

Um  $\text{CO}_2$  im WFI zu vermeiden, findet die Kondensation verfahrensbedingt bei Temperaturen über  $100^\circ\text{C}$  statt, sodass nicht kondensierbare Gase im Kondensator aufgrund des Überdrucks mit einer kleinen Menge Schlepddampf abgeführt werden.

Befinden sich im Speisewasser hohe Konzentrationen an gelösten Gasen, ist eine thermische Speisewasserentgasung zu empfehlen. Die  $\text{CO}_2$ -Konzentration und die damit verbundene pH-Wert-Absenkung ist weiterhin maßgeblich für „Rouging“ verantwortlich – einem Korrosionsphänomen, welches speziell in Reinstwassersystemen zu finden ist (s. hierzu Kap. 7).

#### 4.7.1 Einstufige Destillation

Die einstufige Destillationsanlage besteht im Grunde aus einem Reinstdampferzeuger mit einem nachgeschalteten Kondensator. Im Kondensator wird der erzeugte Reinstdampf gegen das in die Anlage fließende Speisewasser gefahren. Die bei der Kondensation des Reinstdampfes frei werdende Wärme wird damit an das Speisewasser übertragen und das Speisewasser damit vorerwärmt, bevor es in die Verdampferkolonne gelangt. Der installierte Kühler dient nicht der Energierückgewinnung, sondern wird verwendet, um das WFI mit einer einstellbaren Temperatur entnehmen zu können. Da die Energierückgewinnung bei einstufigen Destillationsanlagen relativ gering ist, wird dieser Anlagentyp meist nur bis zu 50 l/h Produktionsleistung verwendet (Abb. 6).

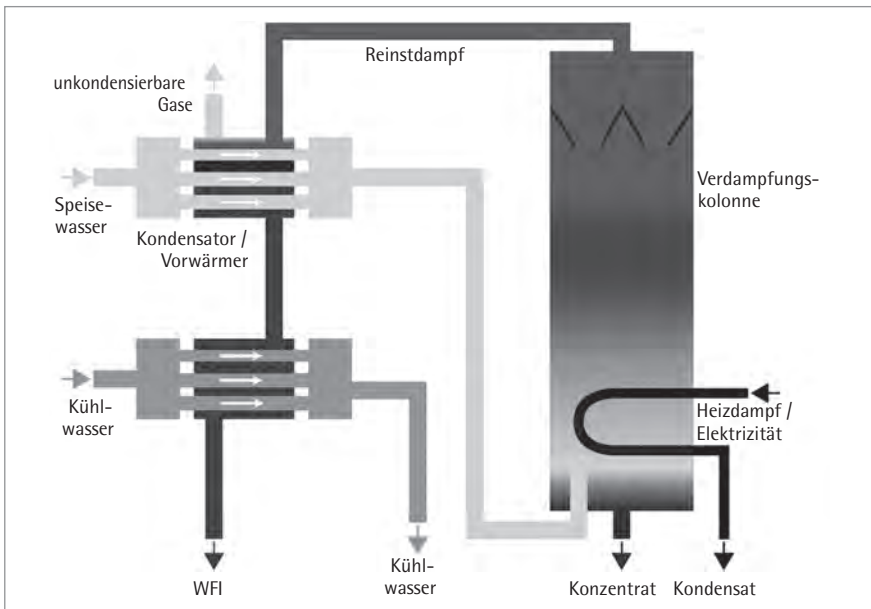


Abb. 6. Einstufige Destillation.

## 4.7.2 Mehrstufige Destillation

Bei der mehrstufigen Destillation werden mehrere Verdampfer so verschaltet, dass die einmal zugeführte Energie möglichst gut zurückgewonnen wird. Die Mehrstufigkeit bedeutet dabei nicht, dass das Speisewasser mehrfach verdampft wird. Jedes Wassermolekül wird in der Anlage nur einmal verdampft. Vielmehr ist das Mehrstufen-Druckkolonnen-Verfahren so aufgebaut, dass erzeugter Reinstampf in der darauffolgenden Kolonne (Stufe) dazu dient, Speisewasser zu verdampfen (Abb. 7). Durch dieses Verfahrensprinzip ist eine kaskadierte Druckabstufung möglich.

