

Hydrotransport – Die kosteneffiziente Alternative zu LKW und Bahn

Heinz M. Nägel

Bislang wurden die unterschiedlichsten Wert- oder auch Abfallstoffe in der Regel per LKW oder Bahn zur weiteren Verarbeitung, Verschiffung oder Entsorgung an entlegene Orte transportiert. Angesichts der globalen Erwärmung und der damit verbundenen Bedrohung für unseren Planeten ist diesbezüglich eine deutliche Trendwende erkennbar. Im Sinne des Umweltschutzes kommt zunehmend eine innovative und kosteneffiziente Alternative zum Einsatz: **Hydrotransport**

Unter Verwendung neuester Technologie werden Mischungen aus Feststoffen und Flüssigkeit (meist nicht-Newtonsche Flüssigkeiten) oft mehrere Hundert Kilometer weit umweltschonend in Pipelines zum Bestimmungsort gepumpt. Die Flüssigkeit dient den Feststoffen dabei als Träger in der Druckleitung.

Diese geniale Lösung wird u. a. erfolgreich in Kohlekraftwerken angewandt, um die in großen Mengen anfallende Flug- und Bodenrasche zu entlegenen Halden zu pumpen (siehe Abb. 1). Dabei kommen Verdrängerpumpen zum Einsatz, wie z. B. Kolbenpumpen, hydraulisch aktivierte Kolbenpumpen oder hydraulische Membranpumpen.

Hydrotransportsysteme stellen für die maschinelle und elektrotechnische Ausrüstung eine ganz besondere Herausforderung dar. Oberstes Gebot ist die Vermeidung von Sedimentationen. Das bedeutet, dass unter allen Betriebsbedingungen eine konstante Förderung gewährleistet sein muss, deren Strömungsgeschwindigkeit den kritischen Wert nicht unterschreitet, der zur Ablagerung der Feststoffe auf dem Rohrboden und damit zur Verstopfung der Leitung führen würde.

Für die optimale Auslegung der Pumpen empfiehlt sich daher zunächst eine rheologische Untersuchung des Mediums. Dies geschieht in der Regel mit einem Rotations-Viskosimeter. Die Untersuchung gibt unter anderem auch Aufschluss über die Grenzspannung (Fließfestigkeit)

τ_0 oder auch τ_r . Besitzt eine Flüssigkeit eine Fließfestigkeit (τ_r), so handelt es sich grundsätzlich um eine nicht-Newtonsche Flüssigkeit. Die ermittelte Kurve der Schubspannung τ zum Schergefälle gibt Aufschluss über die dynamische Viskosität η am jeweiligen Betriebszustand. Darauf aufbauend kann die Reynolds-Zahl auf der Basis der dynamischen und kinematischen Viskosität sowie der Dichte des Mediums berechnet werden. Die Reynolds-Zahl wiederum dient als Ausgangsbasis zur Berechnung der Druckverluste in der Rohrleitung, die unerlässlich ist, um den Druckbereich der Pumpe zu bestimmen.

Um eine Sedimentation der Feststoffe zu vermeiden, erfolgt im nächsten Schritt die Ermittlung der kritischen Geschwindigkeit v_{krit} , die von der gewählten Druckleitung im Innendurchmesser, der Dichte der Partikelkörner, der Feststoff-Volumenkonzentration C_v und der Kornverteilung abhängig ist. Mit Hilfe der errechneten Sinkgeschwindigkeit der Feststoffe kann die Sedimentationsgefahr für die einzelnen Anlagenteile analysiert werden.

