

HANDHABUNG NIEDRIGER DURCHFLÜSSE

E-BOOK

Mit Insider-Tipps und
Ratschlägen von unseren
Experten

www.bronkhorst.com

INDEX

Zusammenfassung	3
Warum gibt es dieses E-Book?	3
Worum geht es?	3
Teil Eins / Was sind (extrem) niedrige Durchflüsse?	4
Massendurchfluss und Volumendurchfluss	5
Was ist typisch für niedrige Durchflüsse?	5
Lösungen für die optimale Performance	5
Teil Zwei / Tipps zur Auswahl des richtigen Durchflussmessers	6
Wann sollte man einen thermischen oder Coriolis-Durchflussmesser oder Durchflussregler wählen?	6
Tipps & Tricks	7
Teil Drei / Flüssigkeitszufuhr mit einem Druckbehälter	10
Flüssigkeitszufuhr – ein stabiler niedriger Durchfluss	10
Umgang mit gelöstem Gas	10
Teil Vier / Flüssigkeitszufuhr mit einer Pumpe	19
Warum sollte man eine Pumpe einsetzen?	19
Welcher Pumpentyp ist geeignet?	20
Teil Fünf / Handhabung von äußeren Bedingungen	22
Welchen Einfluss können äußere Bedingungen auf Ihren Durchflussmesser haben?	22
Welche Verrohrung sollte ich verwenden?	24
Druckschläge verhindern durch Vermeidung plötzlich wechselnder Leitungsdurchmesser	24
Umgang mit Vibrationen	24
Nutzen der Kalibrierung	24
Verwendung von Partikelfiltern, um Verstopfungen zu verhindern	24

ZUSAMMENFASSUNG

Warum gibt es dieses E-Book?

Was haben Mikroreaktoren, Katalysatorforschung und Aromendosierung gemeinsam? Nun, sie alle erfordern den Umgang mit **geringen Flüssigkeitsströmen**. In der Welt der Durchflussregelung und Durchflussmessung unterscheiden wir zwischen „niedrigen Durchflüssen“ und „hohen Durchflüssen“. Aber was bedeutet das eigentlich? Bronkhorst High-Tech ist ein renommierter Lieferant von Durchflussmessern und Durchflussreglern im Bereich „Low Flow“. Es ist also an der Zeit zu erklären, was wir meinen, wenn wir von „niedrigem Flüssigkeitsdurchfluss“ sprechen.

Dieses E-Book ist eine Zusammenfassung unserer Blogserie „Handhabung niedriger Durchflüsse“, ergänzt durch ausführliche Informationen, technische Ratschläge und Insider-Tipps von unseren Experten.

Worum geht es?

Wir haben dieses E-Book mit Empfehlungen für Anwendungen mit niedrigem Durchfluss zusammengestellt, wobei der Schwerpunkt auf niedrigem Flüssigkeitsdurchfluss (**< 100 g/h**) liegt. Neben der Definition von geringen Durchflüssen und Tipps zur Auswahl von Durchflussmessern enthält dieses E-Book auch Ratschläge zu Systemauslegung, Anschlussmaterial und Flüssigkeitsversorgungssystemen. Da die Durchflusskonfigurationen und Prozessbedingungen bei verschiedenen Anwendungen selten gleich sind, gibt es keine Patentlösung. Um die beste Beratung zu bieten, muss man die Kundenanwendung genau kennen.

Dieses E-Book wurde in Zusammenarbeit mit mehreren Bronkhorst-Kollegen aus verschiedenen Abteilungen verfasst: Produktmanagement, Schulung, Außendiensttechnik, Kalibrierung und F&E. Sie alle haben dazu beigetragen, dass dieses E-Book ein nützliches und wertvolles Dokument ist, das Sie als Nachschlagewerk verwenden können.

Viel Spaß beim Lesen.

TEIL EINS

Was sind (extrem) niedrige Durchflüsse?

Die Definition von „niedrig“ ist ungenau und branchenabhängig. In der industriellen Produktion gelten Durchflüsse weit unter 500 kg/h als niedrig, aber in der Forschung wird der Begriff auf Durchflüsse angewendet, die unter 100 g/h liegen. In diesem E-Book konzentrieren wir uns auf die Handhabung – d.h. Messung sowie Regelung – von Durchflussmengen bis zu 100 g/h. Ferner werden auch extrem niedrige Durchflüsse berücksichtigt, die im Bereich < 5 g/h liegen.

Um Ihnen eine Vorstellung davon zu geben, wie wenig 100 g/h bzw. 5 g/h ist, betrachten wir einen Wassertropfen. Wenn ein Wassertropfen einen durchschnittlichen Durchmesser von einem halben Zentimeter hat, entsprechen 100 Gramm pro Stunde etwa 2.000 Wassertropfen pro Stunde, was in der Tat sehr niedrig ist. Und 100 Wassertropfen entsprechen 5 Gramm innerhalb einer Stunde. Exakte Instrumente zur Messung und Regelung niedriger Durchflüsse haben ihre Nützlichkeit für viele verschiedene Anwendungszwecke bewiesen. Hier sind ein paar Beispiele:

- Die Zufuhr von 100 g/h Spezialöl als Schmiermittel wird beim Bohren von Löchern bei der Herstellung von Flugzeugrumpfteilen überwacht. Lesen Sie den Applikationsbericht: [Schmiermitteldosierung bei der Flugzeugfertigung](#).
- Ein ultraniedriger Flüssigethanolstrom von 2 g/h wird verdampft, um einen stabilen Ethanol dampfstrom als Kohlenstoffquelle für die Herstellung von hochwertigem Graphen zu erzeugen.

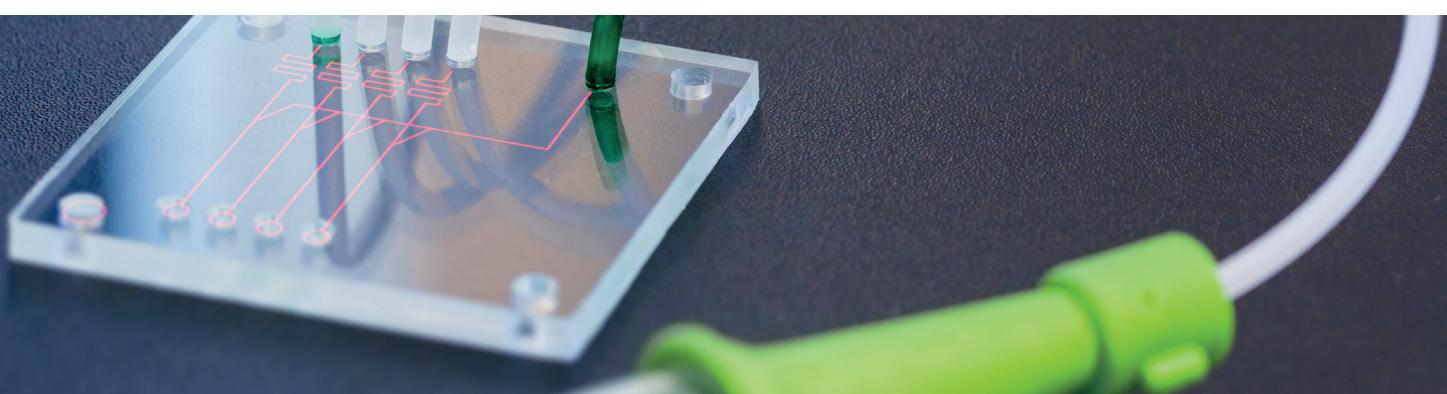
Lesen Sie den Applikationsbericht: [Untersuchung zur Graphenherstellung](#).

• Viele wirtschaftlich relevante katalytische Prozesse laufen bei hohen Drücken und hohen Temperaturen ab. Für die Katalyseforschung müssen (sehr) geringe Durchflüsse verschiedener Kohlenwasserstoffe stabil und pulsationsfrei dosiert werden. Lesen Sie den Applikationsbericht: [Katalyse bei hohem Druck](#).

• Labs-on-Chips und andere mikrofluidische Systeme, die in Pharmazie und Biotechnologie eingesetzt werden, reduzieren den Einsatz von Chemikalien und die Versuchszeiten im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren erheblich. Lesen Sie den Applikationsbericht: [Durchflussmessung in der Mikrofluidik](#).

• Der typische Geruch von Erd- oder Biogas entsteht durch einen „Warnstoff“, der dem Gas nachträglich durch Injektion einer geringen, aber beständigen Flüssigkeitsmenge hinzugefügt wird. Lesen Sie den Applikationsbericht: [Odorierung von Erdgas](#).

In all diesen Fällen ist die Messung oder Dosierung der richtigen Flüssigkeitsmenge - nicht zu viel und nicht zu wenig - entscheidend für die Performance des betreffenden Prozesses.





Massendurchfluss und Volumendurchfluss

Im vorherigen Absatz wurde der Durchfluss in **Masseeinheiten** wie g/h oder mg/s dargestellt. Aber viele Anwender denken in und arbeiten mit **Volumeneinheiten**, insbesondere bei Gasen ist das viel leichter für unsere Vorstellungskraft. Das ist kein Problem, solange wir über dieselben Referenzbedingungen sprechen.

Blog ["Referenzbedingungen in der Durchflussmessung – warum eigentlich?"](#)

Was ist typisch für niedrige Durchflüsse?

Wie unterscheidet sich ein geringer Durchfluss von unter 100 g/h von einem „normalen“ oder hohen Durchfluss? Anwendungen für (extrem) geringe Durchflüsse zeichnen sich durch bestimmte Phänomene aus, die im Zusammenhang mit größeren Durchflüssen nicht auftreten oder irrelevant sind. Aufgrund der (äußerst) geringen Flüssigkeitsmenge, die bewegt wird, sind (extrem) geringe Durchflüsse so empfindlich, dass schon minimale Störungen des Prozesses oder der Umgebungsbedingungen erhebliche Auswirkungen auf die Durchflussstabilität haben können. Entscheidend sind also der Einfluss der äußeren Bedingungen und die Mittel, mit denen diese äußeren Bedingungen gesteuert werden können.

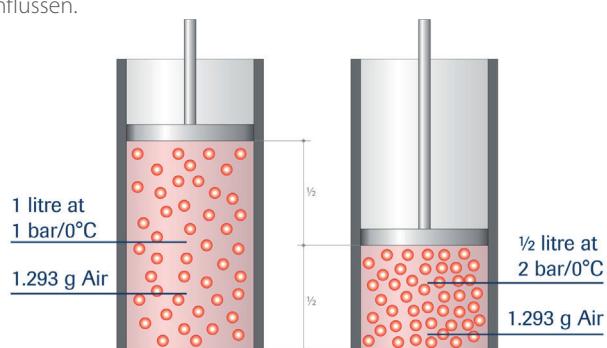
Zum Beispiel haben bereits kleine Leckagen, bei denen Flüssigkeiten oder Gase in den Prozess gelangen oder aus dem Prozess austreten, erheblichen Einfluss auf den gewünschten Durchfluss. Ferner ist zu berücksichtigen, dass Behinderungen durch feste Partikel oder Verunreinigungen der kleinen Durchflussleitungen den Durchfluss ungewollt stören. Insbesondere bei der Dosierung geringer Durchflüsse führen instabile Druckwerte zu instabilen Durchflüssen. Abweichungen beim Vordruck, Pulsation aufgrund zu großer Pumpenhubvolumen im Vergleich zur Durchflussmenge und Auflösung von Gasen (Druckluft) beim Unterdrucksetzen der zu dosierenden Flüssigkeit führen zu instabilen Durchflüssen.