Für die Bestimmung der geeigneten Anlagengröße und die Auswahl der passenden Stufenzahl sollten folgende Größen ermittelt werden:

- Spitzenbedarf
- Tagesbedarf
- Jahresproduktionsmenge
- Kosten für Heizedampf
- Kosten für Kühlwasser

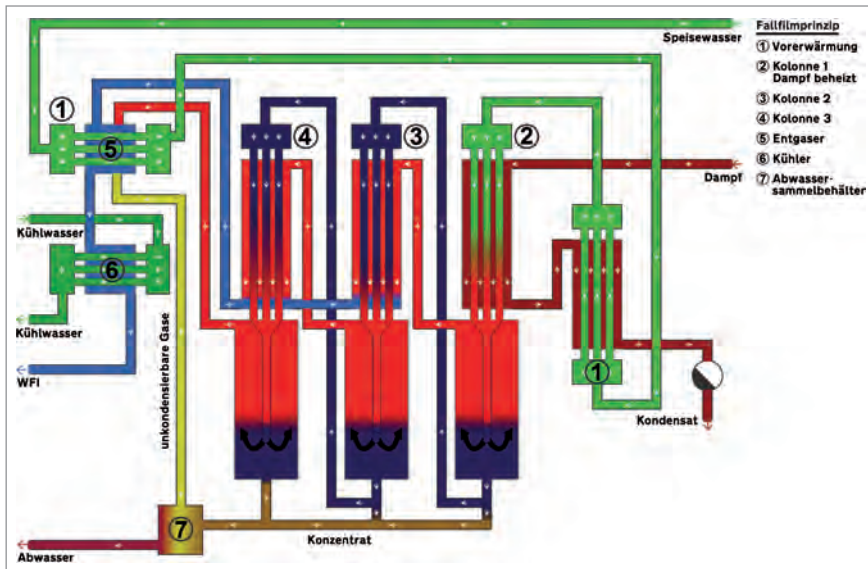


Abb. 7. Prinzipschema des Mehrstufen-Druckkolonnen-Verfahrens.

Die erste Kolonne ist die einzige, in welcher die Verdampfung durch Fremdenergieeintrag erfolgt. Dieser Energieeintrag erfolgt meist in Form von Industriedampf. Bei kleineren Anlagen wird auch elektrische Energie eingesetzt. In der ersten Kolonne ist der Druck und damit auch die Verdampfungstempera-

tur am höchsten. Der Druck in der ersten Kolonne wird durch den zur Verfügung stehenden Industriedampfdruck vorgegeben. Die darauffolgende, zweite Kolonne wird bei niedrigerem Druck betrieben. So wird es möglich, mit dem erzeugten Reinstdampf aus der vorherigen Kolonne das Speisewasser in der darauffolgenden Kolonne zu verdampfen (Abb. 1,7). Typisch für die meisten Hersteller ist ein Betrieb mit Industriedampf zwischen 3–8 bar und einer Kolonnenzahl zwischen 3–9 Stufen.