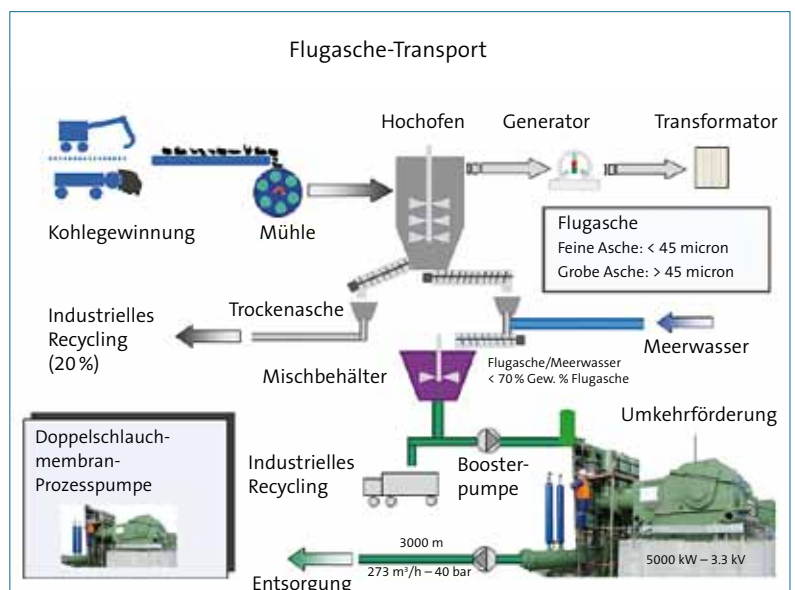


Abb. 1: Hydrotransportsystem zur Entsorgung von Flugasche aus Kohlekraftwerken

Bei Drücken bis 320 bar bietet die hydraulisch aktivierte Doppel-Schlauchmembranpumpe beste Voraussetzungen für derartige Aufgabenstellungen. Schlauchmembranpumpen garantieren einen deutlich besseren Füllungsgrad als Kolbenpumpen und vermeiden gegebenenfalls abrasiv wirkende Partikelablagerungen, weil sich die Schlauchmembrane beim Füllen ähnlich verhält wie der menschliche Darm (siehe Abb. 2.2).

um geradlinig umschließen. Gleichzeitig gewährleisten sie eine zweifache hermetische Abtrennung zum hydraulischen Betätigungsfeld. Die Schlauchmembranen werden vom Kolben über eine hydraulische Vorlageflüssigkeit aktiviert und machen im Takt des Pumpenhubes lediglich eine mit einer Vene vergleichbare Bewegung.

Der Vorteil der Konstruktion liegt im geraden Durchgang, was sich bei der Förderung von Medien, die ag-

