

Schraubenrotoren

das Verschleißobjekt

Q. Yang, H. Ochs, R. Schuhmann, BASF SE , Ludwigshafen

Kurzfassung

Das BASF SE Stammwerk in Ludwigshafen ist der weltweit größte zusammenhängende Chemiestandort einer einzelnen Firma. Je nach Anforderungen der Chemieprozesse werden unterschiedliche Gase in verschiedenen Druckbereichen und Volumenströmen eingesetzt. Ausgehend von Schadensereignissen wird dargestellt, wie konstruktive Ausführungen und geringfügige Änderungen von Prozessparametern das Betriebsverhalten der Schraubenverdichter verändert, und welchen Einfluss dies auf Verfügbarkeit und Standzeit der Schraubenverdichter hat.

1. Einleitung

Die BASF SE ist der weltweit größte Chemiekonzern mit Hauptsitz in Ludwigshafen am Rhein. Das BASF-Stammwerk in Ludwigshafen ist seit 1865 Produktionsstätte und der bedeutendste Produktionsstandort der BASF und heute mit über 2.000 Gebäuden und über 10 km² das größte zusammenhängende komplexe Chemieareal der Welt. Ein weitverzweigtes Netz von Rohrleitungen macht ein effizientes Versorgen der Anlagen mit Rohstoffen und Energie möglich. Im Verbund werden Produktionsanlagen intelligent miteinander vernetzt, um dadurch Ressourcen und Energie einzusparen.

In der Verbundstruktur liegt einer der wichtigsten Vorteile des Standorts. So kann in vielen Fällen das Nebenprodukt eines Betriebs von einem anderen Betrieb als Rohstoff genutzt werden. Um die unterschiedlichen Anforderungen der Chemieprozesse zu erfüllen, sind die Verdichtung und die Förderung von Gasen in verschiedenen Druck- und Fördermengenbereichen notwendig. Schraubenverdichteranlagen sind aufgrund ihres kompakten Aufbaues und der hohen Verfügbarkeit in einer Vielzahl von Produktionsanlagen eingesetzt.

2. Verschleißobjekt Schraubenrotoren

Ausgehend von Schadensereignissen wird dargestellt, inwieweit konstruktive Ausführungen und geringfügige Änderungen von Prozessparametern das Betriebsverhalten der Schraubenverdichter verändert, und welchen Einfluss dies auf Verfügbarkeit und Standzeit der Schraubenverdichter hat.

2.1 Ammoniak - Prozessgasverdichter

Daten Verdichter:

- Antrieb: E-Motor
- Medium: Ammoniak (NH_3)
- Fördermenge: 6.700 Nm^3/h (Volumenregelung über Steuerschieber)
- Drehzahl: 2.986 1/min
- Saugdruck: 1,8 - 2,2 bar a
- Enddruck: 18 bar a
- Inbetriebnahme: 2002

2.1.1 Historie und Befunde

In einer Anlage zur Rückverflüssigung von Ammoniak (NH_3) sind zur Verdichtung ölgeschmierte Schraubenverdichter eingesetzt. Im März 2006 trat nach vierjähriger Betriebszeit an einem Verdichter eine Minderleistung von 20 % auf, nachdem vorher eine Häufung von Filterwechsel des Ölsystems aufgetreten war. Die Anlage wurde abgestellt und der Verdichter demontiert. Ein unerwartetes Schadensbild zeigte sich nach Zerlegen des Verdichters.

Haupt- und Nebenrotor hatten Kontakt mit dem Steuerschieber, wodurch die Dichtleisten der Rotoren abgearbeitet wurden (Bild 1).



Bild 1 Abgearbeitete Dichtleisten von Haupt- und Nebenrotor

Die Führungsnuten des Steuerschiebers waren ca. 2 mm eingearbeitet (Bild 2), Kolben sowie Kolbenstange der Steuerschieberverstellung zeigten starke Verschleißspuren.



Bild 2 Steuerschieber mit eingearbeiteten Führungsnuten

Die Ursache für den Verschleiß des Steuerschiebers ist eine zu hohe Flächenpressung zwischen den Passfedern zur Fixierung und Führung des Steuerschiebers und den Nuten im Steuerschieber. Hierdurch kommt es zum Verschleiß in den Nuten und als Folge zu Kontakt zwischen Steuerschieber und Rotoren. Die hohe Flächenpressung resultiert aus dem zu hohen Schmieröldruck zwischen dem Steuerschieber und der Steuerschieberführung im Verdichtergehäuse. Zur Einregulierung des Öldruckes wurde in der Ölversorgungsleitung des Steuerschiebers ein Regelventil mit Manometer eingebracht. Zusätzlich wurden die Führungsnuten des Steuerschiebers mit einer Oberflächenhärtung versehen.

