

Fortschrittliche Technologie
für Durchflussmessung in
Gasen, Flüssigkeiten und
Wasserdampf

SDF-Durchflusssonden



Inhalt

Einführung	4
Funktionsprinzip	4
Woraus besteht eine komplette Messstelle?	6
Merkmale	7
Geringe bleibende Druckverluste.....	7
Mittelwertbildung auch bei gestörter Geschwindigkeitsverteilung	8
Hohe Genauigkeit.....	9
Großer Dynamikbereich	10
Langzeitgenauigkeit.....	10
Vielseitigkeit	10
Verwendbare Werkstoffe.....	11
Vergleich und Austauschbarkeit mit Sensoren gemäß ISO5167	11
Das System	12
Auswahl des geeigneten Sondentyps.....	12
Welcher Sondengröße für welche Rohrleitung?	12
Auslegung einer SDF-Sonde	13
Auslegungsrechnung	14
Abbildungen und Tabellen	15
Gleichungen zur vereinfachten Auslegungsrechnung.....	15
Typische bleibende Druckverluste bei SDF-Sonden	16
Zulässige maximale Differenzdrücke (in mbar).....	16
Tabelle der Übertragungsbeiwerte von SDF-Sonden (k-Faktoren)	17
Ein- und Auslaufstrecken.....	18
Vorgehen bei extrem kurzen Beruhigungsstrecken	19
Einsatz von zwei Sonden	19
Inbetriebnahme-Kalibrierung.....	19
Bestellschlüssel Standard-Sonden mit Flanschmontage (SDF-F)	21
Zusammenfassung der allgemeinen Spezifikationsdaten von SDF-Sonden.....	23
Häufige Fragen	24

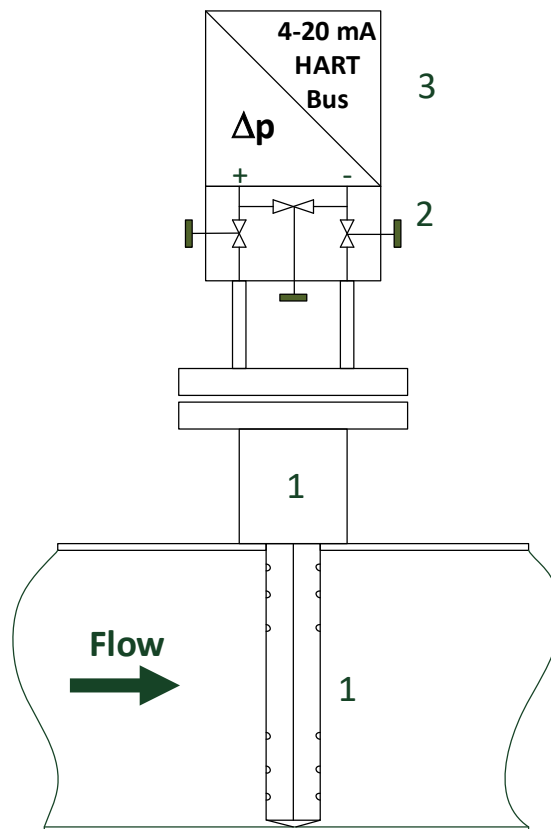
Einführung

Funktionsprinzip

Eine Messung mit einem Wirkdruckgeber besteht immer aus einer Mindestmenge von Bauteilen, die absolut unverzichtbar sind:

- Sensor (in unserem Falle eine SDF-Sonde oder Primärelement gemäß ISO5167);
- Absperrreinrichtung (zur Kalibrierung des Messumformers und Prozessabspernung);
- Differenzdruck-Messumformer als Messwertwandler;
- Anzeige- oder Auswertegerät, das das Resultat der Messung verarbeitet.

Die nebenstehende Abbildung zeigt diese Mindestausstattung in der industriellen Praxis:



Mindestausstattung einer Messstelle:

1. SDF-Durchflusssonde
2. Absperr- und Abgleicharmatur (3- oder 5-Wege-Ventilblock)
3. Elektronischer Differenzdruck-Messumformer

Das nachfolgende Auswerte- oder Anzeigegerät fehlt in dieser Darstellung. Diese Aufgabe können unterschiedliche Geräteformen übernehmen, von einem einfachen Digitalanzeiger bis hin zum Prozessleitsystem. Zu diesem Thema später noch mehr.

Der Sinn der Abgleicharmatur besteht im Nullpunktgleich des Differenzdruck-Messumformers. Dieser ist vor allem bei Messungen von kleinen Mengen unverzichtbar.

Was genau machen diese Komponenten nun?

Die nebenstehende Abbildung zeigt eine Sonde in einer horizontal verlaufenden Rohrleitung. Die Sonde ist rechtwinklig zur Strömungsrichtung montiert.

Die nachfolgenden Erklärungen nutzen die Sonde als Sensor, aber das Messprinzip bleibt auch für Differenzdruckmessungen mit anderen Primärelementen (Blenden, Düsen, etc.) gleich.

Die Strömung fließt von links nach rechts. Das blaue Feld gibt die Geschwindigkeitsverteilung in der Rohrleitung wieder.

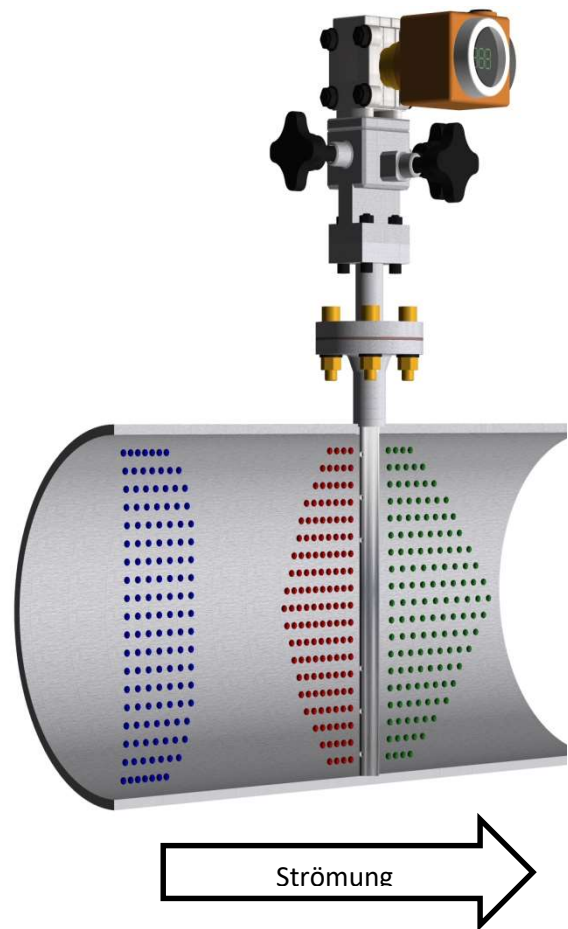
Am Einbauort der Sonde ist die freie Fläche der Rohrleitung beschränkt, es kommt zu einer lokalen Geschwindigkeitserhöhung. Es baut sich eine Überdruckzone vor der Sonde auf, dargestellt durch das rote Feld. Dementsprechend kommt es zu einer Unterdruckzone auf der Abströmseite der Sonde (auch „Saugseite“).

Die Sonde besitzt ist im Inneren zweigeteilt und besitzt zwei Messkammern (eine auf der Anström- eine auf der Abströmseite). Auf beiden Seiten gibt es eine bestimmte Anzahl an Messöffnungen, um den jeweiligen Druck zu erfassen. Diese Drücke werden an den Messumformer weitergeleitet, wo der Differenzdruck gebildet wird. Das hydraulische Differenzdrucksignal in ein elektrisches Signal umzusetzen. Dieses Signal kann anschließend von nachgeschalteten Geräten (Durchflussrechner, Leitsystem, etc.) weiterverarbeitet werden.