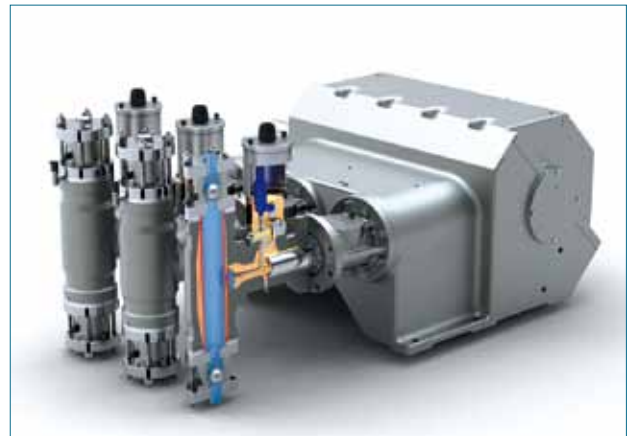


Abb. 3: Triplex-Doppel-Schlauchmembranpumpe

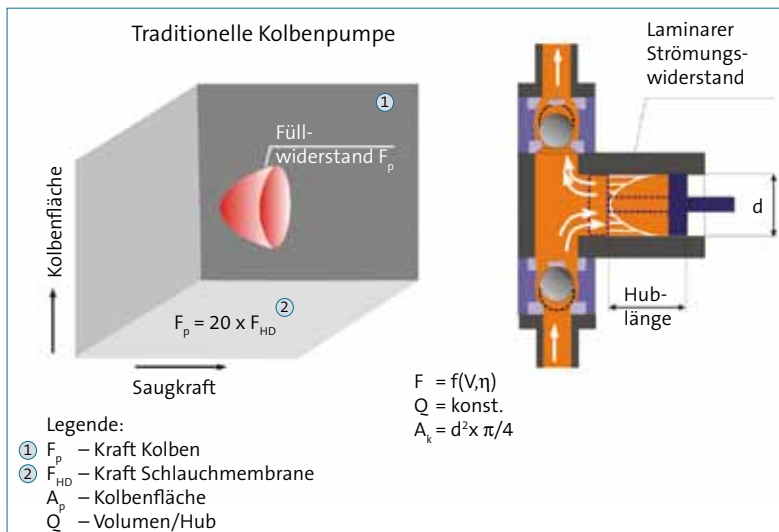


Abb. 2.1: Füllverhalten traditioneller Pumpen

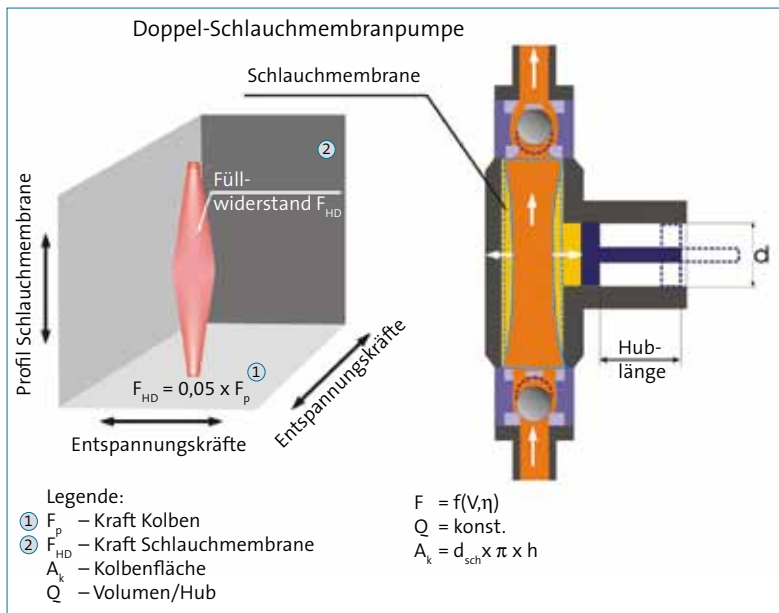


Abb. 2.2: Füllverhalten einer Doppel-Schlauchmembranpumpe

Wirkungsweise von Schlauchmembranpumpen

Das Herz dieser Pumpe bilden zwei Schlauchmembranen, die ineinander angeordnet sind und das Fördermedi-

um geradlinig umschließen. Gleichzeitig gewährleisten sie eine zweifache hermetische Abtrennung zum hydraulischen Betätigungsfeld. Die Schlauchmembranen werden vom Kolben über eine hydraulische Vorlageflüssigkeit aktiviert und machen im Takt des Pumpenhubes lediglich eine mit einer Vene vergleichbare Bewegung. Der Vorteil der Konstruktion liegt im geraden Durchgang, was sich bei der Förderung von Medien, die ag-

tationsstabiler Suspensionen. Die zylindrische Form der Membrane begünstigt das Fließverhalten und verhindert das Absetzen von Feststoffen (siehe Abb. 3).

Beide Schlauchmembranen sind auch alleine voll funktionsfähig. Selbst bei Undichtigkeit einer Schlauchmembrane ist daher gewährleistet, dass das Fördermedium nicht mit dem Pumpengehäuse in Berührung kommt. Die redundante Schlauchmembrane sorgt dafür, dass die Pumpe problemlos noch bis zum nächsten Betriebsstillstand weiter betrieben werden kann.