Die einzelnen Kolonnen können beim Mehrstufen-Druckkolonnen-Verfahren ebenfalls nach dem Fallfilmprinzip oder dem Naturumlaufprinzip arbeiten. Da WFI kontinuierlich erzeugt wird, bietet sich das Fallfilmprinzip besonders an, da dieses Verfahren ohne statische Flüssigkeitssäule auskommt. Fallfilmanlagen werden in den Stand-by-Phasen, in welchen kein WFI produziert wird, entleert. Gleichzeitig weist dieser Anlagentyp ein schnelles Anlaufverhalten auf, d. h., der Zeitraum vom Stillstand der Anlage bis zur WFI-Produktion ist kurz. Anlagen nach dem Naturumlaufprinzip werden in den Stand-by-Phasen heiß gehalten. Erfolgt in diesen Anlagen keine Heißhaltung, so stellt die abkühlende statische Flüssigkeitssäule eine Verkeimungsgefahr dar. Die Heißhaltung verbraucht zusätzliche Energie, die bei der Bilanzierung berücksichtigt werden muss. Die Verschaltung der Wärmeübertrager kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Das erzeugte WFI verlässt am Ende den Kondensator, in dem die unkondensierbaren Gase entfernt werden, bei einer Temperatur über 100 °C. Das heißt, zwischen der Verdampfungstemperatur in der jeweiligen Kolonne und der Temperatur im Kondensator liegt das nutzbare Temperaturgefälle. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten in der Anlagengestaltung bzw. der Dimensionierung der Wärmeübertrager. Eine besteht darin, der Kolonne, in welcher der Reinstdampf zum WFI kondensiert wird, einen zusätzlichen Wärmeübertrager nachzuschalten, in dem WFI gegen Speisewasser gefahren wird und dabei das Speisewasser vorerwärmt (Abb.8). Diese Anlagengestaltung hat jedoch den Nachteil, dass die Anlagen nur durch einen erhöhten Aufwand an Ventiltechnik der Forderung der Maschinenrichtlinie nach Restentleerbarkeit entsprechen kann [13]. Eine andere Möglichkeit besteht darin, das erzeugte WFI mit höherer Temperatur dem Kondensator zuzuführen und die Energie dort an das Speisewasser zu übertragen. Dadurch können die Vorwärmer entfallen und die Anlagen sind konzeptionell leicht restentleerbar. Diese Art der Anlagengestaltung ist in Abb.7 dargestellt.

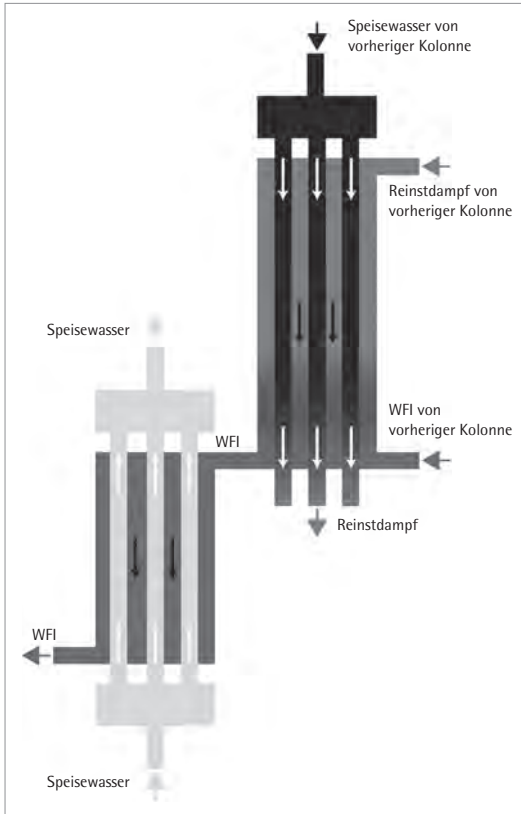


Abb. 8. Fallfilmverdampfer mit Vorerwärmung.

### 4.7.3 Thermokompression

Mechanische Brüdenverdichtung führt bei diesem Verfahren zur Wiederverwendung der im Dampf enthaltenen Energie. Dieses Verfahren wird in der Verfahrenstechnik häufig für die Aufkonzentrierung von Salzen bzw. zur Meerwasserentsalzung eingesetzt. Die Nutzung der Kondensationswärme aus der Destillatherstellung und den nicht kondensierbaren Gasen ermöglichen einen niedrigen Energieverbrauch und eine sehr effektive Herstellung von WFI, v.a. wenn dieses kalt entnommen wird.