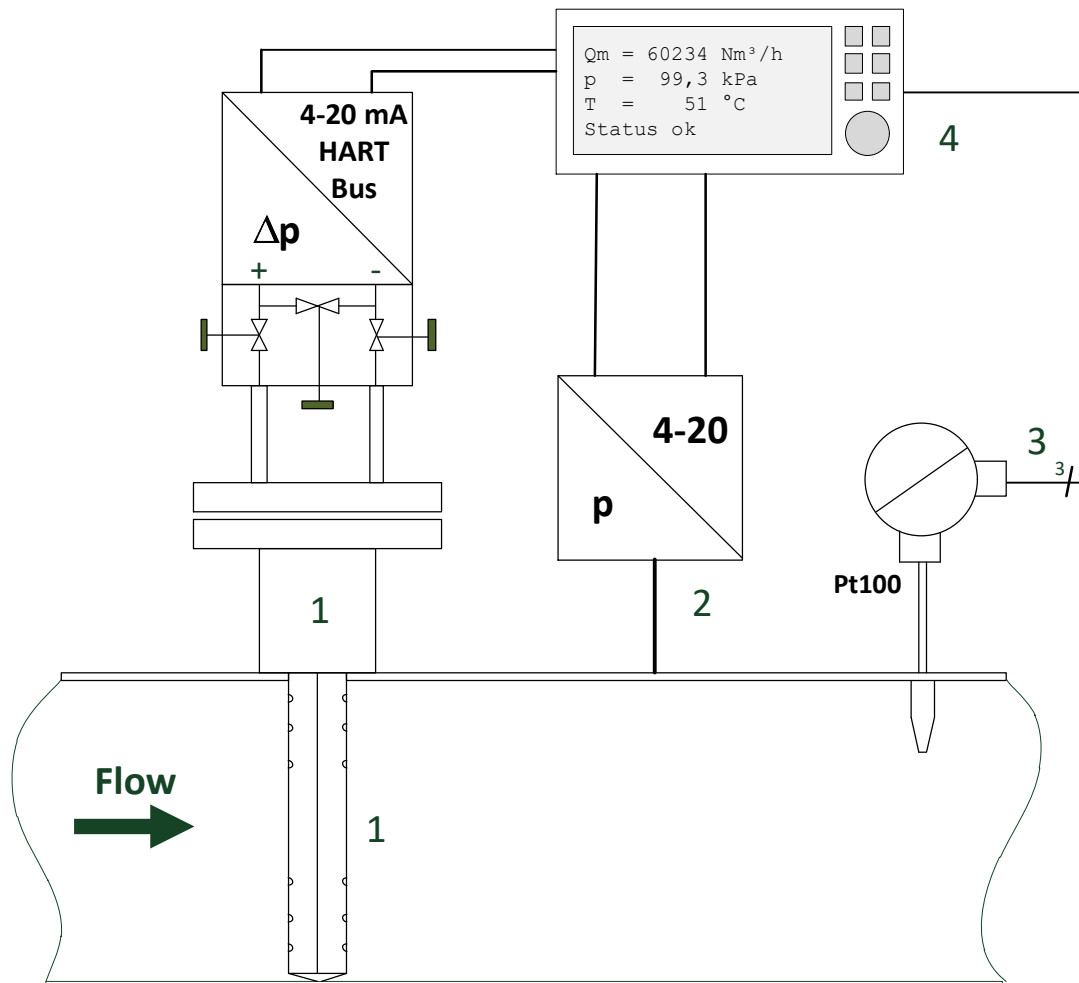
Der Zusammenhang zwischen Differenzdruck Δp und zu messender Fließgeschwindigkeit v ist für ein Medium mit der Dichte ρ und für diese Art von Durchfluss-Sensoren beschrieben durch die Gleichung:

$$v = k * \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}}$$

Dazu mehr in nachfolgenden Abschnitten.



Woraus besteht eine komplette Mesststelle?



Komplett ausgestattete Mesststelle (Beispiel):

1. Durchflussmeseinrichtung mit SDF-Sonde, 3-Wege-Abgleich-Ventilblock, Differenzdruck-Messumformer
2. Absolutdruck-Messumformer
3. Temperatursensor Pt100 (eingebaut in Schutzhülse)
4. Auswerterechner mit Kompensation der p-, T-Einflüsse auf die Mediendichte

Obenstehend abgebildete komplette Mesststelle ist erforderlich, wenn die Einflüsse von Druck und Temperatur auf die Messung korrigiert werden sollen. Dabei handelt es sich um die Korrektur der Eigenschaften des Messstoffs ebenso wie um die Korrektur z.B. der Rohrleitungsausdehnung o.ä.

Merkmale

Geringe bleibende Druckverluste

In Rohrleitungssystemen sind Druckverluste meistens unerwünschte Begleiterscheinungen. Diese gering zu halten ist eines der obersten Ziele bei der Suche nach geeigneten Messgeräten. Daher sind Geräte ohne jede Einengung des Rohrquerschnittes hier besonders nützlich. Darunter fallen Ultraschall-Messgeräte oder magnetisch-induktive Durchflussmesser. Beide Verfahren haben allerdings Anwendungsgrenzen, die ihren Einsatz oftmals ausschließen. SDF-Sonden werden sehr oft dort eingesetzt, wo auch Wirkdruckgeber nach ISO 5167 oder auch nach spezifischen Herstellerstandards eingesetzt werden können.

Druckverlust ist Energieverlust, häufig sind erhöhte Betriebskosten oder entgangene Gewinne die Folge. Dampfdruckverluste führen zu einer verringerten Arbeitskapazität (weniger Dampf kann in einer Turbine in elektrische Energie gewandelt werden). Bei anderen Medien, wie Erdgasen oder Verbrennungsluft, bedeutet Druckverlust eine Erhöhung des notwendigen Förderdrucks, um das Medium von A nach B zu transportieren.

Nachfolgende Tabelle zeigt den Vergleich der Druckverluste und die daraus resultierenden Verluste an Arbeitsfähigkeit des Dampfes zwischen einer typischen Messblende und einer SDF-Sonde in einer sehr alltäglichen Dampfmessung. Das Beispiel zeigt, dass der Druckverlust mit viel Leistung und damit viel Geld erkauft werden muss.

	Messblende	SDF-Sonde	Einheit
Maximaler Wirkdruck (1)	200	23,55	mbar
Bleibender Druckverlust	63	12	% von (1)
Durchfluss	11562		kg/h
Zustand vor dem Sensor			
Absolutdruck	400.0		kPa
Temperatur	150.0		°C
Zustand nach dem Sensor			
Absolutdruck	387,4	399,7	kPa
Temperatur	149,99	149,99	°C
Exergieverlust pro Stunde	19,35	0,43	kWh

Mittelwertbildung auch bei gestörter Geschwindigkeitsverteilung

In diesem Abschnitt zeigen wir Ihnen die besondere Eignung der SDF-Sonden für die Reduzierung der erforderlichen Beruhigungsstrecken im Vergleich mit anderen Messverfahren durch

- geometrische Mittelung der Geschwindigkeit über den Querschnitt
- das besondere Verhältnis der Größe der Messöffnungen zum inneren Volumen der Sonde
- die völlig symmetrische Anordnung der Messöffnungen auf der Vorder- und der Rückseite.

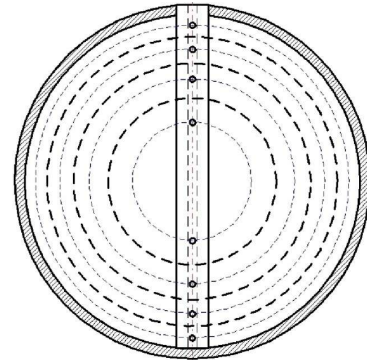
Eines der „Geheimnisse“ der SDF-Sonden ist die Anordnung der Messöffnungen. Diese sind so über das Sondenprofil verteilt, dass eine **geometrische Mittelwertbildung** vorgenommen wird.

