$$

mit: $A_R = \left(\frac{\pi}{4} \cdot D_R^2\right)$, Rohrquerschnittsfläche.

Der Gesamtdruckverlust Δp_{tot} einer Förderstrecke ist gleich der Summe der Druckverluste der einzelnen Rohrleitungselemente Δp_i , d.h. es handelt sich um eine Reihenschaltung von Widerständen. Diese werden durch unterschiedliche Berechnungsansätze beschrieben, in die nicht nur die Art des Elements sondern auch seine Position entlang der Leitung eingeht. Die daraus resultierende aufwendige Leitungsberechnung soll im Folgenden zunächst vereinfacht und das Ergebnis dann für den Leitungsabgleich genutzt werden. Hierzu wird der

Pressure loss due to Druckverlust durch	Basic equations Grundgleichungen	Equations lengths Äquivalente Längen
Straight horizontal pipe gerades horizontales Rohr	$\Delta p_h = \lambda_{\text{tot}} \cdot \mu \cdot \frac{L_{R,h}}{D_R} \cdot \frac{\bar{\rho}_{F,h}}{2} \cdot \bar{u}_{F,h}^2$	$L_{\text{äq},h} = L_{R,h}$ (9)
Initial acceleration Anfangsbeschleunigung	$\Delta p_a = C_a \cdot \mu \cdot \rho_{F,a} \cdot u_{F,a}^2$	$L_{\text{äq},a} = \frac{2 \cdot \bar{C} \cdot D_R}{\lambda_{\text{tot}}}$ (10)
Deflection Umlenkung	$\Delta p_b = K_b \cdot C_b \cdot \rho_{F,b} \cdot u_{F,b}^2$ $K_b = K_b(\alpha_b, \beta_b) \rightarrow \text{Equ. (5)}$	$L_{\text{äq},b} = K_b \cdot \frac{2 \cdot \bar{C} \cdot D_R}{\lambda_{\text{tot}}} = K_b \cdot L_{\text{äq},a}$ (11)
Straight vertical pipe, friction gerades vertikales Rohr, Reibung	$\Delta p_v = \frac{\lambda_{\text{tot}}}{2} \cdot \mu \cdot \frac{L_{R,v}}{D_R} \cdot \frac{\bar{\rho}_{F,v}}{2} \cdot \bar{u}_{F,v}^2$	$L_{\text{äq},v} = \frac{1}{2} \cdot L_{R,v}$ (12)
Straight vertical pipe, lift gerades vertikales Rohr, Hub	$\Delta p_l = \left(1 + \frac{\mu}{C_v}\right) \cdot \bar{\rho}_{F,v} \cdot g \cdot L_{R,v}$	$L_{\text{äq},l} = 2 \cdot \frac{g}{C} \cdot \frac{D_R \cdot L_{R,v}}{\lambda_{\text{tot}}} \cdot \left(\frac{\bar{\rho}_F \cdot A_R}{\dot{M}_F}\right)^2$ $= g \cdot L_{R,v} \cdot \left(\frac{\bar{\rho}_F \cdot A_R}{\bar{C} \cdot \dot{M}_F}\right)^2 \cdot L_{\text{äq},a}$ (13)
Throttle, valve Drosselarmatur, Ventil	$\Delta p_o = \zeta(A_o) \cdot \frac{\rho_{\text{tot},o}}{2} \cdot u_{\text{tot},o}^2$ $\rho_{\text{tot},o}, u_{\text{tot},o}$ – Mixture density, mixture velocity/ Gemischdichte, -geschwindigkeit A_o – Opening cross-section/Öffnungsquerschnitt $\zeta(A_o)$ – Drag coefficient/Widerstandsbeiwert	$L_{\text{äq},o} = \frac{\zeta(A_o)}{\lambda_{\text{tot}}} \cdot \left(\frac{A_R}{A_o}\right)^2 \cdot D_R \cdot \left(1 + \frac{\dot{M}_s}{\dot{M}_f}\right) \cdot \left(\frac{\dot{M}_f + \bar{\rho}_F}{\dot{M}_s + \rho_s}\right)$ (14)

Tab. 1 Calculation of the equivalent lengths
Berechnung der äquivalenten Längen

The equivalent total length of x_b identical bends, e.g. of 90° bends, then amounts to $(x_b \cdot L_{\text{äq},b})$.