Kenntnisse der Anwendung sowie der physische Transport im Rahmen des Prozesses sind für komplexe Vorgänge wie die Handhabung geringer Durchflüsse entscheidend. Die Optimierung der Durchflussstabilität und die Leistung von Flüssigkeitssystemen erfordern umfassende Kenntnisse der Eigenschaften von Flüssigkeiten und Systemkomponenten unter vielen verschiedenen Bedingungen. Jede Komponente, die in einem Flüssigkeitssystem zum Einsatz kommt, kann das Verhalten einer Flüssigkeit beeinflussen oder mit anderen Komponenten interagieren, insbesondere bei niedrigen Durchflüssen.

Lösungen für die optimale Performance

Das Sortiment von Bronkhorst bietet mit den auf thermischen Messprinzipien basierenden [u-FLOW](#) und [LIQUI-FLOW](#) Massendurchflussmessern und -reglern sowie den Coriolis-basierten [mini CORI-FLOW ML120](#) und [mini CORI-FLOW M12](#) Geräten Lösungen, die insbesondere für Anwendungen mit (extrem) geringen Durchflüssen geeignet sind. Ein Massendurchflussmesser beinhaltet einen Sensor, der nur die Durchflussmenge des Mediums misst, während ein Massendurchflussregler zusätzlich zu diesem Sensor ein Regelventil enthält, um die Durchflussmenge des Mediums zu regeln. Hier erfahren Sie mehr zur „[Massendurchflussreglertheorie](#)“.

Durchflussregler werden üblicherweise eingesetzt, um einen stabilen Durchfluss zu garantieren. Allerdings ist für eine optimale Leistung wesentlich mehr als nur ein ausgezeichneter Durchflussregler nötig. Unter anderem müssen Sie sich davon überzeugen, dass das System keine Leckagen aufweist, und Leitungen verwenden, die für kleine Durchflussmengen geeignet sind. Ferner dürfen Sie in Druckluftbehältern kein Gas verwenden, das sich in Flüssigkeit auflöst, oder Sie müssen versuchen, das gelöste Gas vor dem Eintritt der Flüssigkeit in den Durchflussmesser zu entfernen. Im Folgenden befassen wir uns genauer mit diesen und anderen Themen und geben praktische Tipps zur Auswahl des richtigen Geräts für geringe Durchflüsse.



TEIL ZWEI

Tipps zur Auswahl des richtigen Durchflussmessers

Im ersten Teil haben wir darüber berichtet, dass bei (extrem) niedrigen Durchflüssen schon minimale Prozessstörungen oder schwankende Umgebungsbedingungen erhebliche Auswirkungen auf die Durchflusstabilität haben können.

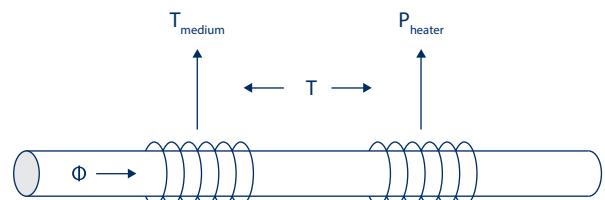
Im zweiten Teil möchten wir Anwendern von Flüssigkeitssystemen mit niedrigen Durchflüssen dabei unterstützen, die Stabilität und Leistung ihres Systems zu optimieren.

Das Kernstück eines Flüssigkeitssystems mit einem niedrigen Durchfluss ist zweifellos der Flüssigkeitsmesser/-regler. Die Entscheidung, welcher Instrumententyp für eine Anwendung mit niedrigem Durchfluss am besten geeignet ist, hängt von den Anforderungen an die **Präzision** und **Stabilität** ab. Schwankende Umgebungsbedingungen oder spezifische Anforderungen des Mediums, die nur schwer zu steuern sind, können ebenfalls eine bedeutende Rolle bei der Auswahl des besten Instrumentes spielen.

Wann sollte man einen thermischen oder Coriolis-Durchflussmesser oder Durchflussregler wählen?

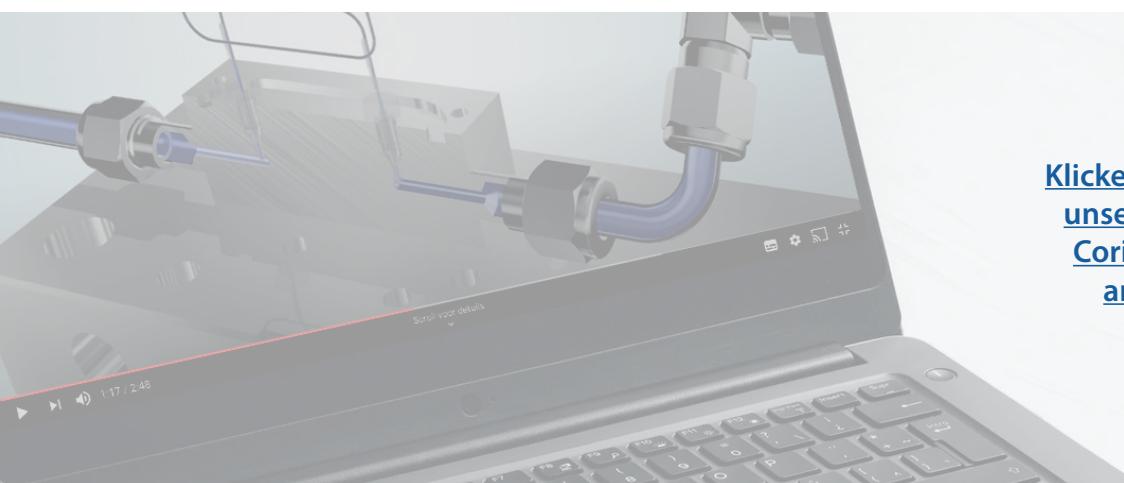
Das Produktsortiment von Bronkhorst umfasst verschiedene thermische Durchflussmesser sowie Coriolis-Durchflussgeräte, die speziell für Anwendungen mit (extrem) niedrigen Durchflüssen vorgesehen sind. Durch die unterschiedlichen Funktionsprinzipien thermischer Durchflussmesser und der Coriolis-Instrumente sind diese für unterschiedliche Anwendungen, Anforderungen und Bedingungen geeignet.

Bei einem **thermischen Massendurchflussgerät** wird ein konstanter Temperaturunterschied zwischen zwei Positionen entlang eines (Kapillar-)Röhrchens erzeugt. Wenn eine Flüssigkeit durch dieses Röhrchen fließt, ist die Leistung zur Aufrechterhaltung des Temperaturunterschieds proportional zur Massendurchflussmenge. Lesen Sie mehr über das [Funktionsprinzip thermischer Massendurchflussmesser](#).



Das **Coriolis-Messprinzip** basiert darauf, dass der Sensor, durch den das Medium fließt, konstant schwingt. Das durchfließende Medium bewirkt eine Änderung der Auslenkung in Abhängigkeit von der Masse. Diese Änderung der Auslenkung ermöglicht so eine direkte Messung des Massendurchflusses durch das Röhrchen. Hinzu kommt, dass die daraus resultierende Änderung der Schwingungsfrequenz des (gefüllten) Röhrchens proportional zur Dichte des Mediums steht.

Lesen Sie mehr über das [Coriolis-Massendurchflussmessprinzip](#).



[Klicken Sie hier, um unser Video zum Coriolis-Prinzip anzusehen](#)



Im Allgemeinen kann man sagen, dass ein Coriolis-Durchflussmesser/Durchflussregler ...

- in Situationen, in denen absolute Präzision und Durchflusstabilität eine entscheidende Rolle spielen, gute Ergebnisse erzielt;
- langfristige Stabilität sowie eine geringfügige thermische Empfindlichkeit aufweist;
- eine gute Wahl ist, wenn zusätzlich zum Durchfluss auch die Dichte des Mediums gemessen oder überwacht werden muss;
- für Flüssigkeitsgemische mit unbekannten Eigenschaften geeignet ist (d. h. medienunabhängig);
- eine leichte Empfänglichkeit für Schwingungen um die Resonanzfrequenz herum aufweist, welche den Einsatz von Dämpfungsmaßnahmen erfordern.

Dem steht gegenüber, dass ein thermischer Durchflussmesser/Durchflussregler ...

- aus wirtschaftlicher Sicht günstiger ist, wenn die zu messenden oder regelnden Flüssigkeiten keiner Schwankungen der Temperatur unterliegen und die Grenzflächenthermodynamik hinreichend bekannt ist.
- gute Ergebnisse erzielt, wenn die Reproduzierbarkeit wichtiger ist als die Präzision;
- eine Spezifikation der Dichte, Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität erfordert;
- im Allgemeinen nur einen relativ leichten Druckabfall verursacht, was dazu beitragen kann, den Durchfluss auch dann stabil zu halten, wenn die Flüssigkeit eine geraume Menge gelöster Gase enthält.

Tipps und Tricks

Angesichts der oben genannten Aspekte können die folgenden Tipps im Hinblick auf niedrige Durchflüsse hilfreich sein:

Tipp 1: Wählen Sie einen Durchflussmesser oder -regler aus, der für Ihren Prozess und Umgebungsbedingungen geeignet ist

Auf der Webseite von Bronkhorst finden Sie ein Tool für die Produktauswahl, das Ihnen dabei hilft, auf der Grundlage bestimmter Parameter wie der maximalen Durchflussrate (Masse oder Volumen), dem Betriebsdruck und der Betriebstemperatur den richtigen [Flüssigkeitsdurchflussmesser oder -regler](#) für niedrige Durchflüsse auszuwählen.

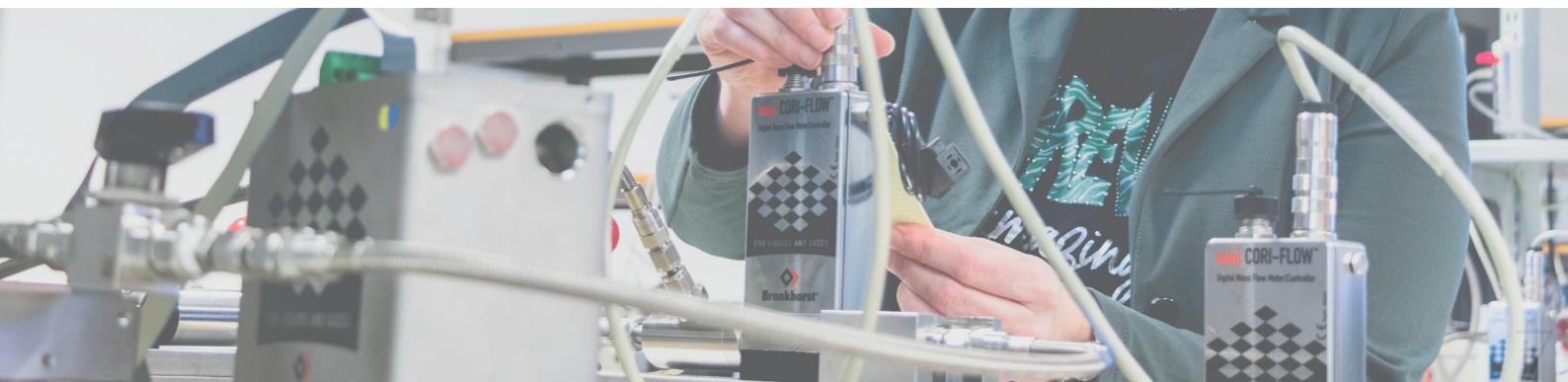
Thermische Instrumente wie die [μ-FLOW](#) und [LIQUI-FLOW](#)-Geräte können Flüssigkeiten bis zu 2 g/h bzw. 0,25 bis 5 g/h im niedrigsten Bereich steuern. Die Coriolis-Massendurchflussmesser [mini CORI-FLOW ML120](#) haben eine maximale Durchflussrate von 200 g/h, können aber auch auf einfache Weise bis auf eine minimale Durchflussrate von 5 g/h reduziert werden, ohne an relativer Genauigkeit einzubüßen. Eine Mindestdurchflussrate von 50 mg/h ist ebenfalls möglich.