In der Thermodynamik steht die Wärmepumpe für einen Kreisprozess, bei welchem durch Eintrag höherwertiger Energie (elektrische Energie) Wärme von einem tieferen auf ein höheres Temperaturniveau angehoben wird. Das heißt, zwischen der Verdampfung bei niedriger Temperatur und der Kondensation bei hoher Temperatur wird der Dampf verdichtet, um durch den Eintrag von mechanischer Energie auf ein höheres Temperaturniveau zu gelangen (Abb. 10). Bei der Wärmepumpe ist die Wärmezufuhr für den Verdampfer und die Wär-

meabgabe räumlich voneinander getrennt. Bei der Thermokompressionsanlage wird die bei der Kondensation frei werdende Wärme durch einen Wärmeübertrager, direkt in den Verdampferraum, abgegeben (Abb. 9).

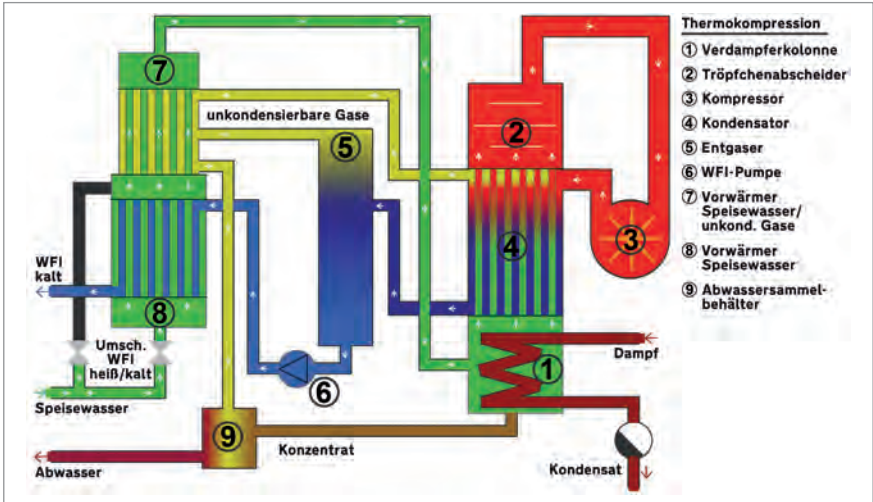


Abb. 9. Prinzipschema Thermokompression.

Die Analogie zwischen Thermokompression und Wärmepumpe wird aus den Abb. 10 und 11 leicht erkennbar. Jedoch stellt die Thermokompression, durch das zufließende Speisewasser und das entnommene WFI, keinen geschlossenen Kreisprozess dar.

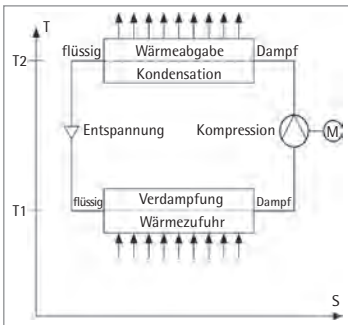


Abb. 10. Wärmepumpe im T-S-Diagramm.

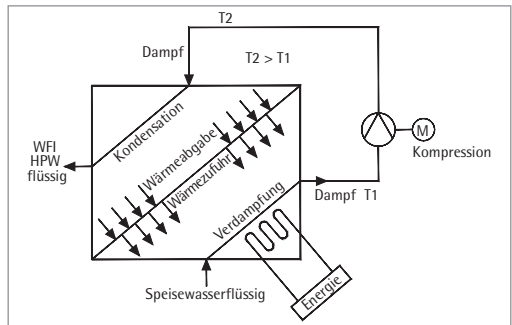


Abb. 11. Analogie Thermokompression / Wärmepumpe.

Durch die Bauform der Verdampferkolonne und des Kondensators ist die Strömungsgeschwindigkeit bei der Verdampfung sehr gering, wodurch die gravitative Tröpfchenabscheidung sehr effektiv ist. Deshalb können Thermokom-

Das Druckstück wird dabei über eine Spindel betätigt, welche wiederum von einem Ventilantrieb bewegt wird. Dadurch wird der Medienfluss in der Rohrleitung eingeschränkt bzw. unterbrochen. Die Durchflussrichtung des Mediums ist dabei frei wählbar. Die Betätigung des Ventilantriebs kann manuell über ein Handrad, pneumatisch oder elektromotorisch erfolgen. In der Praxis werden Membranventile meist pneumatisch durch die Verwendung neutraler Gase (z. B. saubere, trockene Druckluft) betätigt. Saubere und neutrale Flüssigkeiten, wie z. B. Wasser, werden in Ausnahmefällen und entsprechend der Antriebskonstruktion auch als Steuermedien genutzt.