Table 1 presents the associated pressure drop valuations [5] and the derived equivalent lengths $L_{\text{äq},i}$, by way of example for different conveying pipe elements and piping situations. The $L_{\text{äq},i}$ values are determined with a solids/gas velocity ratio averaged over the respective conveying route \bar{C} and a mean gas density $\bar{\rho}_F$ instead of the local values ($C_i, \rho_{F,i}$). This simplifies the calculation and does not cause any significant reduction in precision when balancing the feed pipes: At given pressures (p_D, p_C) and the sought uniform distribution, an identical mean gas density and an (approximately) identical velocity profile occurs in all parallel pipes.

The pressure drop equation of an individual pipe is simplified by means of the described method to:

$$\Delta p_{D,C} = \lambda_{\text{tot}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum L_{\text{äq},i}}{D_R \cdot A_R^2} \cdot \frac{\dot{M}_s \cdot \dot{M}_f}{\bar{\rho}_F} \quad (8)$$

For feed pipe balancing, the equivalent total lengths $\sum L_{\text{äq},i} = L_{\text{äq,tot}}$ of the $j = 1 \dots N$ parallel pipes are first determined. The pipe with the greatest equivalent length, e.g. $L_{\text{äq,tot},N}$, carries the smallest mass flow $\dot{M}_{\text{tot},N}$ or $\dot{M}_{S,N}$ and must therefore be dimensioned for the required throughput. The mass flows of the equivalent shorter pipes are higher, $\dot{M}_{\text{tot},j \neq N} > \dot{M}_{\text{tot},N}$, and have to be reduced to the required value by adjusting the equivalent lengths. For this purpose, the differences $\Delta L_{\text{äq},j} = (L_{\text{äq,tot},N} - L_{\text{äq,tot},j \neq N})$ are generated and then converted with the aid of the equations in Table 1 into real pipe elements with corresponding $\Delta L_{\text{äq},j}$ values. The installation position of these pipe elements along the respective pipe can be flexibly determined.

Druckverlust des jeweiligen Rohrelements in ein den gleichen Druckverlust erzeugendes gerades horizontales Rohrstück äquivalenter Länge umgerechnet. Die Vorgehensweise wird an Hand eines einzelnen Leitungskrümmers mit beliebigem Umlenkwinkel α_b dargestellt. Dessen Druckverlust beträgt:

$$\Delta p_b = K_b \cdot C_b \cdot \rho_{F,b} \cdot u_{F,b}^2 = \frac{K_b \cdot C_b}{A_R^2} \cdot \frac{\dot{M}_s \cdot \dot{M}_f}{\rho_{F,b}} \quad (4)$$

Der Faktor K_b beschreibt die Abhängigkeit von α_b und vom Gleitreibungsbeiwert β_b zwischen Schüttgut und Krümmenwand. Er kann mit

$$K_b = 1 - \exp\left(-\beta_b \cdot \pi \cdot \frac{\alpha_b}{180^\circ}\right) \quad (5)$$

abgeschätzt werden [5]. Für 90°-Stahlrohrkrümmer folgt aus Gleichung (5): $K_b \approx 0,50$. Der Vergleich mit einer äquivalenten Horizontalstrecke ergibt dann:

$$\Delta p_b = \lambda_{\text{tot}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{äq},b}}{D_R \cdot A_R^2} \cdot \frac{\dot{M}_s \cdot \dot{M}_f}{\bar{\rho}_{F,h}} = \frac{K_b \cdot C_b}{A_R^2} \cdot \frac{\dot{M}_s \cdot \dot{M}_f}{\rho_{F,b}} \quad (6)$$

Mit $C_b = \bar{C}$ und $\bar{\rho}_{F,h} = \rho_{F,b} = \bar{\rho}_F$ berechnet sich hieraus die äquivalente Krümmenlänge zu

$$L_{\text{äq},b} = K_b \cdot \frac{2 \cdot \bar{C} \cdot D_R}{\lambda_{\text{tot}}} \quad (7)$$

mit: $\bar{\rho}_F$ = Gasdichte beim mittleren Druck

$\bar{p} = 1/2 \cdot (p_D + p_C)$ im Förderrohr,

$\bar{C}, C_b = (u_s/u_f)$, Geschwindigkeitsverhältnisse Feststoff/Gas.