Der Vorteil dieses Messverfahrens kann in einem Vergleich mit einem Einzelpfad-Ultraschall-Durchflussmesser (z.B. Ultraschall Clamp-On Messungen) gezeigt werden: Das Ultraschallsignal läuft für eine bestimmte Zeit durch den Innendurchmesser der Rohrleitung. Diese Laufzeit wird gemessen und ist ein Maß für den arithmetischen Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit.

Eine ungleichmäßige Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit kann nicht gemessen werden. Dies zieht bei der in der Praxis üblichen ungleichen Verteilung der Geschwindigkeit unweigerlich systematische Messfehler nach sich.

Ein weiterer Vorteil des Designs von SDF-Sonden ist das Verhältnis des inneren Volumens (der beiden Sondenkammern) im Vergleich zu den Messöffnungen. Eine Analogie zur Elektrotechnik: das **charakteristische Verhältnis von der Größe der Messöffnungen zum Volumen der Sonde** verhält sich hydraulisch betrachtet ähnlich wie sich ein elektrisches RC-Glied in elektrischer Hinsicht verhält. Ein großes Volumen puffert Ausgleichsströmungen, ein großer (Strömungs-)Widerstand verringert Ausgleichsprozesse durch von außen einwirkende Signalunterschiede. Mit anderen Worten: unterschiedliche Geschwindigkeitsverteilungen in einer Rohrleitung führen zu unterschiedlichen dynamischen Verhältnissen im Bereich der Messöffnungen. Diese Unterschiede können Ausgleichströme nach sich ziehen, die im Einzelfall sogar zu Rückströmungen aus der Sonde heraus in den Prozess führen könnten. Dies unterbindet oder verringert zumindest die spezifische Konstruktion der SDF-Sonde mit wuchtigem innerem Volumen bei vergleichsweise minimaler Größe der Messöffnungen. Das Gleiche gilt für Staurohrsonden mit Messschlitzen auf der Anströmseite – einfach zu produzieren, aber messtechnisch falsch.

Der dritte Vorteil ist die Anordnung der Messöffnungen auf der Rückseite der Sonde. Um möglichst geringe Ein- und Auslaufstrecken bei hoher Messgenauigkeit sicherzustellen, ist es entscheidend den Über- und den Unterdruck mit der gleichen Präzision zu erfassen. Der Hinweis auf den „berühmten“ statischen Druck, der stromabwärts angeblich gemessen wird, ist theoretisch und praktisch Unsinn. Eine Durchflusssonde muss auf der Anströmseite und auf der Abströmseite die gleiche Anzahl Öffnungen haben, die überdies in der gleichen Stromlinie liegen müssen.



Hohe Genauigkeit

In diesem Abschnitt geben wir Ihnen einen Einblick in die Ergebnisse von hunderten Versuchen auf Prüfständen, in denen SDF-Sonden auf die Abweichungen der von uns angegebenen Durchflusswerte zu den real ermittelten Werten hin untersucht wurden.

SDF-Sonden liefern im Vergleich mit den gängigen Messblenden und Düsen nach ISO 5167 ein hochgradig lineares Ausgangssignal. Das bedeutet: unabhängig von der Fließgeschwindigkeit und den Medieneigenschaften bleibt die Übertragungscharakteristik einer SDF-Sonde unter allen spezifizierten Bedingungen stabil. Das ist bei den meisten Blenden und Düsen nach ISO 5167 nicht der Fall. Die Problematik zeigt nachfolgende Tabelle: weicht eine Blendenmessung von ihrem Auslegungspunkt ab, so erreichen die systembedingten Messfehler erheblich. Das gleiche Problem ergibt sich bei Düsen. Unter den Sensoren nach ISO 5167 ist einzig das klassische Venturirohr ebenso frei von Einflüssen der Reynoldszahl wie eine SDF-Sonde.

Beispielanwendung Wasserdampf ID=250 mm, Auslegungsdaten: Druck = 4bar abs., Temperatur = 150°C, Drosselöffnung d = 120 mm (b = 0,48). Angaben der durch die ISO 5167 erhältlichen Abweichung bei der Anwendung des Übertragungsbeiwertes C vom Auslegungspunkt auf den jeweiligen Betriebspunkt:

Differenzdruck [mbar]	Anzeige qm [kg/h]	Wahrer Wert qm [kg/h]	Fehler
12,5	2.891	2.975	2,85%
25	4.088	4.201	2,69%
50	5.781	5.919	2,33%
100	8.176	8.307	1,58%
200	11.562	11.562	0,00%
400	16.352	15.818	-3,38%

Die angegebenen Fehler beinhalten hierbei noch nicht die ohnehin vorhandene Messunsicherheit eines ISO5167-Wirkdruckgebers. Diese Fehler müssen zu den besagten Linearitätsfehlern hinzu gerechnet werden.

Im Vergleich hierzu die nicht korrigierten Messabweichungen einer SDF-Sonde bei einem Prüfstandlauf bei einem staatlichen Kalibrierlabor:

Ergebnis der Kalibrierung
Calibrationresul

Ausg. mA Soll mA	Ausg. mA Ist mA	Dichte kg/m ³	Soll-Volumen l	Messzeit s	Impulse [mA]	Soll-Masse kg	Belastung t/h	Messabw. %
4,3946	4,3916	999,70	805,74	379,25	83276	805,498	7,65	-0,77
4,7659	4,7715	999,70	756,01	183,35	43743	755,783	14,84	0,73
5,5979	5,6053	999,70	817,22	95,00	26625	816,975	30,96	0,46
8,6691	8,6346	999,70	8679,00	345,28	149067	8676,396	90,46	-0,74
11,8055	11,7827	999,70	8819,00	209,87	123642	8816,354	151,23	-0,29
15,3691	15,3442	999,70	8493,00	138,76	106458	8490,452	220,28	-0,22
18,4921	18,5254	999,70	8508,00	109,05	101010	8505,448	280,79	0,23

Großer Dynamikbereich

Aus vorgenanntem Kalibrierprotokoll geht der weite Messbereich einer Durchflussmessung mit einer SDF-Sonde hervor. Durch die hohe Linearität einer SDF-Sonde überragt dieses Messverfahren andere Messverfahren erheblich.

Betrachten wir das Beispiel eines Wirbelfrequenzzählers, wie er in vielen Anwendungen zum Einsatz kommt. Ihm haftet der Ruf einer extrem weiten Messspanne an. Eine haltlose Legende, wie sich bei näherer Betrachtung zeigt. Auf der Homepage eines namhaften Herstellers für solche Geräte findet sich folgende Gleichung zur Bestimmung der minimalen Durchflussgeschwindigkeit.

Gemäß eines bekannten Herstellers für Vortex Durchflussmessgeräten beträgt die Genauigkeit bei Reynoldszahlen kleiner 20.000 0,85% vom Endwert. Bei einem Durchfluss von 7,65 t/h (kleinster Datenpunkt der Kalibrierung, s. obige Tabelle) beträgt die Reynoldszahl 9.473. Der entsprechende Fehler des Vortexzählers beläuft sich demnach auf +/- 2,64 t/h (=0,85% von 310 t/h) oder **34,4% Fehler** vom Messwert. Die SDF-Sonde weist bei gleichem Durchfluss einen Fehler von 0,77% vom Messwert auf. Der Dynamikbereich der Sonde ist bedeutend größer, das Gleiche gilt auch im Vergleich mit vielen anderen Messverfahren.

Langzeitgenauigkeit

Messblenden benötigen für eine ordnungsgemäße Funktion die Einhaltung von Kantenradien an der Stauscheibe. Diese Radien werden durch das darüber streichende Medium vergrößert. Folge: die Blenden werden ungenau und schließlich unmerklich unbrauchbar.