Tipp 2: Sorgen Sie für einen stabilen (Eingangs-)Druck im Flüssigkeitssystem

Ein hoher stabiler Eingangsdruck ist bei Durchflussreglern eine wichtige Voraussetzung, um bei niedrigen Durchflüssen eine stabile Durchflussrate zu gewährleisten. Um dies zu erreichen, stehen zwei gängige Methoden zur Auswahl: der Einsatz eines Druckbehälters, in dem die Flüssigkeit mit Gas unter Druck gesetzt wird, oder eine Pumpe. In Teil 3 und 4 dieses E-Books erhalten Sie dazu weitere Hintergrundinformationen.

Tipp 3: Bei Einsatz eines Druckbehälters sollte der Einschluss bzw. die Löslichkeit des verwendeten Gases in der Flüssigkeit auf ein Mindestmaß reduziert werden

Lufteinschlüsse oder andere Gasbläschen, die in der Flüssigkeit aufgelöst sind oder mit dem Durchfluss einhergehen, haben einen negativen Einfluss auf die Durchflusstabilität.





Daher gilt: Wenn Gas eingesetzt wird, um die Flüssigkeit unter Druck zu setzen, sollte durch Verwendung einer Membran verhindert werden, dass das Gas direkt mit der Flüssigkeit in Kontakt kommt.

Alternativ dazu kann – wenn das Gas dennoch direkt mit der Flüssigkeit in Kontakt kommt – ein Gas mit einer geringen Löslichkeit verwendet werden, um die Flüssigkeit unter Druck zu setzen, wie beispielsweise Helium oder Stickstoff. Auf die Flüssigkeit sollte möglichst wenig Druck ausgeübt werden. Daneben sollten Druckabfälle im gesamten Flüssigkeitssystem auf ein Mindestmaß begrenzt werden. Dies hängt selbstverständlich auch vom Arbeitsdruck der Anwendung ab. Als letzte Maßnahme kann ein Entgaser eingesetzt werden (siehe Teil 3), um die Flüssigkeit vom gelösten Gas zu befreien.

Tipp 4: Für die präzise Steuerung niedriger Durchflüsse ist ein Piezoventil gut geeignet

Die kurze Ansprechzeit, das geringe Innenvolumen und die niedrige Wärmeerzeugung von Piezoventilen sind insbesondere dann von Vorteil, wenn mit Gas gearbeitet wird, um Flüssigkeiten unter Druck zu setzen. Für einen Betriebsdruck von über 5 bar sind Magnetventile eine gute Alternative. Das Messgerät des Durchflussreglers sollte vorzugsweise zwischen dem Ventil und dem Prozess installiert werden.

Vertiefenden informationen

Piezoventil oder
Magnetventil?

Piezoventil

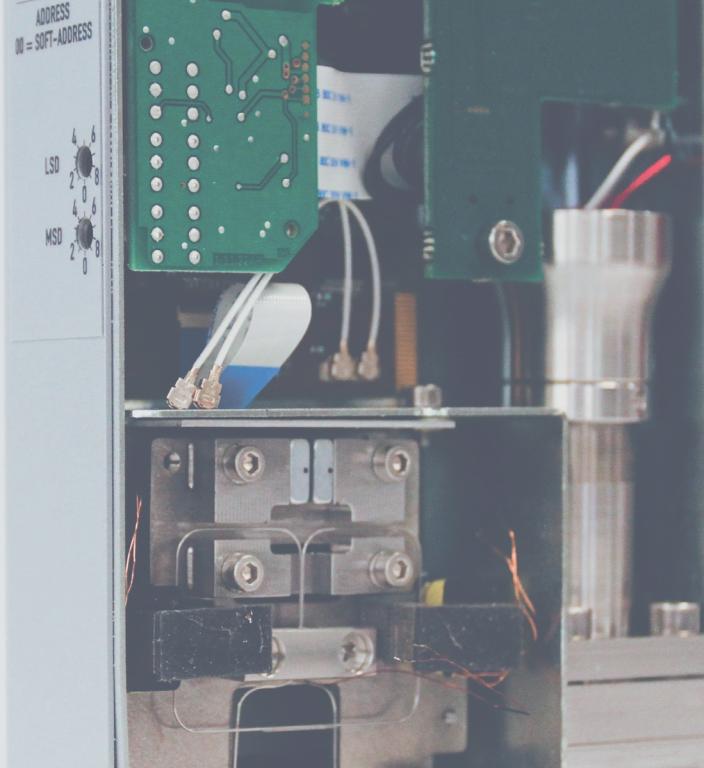
Wenn es um die hochgenaue Regelung kleiner Durchflussmengen geht, ist ein Piezoventil die beste Wahl. Es hat eine schnelle Reaktionszeit und ist sehr präzise, zwei wesentliche Eigenschaften für eine optimale Regelbarkeit des Prozesses.

- *Im Vergleich zu herkömmlichen Magnetventilen hat das Piezoventil fast kein Totvolumen und keine Wärmeentwicklung. Piezoventile sind im Allgemeinen auf einen Betriebsdruck von 5 bar beschränkt und haben eine begrenzte Schutzaart (IP).*
- *Ein weiterer Nachteil eines Piezoventils können seine höheren Kosten sein.*

Magnetventil

Die Magnetventile haben einige Eigenschaften, die je nach Anwendung berücksichtigt werden müssen.

- *Das Regelverhalten eines Magnetventils kann sich aufgrund von eingeschlossenen Gasblasen in den internen (toten) Volumina verschlechtern.*
- *Ein Magnetventil erzeugt Wärme, die die Flüssigkeit ausdehnen kann, sodass die Flüssigkeit mit einem höheren Volumenstrom aus dem Ventil austritt als sie eintritt.*
- *Ein Temperaturanstieg kann zu einer Entgasung der Flüssigkeit führen, wodurch der Durchfluss destabilisiert wird. Die Konstruktion eines Magnetventils weist im Vergleich zum Piezoventil ein etwas größeres Innenvolumen auf, dies hat Einfluss auf das Risiko von Gaseinschlüssen.*



Tipp 5: Das Innenvolumen zwischen Durchflussregler und dem Verfahren sollte möglichst gering sein

Auf diese Weise können Füllzeiten minimiert und externe Störungen begrenzt werden. Daher gilt:

- Die Röhrchen innerhalb des Flüssigkeitssystems sollten möglichst kurz sein und einen geringen Durchmesser haben.
- Feste Rohre, beispielsweise aus Edelstahl, sind gegenüber flexiblen Schläuchen zu bevorzugen.
- Totvolumen in Schleifen und Ventilen, wo Lufteinschlüsse auftreten, sollten nach Möglichkeit vermieden werden. Die Geräte der Baureihen μ-FLOW und mini CORI-FLOW ML120 verfügen jeweils über durchgängige Kapillare mit einem begrenzten Totvolumen.

Lesen Sie mehr über die Bedeutung der richtigen Rohrlänge in unserem Blog '[Warum ist die Verrohrung so wichtig beim Einsatz thermischer Massendurchflussmesser und -regler?](#)'.

Tipp 6: Das System sollte vor dem Betrieb gesäubert werden

Dies ist besonders wichtig bei Skids. Schließen Sie zuerst alle Instrumente an und säubern Sie, bevor Sie mit Messung bzw. Regelung der Flüssigkeit beginnen. Zu diesem Zweck verfügen die Skids von Bronkhorst über eine Reinigungsfunktion.



Insider-Tipp

Wie geht man mit dem Druckabfall von Ventilen um?

Ein unvermeidlicher Nebeneffekt bei der Verwendung jeder Art von Regelventil ist der relativ hohe Druckabfall. Obwohl der absolute Druckabfall in einem Piezoventil begrenzt ist (aufgrund seiner begrenzten Druckstufe), kann der niedrigere Druck nach dem Ventil dennoch dazu führen, dass sich gelöstes Gas dekomprimiert, ausgast und den Durchfluss destabilisiert.

Andererseits sollte ein Regelventil im Fluidsystem immer den höchsten Druckabfall aller Komponenten aufweisen, da sonst seine Regelfunktion beeinträchtigt werden kann. Berücksichtigen Sie dies insbesondere bei der Auswahl von Komponenten wie Ventilen, Filtern und Leitungen. Anstelle eines Regelventils kann auch eine Pumpe eine Alternative sein, um die Durchflussmenge zu regeln. Lesen Sie mehr über Setups mit Pumpen in Teil 4 dieses E-Books.

TEIL DREI

Flüssigkeitszufuhr mit einem Druckbehälter

Flüssigkeitszufuhr – ein stabiler niedriger Durchfluss.
Wie wir im bereits bei den Tipps zur Auswahl eines geeigneten Durchflussmessers oder -reglers schon gezeigt haben, wird für einen Durchflussregler ein stabiler Eingangsdruck benötigt, um eine stabile, niedrige Durchflussrate zu erzielen. Während Gas ein kompressibles Medium darstellt, ist eine Flüssigkeit eher unelastisch. Obwohl Durchflussregler von Bronkhorst in der Lage sind, Druckschwankungen in einem gewissen Umfang auszugleichen, können rasche Änderungen des Eingangsdrucks den Durchfluss verändern.

Im Allgemeinen gibt es zwei Verfahren, die sich dazu eignen, einen stabilen Eingangsdruck für das Flüssigkeitssystem zu gewährleisten: entweder die Verwendung eines **Druckbehälters** mit Gasbeaufschlagung, um die Flüssigkeit unter Druck zu setzen, oder die Verwendung einer **Pumpe**. Für welche Option Sie sich entscheiden, ist eine praktische Entscheidung, die vom System-Setup des Kunden abhängt.

Druckbehälter

Ein Druckbehälter ist eine einfache Möglichkeit, für die weder Strom noch bewegliche Teile benötigt werden. Außerdem ist sie bei leicht flüchtigen Flüssigkeiten von Vorteil. Das Problem besteht allerdings darin, dass sich Gas in einer Flüssigkeit lösen kann und damit negativ auf die Durchflusstabilität wirkt.