Je nach Ausführung des Dichtstegs unterscheidet man bei Membranventilen zwischen Tiefsitz- und Stegausführung, wobei die Tiefsitzausführung nur einen angedeuteten Dichtsteg besitzt (Abb. 1). Dadurch verfügt das voll geöffnete Ventil zwar über einen freien Querschnitt, durch den das Medium ungehindert strömen kann; die sehr starken mechanischen Belastungen der Membrane schränken die Schaltwechsel jedoch extrem ein. Die Stegausführung ist aufgrund seiner vielen Vorteile (wie in Tab. 2 beschrieben) im Vergleich zur Tiefsitzausführung weiter verbreitet. Wird der Begriff „Membranventil“ ohne nähere Erläuterung verwendet, kann man davon ausgehen, dass daher ein Membranventil mit Stegausführung gemeint ist.

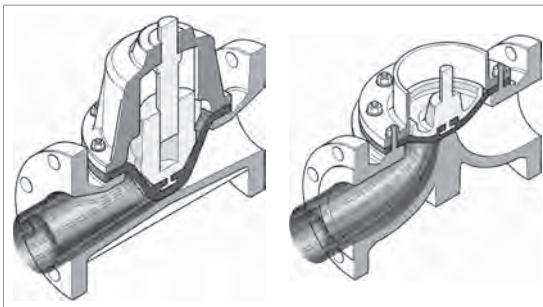


Abb. 1. Membranventil in Tiefsitz- (links) und Mittelsstegausführung (rechts).

Ein Membranventil besteht aus einer Vielzahl an Komponenten, von denen die wichtigsten in Abb. 2 dargestellt sind und nachstehend genauer erläutert werden.

Für **Ventilkörper** sind neben verschiedenen Bauformen auch viele unterschiedliche Werkstoffe und Anschlussarten verfügbar. Die am häufigsten eingesetzten Bauformen sind Durchgangskörper und T-Ventile, wobei Durchgangskörper meist als Absperrorgane in Rohrleitungen und T-Ventile bevorzugt zur Medienverteilung oder Probenahme eingesetzt werden. Als Werkstoffe können sowohl Kunststoffe, wie z. B. PVC oder PVDF, als auch Eisen- (z. B. Sphäroguss, Edelstahl) oder Nichteisenmetalle (z. B. Rotguss, Messing) verwendet werden. Zusätzlich zu den in der Abb. dargestellten Schweißstutzen sind Ventilkörper

auch mit Klebestutzen (nur bei Kunststoffen), Gewindestutzen oder -muffen, Flansch- oder Clamp-Anschlüssen erhältlich.

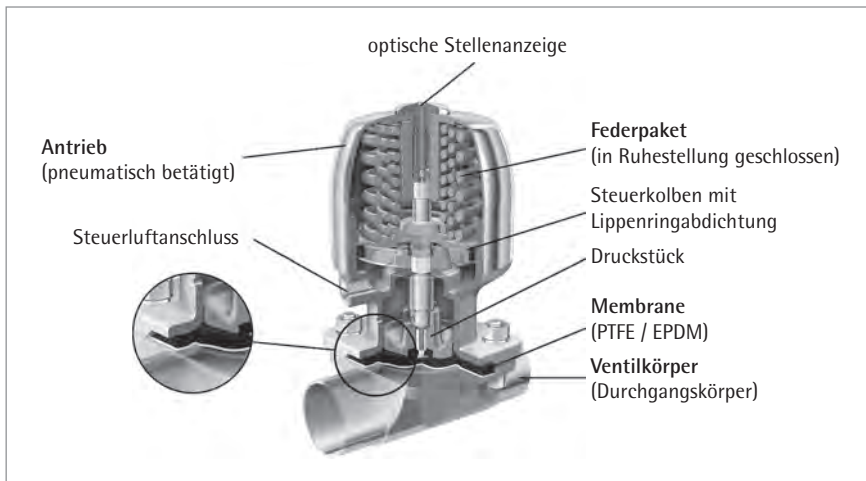


Abb. 2. Aufbau eines kolbengesteuerten Membranventils.