Zum Vergleich: werden an einer SDF-Sonde vom Typ 22 vom äußeren Querschnitt unrealistische 10% durch Abrasion abgetragen, so ergibt sich hieraus eine zusätzliche Abweichung von 0,49% auf den Messwert. Mit anderen Worten: normaler Verschleiß zeigt keine nachweisbare Wirkung auf das Messergebnis.

Vielseitigkeit

SDF-Sonden sind universell einsetzbar. Prinzipiell können Sie überall dort eingesetzt werden, wo andere Wirkdruckgeber auch angedacht wurden. Das betrifft nicht nur Blenden, Düsen und klassische Venturirohre nach ISO5167, sondern auch „V-Cones“ und andere exotische Geräte, den besondere Eigenschaften nachgesagt werden.

Namentlich umfassen die Anwendungsfelder

- technische und Erdgase, auch mit hohem Wasserdampfanteil (z.B. Bio- und Deponiegas), mit Verschmutzung durch Staub oder mit korrosiven Bestandteilen
- Flüssigkeiten (z.B. Kesselspeisewasser, Kondensat, Thermalöl)
- Wasserdampf auch bei sehr hohen Drücken und Temperaturen.

Ungeeignet sind SDF-Sonden für Pasten, Schlämme und klebende Medien. In leitfähigem Wasser sind SDF-Sonden geeignet, insbesondere bei kleinen Durchmessern aber sind magnetische-induktive Messgeräte wirtschaftlich und messtechnisch die erste Wahl.

Verwendbare Werkstoffe

Werkstoff	Anwendung
1.4404	Standard-Werkstoff von SDF-Sonden (Optional: Werkstoff für Anschweiß-Montageteile)
2.4816 (Inconel 600)	Hochtemperatur-Werkstoff für Einsatztemperaturen bis 900°C
2.4633 (Inconel 602)	Hochtemperatur-Werkstoff für Einsatztemperaturen bis 1150°C mit hoher Korrosionsbeständigkeit, jedoch ungeeignet für Luft über 1000°C
1.4539	Korrosionsbeständiger austenitischer Stahl – Anwendung für medienberührte Teile bei SDF-Sonden
P235GH	Werkstoff für Anschweißteile zur Montage einer SDF-Sonde in der Rohrleitung. Dauerbetrieb bis 400°C.
1.5415 (15/16 Mo 3)	Temperaturfester Kesselstahl (Eignung bis 530°C Wandtemperatur)
1.7335 (13CrMo4-5)	Hochtemperaturstabiler legierter Stahl (Eignung bis 560°C Wandtemperatur) – Verwendung für SDF-Anschweißteile in Hochtemperatur-Dampfmessungen
1.7380 (10CrMo9-10)	Hochtemperaturstabiler legierter Stahl (Eignung bis 590°C Wandtemperatur) – Verwendung für SDF-Anschweißteile in Hochtemperatur-Dampfmessungen
1.4923 (X22CrMoV 12-1)	Äußerst hochtemperaturfester nichtrostender Stahl für Frischdampf-Anwendungen mit Einsatztemperaturen über 600°C
1.4841 (X15CrNiSi 25 20)	Hitzebeständiger nichtrostender Stahl mit Eignung für Temperaturen im Bereich zwischen 900 und 1120°C, auch für Luft

Vergleich und Austauschbarkeit mit Sensoren gemäß ISO5167

Kriterium	Blenden	Düsen	Klass. Venturis	SDF-Sonden	AccuFlo® HMP
Druckverlust	Hoch	Hoch	Gering	Gering	Gering
Genauigkeit	Eingeschränkt	Eingeschränkt	Hoch	Hoch	Sehr hoch
Langzeitstabilität	Gering	Gegeben	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Preis	Niedrig	Hoch	Sehr hoch	Niedrig-Mittel	Hoch
Installation	Aufwändig	Aufwändig	Aufwändig	Leicht-Mittel	Mittel Plug'n Play
Dynamik	Eingeschränkt	Eingeschränkt	Hoch	Hoch	Sehr hoch
Normung	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein
Kalibrierung	Aufwändig	Aufwändig	Aufwändig	Möglich	Standard

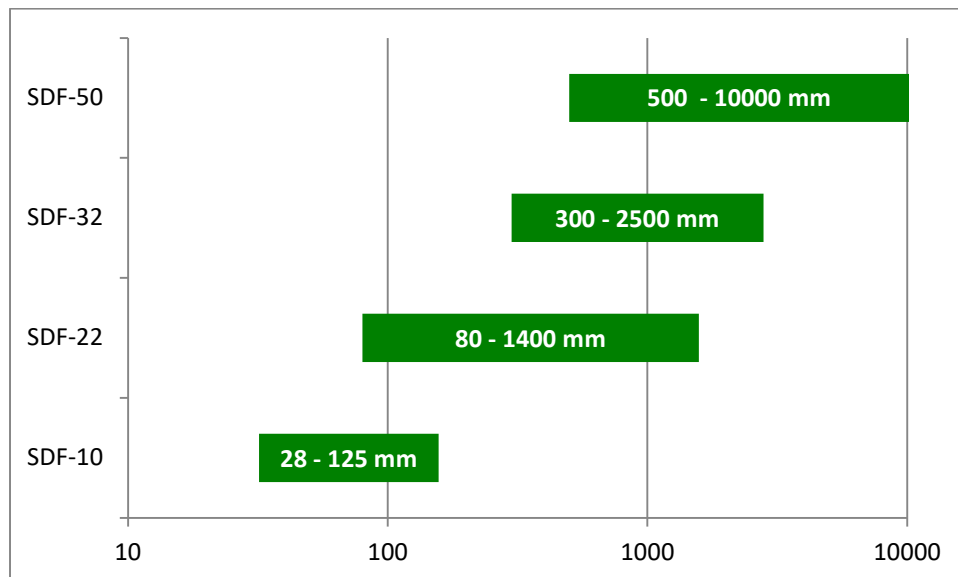
Das System

Auswahl des geeigneten Sondentyps

In diesem Abschnitt zeigen wir Ihnen, wie Sie anhand der wesentlichen Merkmale Ihrer Anwendung zur Auswahl eines geeigneten SDF-Sondentyps gelangen. In den allermeisten Fällen ist diese Spezifizierung sehr einfach und schnell durchzuführen. Sind Sie sich dennoch unsicher, so stehen Ihnen unsere Fachleute gerne und jederzeit unterstützend zur Seite.

Welcher Sondengröße für welche Rohrleitung?

Die Sonden - sprich: die Größe des medienberührten Profils hängt in erster Linie vom Innendurchmesser der Rohrleitung ab, berücksichtigt wird aber auch die mechanische Belastung der Sonde durch die Strömung bzw. die resultierenden mechanischen Belastungen. Die nachstehende Grafik zeigt die Durchmesser-Bereiche für den Einsatz der einzelnen Baugrößen:



Im Anhang finden Sie die Tabelle „Zulässige maximale Differenzdrücke (in mbar)“ (Seite 16), mit deren Hilfe die kleinste noch geeignete SDF-Durchflussonde für eine konkrete Anwendung bestimmt werden kann.

Auslegung einer SDF-Sonde

In diesem Abschnitt zeigen wir Ihnen an einem Beispiel die Handhabung des Typenschlüssels für die SDF-Sonden, so dass Sie in den allermeisten Anwendungsfällen selbst den geeigneten Sondentyp richtig spezifizieren können.

Typischerweise spiegelt der Typenschlüssel einer SDF-Sonde die Sonde komplett wider. Umgekehrt kann man also das, was eine Sonde ausmacht, mit dem Typenschlüssel komplett abfragen. Daher erklären wir die Auslegung einer SDF-Sonde am besten am Beispiel eines konkreten Typenschlüssels:

SDF-F-107,1 mm-3,6 mm/+50 mm-S-C-0-PN40-FPK-DE3-T1-V

Eine solche Sonde ist eine typische Sonde, wie sie für die Messung von Gasen und Flüssigkeiten eingesetzt wird. Der Typenschlüssel kann beispielhaft mit Hilfe der nachstehenden Tabelle entschlüsselt werden.