Pumpe

Der Vorteil einer Pumpe besteht darin, dass kein Gaspolster für den Druckaufbau benötigt wird, also Gas und Flüssigkeit im Grunde nicht in Kontakt miteinander kommen. Das bedeutet, dass kein Gas in die Flüssigkeit diffundieren kann. Außerdem können Pumpen kontinuierlich betrieben werden. Weiterhin ist allerdings damit zu rechnen, dass Pumpen aufgrund ihrer beweglichen Teile einem gewissen Verschleiß unterliegen und somit oft teurer als Druckbehälter sind.

Das gesamte Setup der Förderung / Druckerhöhung von Flüssigkeiten sind unter verschiedenen Aspekten zu betrachten und als System auszulegen. Im Forschungslabor kann zur Druckerzeugung Helium eingesetzt werden, während in einer Produktionsumgebung eine andere – oft pumpenregulierte – Lösung gefunden werden muss. In Kapitel 4 erfahren Sie mehr über die Verwendung einer Pumpe zur Gewährleistung eines stabilen Eingangsdrucks.

Umgang mit gelöstem Gas

Eine große Herausforderung bei der Verwendung eines Druckbehälters ist es, den Anteil des gelösten Gases in der Prozessflüssigkeit auf ein Minimum zu beschränken. Je kleiner die austauschende Grenzfläche und je kürzer die Verweilzeit zwischen Gas und Flüssigkeit, desto besser. Das Henry-Gesetz besagt, dass die Menge des in einer Flüssigkeit gelösten Gases proportional zum Druck des Gases steht, das sich in direktem Kontakt mit der Flüssigkeit befindet. Das hat in mehrerlei Hinsicht konkrete Auswirkungen. Das bei der Druckbeaufschlagung verwendete Gas, das sich in der Flüssigkeit gelöst hat, wird bei Absenken des Druckes im weiteren Verlauf des Prozesses in Form von Gasblasen wieder freigesetzt. Dieser Effekt ist in der Regel nicht erwünscht. Die Löslichkeit eines Gases sinkt in einer Flüssigkeit, während die Temperatur steigt. Ein Temperaturanstieg der Prozessflüssigkeit führt also ebenfalls dazu, dass Gasblasen freigesetzt werden. Hinzu kommt, dass die Flüssigkeit selbst je nach Lage des thermodynamischen Gleichgewichtes eine Dampfphase bildet.

Prinzipiell wird empfohlen, dass Veränderungen des Drucks und der Temperatur im Verlauf der Flüssigkeitsförderung so gering wie möglich bleiben.



Tipp 1: Verwendung eines Druckbehälters

Wenn Gas verwendet wird, um die Flüssigkeit unter Druck zu setzen, empfehlen wir prinzipiell zu verhindern, dass das Gas in direkten Kontakt mit der Flüssigkeit kommt. Sie sollten zum Beispiel einen Druckbehälter mit einer Membran verwenden, die die Flüssigkeit physisch vom Druckgas trennt – das ist vergleichbar mit einem Ausgleichsbehälter in Ihrer Zentralheizung Zuhause.



Expertenrat

Wie groß sollte der Flüssigkeitsbehälter sein?

Der Flüssigkeitsbehälter sollte groß genug sein, um einen stabilen Durchfluss für eine ausreichende Zeitspanne zwischen den Nachfüllungen zu gewährleisten. Das Spülen oder Entleeren des Flüssigkeitssystems kann eine relativ große Menge an Flüssigkeit verbrauchen; berücksichtigen Sie dies bei der Wahl der geeigneten Behältergröße. Die nachstehende Tabelle gibt einen Hinweis auf den Flüssigkeitsverbrauch bei verschiedenen Durchflussraten:

Durchflussrate		Flüssigkeits-verbrauch	
g/h	mg/min	g/Arbeitswoche 40 Stunden	g/Woche 24 x 7 Stunden
0.1	1.6	4	16.8
1	16	40	168
10	160	400	1680
100	1600	4000	16800

Insider-Tipp: Befüllen und Entleeren eines Behälters

Ein transparenter Schlauch neben dem Flüssigkeitsbehälter kann den Flüssigkeitsstand im Inneren optisch anzeigen. Beachten Sie jedoch, dass Kunststoffschläuche den maximalen Betriebsdruck der gesamten Anwendung begrenzen.

Ein aus einem Stück gefertigter Behälter hat normalerweise Öffnungen an beiden Enden (Einlass/Auslass). Der Einlass dient beim Befüllen des Behälters auch als Luftablass. Aus Sicherheitsgründen wird die Verwendung eines Einfülltrichters am Einlass des Behälters dringend empfohlen, um ein Verspritzen und Verschütten von Flüssigkeit infolge von Gasblasen, die aus dem Einlass austreten, zu verhindern.

Das Anbringen einer Entleerungsvorrichtung am Auslass des Flüssigkeitsbehälters bietet die Möglichkeit zum Spülen und Entleeren. Beachten Sie, dass es aufgrund des geringen Durchmessers des Ein- und Auslasses erforderlich sein kann, den Einlass des Behälters zu öffnen, um eine Entleerung zu ermöglichen.





Tipp 2: Verwendung von Gasen mit niedriger Löslichkeit

Es gibt aber auch Lösungen für den Fall, dass es notwendig oder unvermeidlich sein sollte, dass Druckgas in direkten Kontakt mit der Flüssigkeit kommt. Dafür können Sie zum Beispiel Gase mit niedriger Löslichkeit verwenden. Helium ist in der Regel die beste Wahl für wasserbasierte Flüssigkeiten; an zweiter Stelle folgt Stickstoff. Nach Möglichkeit sollte so wenig Druck wie möglich auf die Flüssigkeit ausgeübt werden. Dies hängt selbstverständlich auch vom Arbeitsdruck des Systems ab. In diesem Zusammenhang kann es hilfreich sein, den Flüssigkeitsbehälter wesentlich höher als den Durchflussregler zu positionieren, um sich die Schwerkraft zunutze zu machen und so auf einen niedrigeren Gasdruck zu kommen.

Tipp 3: Verwendung eines Degassers (Entgaser)

Als letzte Maßnahme kann ein Degasser eingesetzt werden, um die Gaskonzentration in der Flüssigkeit zu senken. Ein Degasser besteht im Wesentlichen aus einem permeablen Schlauch, der von außen unter Vakuum gesetzt wird. Durch das Druckgefälle zwischen Flüssigkeit und angelegtem Vakuum diffundiert das in der Flüssigkeit gelöste Gas durch die Poren des

Schlauches aus der Flüssigkeit. Standarddegasser lassen sich gut mit wasserähnlichen Medien verwenden. Für niedrige Durchflussmengen **unter 50 g/h** und je nach Typ der Anwendung empfehlen wir die Verwendung eines Degassers, wenn **Stabilität** und **maximale Genauigkeit** entscheidend sind und Störungen durch Gasblasen eliminiert werden müssen. Ein Degasser gilt allgemein als kostenintensiv, aber wenn Sie ein High-End-System aufbauen wollen, ist dies eine der besten Lösungsmöglichkeiten.

Tipp 4: Druckminderer oder Puffervolumen

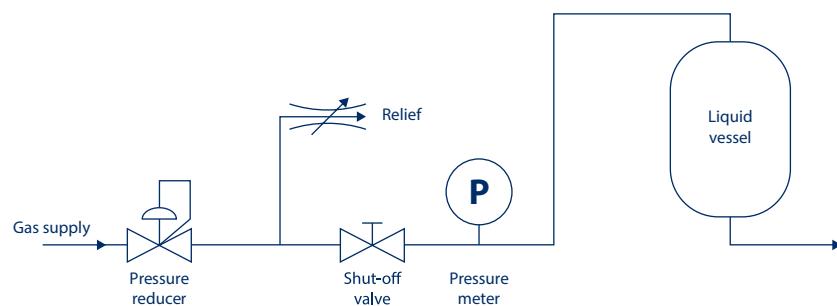
Wenn der Durchflussregler die Eingangsdruckschwankungen des zuführenden Systems nicht kompensieren kann, weil sie zum Beispiel zu schnell aufeinander folgen, gibt es auch für dieses Problem Lösungen. Ein Druckminderer oder ein Puffervolumen zwischen dem Druckregler und dem Flüssigkeitsbehälter kann diese Schwankungen ausgleichen und einen stabilen Eingangsdruck gewährleisten.



Insider-Tipp

Enbau einer Druckentlastung

Um einen stabilen nachgeschalteten Flüssigkeitsstrom aufrechtzuerhalten, sollte der Eingangsdruck in den Flüssigkeitsbehälter über einen längeren Zeitraum hinweg stabil sein. Dies kann durch die Installation eines Druckminderers in der Gaszuführleitung des Flüssigkeitsbehälters erreicht werden. Eine Druckentlastung nach dem Druckminderer hilft bei der Kontrolle des Gasdrucks.





Tipp 5: Umgang mit Korrosion

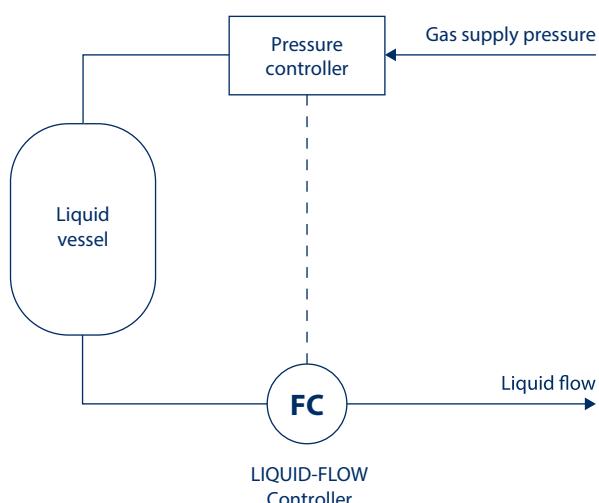
Zur Verwendung von wasserbasierten Medien empfiehlt Bronkhorst einen einteiligen Behälter aus passiviertem Edelstahl, um Korrosion insbesondere an Schweißnähten zu verhindern. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass bei sauren, wässrigen Lösungen keine Chlorid-Ionen vorhanden sind. Wenn organische Lösemittel wie Methanol, Toluol oder Aceton verwendet werden, stellt sich das Problem der Korrosion von Schweißnähten eines Behälters in der Regel nicht. Da die Flüssigkeitsregelung mit einem Druckbehälter üblicherweise im Batchverfahren erfolgt, sollten Sie sich vergewissern, dass der Behälter groß genug ist, um einen stabilen Durchfluss für einen ausreichenden Zeitraum zwischen den Wiederbefüllungen zu gewährleisten. Um Spritzer und Verschütten beim Befüllen zu vermeiden, sollten Sie am Eingang einen Einfülltrichter verwenden.



Extra-Tipp

Minimierung des Gasdrucks durch indirekte Rückführung

Der Gasdruck für Druckbehälter wird üblicherweise auf einen festen Wert eingestellt. Dieser Wert wird für die Anwendung bestimmt oder berechnet und ist in der Regel höher eingestellt, um den Druckverlust aufgrund des Flüssigkeitsverbrauchs auszugleichen. Eine indirekte Rückkopplung gibt Ihnen die Möglichkeit, den Gasdruck zu minimieren und den Durchfluss entsprechend zu regeln. Dies kann durch Hinzufügen eines Druckreglers erreicht werden. Dieses Beispiel zeigt einen Flüssigkeitsdurchflussregler, der ein Regelsignal an ein Druckregelgerät (Druckregler) liefert. Der Druck, der zur Regelung von 1 g/h Wasser benötigt wird, liegt etwa 2 mbar über dem Ausgangsdruck (basierend auf einem μ -Durchflusssensor). Der Druckregler muss in der Lage sein, niedrige Drücke von 1-100 mbar über dem Atmosphärendruck zu regeln.



