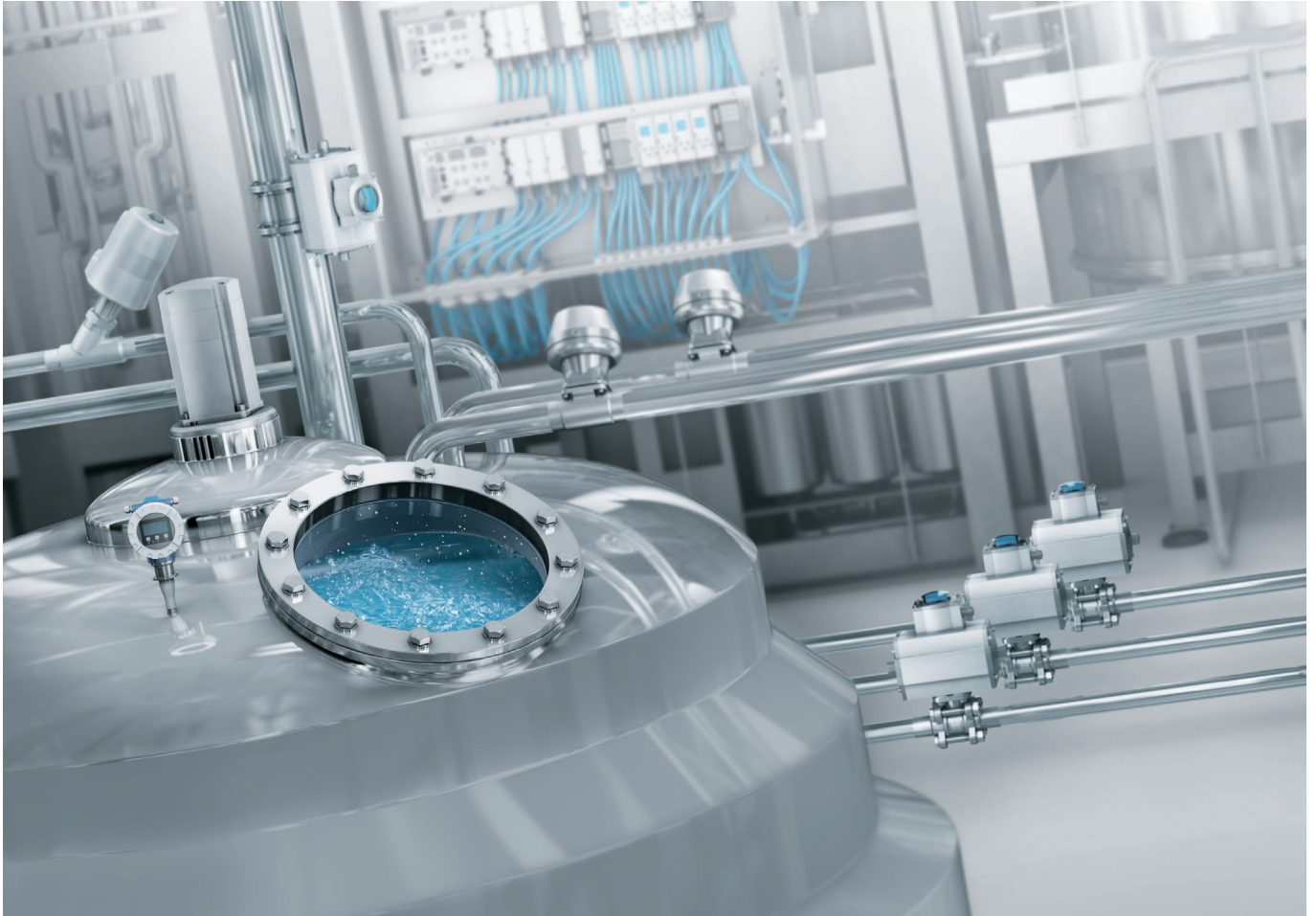


White Paper

Proportionalventile für die Regelung inerter Gase in der Prozessautomation



In der Prozessautomation werden in vielen Anwendungen Gase in Druck und Durchfluss geregelt. Aufgrund von Explosionsschutz-Anforderungen wird in Tanks, Reaktoren und Prozessapparaten einer Anlage oftmals eine inerte Atmosphäre geschaffen und gehalten. Dies erfolgt in der Regel mit Hilfe von Stickstoff und teilweise auch mit Argon. Weitere Anwendungen finden sich beim Materialtransfer zwischen Prozessbehältern und in der Abfüllung. Hier kommen sowohl Inertgase, Luft, Sterilluft und Kohlendioxid zum Einsatz. Die Beaufschlagung von Gleitringdichtungen mit Gasen ist ein weiterer Anwendungsfall. Im Wesentlichen werden die folgenden Funktionen abgedeckt:

- Inertisieren, d. h. kompletter Austausch des enthaltenen Gasvolumens (ungeregelt, hoher Durchfluss)
- Drucküberlagerung (Druckregelung)
- Überströmen in Behältern und Prozessapparaten (Durchflussregelung)
- Materialtransfer (Druckregelung)
- Beaufschlagung und Überwachung von Gleitringdichtungen

Um diese Funktionen abdecken zu können, werden heute in vielen Anwendungen für jede Druckstufe und jedes Gas eigene Leitungen mit Regelventilen und Durchflussmessern benötigt. Je nach den Prozess- und Branchenanforderungen können für solch eine Regelung Investitionskosten zwischen 3.000 – 10.000 € pro Regelkreis anfallen.