Die äquivalente Gesamtlänge von x_b gleichartigen Umlenkungen, z.B. von 90°-Bögen, beträgt dann $(x_b \cdot L_{\text{äq},b})$.

2.3 Application example

Fig. 3a shows a pressure vessel system with $N = 4$ outgoing conveying pipes for continuously feeding a reactor with a total of $\dot{M}_S = 8,0$ t/h of coal dust via specified feeding points. Uniform distribution of the coal dust mass flows is required, i.e. $\dot{M}_{Sj} = 2,0$ t/h. Nitrogen is used as the conveying gas; $\dot{M}_F = 126,0$ kg/h. Pressure in the vessel: $p_D = 2,25$ bar(abs); pressure in the reactor: $p_C = 1,0$ bar(abs); $\Delta p_{D,C} = 1,25$ bar. Steel piping, ($\varnothing 33,7 \times 2,6$) mm, $D_R = 28,5$ mm, $A_R = 0,63794 \cdot 10^{-3}$ m². Design temperature: 20°C. Other data: $\lambda_{tot} = 0,010$, $\bar{C} = 0,90$, $\bar{\rho}_F = 1,868$ kg/m³, $\beta_b = 0,44$.

Due to the structural situation, the piping route depicted in Fig. 3a is initially planned. 90° bends with a radius of $R_b = 0,5$ m are to be used. Table 2 contains the equivalent lengths calculated for this layout and also the solids mass flows \dot{M}_{Sj} occurring at a pressure difference of $\Delta p_{D,C} = 1,25$ bar. The \dot{M}_{Sj} values for this case and in the following text were calculated with the CPP design program for pneumatic conveying systems. This program employs an alternative calculation model [6], which is based on the real conveying pipe route, and is used for additional substantiation of the results.

The differences $\Delta L_{\text{eq},j}$ in the equivalent lengths result in unacceptably large deviations of the solids mass flows \dot{M}_{Sj} from the required value $\dot{M}_{S,4} = 2,0$ t/h. Feed pipe balancing is therefore necessary. In this case, the $\Delta L_{\text{eq},j \neq 4}$ values are converted into 90° bends ($L_{\text{eq},b} = 2,565$ m) and straight, horizontal pipe sections in accordance with possible alternative piping routes. Fig. 3b shows a design variant and Table 3 presents the associated operating data for a complete feed pipe balancing.

In order to achieve $\Delta L_{\text{eq},j} = 0$, the selected distances (a, b), compare Fig. 3b, must be $a \cong 5,218$ m and $b \cong 7,935$ m. However, in practice such precision cannot be achieved, so that residual lengths $\Delta L_{\text{eq},j} \neq 0$ will always remain. Table 4 shows the effects of different $\Delta L_{\text{eq},j}$ residual lengths on the distribution precision by example of pipe 1. The \dot{M}_{Sj} values were again determined with the CPP design program for pneumatic conveying systems.

The solids mass flows \dot{M}_{Sj} calculated with the equivalent length model – equation (8) – and with the CPP design program for pneumatic conveying systems differ slightly. The mass flows calculated with the CPP design program are more accurate, because the program takes account of the real positions of the different pipe elements along the conveying routes. However, the effects on the feed pipe balancing are negligible.

3 Load behaviour

Changes in loading (\dot{M}_S, \dot{M}_F) generally lead to change in the pressure difference $\Delta p_{D,C}$. However, the approaches to calculate the equivalent lengths $L_{\text{eq},i}$ in Table 1 indicate that once a uniform distribution is set, it is maintained independently of the current load condition if all the conveying pipe elements employed for the feed pipe balancing correspond to equations

In Tabelle 1 sind beispielhaft für verschiedene Förderrohrelemente/-situationen die zugehörigen Druckverlustansätze [5] und daraus berechnete äquivalente Längen $L_{\text{eq},i}$ zusammengestellt. Die $L_{\text{eq},i}$ -Werte werden mit einem über die jeweilige Förderstrecke gemittelten Feststoff/Gas-Geschwindigkeitsverhältnis \bar{C} und einer mittleren Gasdichte $\bar{\rho}_F$ anstelle der lokalen Werte ($C, \rho_{F,i}$) bestimmt. Dies vereinfacht die Berechnung und führt zu keiner signifikanten Reduzierung der Genauigkeit beim Rohrleitungsabgleich: Bei gegebenen Drücken (p_D, p_C) und der angestrebten Gleichverteilung stellt sich in allen Paralleleitungen eine identische mittlere Gasdichte und ein (näherungsweise) gleiches Geschwindigkeitsprofil ein.