1	SDF	Die Charakterisierung des Produkts
2	F	Grundlegende Bauform: „F“ steht hier für eine Sonde, die mittels eines Flansches an einen an die Rohrleitung geschweißten Gegenflansch montiert wird.
3	107,1mm	Der Innendurchmesser der Rohrleitung
4	3,6mm/+50 mm	Links steht die Wandstärke der Rohrleitung, hinter dem Schrägstrich rechts steht die Stärke einer eventuell vorhandenen Halsverlängerung in Abhängigkeit der Isolierung . Entfällt diese, dann entfällt auch der Schrägstrich.
5	S	An dieser Position findet sich ein Hinweis auf den Werkstoff der Sonde selbst. „S“ steht für den Standard-Werkstoff 1.4404.
6	C	Der Rohrleitungswerkstoff: „C“ steht hier für die „Werkstoffgruppe 2“, das sind die einfachen Kohlenstoffstähle (z.B. P235 GH). Das „E“ stünde für Anschweißteile aus Edelstahl W.Nr. 1.4404 (Werkstoffgruppe 1). Aus dem Rohrwerkstoff fertigen wir die Anschweißteile.
7	0	Gegenlager: „0“ steht für „kein Gegenlager“
8	PN40	Druckstufe im Klartext
9	FPK	Anschluss der Primärabspernung. Diese wird benötigt, um die Leitung bei Entfernung des elektrischen Differenzdruck-Messumformers absperrern zu können. Hier wurde die komfortable Flanschplatte in abgekröpfter Version („FPK“) gewählt, die auch den Einbau eines Thermometers in die Sonde erlaubt.
10	DE3	Typ der gewählten Primärabspernung: „DE3“ steht für einen Drei-Wege-Ventilblock aus Edelstahl mit beidseitig 7/16“-UNF-Schrauben aus kadmiertem C-Stahl.
11	T1	Zubehör: „T1“ steht hier für ein integriertes Pt100-Widerstandsthermometer in 3-Leiter-Version mit auswechselbarem Messeinsatz ohne elektrischen Messumformer im Anschlusskopf.
12	V	Rohrleitungsverlauf: „V“ = vertikal, „H“ = horizontal

Nach dieser Systematik beschreibt die Bezeichnung

„SDF-DF-10-54,5mm-2,9mm-S-C-0-PN40-KT-FWNC0-0-H“

eine Standard-Dampfsonde mit Flanschanschluss an C-Stahl-Rohrleitung (DN50, PN16, horizontal) inklusive kompakter Montage des Messumformers an einen Fünf-Wege-Block (C-Stahl, direkt

montiert an die im Anschlusskopf integrierten Kondensatgefäße). Diese Version ist ohne Weiteres für Temperaturen bis 300 °C geeignet – mit angepassten Ventilen auch für höhere Temperaturen.

Auslegungsrechnung

Bei der Vorab-Berechnung einer SDF-Sonde geht es im Wesentlichen um die Klärung von zwei Punkten:

1. Welcher Differenzdruck fällt an der SDF-Sonde an bei den spezifischen Anwendungsdaten?
2. Ist die gewählte Sonde diesem Differenzdruck gewachsen? Ist der Differenzdruck hoch genug für den verwendeten elektrischen Messumformer?

Die Auslegung der SDF-Sonde kann sehr leicht und elegant erfolgen mit Hilfe unseres neu entwickelten Sizing Tools, auf das jederzeit im Internet zugegriffen werden kann. Dieses Berechnungstool findet sich in der Web-Präsenz <http://www.ski-gmbh.com/swa>. Hierzu ist eine Anmeldung erforderlich, bei der Emailadresse und Namen angegeben werden müssen. Mit dem umgehend zugesandten Passwort ist der Anwender dann in der Lage, eigene Berechnungen durchzuführen und zu speichern und von jedem Rechner mit Internetverbindung wieder auf diese zuzugreifen.

Die Berechnungen des Differenzdrucks können aber auch mit Hilfe der Gleichungen in der Tabelle „Gleichungen zur vereinfachten Auslegungsrechnung“ auf Seite 15 leicht selbst durchgeführt werden. Für überschlägige Zwecke reicht es dabei, den Übertragungsbeiwert der gewählten SDF-Sonde aus der Tabelle „Tabelle der Übertragungsbeiwerte von SDF-Sonden (k-Faktoren)“ auf Seite 17 zu entnehmen.

Das hierbei erhaltene Ergebnis sollte anhand der im Anhang dieses Dokuments befindlichen Tabelle „Zulässige maximale Differenzdrücke (in mbar)“ (Seite 16) überprüft werden.

Wichtiger Hinweis:

Bei Anwendungen mit hohen Drücken (z.B. Gase und Dampf ab 20 bar Leitungsdruck) und hohen Fließgeschwindigkeiten oder bei sehr großen Rohrleitungen (Innendurchmesser > 2000 mm) bitten wir auch in der Auslegungsphase bereits um Kontaktaufnahme mit uns!

Abbildungen und Tabellen

Gleichungen zur vereinfachten Auslegungsrechnung

Vereinfachte Wirkdruckgleichungen	
Allgemeine Grundgleichung	$v = k * \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}} \text{ mit } [\Delta p] = Pa \text{ (1)}$
Geschwindigkeit	$\Delta p = \frac{\rho}{2} * \left(\frac{v}{k}\right)^2 \text{ mit } [\Delta p] = Pa \text{ (2)}$
Volumenstrom	$\Delta p = \rho * \left(\frac{25 * \dot{V}}{k * ID^2}\right)^2 \text{ (3)}$
Massestrom	$\Delta p = \frac{1}{\rho} * \left(\frac{25 * \dot{m}}{k * ID^2}\right)^2 \text{ (4)}$
Sonderfall Normvolumenstrom bei Gasen	$\Delta p = \frac{\rho_N * T_B}{p_B} * \left(\frac{15,23 * \dot{V}_N}{k * ID^2}\right)^2 \text{ (5)}$
Einheiten	
Geschwindigkeit	$[v] = m/s$
Volumenstrom, Normvolumenstrom	$[V] = m^3/h, [V_N] = Nm^3/h$
Massestrom	$[\dot{m}] = kg/h, [qm]=kg/s$
Druck	$[p] = kPa \text{ abs.}$
Temperatur	$[T] = K$
Dichte	$[\rho] = kg/m^3, [\rho_N] = kg/Nm^3$
Differenzdruck	$[\Delta p] = mbar$
Innendurchmesser	$[ID] = mm, [D] = m, [d] = m$
Die Kennziffern für SDF-Sonden in ISO 5167-Schreibweise	
Öffnungsverhältnis	$\beta = \sqrt{1 - \frac{4 * br}{\pi * D}}$ (br ist die Projektionsbreite der SDF-Sonde in Fließrichtung)
Durchfluss-Koeffizient	$C = k * \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{\beta^4}}$
Differenzdruck-Formel für Massestrom	$dp = \frac{1}{\rho} * \left[0,9003 * \frac{qm}{k * \varepsilon * D^2}\right]^2$

Typische bleibende Druckverluste bei SDF-Sonden

SDF-Typ		10	22	32	50
Innendurchmesser in mm	Druckverlust in % vom Wirkdruck				
	50	29	-	-	-
	100	15	29	-	-
	150	-	19	-	-
	200	-	15	19	-
	250	-	12	16	-
	300	-	10	13	21
	400	-	7	10	15
	500	-	6	8	12
	600	-	5	6	10
	700	-	4	6	9
	800	-	4	5	8
	900	-	3	4	7
1000	-	3	4	6	

Beispiel: eine SDF-22-Sonde für einen Durchmesser DN300, für die ein maximaler Differenzdruck von z.B. 28,63 mbar errechnet wurde, wird an diesem Arbeitspunkt einen bleibenden Druckverlust von ca. 10% gleich 2,8 mbar erzeugen.