Die Proportionalventiltechnik stellt eine interessante Alternative für die Regelung von inerten Gasen in der Prozessautomation dar. Mit ihr kann die erforderliche Genauigkeit der bestehenden Technik bei gleichzeitig geringerem Installationsaufwand und Investitionsbedarf erreicht werden. Der Aufbau einer Regelstation in einem kompakten Schaltschrank spart zudem Platz und erleichtert die Zugänglichkeit zu allen Prozesskomponenten. Die mögliche Integration der Proportionalventile in Ventilinseln reduziert den Platzbedarf, erleichtert die Automation und erhöht die Diagnosemöglichkeiten. Teilweise lassen sich auch bisher manuell geführte Prozesse einfach und kostengünstig automatisieren.

1. Proportionalventiltechnik

Ein Proportionalventil oder Proportional-Druckregelventil, ist ein Stetigventil, das mit Hilfe eines Proportionalmagneten oder zwei Schaltventilen als Pilotventile nicht nur diskrete Schaltstellungen wie Auf/Zu zulässt, sondern ein stetiges Regeln des Ausgangsdruckes erlaubt. Mit einer entsprechend nachgeschalteten Sensorik lässt sich auch ein Volumenstrom problemlos regeln.

Das Bild 1 zeigt einen geschlossenen Regelkreis mit einem einfachen Regler. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass er den Istwert der Regelgröße x regelmäßig an die Regeleinheit zurückmeldet. Dort erfolgt ein Abgleich mit dem Sollwert w , die Berechnung der Regeldifferenz e und die Ableitung der neuen Stellgröße, die an den Stellungsregler übermittelt wird. Dieser stellt das Ventil neu ein und reduziert die Regelabweichung. Durch diverse Störgrößen z , wie z. B. Druckabfall im Leitungsnetz vor und nach dem Ventil, arbeiten diese Regelkreise in der Regel permanent. Die Geschwindigkeit und Präzision einer Regelung hängt von dem generellen Aufbau der Regelstrecke, der Art des Reglers und den verwendeten Komponenten ab.

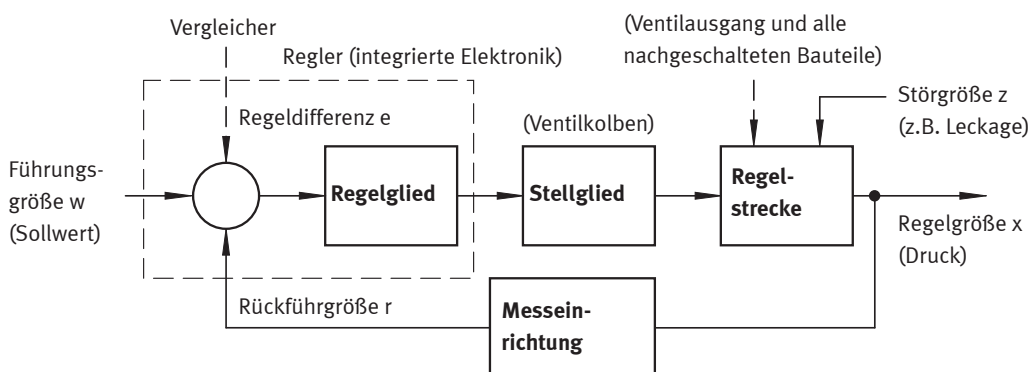


Bild 1: Herkömmlicher geschlossener Regelkreis

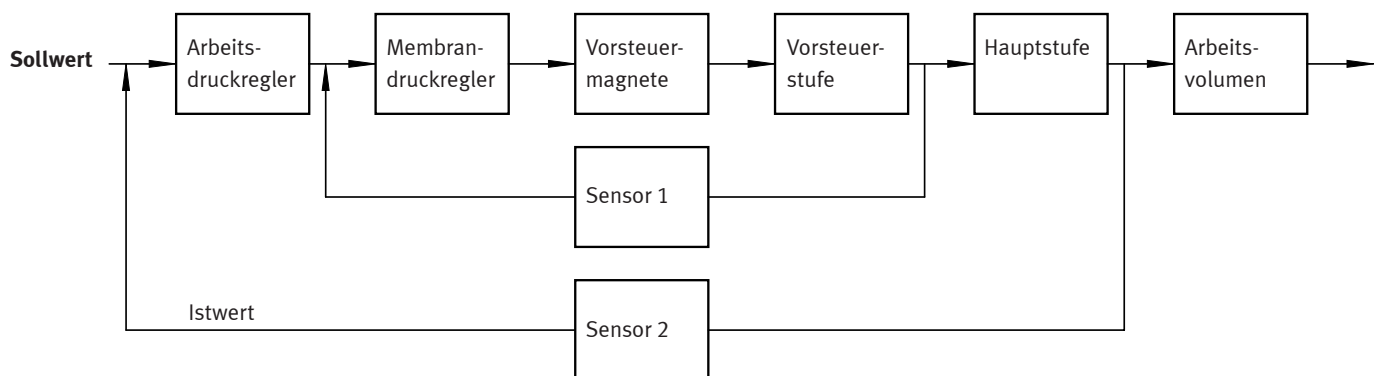


Bild 2: Multi-Sensor-Control (Kaskadenregelung) des Festo Proportionaldruckregelventils VPPM mit zwei integrierten Drucksensoren

Eine kaskadierten Regelung verbessert die Präzision und Stabilität einer Regelstrecke. Bei einer kaskadierten Regelung werden mehrere Regelkreise ineinander geschachtelt. Die Gesamtregelstrecke unterteilt sich in kleinere, besser regelbare Teilstrecken. Dadurch ergibt sich gegenüber dem direkt wirkenden Regler eine höhere Genauigkeit und Stabilität der Regelung. Die Festo Proportional-Druckregelventile verfügen über eine integrierte Multi-Sensor-Control (Bild 2), in die zwei Drucksensoren und Feedbackkreise integriert sind. Dies führt in Zusammenhang mit dem integrierten PID-Regler zu einem überaus stabilen und präzisen Regelverhalten, auch bei anspruchsvollen Anwendungen (Bild 3).