Dadurch, dass das Fördermedium bei dieser einzigartigen Konstruktion nur mit dem Inneren der Schlauchmembrane und nicht mit gleitenden Abdichtungen in Berührung kommt, sind eigentlich nur die Förderventile als Verschleißteil zu betrachten. Der Verschleiß der Förderventile ist in erster Linie vom Betriebsdruck und vor allem von den Druckpulsationen abhängig. Die Arbeitsweise der Schlauchmembrane (Abb. 3) ist vergleichbar mit der Aorta im menschlichen Körper. Allerdings übernimmt die Aorta aufgrund der großen Elastizität ihrer Gefäßwand zusätzlich noch eine so genannte Dämpfer-Funktion, die durch Druckangleichung aus dem schubweise vom Herz ausgestoßenen Blut einen kontinuierlichen Blutstrom ermöglicht. Das ist bei oszillierenden Verdrängerpumpen nicht der Fall. Verdrängerpumpen haben je nach Bauart ein sehr unterschiedliches Pulsationsverhalten. Für eine Triplex-Pumpe, üblicherweise mit 120° oder 2/3 π Kolbenversatz ausgestattet, erfolgt die

Berechnung der Förderstrompulsation oder Strömungsgeschwindigkeitspulsation wie folgt.

Für die Kolbengeschwindigkeit und den Förderstrom gelten:

$$v_k(t) = r \cdot \omega (\sin \psi + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin 2\psi)$$

und

$$\dot{V}(t) = v_k(t) \cdot A_k$$

Untersucht man die Kurve $v_k(t)$, so zeigt sich, dass bei 117° (ca. $2/3 \pi$) ein Minimum und bei

$$(\sin \psi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\psi)$$

ein Maximum auftritt (entsprechend 82° oder 38°). Die Differenz der beiden Punkte ergibt die Restpulsation. Betrachtet man $r \times \omega$ als Konstante und wertet diese Gleichungen hinsichtlich der Extremwerte aus, so ergibt sich für $r = 0,1$ m und $\lambda = 0,142$ (eingesetztes Getriebe) eine Restpulsationsamplitude A von 22,2%.

Legende:

A = Amplitude Pulsation Strömungsgeschwindigkeit

$$\lambda = \frac{r}{L_p} = \text{Kurbelverhältnis} = 0,142$$

r = Radius Kurbelwelle = 0,1 m

L_p = Länge Pleuel = 0,7 m

ψ = Drehwinkel

Aus diesem Formelsatz ergeben sich interessante Vergleichswerte, was die Ungleichförmigkeit verschiedener Multiplex-Kolbenpumpen anbelangt.

2 Zylinder, doppeltwirkend:	45,6%
3 Zylinder, einfachwirkend:	23,0%
4 Zylinder, einfachwirkend:	32,5%
5 Zylinder, einfachwirkend:	7,1%
6 Zylinder, einfachwirkend:	14,0%

Mit einer einfachwirkenden Fünfzylinderpumpe wird demzufolge mit Abstand das beste Ergebnis erzielt (siehe Abb. 4). Dies bleibt auch über einen weiten Druckbereich erhalten.

Der Vorteil der Fünfzylinderpumpe ist jedoch nicht auf den vorteilhaften Pulsationsbereich beschränkt; er wirkt sich auch gleichermaßen mindernd auf den Verschleiß der Förderventile aus, da bei Förderung in eine gemeinsame Sammelleitung weniger Pulsationsdynamik auf die Ventile wirkt.

Wie Abbildung 5 zeigt, trägt die zylindrische Form der Schlauchmembranen im Vergleich zu traditionellen Membranpumpen zu erheblich reduzierten Abmessungen bei.

Pulsationsdämpfung

Um eine optimale Dämpfung der bei Kolbenpumpen unvermeidbaren Pulsationen innerhalb der Ventile und der Druckleitung zu gewährleisten, werden die Pulsationsdämpfer direkt in die Sammelleitung über den Druckventilen der Pumpe installiert. Damit sowohl in Bezug auf den Förderdruck als auch auf die Fördermenge ein Maximum an Gleichförmigkeit erzielt wird, ist bei einer geraden Anzahl