Die Absperrdichtung, auch **Absperrmembrane** genannt, ist das zentrale Dichtelement eines Membranventils, welches zusammen mit dem Ventilkörper den produktberührenden Teil des Ventils darstellt. Alle anderen beweglichen Komponenten kommen mit dem Betriebsmedium nicht in Berührung. Membranen sind in vielen verschiedenen Materialien verfügbar, wobei zwischen Elastomeren und Fluorkunststoffen unterschieden wird. Zu den Elastomeren zählen z. B. NBR, FPM, Silikon oder EPDM, während bei Fluorkunststoffen u. a. zwischen PTFE und TFM<sup>TM</sup> gewählt werden kann. Um bei den steiferen Fluorkunststoffen die benötigte Flexibilität und Dichtfähigkeit zu erreichen, muss der Kunststoff (PTFE) relativ dünn ausgeführt sein. Damit das Druckstück dieses dünne Kunststoffschicht nicht mechanisch überstrapaziert oder zerstört und das natürliche Setzverhalten des PTFE ausgeglichen werden kann, muss hinter der Kunststoffschicht ein Elastomerrücken platziert sein. Dabei ist das PTFE-Membranschicht entweder fest mit dem Gummirückenteil kaschiert oder flexibel vor dem Membranrücken eingelegt. Die Form von Membranen kann sich abhängig vom Hersteller stark unterscheiden, sodass rechteckige, quadratische und auch runde Bauformen auf dem Markt zu finden sind. Die Auswahl einer geeigneten Membrane sollte anwendungsspezifisch erfolgen, da diese abhängig von der Materialzusammensetzung und dem Herstellungsverfahren unterschiedliche Eigenschaften aufweist.

Das **Druckstück** dient zur Übertragung der Schließ- und Abdichtkraft und zur Umformung der Absperrmembrane. Für die Übertragung der Öffnungskraft spielt

die Art der Membranbefestigung am Druckstück eine wichtige Rolle. Hierbei wird zwischen der Befestigung mittels Gewinde- oder Bajonett-Pin unterschieden. Die Befestigung mittels Gewinde-Pin ist am weitesten verbreitet, da durch die große Fläche an den Gewindeflanken eine gleichmäßige Kraftübertragung ermöglicht wird. Beim Bajonettverschluss wirkt die Öffnungskraft lediglich an den Unterflächen des kleinen Passstiftes, sodass er spätestens bei Unterdrucksituationen abscheren kann. Aus Sicherheitsgründen sollte daher – v. a. im Vakuumbetrieb – auf diese Art der Verbindung verzichtet werden.