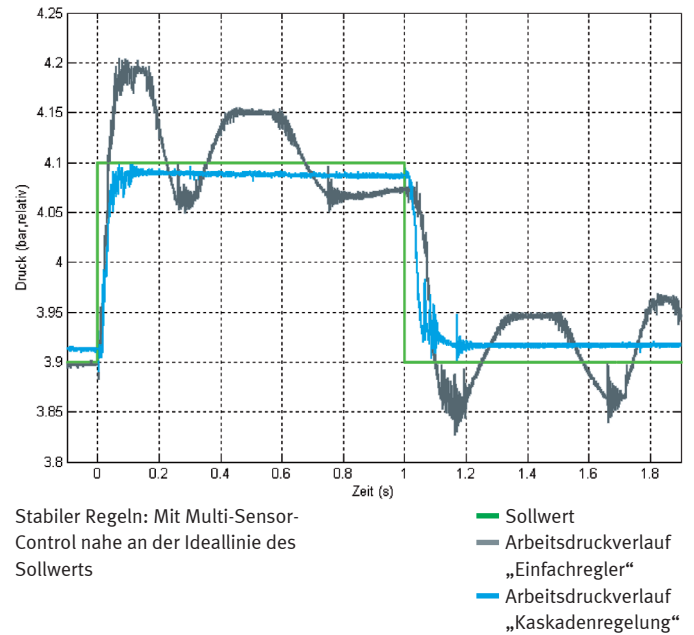


Bild 3: Vergleich des Arbeitsdruckverlaufs eines Einfachreglers zu einem kaskadierten Regler eines Proportionaldruckregelventils

2. Proportionalventiltechnik in der Prozessautomation

In der Prozessautomation werden an Tanks, Reaktoren, Fermentern, Mischern und anderen Prozessapparaten inerte Gase und Luft geregelt. Am Beispiel eines Wirkstofftechnikums zur Produktion chemischer Wirkstoffe in der pharmazeutischen Industrie wollen wir Ihnen die Technik und deren praktische Umsetzung näher bringen.

2.1. Aufgabenstellung

Aufgrund von Explosionsschutz-Anforderungen muss es möglich sein, in den Prozessbehältern (Reaktoren) der Anlage eine inerte Atmosphäre zu schaffen und zu halten. Dies erfolgt mit Hilfe von Stickstoff und Argon, die – je nach Prozessschritt – in Druck oder Durchfluss geregelt werden.

Im Wesentlichen wurden damit die folgenden Funktionen abgedeckt:

- Inertisieren, d. h. kompletter Austausch des enthaltenen Gasvolumens (ungeregelt, hoher Durchfluss)
- Drucküberlagerung (Druckregelung)
- Überströmen in Behältern und Prozessapparaten im laufenden Syntheseprozess (Durchflussregelung)
- Materialtransfer zur Zentrifuge (Druckregelung)

Um diese Schritte und die Versorgung der Gleitringdichtungen der Rührwerke und Zentrifugen abdecken zu können, wurden in den bisherigen Anlagen drei Druckstufen (40 mbar, 2,5 bar und 9 bar) mit eigenen Rohrleitungsnetzen benötigt. In diesen Edelstahl-Rohrleitungen waren Regelventile (Sitzventile) und Durchflussmesser montiert.

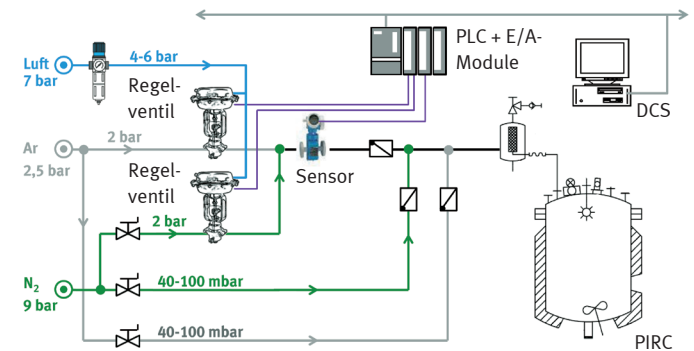


Bild 4: Inertgassteuerung an einem Chemiereaktor zur Wirkstoffherstellung

Ein Teil dieser Funktionen wird üblicherweise mittels manuell einstellbaren Druckminderern oder Drucküberströmventilen abgedeckt. Dynamische Regelungen werden normalerweise mittels Regelventilen (Sitzventile) realisiert. Je nach Funktion werden Durchflussmesser in der Rohrleitung zum Tank und/oder ein Drucksensor am Tank oder Prozessapparat benötigt, die die Durchfluss- und Druckwerte an die Steuerung übermitteln. Die Steuerung und Sollwertvorgabe erfolgt durch die Anlagensteuerung und das darin integrierte Regelmodul. Die nachfolgende Darstellung (Bild 5) zeigt vereinfacht eine Installation an einem Reaktor zur chemischen Wirkstoffherstellung.

Der gezeigte Reaktor steht in einer typischen Multipurposeanlage, in der die Prozessparameter sehr flexibel und häufig angepasst werden müssen. Abhängig von Produkt und Prozess wird der Reaktor wahlweise mit Stickstoff oder Argon beaufschlagt. Je nach Prozessschritt werden entweder der erforderliche Druck und/oder die Durchflussmenge der Inertgase geregelt.