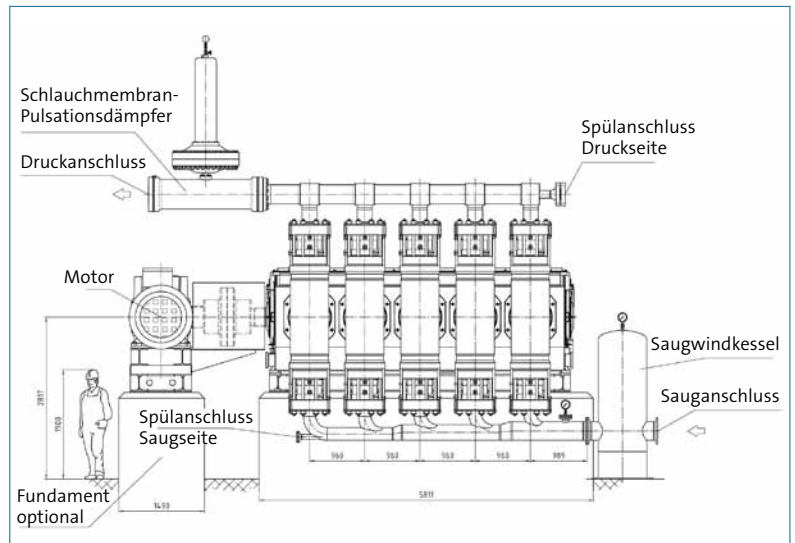


Abb. 5: Doppel-Schlauchmembranpumpe in Quintuplex-Ausführung – Fördermenge 525 m³/h bei 38 Hüben/min. · Antriebsleistung 2.200 kW

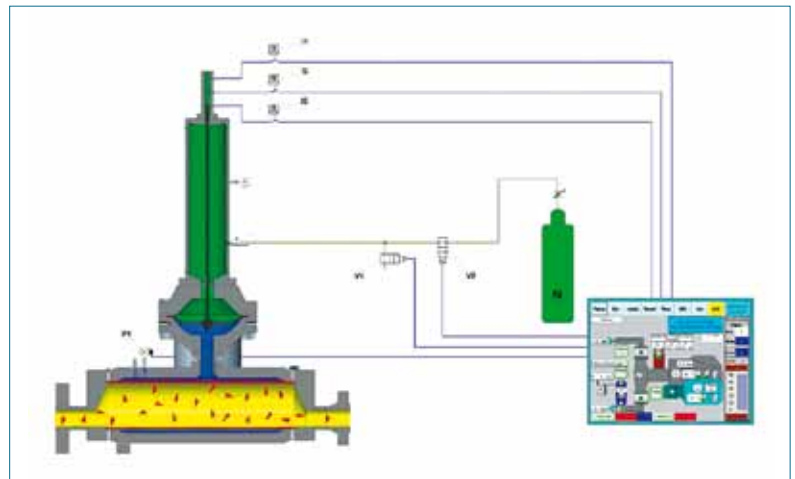
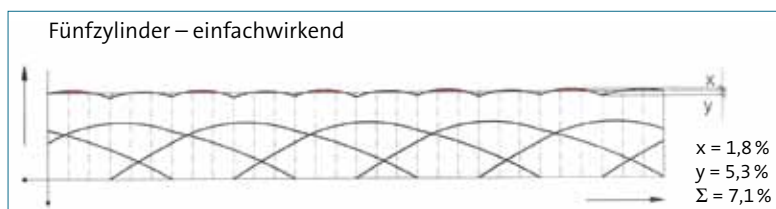


Abb. 6: Schlauchmembran-Pulsationsdämpfer mit automatischer Anpassung an den Betriebsdruck

Abb. 4: Ungleichförmigkeit von einfachwirkenden Fünfzylinderpumpen – bezogen auf den mittleren Förderstrom



von Pumpenköpfen jeder Pumpenkopf mit einem individuellen Dämpfer versehen. Bei einer ungeraden Anzahl von Köpfen (mindestens drei) dagegen genügt angesichts der versetzten Anordnung der Kurbelwellen meist ein einziger Pulsationsdämpfer

fer auf der Druckverbindungsleitung. Damit auch an dieser Stelle die geradlinige Strömung nicht durch Umlenkungen unterbrochen wird, werden Doppel-Schlauchmembranpumpen bei Hochdruckanwendungen mit in den unterschiedlichsten Industriegebieten bestens bewährten horizontal liegenden Schlauchmembran-Pulsationsdämpfern ausgestattet (siehe Abb. 6).