Zulässige maximale Differenzdrücke (in mbar)

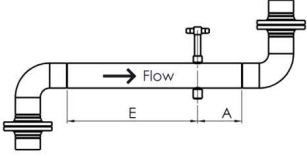
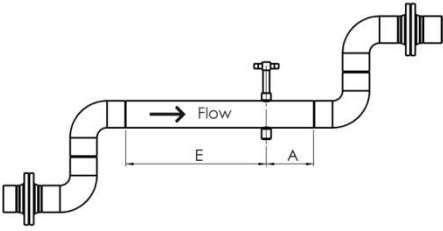
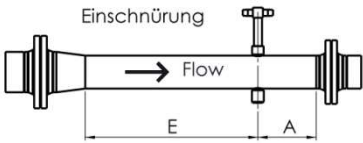
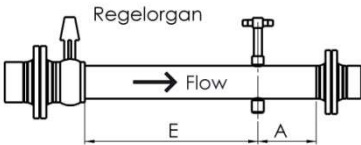
Typ	SDF-10		SDF-M-22		SDF-F-22		SDF-32		SDF-50	
	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
DN	Gegenlager									
40	2265	36251								
50	1417	22672								
65	852	13626								
80	618	9894								
100	367	5870								
125	243	3882	6608		971					
150			4517		663					
200			2667		391					
250			1690		248					
300			1195	2808	176	2808	312			
350			983	2311	144	2311	257			
400			752	1767	111	1767	196	3142		
500			470	1105	69	1105	123	1964		
600			323	759	47	759	84	1349	213	3400
700			237	558		558	62	991	156	2499
800			181	424		424	47	754	119	1900
1000			116	272		272	30	483	76	1217
1200				188		188		334	53	842
1500				138		138		245	39	618

Tabelle der Übertragungsbeiwerte von SDF-Sonden (k-Faktoren)

ID	SDF-10	SDF-22	SDF-32	SDF-50
50	0,5495			
65	0,6090			
80	0,6332			
100	0,6477	0,5495		
125	0,6559	0,6026		
150		0,6271		
200		0,6477		
250		0,6559	0,6443	
300		0,6600	0,6526	
350		0,6623	0,6572	
400		0,6637	0,6600	0,6447
450		0,6647	0,6618	0,6504
500		0,6654	0,6631	0,6542
600		0,6662	0,6647	0,6589
700		0,6667	0,6656	0,6615
800		0,6670	0,6662	0,6632
900		0,6672	0,6666	0,6643
1000		0,6674	0,6669	0,6650
1100		0,6675	0,6671	0,6656
1200		0,6676	0,6672	0,6660
1300		0,6676	0,6673	0,6663
1400		0,6677	0,6674	0,6665
1500		0,6677	0,6675	0,6667
1600			0,6676	0,6669
1700			0,6676	0,6670
1800			0,6677	0,6671
1900			0,6677	0,6672
2000			0,6677	0,6673
2500				0,6676
3000				0,6677

Ein- und Auslaufstrecken

Im Allgemeinen müssen für die ordnungsgemäße Funktion von SDF-Sonden die folgenden Beruhigungsstrecken vor und hinter einer Abweichung vom geraden ungestörten Rohrleitungsverlauf eingehalten werden.

Rohrleitungsverlauf	Einlauf	Auslauf
	7*ID	3*ID
	10*ID	3*ID
	7*ID	3*ID
	20*ID	5*ID

Wichtiger Hinweis: nehmen Sie bei kürzeren als dem angegebenen Beruhigungsstrecken unsere Beratung in Anspruch.

Vorgehen bei extrem kurzen Beruhigungsstrecken

Einsatz von zwei Sonden

Kurze Ein- und Auslaufstrecken sind ein Dauerbrenner in der Durchflussmessung, v.a. in größeren Rohrleitungen. Daher haben wir uns intensiv experimentell mit diesem Thema befasst und können eindeutige Ergebnisse vorweisen. Aus diesen Versuchen lassen sich klare Handlungsregeln ableiten. Wir suchten nach einer Lösung für das Problem, auch unter schwierigen Bedingungen mit kurzen Beruhigungsstrecken eine reproduzierbare Lösung zu finden. Dazu verglichen wir die Resultate einer SDF-Sonde in ein und derselben Strömung hintereinander an drei verschiedenen Einbaustellen:

1. der optimalen Platzierung mit dem 10-fachen Innendurchmesser (ID) als Beruhigungsstrecke vor der Messstelle und dem 5-fachen ID als Beruhigungsstrecke dahinter;
2. der Platzierung mit einer 5*ID Einlaufstrecke und ohne Auslaufstrecke (0*ID)
3. der Platzierung ohne Einlaufstrecke (0*ID) und mit einer 5*ID Auslaufstrecke

Nachfolgende Tabelle zeigt einen Ausschnitt aus den gewonnenen Resultaten:

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Beruhigungsstrecken	* ID		
Einlauf	10	5	0
Auslauf	5	0	5
Masseströme in t/h	Abweichung in %		
20	0,36	-0,60	1,43
50	0,20	-1,17	0,92
140	-0,39	-1,26	0,70
270	-0,77	-1,51	0,50

Das Fazit dieses Versuches lautet: bei Einsatz von zwei über Kreuz angeordneten SDF-Durchflusssonden erzielt man bei fehlender Einlaufstrecke eine Genauigkeit von +/-2% vom Messwert im Durchflussverhältnis minimale zu maximaler Durchflussrate im Bereich 1:13!

Inbetriebnahme-Kalibrierung

Bei deutlicher Unterschreitung der nach DIN 1946 empfohlenen Ein- und Auslaufstrecken ist eine Kalibrierung vor Ort die zuverlässigste Methode, die tatsächliche Strömungsgeschwindigkeit in Gaskanälen zu bestimmen. Bei anderen Medien ist eine Überprüfung mittels Anemometer, Prandtl-Rohr oder Ähnlichem aufgrund der Temperatur- und Druck-Verhältnisse und der damit einhergehenden Gefahren für die Gesundheit nicht ratsam.

Die Vorgehensweise stützt sich dabei auf die grundlegende Formel für Wirkdruckgeber:

$$v = k * \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}}$$

Der k-Faktor charakterisiert hier das Zusammenspiel von Sonde, Rohrleitung (deren Bestandteil die Sonde mit der Montage ja geworden ist) und strömendem Medium. Da alle anderen Einflussgrößen pure Physik sind, kann nur der k-Faktor dieses Zusammenspiel wiedergeben. Der werkseitig ermittelte k-Faktor entspricht den von uns in Prüfstandversuchen ermittelten Idealwerten.

Der reale k-Wert ist der Hebel für eine Korrektur der Abweichung zwischen Prüfstand und der spezifischen Messanordnung. Wenn Sie die Wahl haben, empfehlen wir Ihnen die Korrektur des k-Faktors mittels eines Staurohres nach Prandtl, Pitot oder ähnlichen Verfahren. Diese Messsonden sind für den stationären industriellen Einsatz aufgrund der geringen Differenzdrücke und anderer Tatbestände nicht empfehlenswert. Für Kalibriermessungen an SDF-Sonden hingegen sind sie gut geeignet, da sich die Einflüsse der Mediendichte bei beiden Messverfahren gegenseitig aufheben. Damit wird die Prozedur erheblich vereinfacht.

Um eine Kalibriermessung durchzuführen, müssen wir zwei Dinge bewerkstelligen:

1. Wir müssen möglichst viel von der Strömung zu „sehen“ bekommen; das bedeutet: je mehr Messpunkte aufgenommen werden, desto besser. Optimal ist, wenn in mindestens zwei Achsen gemessen wird.
2. Wir müssen die Ergebnisse in einer Art gewichten, dass jedem Messpunkt die ihm gebührende Bedeutung beigemessen wird. Dies kann rechnerisch oder durch Wahl des Messpunktes erfolgen.