Im Rahmen der Anlagenplanung wurde nach alternativen und flexiblen Konzepten zur Inertgassteuerung gesucht. Man entschied sich im Endeffekt für eine Steuerung mittels Proportional-Druckregelventilen, in der die genannten Funktionen und Prozessparameter automatisiert werden.

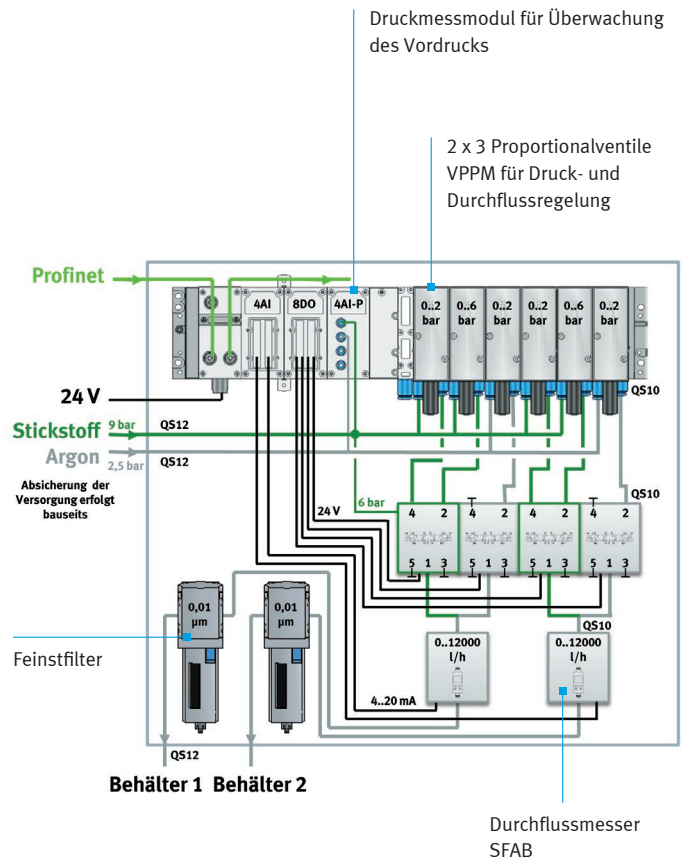


Bild 5: Aufbau der Lösung von Festo („Inertgasstation“)

2.2. Das System „Inertgasstation“

Nach der Entscheidung für die neue Technik wurde die konkrete Umsetzung geplant. Im neuen Technikum kommen statt der bisherigen Regelventile Proportionalventile von Festo zum Einsatz. Da sich jeweils zwei Reaktoren in einem Reaktorraum befinden, wurde aufgrund der räumlichen Nähe eine Inertgasstation für jeweils zwei Reaktoren ausgelegt. Pro Behälter sind ein Ventil für Argon und zwei für Stickstoff vorgesehen. Das erste Ventil hat einen Druckbereich von 0 – 2 bar, das zweite einen Druckbereich von 0 – 6 bar. Die 0 – 2 bar Variante ermöglicht eine genauere Regelung bei kleineren Drücken und Durchflusswerten, während sich mit der 0 – 6 bar Variante deutlich höhere Durchflusswerte realisieren lassen. Je nach Funktion können die beiden Ventile auch hintereinander geschaltet werden – erst schnell füllen und danach präzise regeln. Damit kann einerseits die gewünschte Genauigkeit bei der Drucküberlagerung gewährleistet werden, andererseits können ausreichend große Durchflüsse beim Inertisieren bewältigt werden, für die höhere Ausgangsdrücke erforderlich sind.

Die Proportional-Druckregelventile sind auf einer Ventilinsel MPA integriert, die an eine Automatisierungsplattform CPX angeschlossen ist. Die Durchflusssensoren wurden ebenfalls aus der Rohrleitung am Reaktor herausgenommen und in den Schaltschrank versetzt. Sie sind mit dem 15 Bit-Analogeingangsmodule der CPX verbunden. Ein CPX-Druckmessmodul übernimmt die Messung der Vordrücke im betreffenden Anlagenteil. Diese flächendeckende Überwachung stellt einen

deutlichen Gewinn an Diagnosemöglichkeiten gegenüber dem bisherigen Ansatz dar, nach dem am zentralen Druckminderer ein Druckschalter für die gesamte Anlage installiert wurde. Gleichzeitig reduziert die Zusammenlegung der Funktionen für zwei Reaktoren auf einer Ventilinsel die Anschaffungs- und Installationskosten.

Das Risiko einer Kontamination durch die Lebensdauerschmierung der Ventile ist zwar denkbar gering, doch aus Sicherheitsgründen entschied sich der Kunde für nachgeschaltete Feinstfilter mit einer 0,01 µm Filterpatrone. Immerhin kommen die Prozessgase direkt mit medizinischen Wirkstoffen in Kontakt. Nach dem Filter gehen die Leitungen direkt zum Reaktor.