Die Druckverlustgleichung einer Einzelleitung vereinfacht sich durch die beschriebene Methode zu:

$$\Delta p_{D,C} = \lambda_{tot} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum L_{\text{eq},i}}{D_R \cdot A_R^2} \cdot \frac{\dot{M}_S \cdot \dot{M}_F}{\bar{\rho}_F} \quad (8)$$

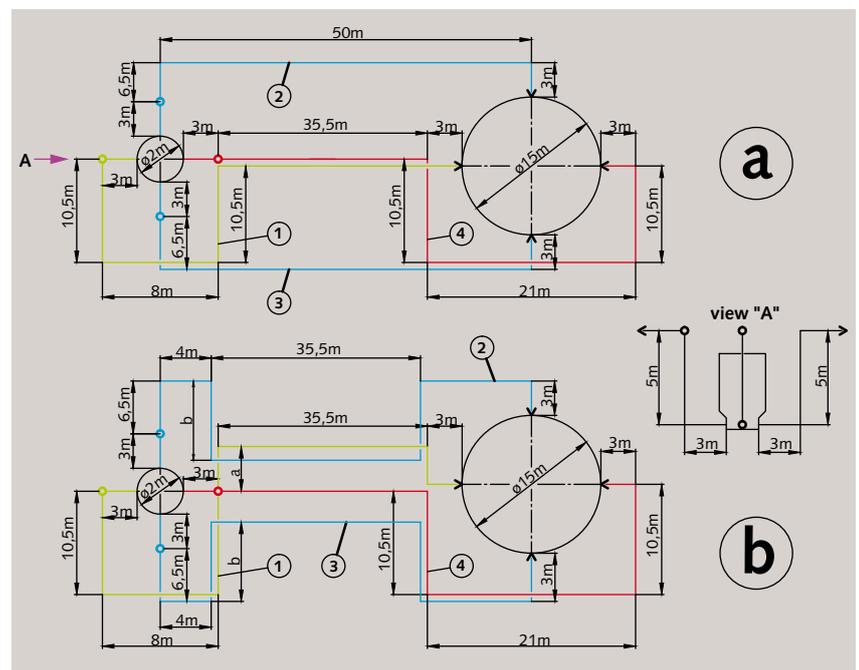
Für einen Rohrleitungsabgleich werden zunächst die äquivalenten Gesamtlängen $\sum L_{\text{eq},i} = L_{\text{eq,tot}}$ der $j = 1 \dots N$ Paralleleitungen ermittelt. Die Leitung mit der größten äquivalenten Länge, z.B. $L_{\text{eq,tot},N}$, wird vom kleinsten Massenstrom $\dot{M}_{\text{tot},N}$ bzw. $\dot{M}_{S,N}$ durchströmt und muss somit für den gewünschten Solldurchsatz ausgelegt sein. Die Durchsätze der äquivalent kürzeren Leitungen sind größer, $\dot{M}_{\text{tot},j \neq N} > \dot{M}_{\text{tot},N}$, und müssen durch Angleichung der äquivalenten Längen auf den Sollwert gedrosselt werden. Hierzu werden die Differenzen $\Delta L_{\text{eq},j} = (L_{\text{eq,tot},N} - L_{\text{eq,tot},j \neq N})$ gebildet und mit Hilfe der Gleichungen in Tabelle 1 in reale Rohrelemente mit entsprechenden $\Delta L_{\text{eq},j}$ -Werten umgerechnet. Deren Einbauposition entlang der jeweiligen Leitung kann flexibel festgelegt werden.