Bei Verwendung einer indirekten Rückkopplung ist die im Wasser gelöste Luft bis zu 1500-mal geringer als bei einem Drucktank mit 4 bar(a). Der Druckregler passt den Eingangsdruck sofort an, um den erforderlichen Durchfluss zu erreichen.

Die [Druckmessgeräte](#) von Bronkhorst können in verschiedenen Konfigurationen eingesetzt werden, um diese Methode der Flüssigkeitsversorgung zu unterstützen.



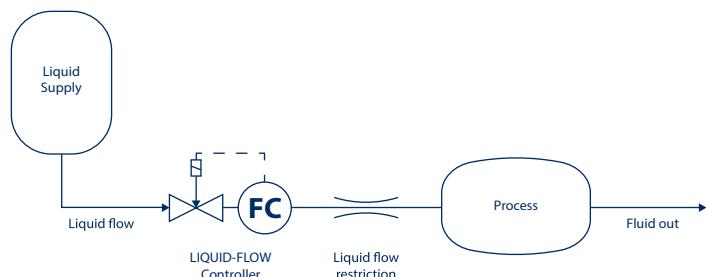
Extra-Tipp

Reduzieren Sie die Auswirkungen von gelösten Gasblasen

Entgaser sind sehr effektiv, um Gas aus Flüssigkeiten zu entfernen, aber je nach Flüssigkeit oder Anwendung ist dies nicht immer eine Option. Gelöstes Gas in der Flüssigkeit ist ein potenzielles Risiko, da es unerwartet im System freigesetzt werden und unerwünschte Auswirkungen haben kann. Die Auswirkungen der Gasfreisetzung (Blasen) können durch die Aufrechterhaltung eines konstanten Drucks im Fließweg verringert werden.

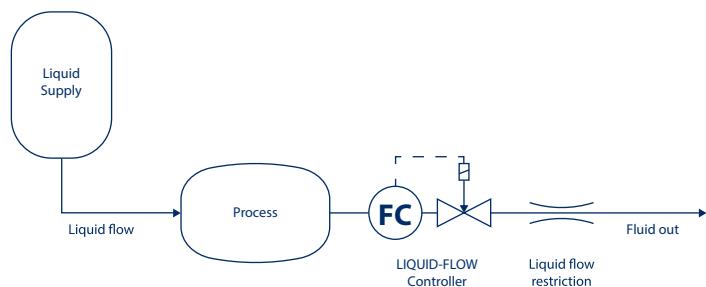
Beispiel 1

Verwenden Sie einen Flüssigkeitsdurchflussbegrenzer nach dem Flüssigkeitsdurchflussregler, um einen stabilen Systemdruck aufrechtzuerhalten. Es verhindert, dass das Gas in den Durchflussregler entweicht und das Mess- und Regelsignal beeinflusst. Die potenziellen Auswirkungen einer Gasfreisetzung (Blasen) im Prozess oder sogar stromabwärts können akzeptabel oder sogar vernachlässigbar sein. Bei einigen Anwendungen kann der Prozess selbst als Drossel wirken.



Beispiel 2

Halten Sie den Systemdruck im Prozess und im Flüssigkeitsdurchflussregler aufrecht. Dadurch wird verhindert, dass Gas in den Prozess und in den Durchflusssensor entweicht. In diesem Fall wird der Sensor stromabwärts vom Prozess platziert, was in bestimmten Branchen eine gängige Methode ist. Dies kann zwar nicht auf alle Durchflussregelungen angewandt werden, aber das Verständnis des Prinzips kann bei der Konstruktion künftiger Systeme hilfreich sein.





Vertiefende Informationen (1/4)

Das Henry-Gesetz,
die Theorie des
Löslichkeitsverhaltens
von Gasen in
einer Flüssigkeit

Für ein Gas i , das in einer Flüssigkeit löslich ist, ist der Molenbruch des gelösten Gases in der Flüssigkeit, $y_{i,liquid\ side}$ mit dem Partialdruck des Gases $P_{i,gas\ side}$ durch das Henry-Gesetz verbunden:

$$y_{i,liquid\ side} = \frac{P_{i,gas\ side}}{H}$$

Dabei ist H die Henry-Konstante. Die Henry-Konstante steigt mit zunehmender Temperatur. Einige typische Werte für 300 K sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Gase	H
Luft	$7.4e10^4$
He	$1.5e10^5$
N_2	$8.9e10^4$
H_2	$7.2e10^4$
CO_2	$1.7e10^3$
O_2	$4.5e10^4$

Die Gaslöslichkeit lässt sich am Beispiel eines mit Wasser gefüllten Tanks veranschaulichen, der mit Luft unter Druck gesetzt wird. An der Luft-Wasser-Grenzfläche ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt. Sowohl die Luft als auch der Dampf sind ideale Gase. Der Dampfdruck von Wasser bei 300 K beträgt 35 mbar, was nur ein kleiner Teil der Luft bei Atmosphärendruck ist. Er kann für das Gesamtbild vernachlässigt werden.

Der Molenbruch der in Wasser gelösten Luft unterhalb der Wasseroberfläche bei Atmosphärendruck beträgt $1/7,4e10^4 = 1,35e10^{-5}$. Die molare Masse der Luft beträgt 28,97 g/mol. Die molare Masse von Wasser beträgt 18,02 g/Mol. Der Massenanteil von Luft in Wasser, das mit 1 bara unter Druck steht, beträgt also $2,17e-5$.

Bei einer bekannten Wasserdichte von 1 kg/l enthält das Wasser im Tank bei 1 bara 0,022 g Luft pro Liter Wasser.

Bei einer bekannten Dichte der Luft unter Standardbedingungen von 1,2 g/l sind das 0,018 l/l bei 1 bar oder 1,8 Vol%/bar. Das bedeutet, dass Wasser, das bei atmosphärischem Druck der Luft ausgesetzt ist, das Äquivalent von 1,8 Vol% gelöster Luft enthält.

Nach dem Henry'schen Gesetz ist die Menge des gelösten Gases proportional zum Druck. Bei höherem Druck löst sich also mehr Gas im Wasser. Wenn der Druck gesenkt wird, kann das gelöste Gas nicht in der Flüssigkeit verbleiben und das Gas erscheint als Blasen. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn eine Flasche Mineralwasser mit Kohlensäure zum ersten Mal geöffnet wird. Für mikrofluidische Systeme mit hohen Anforderungen an die Stabilität ist dieser Effekt unerwünscht.

Nach den Henry-Konstanten ist die Löslichkeit von Helium geringer als die von Luft und die von Kohlendioxid größer als die von Luft.

Blasen in einem mikrofluidischen System

Bei der Kontrolle eines Durchflusses mit einem Aufbau wie in Abbildung A bei einem Luftdruck von 2 bar beträgt das Volumen der aus dem Wasser entweichenden Luft am Ende des Prozesses $2 \times 1,8\% = 3,6\text{ Vol\%}$. Es wird davon ausgegangen, dass das Wasser mit der Druckluft bei 2 bar gesättigt ist und der gesamte Druckabfall über das Regelventil erfolgt. Daraus ergibt sich eine theoretische Volumenausdehnung durch die Luftblasen von 3,6 % nach dem Ventil aufgrund der Dekompression. Diese Ausdehnung der Luft führt zu einer Erhöhung des Massenstroms nach dem Ventil zwischen den entstandenen Luftblasen um 3,6 %. Da Massenstrom ein gleich Massenstrom aus ist, muss der durchschnittliche Massenstrom einschließlich der Luftblasen gleich sein. Es ist zu erwarten, dass eine Verringerung des Drucks oder die Verwendung von Helium als Treibgas die Menge der Gasblasen reduziert.



Vertiefende Informationen (2/4)

Das Henry-Gesetz, die Theorie des Löslichkeitsverhaltens von Gasen in einer Flüssigkeit

Abbildung A

Grundlegender Aufbau der Strömung. Von links nach rechts: Ein unter Druck stehender Vorratsbehälter mit Absperrventil, ein thermischer Flüssigkeitsdurchflussmesser L01, ein Piezo-(Regel)Ventil V21. Alle Komponenten sind mit 1/16"-Tefzelschläuchen miteinander verbunden.

Ein Entgaser kann verwendet werden, um die Auswirkungen von gelösten Gasen in der Flüssigkeit zu reduzieren. Ein Entgaser besteht aus einem gasdurchlässigen Schlauch, der sich in einer Vakuumkammer befindet. Wenn die Flüssigkeit mit den gelösten Gasen durch den Entgaser fließt, werden die gelösten Gase aus der Flüssigkeit herausgezogen, was zu einer stabilen Strömung weiter stromabwärts führen sollte. Entgaser sind im Handel erhältliche Geräte.

Der folgende Aufbau wird verwendet, um die Wirkung von gelöster Luft und die Wirkung eines Entgasers zu untersuchen (siehe Abbildung B).

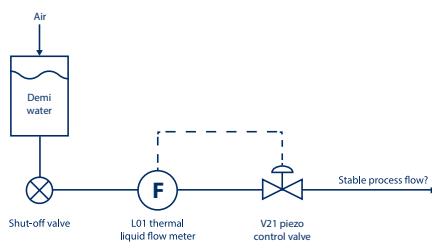


Abbildung A

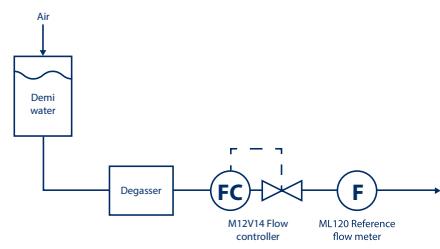


Abbildung B

Abbildung B

Versuchsaufbau zur Untersuchung der Wirkung von Luftblasen und Entgaser. Von links nach rechts: Druckvorratsbehälter mit Wasser, Entgaser, M12V14-Durchflussregler, Referenz-Durchflussmesser ML120

Die vom Hersteller [2] angegebenen Genauigkeitsspezifikationen der verwendeten Geräte sind in Tabelle 1 dargestellt

Eigenschaft	M12V14	ML120
Genauigkeit [%RD]	0.2 %	0.2 %
Nullpunktstabilität [mg/h]	100	10

Tabelle 1: Genauigkeitsspezifikation der Coriolis-Geräte M12 und ML120 von Bronkhorst

Es wird eine Messung durchgeführt, um die Stabilität des Prozessdurchflusses des Grundaufbaus von Bild B zu überwachen. Ein ML120-Durchflusssensor wird hinter dem M12V14-Durchflussregler angebracht, um die Stabilität des von ihm erzeugten Durchflusses zu messen. Zu Beginn wird der Entgaser ausgeschaltet, damit die gelöste Luft im Wasser verbleibt. Der M12 wird so eingestellt, dass er eine Durchflussrate von 1 g/h regelt. Anschließend misst der Durchflussmesser ML120 die Stabilität des erzeugten Durchflusses. Nach einigen Stunden wird der Entgaser eingeschaltet, um die Menge der gelösten Luft zu reduzieren. Die Ergebnisse sind in Diagramm 1 dargestellt und werden im nächsten Abschnitt erläutert.