Nach der Reparatur und Wiederinbetriebnahme wurde der Schraubenverdichter im November 2007 entsprechend einer vertraglichen Vereinbarung mit dem Hersteller demontiert und zerlegt. An den Bauteilen zeigten sich nahezu die gleichen Schädigungen wie im März 2006 (Bild 3).



Bild 3 Nebenrotor mit abgearbeiteten Dichtleisten nach Demontage

Einzig die durchgeführte Oberflächenhärtung der Führungsnuten zeigte Wirkung, es ist kein nennenswerter Verschleiß aufgetreten. Die Schadensbilder zeigten, dass der Steuerschieber im Bereich der Vollaststellung durch ein Öldruckpolster zwischen Steuerschieber und Steuerschieberführung nach oben gedrückt wird. Konstruktiv halten die im Gehäuse eingebrachten Passfedern den Steuerschieber im Bereich der Druckseite nach unten. Im Bereich der Saugseite gibt es keine weitere Lagerung oder Führung. Um einen Druckaufbau im Bereich zwischen Passfederführung und Saugseite zu vermeiden wurde der Steuerschieber geändert und ohne Ölnuten ausgeführt (Bild 4 und 5)



Bild 4 Steuerschieber mit Ölnuten



Bild 5 Steuerschieber ohne Ölnuten

Nach Instandsetzung des Verdichteraggregates erfolgte die Wiederinbetriebnahme der Anlage im März 2008.

Eine mit dem Hersteller vertraglich vereinbarte Inspektion wurde im Januar 2010 durchgeführt. An den Bauteilen zeigten sich nahezu die gleichen Schädigungen wie bei den vorangegangenen Inspektionen. Zum ersten Mal trat eine Schädigung der Passfedern auf (Bild 6). Die Modifikationen am Steuerschieber zeigten nicht die gewünschte Wirkung.



Bild 6 Anlaufspuren am Steuerschieber und Abtrag unterhalb der Passfedern

2.1.2 Abhilfemaßnahmen

Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Schädigungen, der durchgeführten konstruktiven Veränderungen und der konstruktiven Diskussion mit dem Hersteller, ist die Druckverteilung des Leckgasstromes ausgehend von der Druckseite in Richtung Saugseite unterhalb des Steuerschiebers die Ursache der Schädigungen. Das Wirkprinzip ist in Bild 7 dargestellt

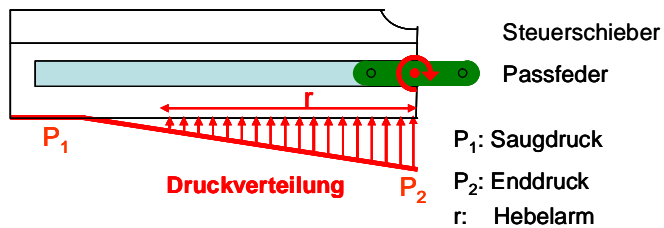


Bild 7 Druckverteilung und Hebelarme unterhalb Steuerschlitten

Im Gleitspalt zwischen dem Steuerschieber und der Steuerschieberführung entsteht eine Druckverteilung zwischen Saug- und Druckseite. In der Stellung „Vollast“ wird aufgrund der entstehenden Druckverteilung zwischen Saug- und Enddruck der Steuerschieber durch ein resultierendes Drehmoment, mit Drehpunkt im Bereich der Passfeder, nach oben gedreht. Um die Druckverteilung unterhalb des Schiebers zu verändern und den Hebelarm zu reduzieren, werden Entlastungsnuten im Zylinder unterhalb des Steuerschiebers eingebracht.

Die Wirksamkeit der eingebrachten Abhilfemaßnahmen wird erst nach der geplanten Demontage im November 2010 ersichtlich.