Die Betätigung der Ventile erfolgt durch den **Ventilantrieb**, welcher auch als Aktuator bezeichnet wird. Dabei kann die Betätigung manuell, pneumatisch, elektromotorisch oder elektromagnetisch erfolgen. Zu den am häufigsten eingesetzten Antrieben gehören die manuell und die pneumatisch betätigten Antriebe. Die manuelle Betätigung erfolgt über ein möglichst ergonomisch geformtes Kunststoff- oder Metallhandrad. Im Pharmabereich werden sowohl autoklavierbare Kunststoff- als auch leicht zu reinigende Edelstahlhandräder verwendet. Bei höheren Betriebstemperaturen empfiehlt sich jedoch die Verwendung eines temperaturbeständigen Kunststoffhandrads, da aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit Verbrennungen vermieden werden können. Pneumatische Antriebe werden meist mittels Druckluft betätigt, können aber auch mit Inertgasen, wie z. B. Stickstoff, betrieben werden (z. B. in explosionsgefährdeten Bereichen). Um eine lange Lebensdauer der Antriebskomponenten zu gewährleisten, sollte das verwendete Steuermedium stets öl-, wasser- und staubfrei sein. Je nach Steuerfunktion des Antriebs sind die Antriebskomponenten dabei unterschiedlich angeordnet. In Abb. 2 ist die Steuerfunktion „federkraft-schließend“ – auch „normally closed“ genannt – dargestellt. Bei dieser Steuerfunktion befindet sich das **Federpaket** im oberen Teil des Antriebs und hält das Ventil geschlossen, solange kein Steuermedium anliegt. Befindet sich das Federpaket im unteren Teil des Antriebs, also unterhalb des Steuerkolbens oder der Steuermembrane, ist das Ventil in der Ruhestellung geöffnet. Diese Steuerfunktion wird als „federkraft-öffnend“ oder „normally open“ bezeichnet. Beide beschriebenen Steuerfunktionen erfüllen eine Art Sicherheitsfunktion, da die Antriebe und somit auch die Membranventile bei Ausfall des Steuermediums eine definierte Stellung einnehmen. Enthält der Antrieb kein Federpaket, handelt es sich um einen beidseitig angesteuerten Antrieb, der bei Druckluftausfall eine unkontrollierte Stellung einnimmt. Durch diese Eigenschaft kann das Ventil zwar keine Sicherheitsfunktion einnehmen, bietet jedoch im Regelbetrieb den Vorteil, präziser und langfristig reproduzierbarer zu steuern.

Die optische **Stellungsanzeige** signalisiert dem Anwender, ob das Ventil zum aktuellen Zeitpunkt geöffnet oder geschlossen ist. Da die Ausführung je nach Antriebsart (manuell, pneumatisch oder elektrisch) stark variieren kann, wird hier nur kurz auf die Stellungsanzeige pneumatischer Antriebe eingegangen.



Diese ist bei den meisten Ventilen standardmäßig integriert und greift die Hubbewegung der Antriebsspindel ab. Durch die Verwendung eines modularen Systems, wie es bei einigen Ventilherstellern üblich ist, kann die optische Stellungsanzeige durch anderes Zubehör, wie z. B. elektrische Rückmelder, ersetzt werden. Soll das Ventil für Regelaufgaben eingesetzt werden, werden Stellungs- oder Prozessregler adaptiert. Herstellerabhängig können die Regler direkt oder extern mit dem Ventiltrieb gekoppelt werden (Abb.3).



Abb. 3. Membranventil mit direkt (links) oder extern (rechts) angebautem Prozessregler.

Die Abstimmung der Bauteile aufeinander ist von großer Bedeutung, da dies einen enormen Einfluss auf die Wartungsintervalle, die Prozesssicherheit und die Produktqualität hat. Ein wesentlicher Faktor auf die Wartungsintervalle kann die Anpassung des Federpakets an den tatsächlich vorhandenen Betriebsdruck sein. Liegt der vorhandene Betriebsdruck z. B. dauerhaft unter dem maximalen Betriebsdruck z. B. dauerhaft unter dem maximalen Betriebsdruck, kann ein schwächeres Federpaket gewählt werden. Dadurch wird die Kräfteinwirkung auf die Absperrmembrane verringert und deren Lebensdauer positiv beeinflusst. Die Abstimmung zwischen der Membran- und der Ventilkörperkontur spielt für die Prozesssicherheit und die Produktqualität eine entscheidende Rolle. Durch ein optimales Ineinandergreifen der beiden Konturen wird nicht nur eine gute Abdichtung nach außen, sondern auch eine gute Reinigbarkeit gewährleistet (Abb.2). Die Kombination von Bauteilen unterschiedlicher Hersteller ist daher nicht zu empfehlen und sollte nur in Ausnahmefällen nach vorheriger, eingehender Prüfung erfolgen. Grundsätzlich erlischt dabei die Gewährleistung.