Umkehrförderung

Speziell bei der Förderung von Fluiden mit nicht-Newtonschen Eigenschaften besteht ein nicht zu unterschätzendes Risiko, dass das Medium innerhalb der Pumpe sedimentiert, wodurch die Bewegung der Membrane so weit beeinträchtigt werden kann, dass sie letztendlich bricht. Bei traditionellen Membran- und Kolbenmembranpumpen mit Förderung von unten nach oben besteht die Gefahr, dass Feststoffe während des Saughubes zurück in den unteren Bereich des Fördergutraumes fallen, wenn die Sinkgeschwindigkeit der im Medium

enthaltenen Feststoffe größer ist als die Transportgeschwindigkeit.

Für den Hydrotransport konnte daher das traditionelle Wirkprinzip der Pumpen auf den Kopf gestellt werden, so dass die Förderung von oben nach unten erfolgt. Hierzu werden die Doppel-Schlauchmembranpumpen mit Umkehrventilen ausgestattet, die speziell zur Förderung heterogener Mischungen entwickelt wurden (siehe Abb. 7). Eine Durchströmung der Pumpe von oben nach unten verhindert das Absetzen von Feststoffen, was wiederum zu einem höheren Wirkungsgrad beiträgt. Doppel-Schlauchmembranpumpen (Abb. 8) sind nach dem Baukastenprinzip konstruiert und stehen derzeit für Förderleistungen bis 750 m³/h und eine Antriebsleistung bis 2.500 KW zur Verfügung. Die geradlinig durchströmten Pumpen bieten beste Voraussetzungen für den Hydrotransport von problematischen Fördermedien, wie z. B. die Entsorgung von Flug- und Bodenasche aus Kohlekraftwerken oder die Förderung von Kohle-, Kupfer-

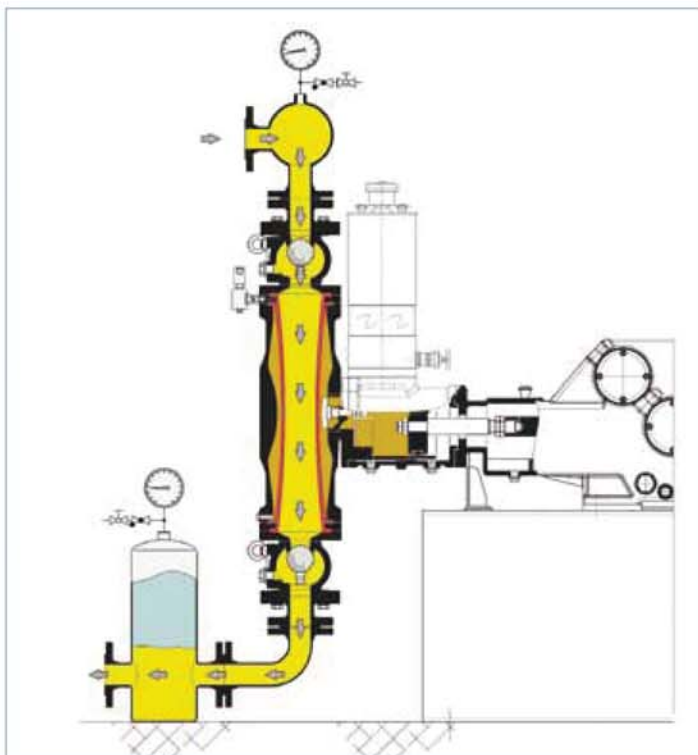


Abb. 7: Umkehrförderung

HERZ.ARBEIT WELT.WEIT

BIONIK IM PUMPENBAU

Wie eine pulsierende Vene funktioniert die **MULTISAFE Doppel-Schlauchmembranpumpe** mit zwei ineinander angeordneten Schlauchmembranen und gewährleistet einen schonenden, geradlinigen Durchfluss des Mediums - sicher und umweltfreundlich.