2.2 Wasserstoff - Prozessgasverdichter

Daten Verdichter

- Antrieb: E-Motor mit Drehzahlregelung
- Medium: Wasserstoff (H_2)– Mischgas
- Fördermenge: 1.900 Nm^3/h
- Drehzahl: 16.320 1/min
- Saugdruck: 19,2 bar a
- Enddruck: 24,2 bar a
- Inbetriebnahme: 2001

2.2.1 Historie und Befunde

Nach fünfjähriger, nahezu problemfreier Laufzeit befand sich ein für die Förderung und Verdichtung von Wasserstoff-Mischgas ausgelegter trockenlaufender Schraubenverdichter bestimmungsgemäß im Spülbetrieb mit Stickstoff. Die Maschine wurde von der Betriebsmannschaft von Hand abgestellt, nachdem schlagartig starke Geräusche entstanden und die Stromaufnahme der Antriebsmaschine ein Vielfaches des üblichen Wertes erreichte. Nach der Demontage des Verdichters zeigten sich starke Anstreifspuren an den Rotoren (Bild 8) sowie am Gehäuse.

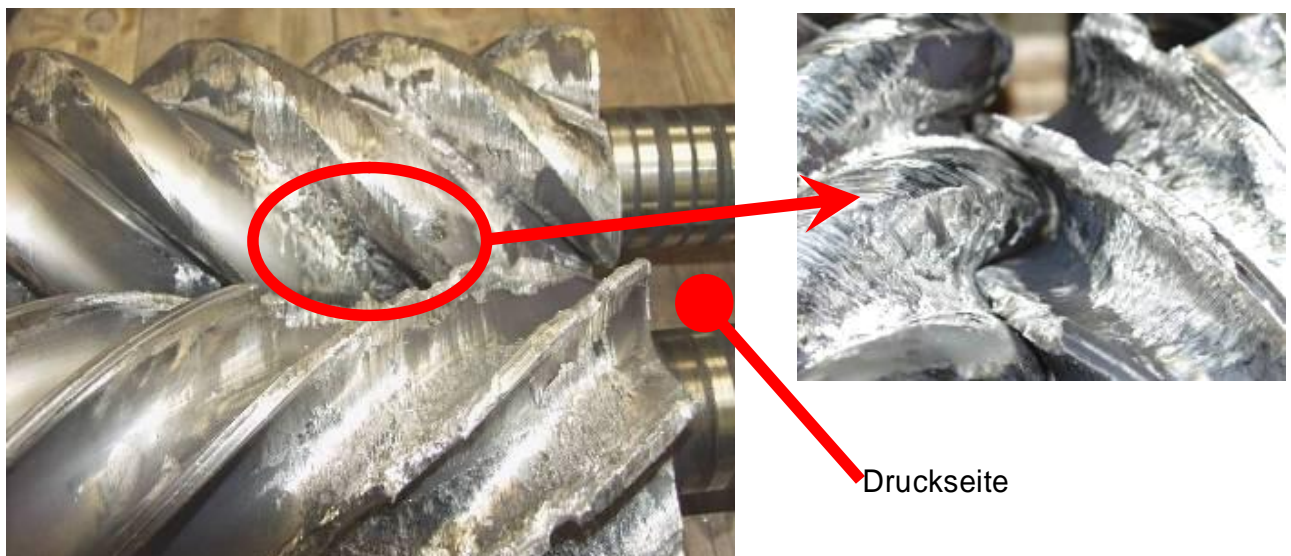


Bild 8 Hauptrotoren (oben) und Nebenrotoren (unten) des Verdichters

Um den Eintrag inkompressibler Medien auszuschließen wurden Rohrleitung und Behälter um den Verdichter geöffnet. Dabei wurden in der Druckleitung Späne (Bild 9) sowie ca. 1,5 Liter Flüssigkeit (Bild 10) entnommen. Die Späne traten als Folgen des Anlaufens der Rotoren auf. Weiterhin konnte in der Sicherheitsventil-Abblaseleitung und in der Haube des Bypasskühlers Flüssigkeit entnommen werden. Die Impulsleitungen der Druckmesseinrichtungen waren zur Saugseite hin vollständig mit Flüssigkeit gefüllt.

Nach dem Öffnen des Abscheiders waren Füllstandsmarken (Pegel) bis zur Unterkante des Auslassstutzens sichtbar (Bild 11).