2.3 Anwendungsbeispiel

Bild 3a zeigt eine Druckgefäßanlage mit $N = 4$ abgehenden Förderleitungen, die einen Reaktor über vorgegebene Eingabestellen kontinuierlich mit insgesamt $\dot{M}_S = 8,0$ t/h

3 Example of calculation: line course

Berechnungsbeispiel: Leitungsverlauf



Pipe number Leitungsnummer	1	2 + 3	4
Number of 90° bends Anzahl 90°-Bögen x_b	5	4	6
$L_{\text{äq,h}} = L_{R,h}$ [m]	70.50	62.50	83.50
$L_{\text{äq,v}} = 0,5 \cdot L_{R,v}$ [m]	2.50	2.50	2.50
$L_{\text{äq,a}}$ [m]	5.13	5.13	5.13
$X_b \cdot L_{\text{äq,b}}$ [m]	12.83	10.26	15.39
$L_{\text{äq,l}}$ [m]	5.76	5.76	5.76
$L_{\text{äq,tot,j}}$ [m]	96.72	86.15	112.28
$\Delta L_{\text{äq,j}} = L_{\text{äq,tot,4}} - L_{\text{äq,tot,j}}$ [m]	15.56	26.13	0
$\dot{M}_{S,j}$ [t/h]	2.43	2.83	2.00
Difference [%] Abweichung [%]	+ 21.5	+ 41.5	± 0

Tab. 2 Unbalanced pipes

Nicht abgegliche Leitungen

(9) to (12). The equivalent length $L_{\text{äq,l}}$ describing the lifting of the gas/solids mixture – equation (13) – is influenced by the conveying gas mass flow \dot{M}_F : A decrease in the gas throughput increases the quantity of bulk material currently present in the vertical pipe, thereby increasing the lifting pressure drop, and therefore requiring a greater equivalent length and vice versa. As the lifting and frictional losses occur simultaneously, vertical pipe sections negatively affect the distribution precision in the case of changes in \dot{M}_F . Changes in the solids mass flow \dot{M}_S do not have any effect.

The equivalent length $L_{\text{äq,o}}$ of a throttle valve or of a control valve can be calculated using equation (14), Table 1. It can be seen that changes in the solids mass flow \dot{M}_S and in the gas mass flow \dot{M}_F influence the current length of $L_{\text{äq,o}}$. In order to maintain a uniform distribution despite any occurring changes in load, the drag coefficient $\zeta(A_o)$ of the valve would have to be adapted to suit the respective conditions by adjusting the cross-section of the opening A_o . However, according to equation (14) one exception to the above rule is a change in load during which the ratio $(\dot{M}_S/\dot{M}_F) = \mu$ is kept constant, because this does not change $L_{\text{äq,o}}$. Other approaches describing the pressure drop behaviour of valves produce comparable results.

The above considerations imply that it is best to balance the feed piping by installing straight, horizontal piping elements and/or pipe bends with any desired deflection angle.

The described process can also be used for the designing of reactor feeding systems with a specified, fixed unequal distribution of the solids mass flows $\dot{M}_{S,j}$. Furthermore, it is possible to compensate for any locally fixed unequal distribution of the reactor pressure p_c .

Tab. 3 Balanced pipes

Abgegliche Leitungen

Pipe number Leitungsnummer	1	2 + 3	4
Number of 90° bends Anzahl 90°-Bögen x_b	7	8	6
$L_{\text{äq,h}} = L_{R,h}$ [m]	80.94	78.37	83.50
$L_{\text{äq,v}} = 0,5 \cdot L_{R,v}$ [m]	2.50	2.50	2.50
$L_{\text{äq,a}}$ [m]	5.13	5.13	5.13
$X_b \cdot L_{\text{äq,b}}$ [m]	17.95	20.52	15.39
$L_{\text{äq,l}}$ [m]	5.76	5.76	5.76
$L_{\text{äq,tot,j}}$ [m]	112.28	112.28	112.28
$\Delta L_{\text{äq,j}} = L_{\text{äq,tot,4}} - L_{\text{äq,tot,j}}$ [m]	0	0	0
$\dot{M}_{S,j}$ [t/h]	2.00	2.00	2.00

Kohlenstaub versorgen soll. Es ist eine Gleichverteilung der Kohlemassenströme gefordert, d.h. $\dot{M}_{S,j} = 2,0$ t/h. Als Fördergas wird Stickstoff verwendet; $\dot{M}_F = 126,0$ kg/h. Druck im Sender: $p_D = 2,25$ bar(abs); Druck im Reaktor: $p_C = 1,0$ bar(abs); $\Delta p_{D,C} = 1,25$ bar. Stahlrohrleitungen, ($\emptyset 33,7 \times 2,6$) mm, $D_R = 28,5$ mm, $A_R = 0,63794 \cdot 10^{-3}$ m². Auslegungstemperatur: 20°C. Weitere Daten: $\lambda_{\text{tot}} = 0,010$, $\bar{C} = 0,90$, $\bar{\rho}_F = 1,868$ kg/m³, $\beta_b = 0,44$.