2.3. Versorgung der Gleitringdichtungen

Im Gegensatz zur Ausgangsplanung wurden bei der endgültigen Version auch Proportionalventile zur Versorgung der Gleitringdichtungen der Rührwerke in die Station mit aufgenommen. Bei den bestehenden Altanlagen werden die Gleitringdichtungen über die 9 bar Stickstoffleitung versorgt. Vor den Dichtungen ist nur ein manuell einstellbarer Druckregler installiert. Die Nachteile dieser alten Lösung sind:

- 1 Keine bzw. geringe Flexibilität in Multipurpose-Anlagen. Der Versorgungsdruck muss für jeden Batch manuell eingestellt werden, oder man stellt ihn von vornherein auf den maximal benötigten Druck ein.
- 2 Höhere Betriebskosten und eine potentielle Fehlerquelle, wenn der Versorgungsdruck für jeden Batch manuell kontrolliert und ggf. nachjustiert werden muss
- 3 Die Dichtungen müssen von Zeit zu Zeit zerlegt werden, um sie einer Sichtprüfung zu unterziehen und den Verschleißzustand zu beurteilen. Dies geht nur, wenn die Anlage zu Wartungszwecken abgeschaltet ist.
- 4 Höherer Stickstoffverbrauch und ggf. höherer Verschleiß, wenn die Dichtung immer mit dem maximal erforderlichen Druck beaufschlagt wird.

Im neuen Technikum kommen hierfür ebenfalls Proportionalventile zum Einsatz. Hierfür sind zusätzlich ein Proportionalventil, ein Durchflussmesser und ein Feinstfilter in die Inertgasstation integriert. Die Mehrkosten im Vergleich zur alten Lösung mit manuell einstellbaren Druckreglern sind durch die Integration auf die Ventilinsel vergleichsweise gering. Aus Sicht des Anlagenbetreibers ergeben sich folgende Vorteile der neuen Lösung:

- 1 Der Druck in der Gleitringdichtung wird passend zum Betriebsdruck im Reaktor angepasst. Die Druckdifferenz zwischen Betriebsdruck im Reaktor und der Gleitringdichtung bleibt immer konstant.
- 2 Ein zusätzlicher einfacher Durchflussmesser misst den Gasverbrauch der Dichtung. Abweichungen können so rechtzeitig über die Steuerung erkannt werden. Die Sichtprüfung der Dichtung im Rahmen der Wartung kann entfallen oder die Zyklen verlängert werden.
- 3 Ein Drucksensor in der Automatisierungsplattform CPX überwacht den Eingangsdruck.
- 4 Die Ventilinsel MPA ist über das Automatisierungsmodul CPX und den integrierten Feldbusknoten an das Prozessleitsystem angeschlossen. Dadurch können alle Funktionen und Werte zentral überwacht und ausgewertet werden.

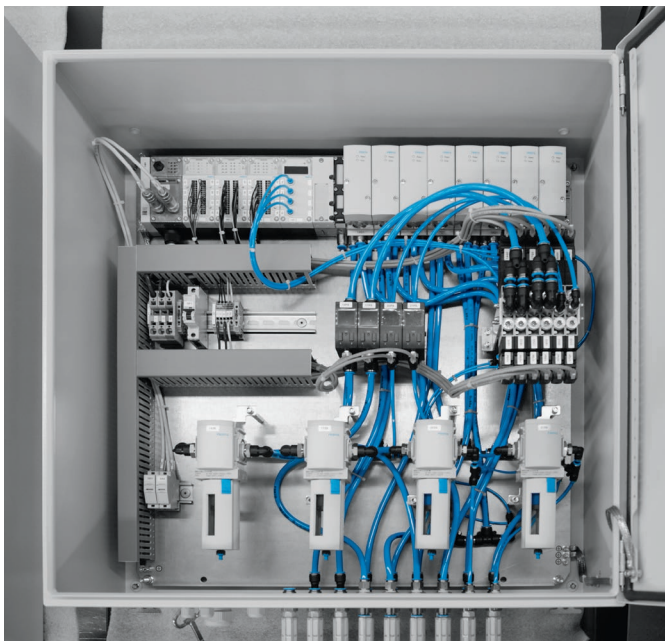


Bild 6: Inertgasstation im Schaltschrank für einen Reaktor zur Druck- und Durchflussregelung von inerten Gasen.

Durch die Integration der Versorgung der Gleitringdichtung in die Inertgasstation wurden im Endeffekt acht Proportionalventile für zwei Reaktoren im Schaltschrank installiert.

Die Schaltschränke wurden im Technikkorridor (non-Ex-Bereich) vor den Reaktorräumen installiert. Der Anschluss an den Prozess erfolgt mittels Schläuchen, die das kurze Stück zwischen Schaltschrank und Rohrleitung überbrücken.

Im Vergleich zu den alten Anlagen sind die Regelventile, die Stellungsregler sowie die Durchflussmesser nicht mehr im Ex-Bereich installiert. Das bedeutet geringe Investitionskosten sowie eine vereinfachte Planung und Risikobewertung für die Anlage.

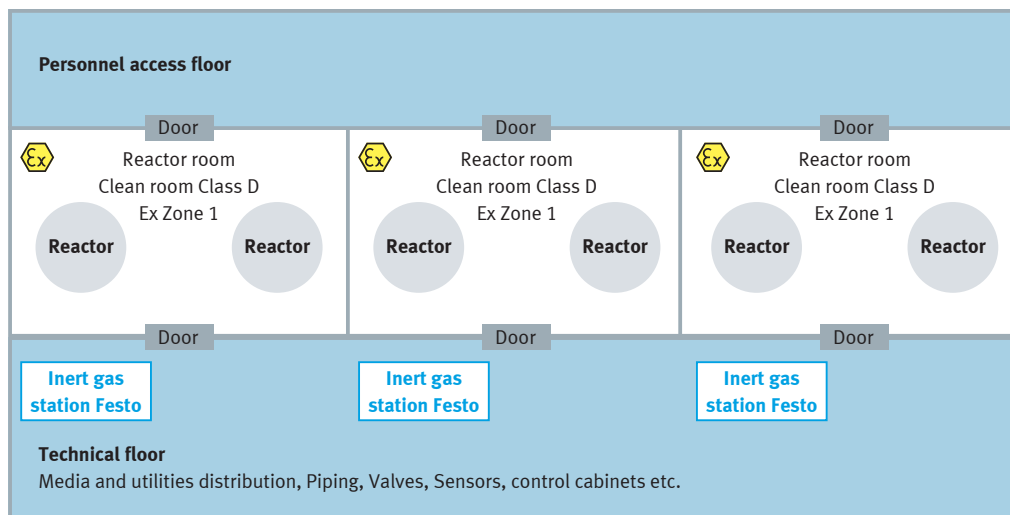


Bild 7: Wirkstoffproduktion, Prinzipskizze räumliche Aufteilung und Installation der Inertgasstation beim Kunden