Vertiefende Informationen (3/4)

Das Henry-Gesetz, die Theorie des Löslichkeitsverhaltens von Gasen in einer Flüssigkeit

Messergebnisse

Abbildung 1 ist in zwei Abschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt auf der linken Seite zeigt die Performance bei ausgeschaltetem Entgaser. Der rechte Abschnitt zeigt die Systemleistung bei eingeschaltetem Entgaser. Da es einige Zeit dauert, bis das System stabil ist, zeigen wir Ihnen hier einen Ausschnitt aus einem Langzeitversuch.

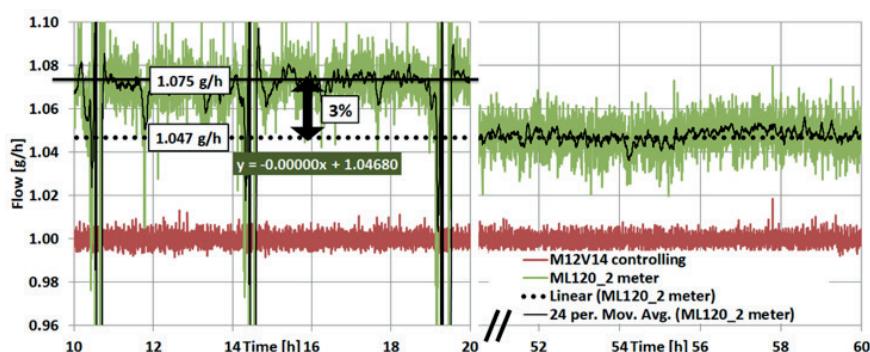


Abbildung 1: Messergebnisse busgeschaltetem Entgaser (linke Seite) und eingeschaltetem Entgaser (rechte Seite)

In Abbildung 1 stellt die rote Linie den gemessenen Durchfluss des M12-Durchflussreglers dar, der 60 Stunden lang kontinuierlich mit 1 g/h lief. Die grüne Linie stellt den gemessenen Durchfluss des Referenzdurchflussmessers ML120 dar, der stromabwärts nach dem Regelventil des M12 positioniert ist.

Im linken Abschnitt ist deutlich zu erkennen, dass der M12 einen stabilen Durchfluss regelt, während der ML120 einen diskontinuierlichen Durchfluss aufgrund von Luftblasen aufweist. Außerdem ist eine Endabweichung von 45 mg/h zwischen den beiden Geräten zu erkennen, die durch einen Nullpunkt drift der Geräte oder eine Kalibrierungsabweichung verursacht werden kann. Die Abweichung liegt innerhalb der kombinierten Spezifikationsgrenzen der Durchflussmessgeräte, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Auf der rechten Seite des Diagramms, wo der Entgaser aktiv ist, ist eine niedrigere Durchflussrate zu erkennen. Der Durchfluss scheint geringer zu sein, wenn keine Gasblasen vorhanden sind. Dies führt zu einem Rückgang des Massenstroms um etwa 3 %.

Die gepunktete Linie auf der linken und rechten Seite der Abbildung ist der berechnete Durchschnittswert über den gesamten Datensatz von 60 Stunden. Dies zeigt, dass der Massendurchfluss in beiden Fällen gleich ist, obwohl er auf der linken Seite des Diagramms zwischen den Luftblasen höher zu sein scheint.



Vertiefende Informationen (4/4)

Das Henry-Gesetz, die Theorie des Löslichkeitsverhaltens von Gasen in einer Flüssigkeit

Eine Vergrößerung eines Zeitraumes, in dem eine Luftblase den Referenz-Durchflussmesser passiert, ergibt folgendes Bild (siehe Abbildung 2).

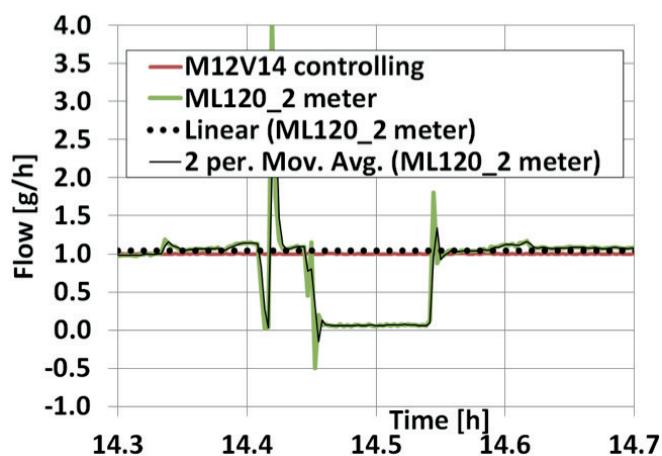


Abbildung 2: Vergrößerung einer Luftblase, die das Referenzmessgerät nach 14,5 Stunden passiert

Die Luftblase benötigt etwa 0,1 Stunden, um das System zu passieren, während der Durchfluss zwischen zwei Luftblasen stabil zu sein scheint. Die Zeit zwischen zwei Luftblasen beträgt laut der linken Seite von Diagramm 1 etwa 3,5 Stunden. Der prozentuale Anteil der Zeit, in der eine Luftblase vorhanden ist, beträgt $0,1/3,5 = 3\%$. Während dieser Zeit ist der Massenstrom nahezu Null, da die Luftblasen mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Flüssigkeit strömen und die Dichte 0,1 % der Dichte von Wasser beträgt.

Schlussfolgerung

Gelöste Gase in Flüssigkeiten werden freigesetzt, wenn der Druck verringert wird. Dies geschieht in mikrofluidischen Systemen, wenn Flüssigkeitsreservoirs mit Gasdruck beaufschlagt werden und der Fluss durch Ventile geregelt wird, die einen Druckabfall verursachen. Gasblasen verursachen Instabilität und Abweichungen im Massenfluss.

Die Schlussfolgerung, die aus dem Experiment gezogen werden kann, ist, dass bei Vorhandensein von Luftblasen in einem System, das anfänglich unter einem Druck von 2 bara steht, der Massendurchfluss die meiste Zeit um 3 % höher ist, während in 3 % der Zeit der Massendurchfluss fast 0 ist. Dies führt zu demselben durchschnittlichen Massendurchfluss, als ob das Gas noch gelöst wäre. Dieser Effekt erscheint sehr gering, ist aber mit empfindlichen Durchflussmessern sehr gut messbar.

Obwohl der durchschnittliche Massendurchfluss bei stabilen Bedingungen gleich ist, scheint er zwischen entstandenen Gasblasen höher zu sein. Da der Durchfluss in unserem Beispiel von einem genauen Durchflussmesser gesteuert wird, ist zu erwarten, dass der von ihm gelieferte Durchfluss genau ist. Bei Vorhandensein von gelöstem Gas und Druckabfall kann der Massenstrom zwischen den Gasblasen nach dem Durchflussregler jedoch um einige Prozent höher sein. Die gemessene Abweichung von 3 % entspricht in etwa den berechneten 3,6 %. Ein Entgaser reduziert die sonst durch Luftblasen verursachten Störungen und Abweichungen.

TEIL VIER

Flüssigkeitszufuhr mit einer Pumpe

Ein ausreichend und hoher stabiler Eingangsdruck ist bei Durchflussreglern eine wichtige Voraussetzung, um bei (extrem) niedrigen Durchflüssen eine stabile Durchflussrate zu gewährleisten. Wie Sie in Kapitel 3 erfahren konnten, gilt bei der Verwendung von Druckbehältern zur Erzeugung eines stabilen niedrigen Durchflusses vor allem zu verhindern, dass in der Flüssigkeit gelöste Gase vorhanden sind. Wenn die Lösung von Gasen in der Flüssigkeit vermieden werden soll, ist die Verwendung einer Pumpe zur Erzeugung des Eingangsdrucks eine gute Wahl.

Warum sollte man eine Pumpe einsetzen?

Eine Pumpe ist ein Gerät, das einen **kontinuierlichen, zuverlässigen und stabilen Druck oder Durchfluss** gewährleisten kann. Die mechanische Wirkung der Pumpe selbst setzt die Flüssigkeit unter Druck und verhindert damit, dass gelöstes Gas in die Flüssigkeit gelangt. Wenn die Pumpe Flüssigkeit aus einem separaten drucklosen Behälter saugt, kann dieser jederzeit wiederbefüllt werden ohne den Vorgang zu unterbrechen. Es empfiehlt sich, den Behälter in gleicher Höhe wie die Pumpe zu positionieren, damit kein Vakuum entsteht und sich Gasblasen ansammeln können. Zusätzlich sollte ein Absperrventil benutzt werden, um ein spontanes Entleeren des Behälters in die Pumpe zu verhindern. Stellen Sie sicher, dass bei der Montage des Ventils kein zusätzliches Totvolumen entsteht, in dem sich Luft ansammeln kann.

Welcher Pumpentyp ist geeignet?

Eine Verdrängererpumpe – entweder eine Zahnradpumpe oder eine Kolbenpumpe – kann den benötigten Eingangsdruck für den Durchflussregler liefern. In einer Zahnradpumpe wird eine feste Flüssigkeitsmenge zwischen verzahnten rotierenden Getrieben wiederholt verdrängt, was einen Fluss erzeugt; bei einer Kolbenpumpe hingegen wird ein Durchfluss

erzielt indem ein Kolben eine feste Menge ansaugt und ausstößt. Im Allgemeinen sind kleine Pumpen gut geeignet, da eine Pumpe mit einem kleinen Innenvolumen weniger Zeit zum Befüllen und Wiederbefüllen benötigt. Bei allen Pumpentypen sollte sichergestellt werden, dass die medienberührten Pumpenmaterialien mit der Prozessflüssigkeit kompatibel sind. Da das verdrängte feste Flüssigkeitsvolumen bei Zahnradpumpen im Allgemeinen geringer ist als bei Kolbenpumpen, sind Zahnradpumpen die bevorzugte Option für Kunden, die eine weitgehend stabile Durchflusskontrolle für niedrige Durchflüsse wünschen. **Zahnradpumpen** haben jedoch einen maximalen Betriebsdruck von **10 bis 15 bar**.

Kolbenpumpen können einem höheren Druck standhalten, von mehreren Dutzend bis **mehr als 100 bar** – Prozessbedingungen, wie sie bei Anwendungen mit niedrigem Durchfluss häufig vorkommen.

Die Doppelkolben-Pumpen, die wir bei Bronkhorst verwenden, sind um 180° phasenversetzt, was einen äußerst stabilen Druck/Fluss erzeugt, der im niedrigen Durchflussbereich sehr wichtig ist. Ob die Genauigkeit ausreicht, hängt jedoch vom Anwendungsverfahren des Kunden ab. Die benötigte Flüssigkeitsmenge wird genau dosiert; aufgrund des Pumpenprinzips wird aber in kleinen Mengen (entsprechend dem Hub des einzelnen Kolbens) dosiert. Bei einem ausreichend großen Prozessvolumen ist die Durchmischung groß genug, um diese Pulsation auszugleichen. Wenn die zu dosierende Menge innerhalb weniger Sekunden gleichmäßig verteilt werden soll, sind Kolbenpumpen eher weniger geeignet; in diesem Fall wäre eine Zahnradpumpe möglicherweise die bessere Wahl.