Bild 9 Späne der Rotoren aus Druckleitung hinter Verdichter

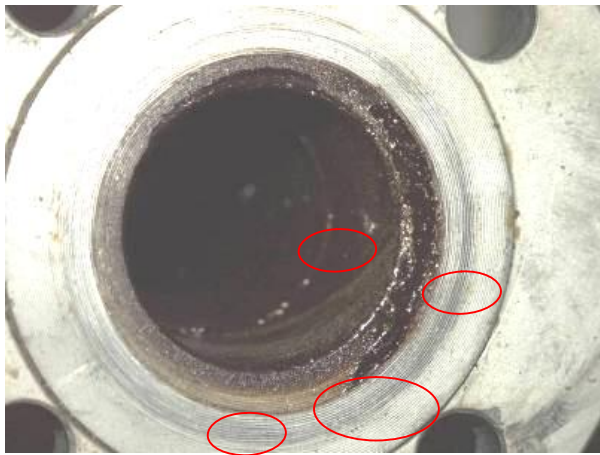


Bild 10 Druckleitung mit Flüssigkeit und Späne

Füllstandsmarken (Pegel) Austrittsstutzen zur Maschine

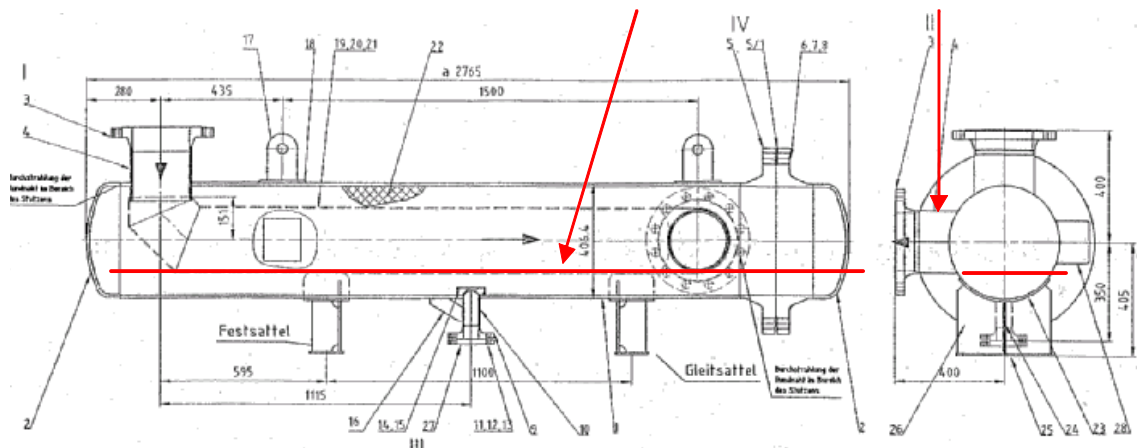


Bild 11 Abscheider, Füllstandsmarken sind rot markiert

Da es sich um einen liegenden Behälter mit seitlichem Abgang zur Maschine handelt, ist davon auszugehen, dass während des Betriebs Flüssigkeit aus einem Behältersumpf in die Saugleitung mitgerissen wurde, was zum Schaden an der Maschine führen konnte. Nach Entleerung der Anlagenteile, Änderung der Füllstandsüberwachung am Behältersumpf und Instandsetzung des Verdichteraggregates erfolgte die Wiederinbetriebnahme der Anlage.

Nach nur fünfmonatiger Betriebszeit fiel der Schraubenverdichter durch Überschreitung der Motorstromgrenze erneut aus. Die Anlage wurde zuvor mit Stickstoff gespült und war bereit für das Anfahren mit H₂ – Mischgas.

Die Rotoren wurden mittels Endoskopie über den Druckstutzen kontrolliert und starke Schäden an den Laufflächen festgestellt. Der Verdichter wurde samt Getriebe aus der Anlage entnommen. Wie beim ersten Schaden zeigten sich nach der Demontage des Verdichters starke Anstreifspuren und Ausbrüche an den Rotoren sowie am Gehäuse (Bild 12 und 13). Am Getriebe konnten Schäden an allen Lagern, der Torsionswelle, dem Zahnrad und der Ritzelwelle sowie der Gleitringdichtung festgestellt werden. Das Getriebegehäuse war ohne Befund.