Im Laufe der Anlagenprojektierung hat sich der Betreiber dafür entschieden, die gleiche Technik auch für die Zentrifugen zur Fest-Flüssigtrennung des Wirkstoffs sowie für die Trockenschränke einzusetzen. Dadurch wurde die Stickstoffversorgung aller Prozessgeräte im Technikum einheitlich umgesetzt.

2.4. Einbindung in die Steuerung

Im Rahmen des Projektes wurden die Inertgasstationen an ein Siemens PCS 7 System angebunden. Die Bedienstation wurde als mobile Einheit ausgelegt, von der aus sich die beiden Reaktoren in einem Reaktorraum bedienen lassen.

Für die Einbindung der Proportionalventile und der E/A-Module in die Steuerung ist eine umfangreiche Treiberbibliothek verfügbar. Dadurch werden beim Erzeugen der Baugruppentreiber automatisch eigene Rack- und Modulbausteine für die Automatisierungsplattform CPX generiert. Dies erleichtert die Programmierung (Bild 8) immens, da an dieser Stelle keine manuellen Eingriffe durch Programmierer erforderlich sind.

Auch bei dieser Art der Regelung werden ein Drucksensor im zu regelnden Behälter und ein PID-Regelbaustein in der Steuerung benötigt. Die richtige Auslegung des Regelkreises für einen störungsfreien und reproduzierbaren Betrieb ist bei der Proportionalventiltechnik genauso wichtig wie bei anderen technischen Lösungen.

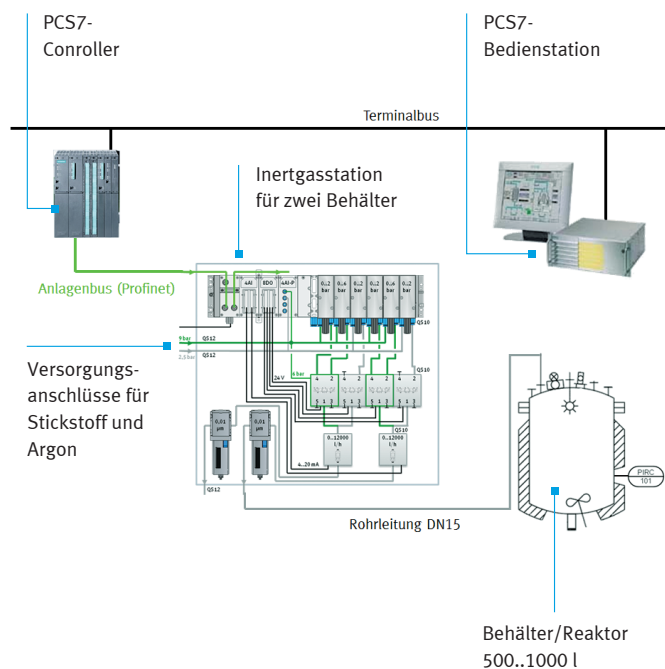


Bild 8: Inertgasstation im Anlagenverbund, zur besseren Übersicht wird nur ein Prozessbehälter dargestellt