Verwendung von Massendurchflussmessern mit Pumpe zur Realisierung von Regelkreisen

Massendurchflussmesser von Bronkhorst, insbesondere Coriolis-basierte Massendurchflussmesser, eignen sich hervorragend, um in Kombination mit Pumpen einen Regelkreis zu realisieren und damit eine stabile niedrige Durchflussrate zu erzielen. Eine stabile niedrige Durchflussrate lässt sich ebenfalls durch die Verwendung eines Druckregelsystems erzielen. In einem solchen System wird die Pumpendrehzahl mithilfe eines ([EL-PRESS](#))-Druckreglers reguliert, um einen konstanten und stabilen Eingangsdruck zu gewährleisten. Gleichzeitig wird der Durchfluss gesteuert von einem Regelventil, das von einem Durchflussmesser wie dem Bronkhorst mini CORI-FLOW ML120 betrieben wird.

Für viele Anwendungen mit niedrigem Durchfluss braucht es keinen so komplexen Regelkreis wie beim oben genannten kombinierten Durchfluss- und

Druckregelsystem. Am einfachsten lässt sich mithilfe einer Pumpe einen Durchfluss erzielen, indem diese die Flüssigkeit aus einem Behälter ansaugt und die Pumpendrehzahl über das Regelsignal des Durchflussmessers gesteuert wird. In der Praxis wird ein solches „**direktes Regelungssystem**“ verwendet, um geringe Durchflüsse von Kohlenwasserstoffverbindungen bei der Forschung und Entwicklung von Hochdruckkatalysatoren stabil und pulsationsfrei zu dosieren.

Um ein reibungsloses Regelverhalten und einen stabilen Durchfluss im gesamten Durchflussbereich zu gewährleisten, kann eine **Bypass-Leitung** mit einer justierbaren Einschränkung – üblicherweise ein Nadelventil – in das direkte Regelungssystem integriert werden. Die Bypass-Methode bewirkt eine höhere Pumpendrehzahl, was zu einer stabileren Durchfluss-/Druckregelung führt. Die Pumpe läuft mit einem effizienteren und stabileren Sollwert und erzielt einen reibungsloseren Durchflussausgang.



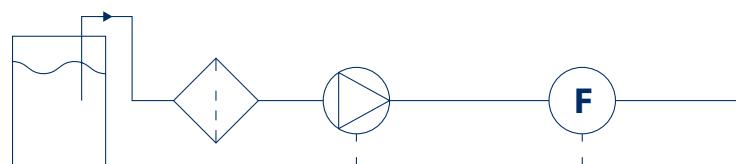
Expertenrat

Mögliche Pumpenkonfigurationen

Direkte Steuerung

Die einfachste Art, eine Pumpe zur Erzeugung eines Flüssigkeitsstroms zu verwenden, ist eine direkte Steuerung. In diesem Fall wird die Pumpe direkt vom Durchflussmesser (mit integriertem PID-Regler) gesteuert. Der unterstützte Durchflussbereich der Pumpe sollte mit dem Messbereich des Durchflussmessers vergleichbar sein.

- Zum Schutz der Pumpe vor Partikeln wird ein Filter vor der Pumpe angebracht.
- Die Durchflussmesser von Bronkhorst bieten eine Firmware zur Programmierung einer Alarmfunktion, die ein Trockenlaufen der Pumpe verhindert.
- Diese Anordnung kann einen begrenzten Regelbereich (20:1) haben, da die meisten Pumpen in den unteren Durchflussbereichen instabiler sind.

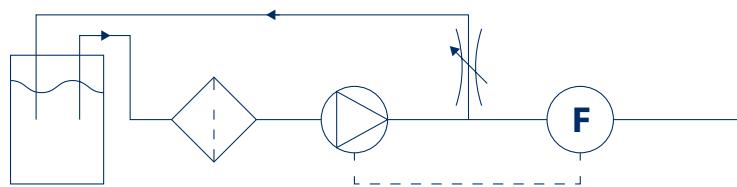




Setup mit Bypass-Leitung

Die Verwendung einer Bypass-Leitung hinter dem Pumpenmodul hat bei Anwendungen mit geringem Flüssigkeitsstrom mehrere Vorteile. In einigen Fällen kann sie sogar notwendig sein. Bei sehr geringen Durchflüssen muss die Pumpe möglicherweise im unteren Teil ihres Drehzahlbereichs arbeiten, was zu einem instabilen Regelverhalten führen kann. Durch Hinzufügen einer Bypass-Schaltung kann die Pumpe mit einer effizienteren Drehzahl betrieben werden, wobei die dosierte Flüssigkeitsmenge immer noch sehr gering sein kann. In vielen Fällen kann ein Bypass helfen, die Pumpe mit der effizientesten Drehzahl zu betreiben. Dieser Aufbau ermöglicht auch ein großes Turndown-Verhältnis, d. h. der Aufbau kann im höheren Durchflussbereich des Flüssigkeitsdurchflussreglers mit geschlossenem Bypass und im niedrigeren Bereich des LFC mit geöffnetem Bypass verwendet werden.

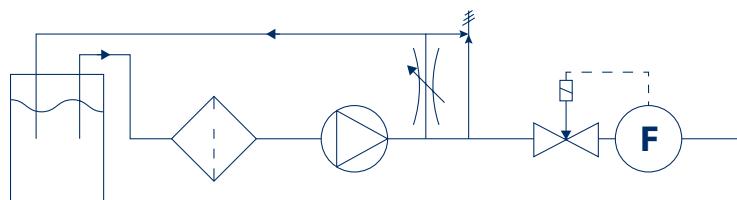
Blog: [Wie man Vibrationen bei der Nutzung von Coriolis-Massendurchflussmessern beherrschen kann](#)



Setup mit eingestellter Pumpendrehzahl

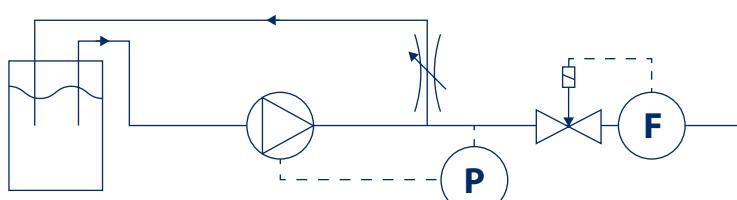
Eine andere Methode besteht darin, die Pumpe mit einer festen (optimalen) Drehzahl laufen zu lassen, wodurch ein kontinuierlicher und stabiler Flüssigkeitsstrom mit konstantem Druck erzeugt wird. Der Strom fließt über den Bypass zurück in den Lagertank. Ein Flüssigkeitsdurchflussregler mit einem Ventil nutzt den konstanten Zufluss, um die Flüssigkeit in den Prozess zu steuern. Zusätzliche Komponenten können eingesetzt werden, um die Lebensdauer des Systems zu verlängern, z.B. ein Druckbegrenzungsventil zum Schutz vor unerwarteten Druckspitzen und ein zusätzlicher Partikelfilter. Hierfür gibt es mehrere Gründe:

- Die Pumpe ist in der Regel in der Lage, größeren Partikeln standzuhalten als das Regelventil (insbesondere wenn es sich um ein Piezoventil handelt).
- Aufgrund der größeren Oberfläche und Porengröße hat der erste Filter eine wesentlich höhere Durchflusskapazität als der Durchflussmesser benötigt, was notwendig ist, um mit dem oberen Bereich des überdimensionierten Durchflussbereichs der Pumpe Schritt zu halten.
- Der zweite Filter schützt das Regelventil nicht nur vor Partikeln, die den ersten Filter passieren, sondern auch vor Partikeln, die von der Pumpe erzeugt werden.



Setup mit Druckregelung

Eine letzte Optimierung kann dadurch erreicht werden, dass die Pumpendrehzahl mit Hilfe eines Druckreglers gesteuert wird, um einen stabilen Eingangsdruck für den weiteren Prozess zu gewährleisten.



TEIL FÜNF

Handhabung von äußeren Bedingungen

Welchen Einfluss können äußere Bedingungen auf Ihren Durchflussmesser haben?

In den vorherigen Teilen dieses E-Books wurden Durchflussmesser von Bronkhorst vorgestellt, die (extrem) niedrige Durchflüsse messen können. Diese Durchflussmesser sind äußerst empfindlich. Das bedeutet, dass auch minimale Unterbrechungen und Störungen in einem Prozess oder sich ändernde Umweltbedingungen detektiert werden können. Es werden also alle Störungen, die auch schon vorher in einem Prozess auftraten, nun offensichtlich, da die Messgenauigkeit durch die Verwendung dieses empfindlichen Durchflussmessers erhöht wird.

Eventuell reagiert der Anwender in diesem Fall auf diese Situation, da er denkt, es würde etwas mit dem Messinstrument nicht stimmen. Aber das Gegenteil ist der Fall! Die Informationen dieses E-Books sollen Ihnen dabei helfen, Ihren eigenen Prozess zu optimieren. Überprüfen Sie äußere Bedingungen wie **Leitungen** zum und vom Durchflussmesser, den Einfluss von **vibrierenden Instrumenten** in der Umgebung oder das **Vorhandensein fester Partikel oder Gasblasen** in der Flüssigkeit.

In einem praktischen Kontext bedeutet das: Wenn ein Coriolis-Durchflussmesser oder -regler zum Einsatz kommt, wird ein relativ hoher Vordruck benötigt, um den Druckabfall im Instrument zu überwinden. Das ist hauptsächlich dann der Fall, wenn Coriolis-Instrumente in ihrem normalen Durchflussbereich eingesetzt werden. Aber weil Coriolis-Instrumente eine hohe Messspanne von bis zu 1:100 haben, ist der Druckabfall im unteren Bereich in der Regel geringfügig und mit einem thermischen Instrument vergleichbar.

Obwohl eine Messung mit einem solchen Coriolis-Durchflussmesser wesentlich genauer ist als mit einem thermischen Durchflussmesser, ermöglicht ein hoher Vordruck eines Druckbehälters, dass mehr Gas in der Flüssigkeit gelöst wird. Dabei werden im weiteren Verlauf des Prozesses Gasblasen bei einem niedrigeren Druck freigesetzt, was zu instabilen Messergebnissen führt. Mit diesem E-Book über niedrige Durchflüsse möchten wir Ihnen zeigen, was Sie tun können, um ihren Prozess zu optimieren. Dabei werden die jeweiligen Vor- und Nachteile sowie mögliche Auswirkungen der verschiedenen Möglichkeiten dargestellt und erklärt.

Welche Verrohrung sollte ich verwenden?

Verwenden Sie möglichst kurze Rohr mit kleinem Querschnitt. Wenn **Länge und Durchmesser der Flüssigkeitszuführleitung** zwischen Durchflussmesser und Prozessaufbau **auf ein Minimum reduziert** werden, benötigt das Befüllen und Wiederbefüllen möglichst wenig Zeit. Der Druckabfall bei Coriolis-Durchflussmessern ist wesentlich höher als bei thermischen Durchflussmessern, weil die Kapillare bei letzterem 20 mal kürzer ausfällt und der Durchmesser größer ist.