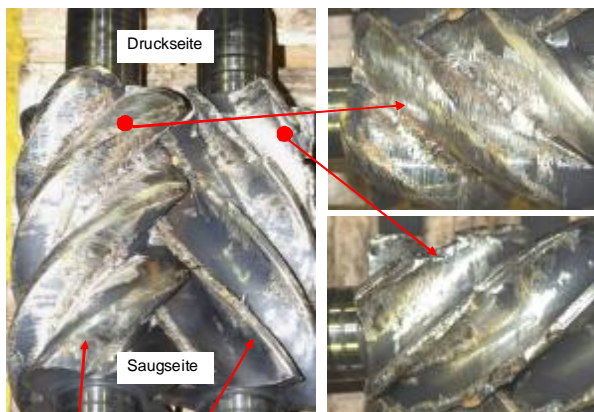


Bild 12 Haupt- und Nebenrotoren des Verdichters



Bild 13 Zylinder mit Materialauftrag stirnseitig und Abtrag am Umfang

Die Befunde der schadhaften Teile zeigen, dass die Rotoren radial am Gehäuse angelaufen sind bzw. sich gegenseitig berührt haben. Die Ursache hierfür ist thermische Ausdehnung der Rotoren infolge zu hoher Verdichtungsendtemperatur, was zu einer Aufhebung des voreingestellten Spiels zwischen den beiden Rotoren bzw. zwischen Rotoren und Gehäuse führt. Dies ist aus dem rapiden Anstieg der Verdichtungsendtemperatur abzuleiten (Bild 14).

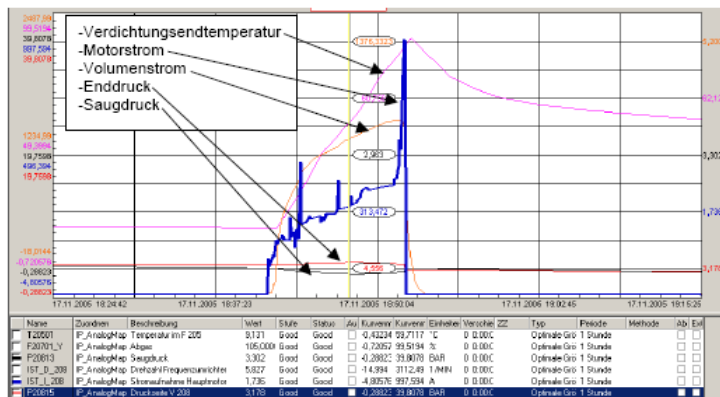


Bild 14 Prozessdaten bei Start der Maschine

Ausschlaggebend für die Verdichtungsendtemperatur ist das Verhältnis zwischen Saug- und Enddruck (Verdichtungsverhältnis). Der Saugdruck ergibt sich aus dem eingestellten Systemdruck. Der Enddruck resultiert aus dem Saugdruck plus der Summe der Druckverluste der Anlage. Die Druckverluste ergeben sich aus der Dichte des geförderten Gases sowie der Strömungswiderstände und der Strömungsgeschwindigkeit.

Im vorliegenden Fall ist davon auszugehen, dass durch ein Zusammenspiel aller Faktoren das Verdichtungsverhältnis stark anstieg und somit die zulässige Verdichtungsendtemperatur deutlich überschritten wurde. Da die für die Absicherung der Maschine vorgesehenen Sensoren für Druck und Temperatur nicht direkt vor und hinter der Maschine angebracht waren, konnte die tatsächliche Temperaturentwicklung nur mit erheblicher Zeitverzögerung gemessen werden.

In der Vergangenheit wurden die Schalldämpfer umgebaut und zusätzliche Schalldämpferplatten vor und hinter der Maschine eingebracht. Die insbesondere bei der Fahrweise mit Stickstoff und Luft entstandenen Druckverluste führten zu einem erhöhten Verdichtungsverhältnis welches durch die Maschine überwunden werden musste, messtechnisch jedoch nicht erfasst bzw. überwacht wurde.

2.2.2 Abhilfemaßnahmen

Um Schäden durch thermische Ausdehnung frühzeitig zu erkennen und zukünftig zu vermeiden erfolgten nachfolgende Modifikationen:

- Position der Sensoren
 - Verlegung der Drucksensoren für Saug- und Enddruck direkt an die Maschinenflansche
 - Verlegung des Temperatursensors für die Verdichtungsendtemperatur direkt an den Druckflansch der Maschine
- Druckverhältnisregelung, Alarmierung und Abschaltung für Betrieb mit Wasserstoff (Normalbetrieb) und Stickstoff (Spülbetrieb). Maschinendrehzahl nach der Anpassung des Druckverhältnisses
- Motorsteuerung
 - Zur Vermeidung rapider Drehzahländerungen und der damit verbundenen Gefahr der schnellen Aufheizung wurde eine Rampe zwischen minimaler und maximaler Drehzahl hinterlegt.