Bedingt durch bauliche Gegebenheiten wird zunächst der in Bild 3a dargestellte Leitungsverlauf geplant. Als Krümmer werden 90°-Bögen mit einem Radius $R_b = 0,5$ m verwendet. **Tabelle 2** enthält die für diese Ausführung berechneten äquivalenten Längen und die sich bei einer Druckdifferenz $\Delta p_{D,C} = 1,25$ bar einstellenden Feststoffmassenströme $\dot{M}_{S,j}$. Die $\dot{M}_{S,j}$ -Werte wurden hier und im weiteren Text mit dem CPP-Auslegungsprogramm für pneumatische Förderanlagen berechnet. Dieses benutzt ein alternatives, auf dem realen Förderleitungsverlauf basierendes, Rechenmodell [6] und wird zur zusätzlichen Absicherung der Ergebnisse verwendet.

Die Unterschiede $\Delta L_{\text{äq,j}}$ in den äquivalenten Längen resultieren in unzulässig großen Abweichungen der Feststoffmassenströme $\dot{M}_{S,j}$ vom Sollwert $\dot{M}_{S,4} = 2,0$ t/h. Ein Leitungsabgleich ist erforderlich. Im vorliegenden Fall werden die $\Delta L_{\text{äq,j} \neq 4}$ -Werte entsprechend möglicher alternativer Leitungsverläufe in 90°-Bögen ($L_{\text{äq,b}} = 2,565$ m) und gerade horizontale Rohrstücke umgerechnet. **Bild 3b** zeigt eine Ausführungsvariante und **Tabelle 3** die zugehörigen Betriebsdaten für einen vollständigen Abgleich.

Um $\Delta L_{\text{äq,j}} = 0$ einzustellen, müssen die Abstände (a, b), vgl. Bild 3b, zu $a \cong 5,218$ m und $b \cong 7,935$ m gewählt werden. Praktisch sind derartige Genauigkeiten nicht realisierbar, so dass immer Restlängen $\Delta L_{\text{äq,j}} \neq 0$ verbleiben werden. **Tabelle 4** zeigt die Auswirkungen verschiedener $\Delta L_{\text{äq,j}}$ -Restlängen auf die Verteilgenauigkeit an Hand der Leitung 1. Die $\dot{M}_{S,j}$ -Werte wurden wieder mit dem CPP-Pneumatikprogramm ermittelt.

Die mit dem Äquivalenzlängenmodell – Gleichung (8) – und dem CPP-Pneumatikprogramm berechneten Feststoffmassenströme $\dot{M}_{S,j}$ unterscheiden sich geringfügig. Letztere sind genauer, da die realen Positionen der verschiedenen Rohrelemente entlang der Förderstrecken berücksichtigt werden. Die Auswirkungen auf den Leitungsabgleich sind vernachlässigbar.

3 Lastverhalten

Laständerungen (\dot{M}_S, \dot{M}_F) führen generell zu einer Änderung der Druckdifferenz $\Delta p_{D,C}$. Den Ansätzen zur Berechnung der äquivalenten Längen $L_{\text{äq,i}}$ in Tabelle 1 ist jedoch zu entnehmen, dass eine einmal eingestellte Gleichverteilung unabhängig vom aktuellen Lastzustand erhalten bleibt, wenn beim Abgleich nur Förderrohrelemente entsprechend den Gleichungen (9) bis (12) verwendet werden. Die den Gas-/Feststoffhub beschreibende äquivalente Länge $L_{\text{äq,l}}$ – Gleichung (13) – wird vom Fördergasmassenstrom \dot{M}_F beeinflusst: Verringerter Gasdurchsatz erhöht die sich augenblicklich im vertikalen Rohr befindliche Schüttgutmenge, somit den Hubdruckverlust und erfordert deshalb eine größere äquivalente Länge und umgekehrt. Da Hub- und Reibungsverluste gleichzeitig auftreten, verschlechtern Vertikalstrecken bei \dot{M}_F -Ände-