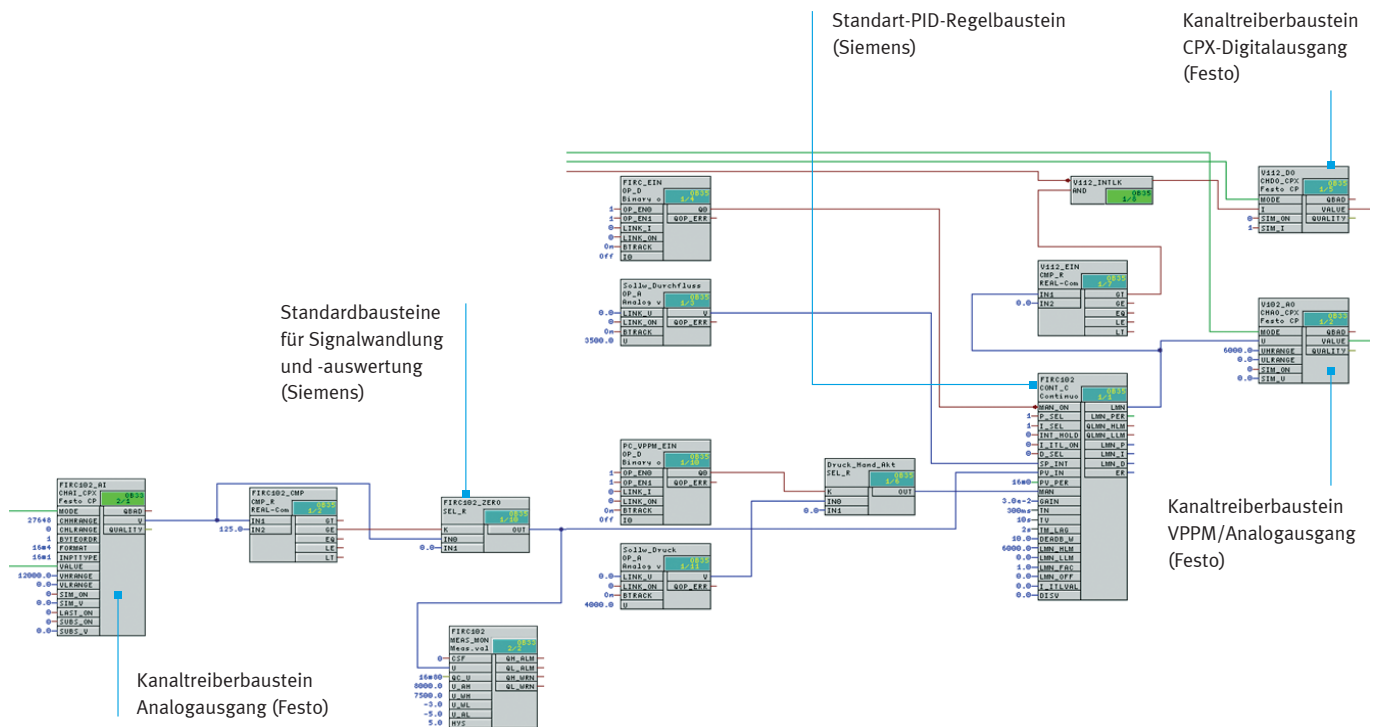


Bild 9: Programmierung des Durchflussreglers in SIMATIC PCS 7

Im Rahmen der Untersuchungen zu dem Projekt wurden mit der neuen Technik Tests im Technikum gefahren. In diesen Versuchen wurde das ausgezeichnete und schnelle Regelverhalten der Installation unter Beweis gestellt (Bild 10). Nach einer Sollwertänderung der erforderlichen Durchflussmenge regelt die kaskadierte PID Regelung den Istwert schnell und ohne Überschwängen auf den neuen Sollwert ein.

Der eingestellte Sollwert wurde schneller erreicht und stabiler gehalten als mit der bisherigen Lösung über einen Einfachregler. Die Sollwertabweichung bei einem Sollwert von 7.000 l/h beträgt ca. 0,5 – 1% des Sollwertes.

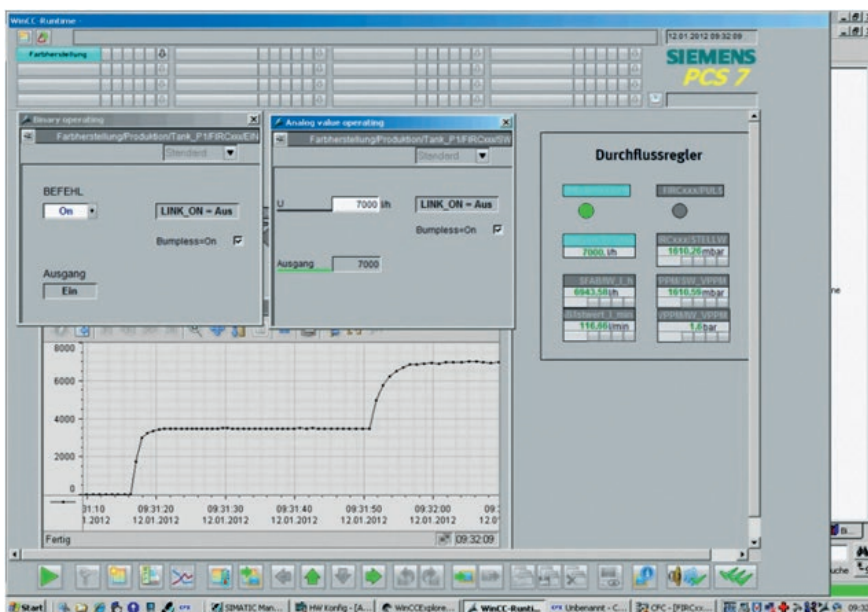


Bild 10: Durchflusskurven der Inertgasregelung aus der Anlage während des Systemtests

3. Steuerungsprogrammierung von Proportionalventiltechnik in der Prozessautomation

Die Steuerung mittels Proportionalventiltechnik erfordert in der Programmierung eines Prozesses an einigen Stellen ein leichtes Umdenken im Vergleich zur herkömmlichen Technik. Proportional-Druckregelventile verfügen über integrierte Drucksensoren, die den Druck direkt am Ausgang des Ventils messen. Der Druckregler bei einem Proportional-Druckregelventil ist immer aktiv. Bei einer Sollwertvorgabe durch die Steuerung an das Proportional-Druckregelventil muss deshalb beachtet werden, dass die Sollwerte, die das Proportionalventil bekommt, von diesem immer als der Ausgangsdruck des Ventils interpretiert und geregelt werden.

3.1. Inertisierung

Ein Inertisierungsablauf besteht in der Regel aus drei aufeinanderfolgenden Zyklen, in denen der Behälter zunächst evakuiert und dann über das Proportionalventil mit Stickstoff wieder auf atmosphärischen Druck gebracht (entspannt) wird. Um das benötigte Gasvolumen zügig in den Behälter strömen zu lassen, empfiehlt es sich, entweder einen hohen Ausgangsdruck am Proportionalventil vorzugeben oder den Durchflussregler mit einem entsprechend hohen Sollwert zu betreiben. Dadurch wird das Proportionalventil voll geöffnet. Beide Vorgänge enden, sobald der Behälterinnendruck den gewünschten Sollwert erreicht hat. Das reine Aufschalten des Proportionalventils mit einem nur sehr geringen Sollwert (z. B. 50 mbar Überdruck) hätte einen geringen Durchfluss zur Folge und damit ein sehr langsames Ansteigen des Behälterinnendrucks. Ein Inertisierungszyklus würde entsprechend lange dauern.