In der Praxis ist es einfacher, die Messpunkte vorher festzulegen, so dass sich die Gewichtung anschließend von alleine ergibt. Natürlich macht es Sinn, wenn während der Messung die Betriebsbedingungen annähernd konstant bleiben. Erhebliche Schwankungen von mehr als 10% der Durchflussrate führen zu nicht mehr miteinander vereinbaren Einzelmessungen.

Bestellschlüssel Standard-Sonden mit Flanschmontage (SDF-F)

SDF											
											Rohrleitungsmontage Grundpreis (bis max. PN64, SDF-32 max. PN40, SDF-50 max. PN16)
	F										Grundpreis (PN100) nur 1.4404
	F										Grundpreis (PN160) nur 1.4404
	F										Sonderausführung
	FX										Sonderausführung
											Profiltyp
		10									Innendurchmesser: 28 - 125 mm
		22									Innendurchmesser: 80 - 1400 mm
		32									Innendurchmesser: 300 - 2500 mm
		50									Innendurchmesser: 500 -10000 mm
											Innendurchmesser (Zahlenwerte mit Einheit) Preis je 100 mm
											Wandstärke / +Halsverlängerung (Zahlenwert mit Einheit) Preis je 100 mm (bis max. PN64) Preis je 100 mm (PN100/160)
											Sonderwerkstoff für medienberührte Teile (Faktoren)
						S					W.Nr. 1.4404 (316 L)
						41					W.Nr. 1.4541 (nur mit Prozessanschluss "R", "N2" o. "X")
						R					W.Nr. 1.4539 (nur mit Prozessanschluss "R" o. "X")
						H					Hastelloy C22) (nur Prozessanschluss "R" o. "X")
						HT					Inconel 602 (nur mit Prozessanschluss "R" o. "X")
						X					Sonderwerkstoff
											Werkstoff der Montageteile (ohne Gegenlager) PN16/40: Typ10=DN15; Typ22=DN32; Typ32=DN40; Typ50=DN80 PN64/100/160: Typ10=DN25; Typ22=DN40; Typ32=DN40; Typ50=DN80
						C					Flansch, C-Stahl, PN16
						C					Flansch, C-Stahl, PN40
						C					Flansch, C-Stahl, PN64/100
						E					Flansch, 1.4404, PN16
						E					Flansch, 1.4404, PN40
						E					Flansch, 1.4404, PN64/100
						X					Sonderausführung
											Gegenlager
						O					ohne
						SC					Gegenlager mit R1"-Stopfen aus C-Stahl (max. PN40 180°C)
						SC					Gegenlager (Rohrgewinde u. Kappe) aus C-Stahl (max. PN40 180°C)
						SE					Gegenlager (Rohrgewinde u. Kappe) aus 1.4404 (max. PN40 180°C)
						GF					Gegenlager mit Flansch, C-Stahl, PN16
						GF					Gegenlager mit Flansch, C-Stahl, PN40
						GF					Gegenlager mit Flansch, C-Stahl, PN64/100
						GF					Gegenlager mit Flansch, 1.4404, PN16
						GF					Gegenlager mit Flansch, 1.4404, PN40
						GF					Gegenlager mit Flansch, 1.4404, PN64/100
						GG					geschlossenes Gegenlager, C-Stahl, max. PN100
						GG					geschlossenes Gegenlager, 1.4404, max. PN100
						X					Sonderausführung

		Druckstufe (z.B. „PN16“, „CL300“ o.ä.)
		Prozess-/Wirkdruckanschlüsse
	N2	Nippel mit 1/2-14-NPT-Außengewinde
	N4	Nippel mit 1/4-18-NPT-Außengewinde
	R2	Nippel mit R1/2"-Außengewinde
	R4	Nippel mit R1/4"-Außengewinde
	R	Rohrstückchen 12 mm
	S	Schlauchnippel 10,5x1,5mm
	FP	Flanschplatte zum Aufbau eines 3-Wege-Ventilblockes (nur ohne integrierte Temperatureaufnahme)
	FPD	Doppel-Flanschplatte zum Aufbau von zwei 3-Wege-Ventilblöcken (nur ohne integrierte Temperatureaufnahme)
	FPK	Flanschplatte zum Aufbau eines 3-Wege-Ventilblockes jedoch um 90° gedreht, für z.B. eine integrierte Temperatureaufnahme
	FPX	Sonderdirektmontagevorrichtung, für z.B. Umschalhahnmontage
	X	Sonderausführung
		Erstabspernung
	0	ohne
	KE	Kugelhähne PN40 aus 1.4401 (max. 200°C)
	AC1	Absperrventile PN420 DN5, C-Stahl, 1/2" NPT (max. 200°C)
	AE1	Absperrventile PN420 DN5, 1.4404, 1/2" NPT (max. 200°C)
	DE1	3-Wege-Ventilblock, Werkstoff 1.4401 (max. 200°C), Schrauben: Prozesseitig 7/16-UNF kadmiert, messumformerseitig metrisch Edelstahl (nur mit Flanschplatte) wie 'DE1', jedoch Schrauben prozesseitig 7/16-UNF Edelstahl
	DE2	wie 'DE1', jedoch Schrauben prozesseitig 7/16-UNF Edelstahl
	DE3	wie 'DE1', jedoch Schrauben messumformerseitig 7/16-UNF kadmiert
	DE4	wie 'DE2', jedoch Schrauben: messumformerseitig 7/16-UNF Edelstahl
	FE1	5-Wege-Ventilblock, Werkstoff 1.4401 (max. 200°C), Schrauben: Prozesseitig 7/16-UNF kadmiert, messumformerseitig metrisch Edelstahl (nur mit Flanschplatte)
	X	Sonderausführung, siehe ggf. Extrablatt
		Zubehör (Mehrfachauswahl möglich; mit "/" trennen)
	0	ohne
	VC	1 Paar Verschraubungen für Rohranschluss 12 mm, C-Stahl
	VE	1 Paar Verschraubungen für Rohranschluss 12 mm, 1.4404
	UC	Umschalhahn PN100 mit Spülanschluss aus C-Stahl (max. 200°C)
	UE	Umschalhahn PN100 mit Spülanschluss aus 1.4404 (max. 200°C)
	CH	Einseitige Reinigungsöffnungen für Druckluftanschluss (R1/8")
	IH	Inspektions- und Reinigungsöffnungen (nur sinnvoll mit Gegenlager)
	X	Sonderausführung, siehe ggf. Extrablatt
		Rohrleitungsverlauf
	H	Horizontal
	V	Vertikal (auch schräger Verlauf)