REFERENCES

- [1] Hilgraf, P., Nolde, H.-D.: New Design Methods for Coal Distribution Systems for Blast Furnace Coal Injection. ICSTI'09, 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, 19-23 October 2009, Shanghai, China, Collected Proceedings: Volume 2, Paper B2-2.07, pp. 783-787.
- [2] Aue-Klett, C., Nickel, T., Hartge, E.-U., Werther, J., Hilgraf, P., Reppenhagen, J., Eichinger, F.: Split of Pneumatic Conveying Line to Multiple Parallel Lines – Prediction of Mass Flow Distribution and Control. Chem.-Ing.-Tech. 73 (2001) No. 6, pp. 705-708.
- [3] Nickel, T.: Einfluß der Leitungsführung auf den Druckverlust bei der pneumatischen Dichtstromförderung in dünnen Leitungen. Diploma Thesis, TUHH Technische Universität Hamburg-Harburg, 2000, unpublished.
- [4] Klett, C.: Entwicklung einer Regelung zur gezielten Aufteilung einer pneumatischen Förderung auf mehrere Teilströme. Diploma Thesis, TUHH Technische Universität Hamburg-Harburg, 2000, unpublished.
- [5] Hilgraf, P.: Recent Developments in Efficient Pneumatic conveying. Chapter 1 in "Design and Selection of Bulk Material Handling Equipment and Systems", Volume 1, Wide Publishing, Kolkata, India 2011, pp. 1-38.
- [6] Hilgraf, P.: Auslegung pneumatischer Dichtstromförderungen auf der Grundlage von Förderversuchen – Untersuchungen zum Scale-up. ZKG INTERNATIONAL 42 (1989) No. 11, pp. 558-566.

$\Delta L_{\text{äq},1}$ [m]	$\dot{M}_{s,1}$ [t/h]	Difference [%] Abweichung [%]
0	2.000	± 0
1,0	2.025	+ 1.25
2,0	2.050	+ 2.50
15,56	2.430	+ 21.50

Tab. 4 Balance inaccuracy at pipe 1
Abgleichungenauigkeiten bei Leitung 1

rungen die Verteilgenauigkeit. Änderungen des Feststoffmassenstroms \dot{M}_s sind ohne Einfluss.

Die äquivalente Länge $L_{\text{äq},0}$ einer Drosselarmatur oder eines Stellventils kann mit Gleichung (14), Tabelle 1, berechnet werden. Es ist ersichtlich, dass Änderungen sowohl des Feststoffmassenstroms \dot{M}_s als auch des Gasmassenstroms \dot{M}_f die aktuelle Länge von $L_{\text{äq},0}$ beeinflussen. Zur Erhaltung einer Gleichverteilung bei beliebigen Laständerungen müsste der Widerstandsbeiwert $\zeta(A_0)$ der Armatur durch Nachregelung des Öffnungsquerschnitts A_0 den jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden. Eine Ausnahme hiervon stellen nach Gleichung (14) Laständerungen dar, bei denen das Verhältnis $(\dot{M}_s/\dot{M}_f) = \mu$ konstant gehalten wird. Diese verändern $L_{\text{äq},0}$ nicht. Andere Ansätze zur Beschreibung des Druckverlustverhaltens von Armaturen führen auf vergleichbare Ergebnisse.

Die vorstehenden Betrachtungen implizieren, dass ein Leitungsabgleich bevorzugt mittels Einbau gerader horizontaler Rohrelemente und/oder mit Rohrkrümmern beliebigen Umlenkwinkels durchgeführt werden sollte.

Mit dem beschriebenen Verfahren lassen sich auch Reaktorbeschickungen mit vorgegebener, fest eingestellter Ungleichverteilung der Feststoffmassenströme $\dot{M}_{s,j}$ auslegen. Weiterhin ist es möglich, örtlich fixierte Ungleichverteilungen des Reaktordrucks p_c zu kompensieren.