Eine sich an die Inertisierung anschließende Drucküberlagerung des geschlossenen Behälters kann über die Druckregelung erfolgen. Ähnlich wie bei der Inertisierung erfolgt der Druckaufbau bis zum gewünschten Sollwert durch Vorgabe eines höheren Ausgangsdrucks. Dieser wird kurz vor dem Erreichen des Sollwerts auf den eigentlichen Sollwert reduziert. Diese Vorgehensweise führt hinsichtlich der Dauer eines Inertisierungsvorgangs zu den gleichen Ergebnissen wie bei herkömmlichen einfachen Regelungen.

3.2. Materialtransfer

Der Materialtransfer zwischen zwei Behältern wird z. B. bei scherempfindlichen Zellen oder Proteinen in der biotechnologischen Produktion nicht über Pumpen realisiert sondern über ein Druckpolster auf dem Quellbehälter. Der Quellbehälter wird zunächst auf den notwendigen Transferdruck z. B. 1,5 bar vorgespannt. Dies geschieht idealerweise durchflussgeregelt mit einem hohen Volumenstrom oder durch Vorgabe eines Ausgangsdrucks, der deutlich höher ist als der eigentliche Transferdruck. Dadurch wird das Proportionalventil voll geöffnet, der erforderliche Transferdruck in kurzer Zeit erreicht. Ist der erforderliche Transferdruck erreicht kann auf eine Druckregelung umgeschaltet werden. Diese kompensiert nach dem Öffnen des Behälterbodenventils des Quellbehälters den daraus resultierenden Druckabfall und hält den Transferdruck konstant.

3.3. Abfüllen

Genau gleich funktioniert der Einsatz in der Produktion oder beim Abfüllen zum Beispiel in der Lebensmittelindustrie. Die Abfüllmaschinen haben in der Regel einen Vorlagetank aus welchem das Produkt den Abfüllstutzen zugeführt wird. Durch den sich während des Abfüllvorgangs ändernden Füllstands im Vorlagetank ändern sich die Druckverhältnisse in den Abfüllleitungen. Dies führt je nach Medium zu

einer größeren Streuung des Abfüllvorgangs hinsichtlich des abgefüllten Gewichts. Da ein Unterfüllen der Behältnisse in der Regel nicht zulässig ist, verschenken die Kunden mit einer dauerhaften Überfüllung bares Geld. Über ein Proportionaldruckregelventil wird der Vorrattank nicht einfach belüftet sondern mit einem geeigneten Gas beaufschlagt. Dabei wird über den gesamten Abfüllvorgang – unabhängig vom schwankenden Füllstand – ein konstanter Vordruck aufrechterhalten. Dadurch sinkt die Streuung des Abfüllgewichts, der Kunde spart bares Geld.

3.4. Überströmen eines Behälters

Auch das Überströmen eines Behälters mit Stickstoff, um explosionsgefährliche Gase kontinuierlich während des Prozesses über die Abgasleitung auszuschieben, kann je nach Prozessanforderungen druck- oder durchflussgeregelt erfolgen. Bei kleineren Durchflüssen ist eine Druckregelung vorzuziehen, während bei hohen Durchflüssen eine Durchflussregelung vorteilhafter ist.

4. Bewertung und Vorteile der Proportionalventiltechnik in der Prozessautomation

Wie jede andere technische Lösung haben auch die oben beschriebene Applikationen Einsatzgrenzen, die bei der Auslegung berücksichtigt werden müssen. Die Proportionalventiltechnik mittels elektromagnetischen Antrieben ist momentan für Anschlussgrößen G 1/4 bis G 1 verfügbar. Das Proportional-Druckregelventil VPPM hat mit einer Nennweite DN 1/2" einen maximalen Durchfluss von ca. 12.000 l/min. Die eingesetzten Komponenten und Materialien sind nur für die direkte Steuerung inerter bzw. neutraler Medien geeignet. Die Regelung von Dampf, Wasserstoff (H₂), Sauerstoff (O₂) oder aggressiven Gasen wie Ammoniak (NH₃) ist aufgrund der Materialbeständigkeit oder fehlender Zulassungen derzeit nicht möglich. Hier können Proportional-Druckregelventile zur Ansteuerung von z. B. Sitzventilen eingesetzt werden. Diese indirekte Anwendung entspricht denen im Abschnitt 2 beschriebenen Applikationen aus der Fertigungsautomatisierung.

Aus Sicht des Betreibers hat die oben beschriebene Realisierung der Inertgassteuerung mittels Proportionalventiltechnik am Reaktor eindeutige Vorteile:

- Flexiblere und einfachere Steuerung der Anlage
- Geringere Installationskosten
- Weniger Platzbedarf in der Anlage
- Bei kleinen Nennweiten bis 1/2" können Edelstahlrohre durch einfach zu installierende und deutlich preiswertere Schläuche ersetzt werden
- Reduzierte Ex-Schutz Anforderungen durch Schaltschrankinstallation im Non Ex-Bereich
- Erweiterte Diagnosemöglichkeiten durch Integration der Proportionalventile auf der Ventilinsel

Aus diesem Grund stellt die Proportionalventiltechnik eine interessante Alternative für die Regelung von inerten Gasen in der Prozessautomation dar.

Autor:

Thomas Schulz
Leiter Industriesegment-
und Key-Account-Management
Biotech/Pharma/Cosmetics

Festo AG & Co. KG
Rechbergstrasse 19
73770 Denkendorf
Tel.: +49 711 347 52192
Mail: thss@de.festo.com