Es gilt, ein optimales Mittel zwischen Druckabfall und dem kleinstmöglichen Innenvolumen der Leitung zu finden. Für **niedrige Durchflüsse bis zu 100 g/h** wird eine Leitung mit einem Außendurchmesser von **1,6 mm (ca. 1/16 Zoll)** empfohlen. Für **höhere Durchflussmengen** empfehlen wir eine Leitung mit **3 mm (ca. 1/8 Zoll)**, um den Druckabfall zu begrenzen. Verwenden Sie möglichst wenige Verbindungs-, Winkel- oder T-Stücke, da sich dort Luft ansammeln kann, sodass der Durchfluss instabil wird. Verwenden Sie bei Bedarf Verbindungsstücke mit einem geringen Innenvolumen.



Expertrat

Empfohlene Rohrgrößen

Rohrleitungen mit einem kleineren Innendurchmesser (ID) haben einen höheren Druckabfall und bergen ein größeres Risiko der Ausgasung. Es muss ein Optimum zwischen dem Druckabfall und dem kleinstmöglichen Innenvolumen der Rohrleitung gefunden werden. Im Allgemeinen: Geringe Durchflüsse $< 100 \text{ g/h} \Rightarrow \text{OD: 1/16 Zoll}$ und Höhere Durchflüsse $> 100 \text{ g/h} \Rightarrow \text{OD: 1/8 Zoll}$ (OD = Außendurchmesser, outer diameter)

Durchfluss	Empfohlene Rohrgröße OD x ID	Druckverlust über 10 cm / 100 mm	Flüssigkeitsgeschwindigkeit (estimate)
0.1	1/16" x 0.01"	< 0.3 mbar	0.5 mm/s
	1/16" x 0.02"	vernachlässigbar	0.1 mm/s
1	1/16" x 0.01"	< 3.0 mbar	5.5 mm/s
	1/16" x 0.02"	< 0.3 mbar	1.4 mm/s
2	1/16" x 0.01"	< 6.0 mbar	11 mm/s
	1/16" x 0.02"	< 0.5 mbar	2.7 mm/s
	1/8" x 0.0069"	vernachlässigbar	0.2 mm/s
10	1/16" x 0.02"	< 0.2 mbar	13.7 mm/s
	1/8" x 0.069"	vernachlässigbar	1.2 mm/s
100	1/16" x 0.02"	< 20 mbar	137 mm/s
	1/8" x 0.069"	< 0.2 mbar	11.5 mm/s

Tabelle: Empfohlene Rohrgrößen und erwartete Druckverluste (berechnet mit Wasser):

Die Entscheidung zwischen festen Leitungsmaterialien wie Edelstahl und weichen Leitungsmaterialien ist im Wesentlichen vom Betriebsdruck abhängig. In einer Produktionsumgebung, in der mit hohem Druck gearbeitet wird, kommen flexible Leitungen nur selten zum Einsatz. Für **Durchflussmengen bis zu 2 g/h** werden **feste Leitungen** dringend empfohlen, weil sie interne Volumenänderungen verhindern. Für Durchflussmesser mit Hastelloy-Kapillaren werden Leitungen aus Hastelloy empfohlen. Lesen Sie unseren Blog ["Warum ist die Verrohrung so wichtig beim Einsatz thermischer Massendurchflussmesser und -regler?"](#) um mehr über die Auswahl der Verrohrung zu erfahren.

Example

Difference between result in setup using a 1/4 inch tube vs 1/16 inch tube

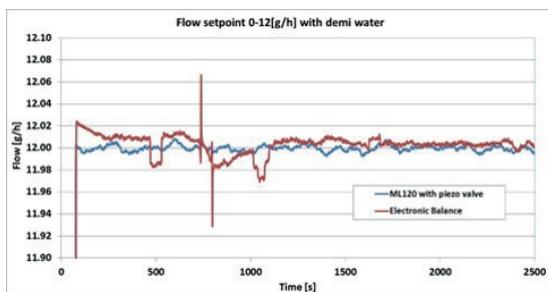


Abbildung A: 1/4 inch tube

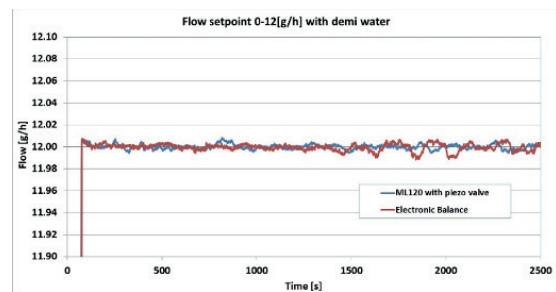


Abbildung B: 1/16 inch tube

Die Durchflussmenge in den Rohrabschnitt wird mit einem Coriolis-Massendurchflussmesser (mini CORI-FLOW ML120) geregelt - blaue Linie - , der Durchfluss nach außen wird mit einer elektronischen Skala gemessen - rote Linie - Abbildung B mit dem 1/16-Zoll-Schlauch zeigt hierbei deutlich die erhöhte Stabilität, während in Abbildung A (1/4"-Rohr) deutliche stärkere Schwankungen zu sehen sind.



Druckschläge verhindern durch Vermeidung plötzlich wechselnder Leitungsdurchmesser

Druckschläge sind ein Phänomen, das besonderer Aufmerksamkeit bedarf. Sie kennen es wahrscheinlich von Ihrer Toilette oder Ihrem Geschirrspüler Zuhause: Wasserschlag ist ein hydraulischer Stoß, der auftritt, wenn eine bewegliche Flüssigkeit plötzlich gestoppt wird, in Bewegung gerät oder die Richtung ändert. Dadurch entsteht ein Druckschlag, der weit über dem (statischen) Druckwert liegt, für den ein System in der Regel ausgelegt ist.

Sie können einen Druckstoß verhindern, indem Sie plötzliche Wechsel von großen zu kleinen Leitungsdurchmessern vermeiden, einen kleinen Pulsationsdämpfer anbringen (der einen Dämpfungseffekt durch eine isolierte Gassäule bietet), den Druck allmählich erhöhen oder darauf achten, dass die Pumpe nicht gegen ein geschlossenes Ventil pumpt.

Umgang mit Vibrationen

Vibrationen einer Pumpe oder anderer Instrumente in der unmittelbaren Umgebung können die Leistung von Coriolis-Durchflussmessern negativ beeinflussen. Das Funktionsprinzip von Coriolis-Durchflussmessern beruht auf Vibrationen. Daher muss sichergestellt werden, dass Pumpen und andere Instrumente in der Umgebung eine andere Vibrationsfrequenz als das Coriolis-Instrument aufweisen. Um den Coriolis-Durchflussmesser gegen diese äußeren Vibrationen abzuschirmen, können Sie (leicht flexible) PEEK-Leitungen verwenden oder den Durchflussmesser/-regler mechanisch entkoppeln, indem Sie die Leitung spiralförmig verbiegen. Für die Coriolis-Instrumente bietet Bronkhorst 2 kg und 4 kg schwere [Masseblöcke](#) mit Vibrationsdämpfern an, die als zusätzliche Puffer Vibrationen absorbieren.

Lesen Sie unseren Blog '[Wie man Vibrationen bei der Nutzung von Coriolis-Massendurchflussmessern beherrschen kann](#)', um mehr über die Auswirkungen von Vibrationen auf Durchflussmesser zu erfahren.

Nutzen der Kalibrierung

Wir empfehlen, thermische Durchflussmesser wie [μ-FLOW](#) und [LIQUI-FLOW](#)-Instrumente einmal pro Jahr kalibrieren zu lassen. Coriolis-Instrumente wie der mini [CORI-FLOW ML120](#) brauchen nicht kalibriert zu werden, weil das Messprinzip weniger anfällig für Alterungerscheinungen ist. In Bereichen wie der Automobilindustrie, Pharmazeutik und Lebensmittelherstellung ist eine Kalibrierung jedoch gesetzlich oder aufgrund von Standardisierungsprozessen vorgeschrieben. In diesen Branchen ist es lebenswichtig, dass ein Messinstrument den richtigen Wert ermittelt. Bei der Kalibrierung kann es nützlich sein, transparente flexible Leitungen, z. B. aus Teflon, zu verwenden, damit Gasblasen in der Flüssigkeit visuell erkannt werden können.

Verwendung von Partikelfiltern, um Verstopfungen zu verhindern

Um Verstopfungen in Leitungen und Kapillaren mit geringem Durchmesser in Durchflussmessern zu verhindern oder Schäden an (Piezo-)Regelventilen zu vermeiden, empfehlen wir, einen oder mehrere Partikelfilter einzusetzen. Das ist insbesondere dann wichtig, wenn Kanäle und Regelventile für niedrige Durchflussmengen verwendet werden. Die Filterporengröße sollte maximal ein Zehntel der kleinsten Kapillare, Öffnung oder Regelöffnung im System betragen; für Poren, die dem Piezo-Regelventil nachgeordnet sind, wird eine Porengröße von **5 Mikron** empfohlen. Eine große Filteroberfläche kann einen hohen Druckabfall kompensieren, der durch eine geringe Porengröße verursacht wird.



Coriolis Durchflussmesser in Kombination mit Pumpe montiert auf einem Masseblock



Insider-Tipp

Einbau eines Partikelfilters

Im niedrigen Durchflussbereich von Flüssigkeiten kann das Vorhandensein selbst kleinster Partikel das Risiko einer Verstopfung drastisch erhöhen und zu einer Beschädigung der Komponenten führen. Um einen stabilen Durchfluss im niedrigen Durchflussbereich zu gewährleisten, ist es wichtig, dass die Flüssigkeit absolut frei von Verunreinigungen ist. Aber auch bei der Verwendung von Flüssigkeiten mit höchstem Reinheitsgrad wird der Einsatz von Partikelfiltern dringend empfohlen.

Bei der Auswahl eines geeigneten Filters sollten Sie die folgenden Empfehlungen beachten:

Porengröße

- Mindestens 10x kleiner als die kleinste Kapillare, Blende oder Regelspalte im System
- Die empfohlene Porengröße beträgt 5 µm (für Piezo-Ventile).
- Wenn die zu verarbeitende Flüssigkeit viele Partikel enthält, können mehrere Filterstufen mit abnehmender Porengröße eine Option sein.

Oberfläche

- Ein hoher Druckabfall sollte vermieden werden, da er zur Ausdehnung des gelösten Gases führen kann.
- Die Oberfläche des Filters sollte einen geringen Druckabfall gewährleisten, auch beim Anfahren oder Spülen des Systems.
- Eine große Oberfläche kann einen höheren Druckabfall, der durch eine kleine Porengröße verursacht wird, ausgleichen.
- Eine große Oberfläche führt zu weniger Verstopfung und damit zu weniger Wartungsaufwand.

Tipps

- Montieren Sie den Filter mit der Oberseite nach unten (Auslass nach oben, wenn möglich), damit Gasblasen beim Spülen entweichen können.
- Reinigen Sie verstopfte Filter oder tauschen Sie sie aus; achten Sie darauf, sie in der gleichen Richtung wieder einzubauen wie vorher.
- Achten Sie darauf, den Filter vor jedem Bauteil zu installieren, das empfindlich gegen Verstopfung oder Beschädigung ist.
- Filter filtern keine gelösten Elemente wie Mineralien (z. B. gelöster Kalk oder Natriumchlorid) und chemische Stabilisatoren.

Danke fürs lesen

Benötigen Sie Unterstützung?
Kontaktieren Sie uns!



www.bronkhorst.com