Die Anlage ist seit Umsetzung der Abhilfemaßnahmen störungsfrei in Betrieb.

2.3 Ammoniak - Kälteverdichter

Daten Verdichter

- Antrieb: E-Motor
- Medium: Ammoniak (NH₃)
- Fördermenge: 2631 Nm³/h (Volumenregelung über Steuerschieber)
- Drehzahl: 2.985 1/min
- Saugdruck: 1,8 bar a
- Enddruck: 14,5 bar a
- Inbetriebnahme: 2002

2.3.1 Historie und Befunde

Ein ölgeschmierter NH₃-Schraubenverdichter einer Kälteanlage wurde nach zwei Jahren Betriebszeit aufgrund eines Schadens am Motor abgestellt.

Nach der Demontage des Motors wurde ein Totalschaden am Motorlager und am Stator festgestellt. Aufgrund dieser Schädigung wurde der Verdichter demontiert und ein unerwartetes Schadensbild gefunden. Die Rotoren (Bild 15) und das Gehäuse sind irreparabel geschädigt.

Als mögliche Ursache wurde angenommen, dass zuerst das Lager am Motor versagt hat und dadurch Kräfte auf die Rotorwelle ausgeübt wurden. Dies führte zum Durchbiegen der Rotoren und zum nachfolgenden Kontakt der Rotoren mit dem Gehäuse. Nach Instandsetzung des Motors und des Verdichters sowie Ausrüstung der Aggregate mit einer Schwingungs-Überwachung wurde die Anlage wieder in Betrieb genommen.



Bild 15 Hauptrotor (links) und Nebenrotor (rechts) des Verdichters

Nach der Wiederinbetriebnahme wurde der Verdichter im Jahr 2008 nach ca. 30.000 Laufstunden zu einer routinemäßigen Inspektion abgestellt und demontiert. Wiederholt zeigten sich unerwartete Schädigungen. Die beiden Rotoren (Bild 16) zeigen Schleifspuren und Schlagmarken insbesondere am Rotorgrund und an der Spitze der Rotorprofile. Am Steuerschieber (Bild 17) sind Verschleißspuren erkennbar, das Gehäuse (Bild 18) zeigt stirnseitige Anlaufspuren.



Bild 16 Hauptrotor (links) und Nebenrotor (rechts) des Schraubenverdichters



Bild 17 Anlaufspuren auf dem Leistungsschieber

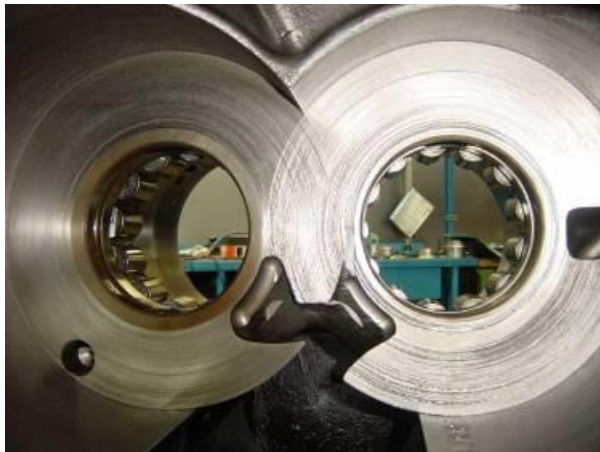


Bild 18 Anlaufspuren im Gehäuse stirnseitig (Druckseite)

2.3.2 Abhilfemaßnahmen

Aufgrund von Produktionsverpflichtungen und der Bauteilschädigungen wurde ein Ersatzverdichter installiert. An dem installierten Ersatzverdichter und am Ölabscheider traten nach der Inbetriebnahme Schwingungswerte auf, die nach Vorgabe des Herstellers und nach VDI 3836 als hoch zu bewerten ist. Anlagenmodifikationen und Änderungen der Betriebsweise führten bisher zu keiner Verbesserung.