Zusammenfassung der allgemeinen Spezifikationsdaten von SDF-Sonden

- Geeignet für die Messung von Gasen, Flüssigkeiten und Wasserdampf
 - Zwei-Kammer-Profil, symmetrischer Aufbau
 - Bidirektionaler Betrieb möglich
 - Inhärente Vortex-Wirbeldämpfung (Karmann'sche Wirbelstraße)
 - Messbereich: abhängig vom kleinsten Differenzdruck; Empfehlung:
 - Gase: kleinster Messbereich $\Delta p_{FS, \min} = 1 \text{ mbar}$
 - Dampf und Flüssigkeiten: kleinster Messbereich $\Delta p_{FS, \min} = 5\text{-}10 \text{ mbar}$
 - Rohrdurchmesser von DN40 bis DN11000
 - Werkstoffe
 - Medienberührte Teile: 1.4404 (Standard). Optional: Hastelloy C22, Inconel 602, Monel, 1.4871, 15 Mo 3, 1.4922/P91/P92 – andere Werkstoffe auf Anfrage
 - Montageteile: P235GH (Standard); Optional: 1.4404, 15/16 Mo 3, 1.7380, 1.4922 – andere Werkstoffe auf Anfrage
 - Temperatur des Mess-Mediums: -180°C bis 1100°C
 - Druckstufen: PN16 (Standard) bis PN420 (3000 lbs); Sonderdrücke auf Anfrage
 - Konformität zu DGRL 2014/68/EU
 - Max. Messabweichung: typ. 1% vom Messwert im spezifizierten Dynamikbereich
 - Dynamik:
 - Max. 1:10 mit einem Messumformer
 - Max. 1:40 im Split-Range-Betrieb (max. Abweichung im Bereich 1:10 kleiner 1% vom Messwert)
 - Anschlüsse:
 - $\frac{1}{2}$ "-14-NPT-m (Standard bei Gasen und Flüssigkeiten)
 - Flanschanschluss für Direktmontage Differenzdruck-Messumformer (Option)
 - Kondensatgefäße mit Schweißanschluss (Standard bei Wasserdampf)
 - Kompaktkopf mit integrierten Kondensatgefäßen (Option bei Wasserdampf)
 - Montage in Rohrleitung: Werkstoffe gemäß Rohrleitungswerkstoff, Bauformen:
 - Anschweißstutzen mit Schneidringverschraubung
 - Montageflansch gemäß Druckstufe
 - Verunreinigung des Messstoffs:
 - Trockener Staub: max. 100 mg/m^3
 - Max. 10 g/m^3 Staub bei Verwendung einer Luftspüleinrichtung LSE-HD (bei höherer Staubbeladung Hersteller konsultieren)
 - Säurehaltige Bestandteile im Messstoff: Werkstoff der medienberührten Teile anpassen
 - Besondere Eigenschaften:
 - Hohe Genauigkeit und exzellente Dynamik
 - Geringe bleibende Druckverluste
 - Geringe Beschaffungs- und Installationskosten
 - Einfache Nachrüstbarkeit
 - Bidirektionaler Betrieb
 - Robustheit und Unempfindlichkeit gegen Verunreinigungen des Messstoffes
-

Häufige Fragen

Das Auswertegerät kann das Durchflussergebnis nur in Abweichung um einen Auslegungspunkt herum errechnen. Wie muss die Übertragungsgleichung unter diesen Umständen aussehen?

Der Betrag des zu ermittelnden Massestroms hängt bei kompressiblen Medien nicht nur von dem gemessenen Differenzdruck ab, sondern auch von Druck und Temperatur, die sich auf die Dichte des Mediums auswirken. Wenn eine Messung ausgelegt wird, dann bestimmt man den Differenzdruck um ein bestimmtes Druck-Temperatur-Wertepaar herum. Weicht das Signal in der Praxis nun von diesem Wertepaar ab, so muss eine Korrektur vorgenommen werden. Diese Korrektur ist relativ kompliziert und sollte im Allgemeinen einem speziellen Prozessrechner überlassen werden. Nur in Messungen mit idealisierten Gasen (also alle Gasmessungen mit nicht zu hohen Drücken), kann die Korrektur vorgenommen werden nach folgenden Formeln:

$$qV_N = \sqrt{\frac{p * T_D * \Delta p}{p_D * T * \Delta p_D}} * qV_{N,D} = \sqrt{\frac{p * T_D}{p_D * T}} * qV_{N,D} * \sqrt{\frac{i_{\Delta p} - 4mA}{16 mA}}$$

Wenn der Differenzdruck-Messumformer bereits radiziert, dann ergibt sich hieraus:

$$qV_N = \sqrt{\frac{p * T_D}{p_D * T}} * qV_{N,D} * \frac{i_{\Delta p} - 4mA}{16 mA}$$

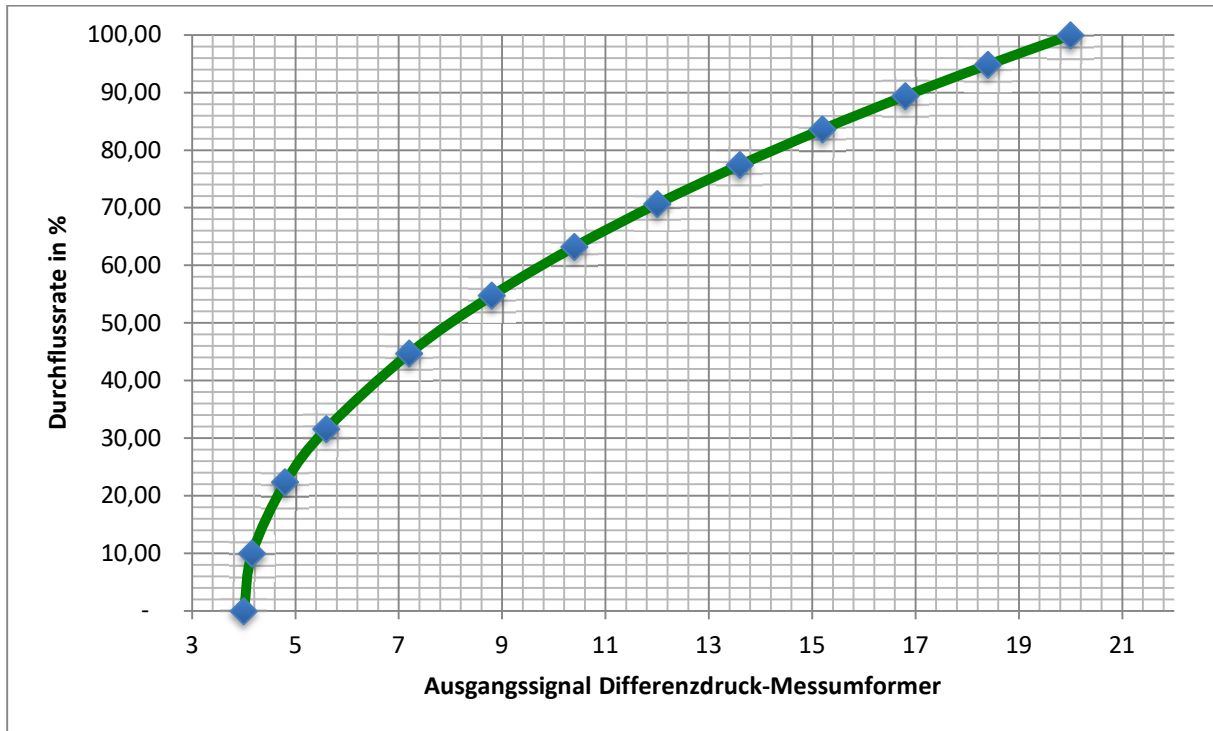
Der Index „D“ steht hier für Auslegungsdaten („Design“), die Werte ohne Index „D“ stehen für aktuell gemessene Betriebswerte. $i_{\Delta p}$ ist der am Differenzdruckmessumformer gemessene Strom.

Wie sieht die Übertragungskurve des Ausgangssignals als Funktion des Massestroms aus?

Die Kurve ergibt sich aus der „Mutter aller Wirkdruckgleichungen“, die eingangs aufgeführt wurde.

$$v = k * \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}}$$

Übertragen auf den Zusammenhang des Stromausgangs eines Differenzdruckmessumformers zur Durchflussrate ergibt sich nachfolgende charakteristische Kennlinie.



Bei Verwendung eines radizierenden Messumformers ist die Übertragungskennlinie natürlich eine Gerade.

S.K.I. Schlegel & Kremer Industrieautomation GmbH

Postfach 41 01 31
D-41241 Mönchengladbach

Hanns-Martin-Schleyer-Str. 22
D-41199 Mönchengladbach

Telefon: +49 (0) 2166/62317-0

Web: www.ski-gmbh.com

E-Mail: info@ski-gmbh.com

Warenzeichen und Logos sind Eigentum ihrer Besitzer
Techn. Änderungen vorbehalten. Abbildungen können Optionen enthalten