PREISTRÄGER
Großer Preis des
MITTELSTANDES
2014/2015

Innovative Pumpentechnik: 100% sicher gegen Überdruck, Vakuum und ungünstige Saugverhältnisse. **Höchste Betriebssicherheit:** Bei Undichtigkeit einer Schlauchmembrane sichert die zweite die Funktionstüchtigkeit bis zur Reparatur. **Einzigartiges Diagnosesystem:** gewährleistet beispielsweise die ständige Überwachung von Förderventilen und Schlauchmembranen.

FELUWA Pumpen GmbH | Fon 06594-10-101 | www.feluwa.com

Erz- oder ähnlichen Schlämmen über große Entfernungen.

In Fällen kritischer Prozessbedingungen, in denen die kontinuierliche Förderung nicht unterbrochen werden darf, empfiehlt sich darüber hinaus die Verwendung von Doppelventilen. Rückflussleckagen als Folge von eingeklemmten Feststoffen werden

auf diese Weise sicher ausgeschlossen. Da die Verschleißrate proportional zum Differenzdruck steigt, wird bei der Verwendung von Doppelventilen der Verschleiß entsprechend reduziert, während der Abstand zwischen den Wartungsintervallen erhöht wird. Alle zur Auswahl stehenden Ventilvarianten sind in Kassettenbauweise



Abb. 8: Doppel-Schlauchmembranpumpen in Drillings-Ausführung im Einsatz

konzipiert und können ohne vorherige Demontage von Rohrleitungen schnell und problemlos aus- und wieder eingebaut werden.

Antriebs-, Regel- und Diagnosesysteme

Moderne Hydrotransportsysteme erfordern natürlich auch adäquate Antriebs-, Regel- und Diagnosesysteme. Doppel-Schlauchmembranpumpen werden gemäß den örtlichen Gegebenheiten entweder mit Nieder- oder Mittelspannungsmotoren ausgerüstet, deren Geschwindigkeit über entsprechende Frequenzumformer gesteuert wird. Fördern mehrere Pumpen in die gleiche Druckleitung, wird darüber hinaus eine Inkremental-Überwachung der Frequenzumformer eingesetzt, um Rohrleitungsschwingungen zu vermeiden.

Zustandsüberwachung

Das Internet wird sukzessiv zum umfassenden Medium für den Transport von Daten aller Art. Bis 2015 wird die Zahl der Internetnutzer voraussichtlich auf rund fünf Milliarden anwachsen. Auch die Industrie setzt verstärkt auf drahtlosen Datenverkehr und schätzt die daraus resultierenden, neuen Perspektiven.

Mit umfassenden Diagnosesystemen und Touch Panels bieten die hier vorgestellten Prozesspumpen schon jetzt die als HMI (Human Machine Interface) bekannte Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine mit vollständiger Integration der Pumpendiagnose in Industrie-Leitsysteme und Webservice-Option. Die in den Schaltschrank integrierten Touch Panels geben dem Betreiber Aufschluss über die aktuellen Betriebsdaten und Messwerte, wie z. B. Hubzahl, Saugdruck, Druckschwankungen, Temperatur von Hydraulik- und Getriebeöl oder den Zustand von Schlauchmembranen und Förderventilen. Sie zeigen nicht nur daraus resultierende eventuelle Mengen- und Wirkungsgradverluste auf, sondern leisten gleichzeitig einen beachtlichen Beitrag zur Reduzierung der Energiekosten. Bei Einbindung in Industrie-Leitsysteme bieten Touch Panels darüber hinaus die Möglichkeit

von Webservice, der in vielen Fällen den Einsatz vor Ort erspart.