2.4 Druckluft - Prozessgasverdichter

Daten Verdichter

- Antrieb: E-Motor
- Medium: Luft
- Fördermenge: 4240 kg/h
- Drehzahl: 16.500 1/min
- Saugdruck: Umgebungsdruck
- Enddruck: 26,5 bar a
- Inbetriebnahme: 2005

2.4.1 Historie und Befunde

Zur Luftverdichtung einer Anlage ist ein 3-stufiger Prozess Schraubenverdichter mit Wassereinspritzung eingesetzt. Es wird Umgebungsluft, industrielle Atmosphäre ohne genaue Angabe der Zusammensetzung, angesaugt und in der 3. Stufe auf 26,5 bar a bei einer Temperatur von 135 °C verdichtet. Nach einer Betriebszeit von 1.200 Stunden trat ein Schaden in Form eines Bruches des Nebenläufers der Hochdruckstufe (Bild 19 und 20) auf.



Bild 19 Hauptrotor (unten) und Nebenrotor (oben) der 3. Stufe: Zapfenbruch am Nebenrotor der Druckseite



Bild 20 Bruchfläche

Ein gemeinsam mit dem Hersteller und unabhängigen Experten erstelltes Gutachten kam zu dem Ergebnis, dass der ursächliche Grund in der Bildung einer korrosiven und abrasiven Ablagerung im Bereich der Kohleringdichtungen lag. Nachfolgende Rissbildung und Rissausbreitung unter korrosivem Einfluss führte zum Bruch. Eine Schwingungsanalyse ergab, dass bei der minimalen Drehzahl des Motors unter Prozessbedingungen die erste Biegeeigenfrequenz des Nebenrotors angeregt wird.

Als Abhilfemaßnahme wurde die Beschichtung der Welle in ein Mehrschichtensystem geändert. Bei An- und Abfahvorgängen wird der kritische Drehzahlbereich schnell durchfahren, um nicht in dem Resonanzbereich zu verharren.

Nach nur kurzer Laufzeit kam es im Juli 2006 erneut zu einem Bruch des Nebenläufers der 3. Stufe in einem Bereich, der nicht durch die neue Beschichtung geschützt wurde.



Bild 21 Bruch Nebenläufer



Bild 22 Bruch Nebenläufer

Eine erneute Schadensanalyse mit dem Hersteller und unabhängigen Experten kam zu dem Schluss, dass der Schaden definitiv durch Korrosion verursacht wurde. Man geht davon aus, dass im Dichtungsbereich auf der Druckseite der 3. Stufe des Schraubenkompressors unter den dort herrschenden Bedingungen von 26,5 bar a und 135°C in Verbindung mit der Wassereinspritzung korrosive Schwefelsäure gebildet wird. Auf Grund von Verdampfungs- und Kondensationseffekten können sich hier die Schwefelkomponenten, die die Schwefelsäure bilden, aufpegeln.

2.4.2 Abhilfemaßnahmen

Die Rotoren der 3. Stufe wurden aus hoch korrosionsbeständigem Werkstoff neu gefertigt. Als weitere Maßnahmen zur Ursachenbehebung wurden die Wellenansätze mit einer PTFE-Beschichtung versehen. Außerdem wurde die Einspritzwassermenge erhöht. Der Verdichter ging im November 2007 in Betrieb.

3. Zusammenfassung

Schraubenverdichteranlagen sind aufgrund ihres kompakten Aufbaues und der hohen Verfügbarkeit in einer Vielzahl von Produktionsanlagen eingesetzt. Bei den tatsächlich auftretenden Betriebsbedingungen, die in vielen Fällen nur geringfügig von den ursprünglichen Auslegungsdaten abweichen, können Schadensereignisse in unterschiedlicher Ausprägung auftreten. Meist liegt ein Zusammenspiel verschiedener Ereignisse und Ursachen vor. Für die Erarbeitung nachhaltiger Abhilfemaßnahmen ist eine strukturierte Schadensanalyse erforderlich, die eine intensive Zusammenarbeit zwischen Betreiber, technischen Fachzentren, Hersteller und Hochschulen bedingt. Mit der Vernetzung verschiedener Fachdisziplinen werden Optimierungsmaßnahmen gefunden, die die Verfügbarkeit der Verdichteranlage und somit der gesamten Produktionsanlage gewährleistet.