Ein entscheidendes Kriterium der Zustandsüberwachung ist, erste Anzeichen von Verschleiß oder sonstige Abweichungen von den Sollwerten so frühzeitig zu erkennen, dass der Betreiber die Möglichkeit hat, die weitere Entwicklung zu beobachten und erforderliche Wartungsmaßnahmen so in den Prozess einzubinden, dass kein unplanmäßiger Stillstand entsteht. Da die leckagefreie Abdichtung der Förderventile nicht nur beim Hydrotransport eine entscheidende Rolle spielt, wurde für die hier vorgestellten Doppel-Schlauchmembranpumpen zusammen mit einem namhaften Elektrokonzern ein System zur Früherkennung von Ventilverschleiß entwickelt. Das Messprinzip der maßgeschneiderten Detektoren basiert auf der Körperschallanalyse und erkennt Leckagen zwischen Ventilsitz und Kugel oder Kegel bereits zu einem Zeitpunkt, wenn der Fördermengenverlust noch unter 1,5 % liegt. Das Messergebnis kann über einen potentialfreien Kontakt auf vielfältige Weise weitergeleitet werden (z. B. Internet oder Intranet) und bietet dem Betreiber die Möglichkeit einer gezielten Voraussplanung von Wartungs- und Reparaturarbeiten sowie der exakten Bestimmung der MTBR-Werte. Verfügbarkeit und Betriebssicherheit der Pumpen werden durch die 4 in 1 Diagnoseeinrichtung signifikant erhöht. Diese Einrichtung umfasst die permanente Zustandsüberwachung aller Förderventile (Valve Performance Monitoring System – FVPMS), der primären und sekundären Schlauchmembranen, Zulauf-/Saugdruck sowie Hydraulik-/Getriebeöltemperatur. Wartungskosten können auf diese Weise erheblich reduziert werden. Das FVPMS bestimmt präzise, welches der Saug- und Druckventile undicht ist und gegebenenfalls ausgetauscht werden muss. Präventive Wartung wird damit zum Auslaufmodell.

Betriebskosten

Abgesehen von den Aspekten des Umweltschutzes stellt der Hydrotransport nicht nur eine wesentlich einfachere Problemlösung dar, sondern

kann darüber hinaus auch zu erheblichen Kosteneinsparungen beitragen, wie das nachstehende Beispiel zeigt.

Betriebskosten-Beispiel (ohne Rohrleitung und Aufbereitung)

Rohrleitungslänge: 72.000 m
 Geodätische Förderhöhe: 108 m
 Fördermedium: Kohleslurry
 Dichte: 1.180 kg/m³
 Dynamische Viskosität: 104 mPas
 Fördermenge: 3 Pumpen à 440 m³/h = 1.320 m³/h
 Förderdruck: 120 bar
 Elektrischer Leistungsbedarf: 1.795 kW/Pumpe = 5.385 kW (Gesamtleistung)
 Hubzahl: 43 Hübe/min.
 Energiekosten: 5.385 kWh/1.320 m³/h = 4,07 kW/m³, bei 0,07 €/kWh folgt daraus 0,285 €/m³
 Gesamtkosten (CAPEX & OPEX) für den Transport pro m³: 0,323 €/m³ (Anschaffungskosten auf der Basis einer Lebensdauer von 30 Jahren + Verschleißteile in den ersten 2 Jahren + Energiekosten)

Folgerung

Besonders im Hinblick auf die lineare Strömung ohne unnötige Umlenkung, die doppelte Abgrenzung zwischen Flüssigkeits- und Antriebsende sowie die optionale Umkehrförderung empfiehlt sich der Einsatz von Doppel-Schlauchmembranpumpen für den Hydrotransport abrasiver und/oder aggressiver Flüssigkeiten, Schlämme und Pasten.

Mit einer Fördermenge von max. 750 m³/h und einem Druck von max. 320 bar stellt die patentierte und mehrfach ausgezeichnete Konstruktion eine lohnende Alternative zur traditionellen Entsorgung per LKW oder Bahn dar, die dem Betreiber und der Umwelt gleichermaßen zugute kommt.

Autor: Heinz M. Nägel
 Geschäftsführer der
 FELUWA Pumpen GmbH
 Mürlenbach