

11. Workshop Kolbenverdichter

24. / 25. Oktober 2007

Vortrag 13

Kolbenringverschleiß aufgrund mechanischer Schwingungen?

Dipl.-Ing. H.-H. Dilbat, Dipl.-Ing. G. Braun
Josef Mehrer GmbH & Co. KG



Dipl.-Ing. R. Missal
KÖTTER Consulting Engineers KG

Die Josef Mehrer GmbH & Co. KG hat vor ca. 4 Jahren einen neuen Standardverdichter entwickelt. Dieser Verdichter in V-Bauform kann als ein-, zwei- und dreistufiger Verdichter eingesetzt werden und verdichtet Gase von 1 bar(a) auf bis zu 64 bar(a). Die Basisdaten der Verdichterbaureihe V 900 Abbildung 1 sind nachfolgend zusammengefasst:

- Ölfrei verdichtender Kreuzkopfkompressor in Hubkolbenbauart
- 2-Zylinder in V-Bauart mit geschlossenem Kühlkreislauf
- Zylinder doppelwirkend mit trockenen Laufbuchsen
- Kolbendurchmesser (Standard): 360, 260, 220, 170 und 122 mm
- Hub: 110 mm
- Mittlere Kolbengeschwindigkeit: 3,6 m/s (985 1/min)
- Triebwerkschmierung durch separate Ölpumpe
- Kurbelgehäuse und Zylinder aus GGG 40.3
- Gewicht: ca. 4,5 t (je nach Ausführung)
- Abmessungen [mm] ca.: L 2600; B 2600; H 1900 (je nach Ausführung)
- Antrieb: direkt gekuppelt / Keilriemen
- Enddrücke: bis 64 bar
- Ansaugstrom: bis 2.000 m³/h
- Drehzahlbereich: 400 bis 1.000 U/min
- Antriebsleistung: bis 200 kW

Ein Betreiber eines Verdichters aus dieser Baureihe stellte einen erhöhten Verschleiß an den Kompressions- und Führungsringen fest. Während die übliche Standzeit dieser Ringe ca. 8.000 Stunden beträgt, waren bei diesem Verdichter die Ringe innerhalb von ca. 1.000 Stunden verschlissen.

Als mögliche Ursachen für diesen erhöhten Verschleiß kommen grundsätzlich in Frage:

1. ungeeignete Materialpaarung Kolbenringe / Laufbuchse
2. hohe thermische Belastung (Verdichtungstemperatur, ungenügende Kühlung)
3. Beschaffenheit des Gases bzw. Verschmutzung
4. Fertigungstechnische Probleme (Versatz, Oberflächenbeschaffenheit)
5. konstruktives Problem (Schwingungen)

Die einzelnen Punkte wurden untersucht und schieden aus folgenden Gründen als Ursache aus:

- Zu 1): langjährige gute Erfahrung mit der verwendeten Werkstoffpaarung
- Zu 2): keine überhöhte Verdichtungenstemperatur Temperaturerhöhungen
- Zu 3): Betrieb nach Aussage des Betreibers immer mit Vorfilter
- Zu 4): Kontrolle der Bauteile ergab keine Abweichung in den vorgegebenen Toleranzen.

Da somit nur noch eine mögliche Schwingungsanregung einzelner Bauteile übrig blieb, wurde diese mögliche Ursache näher untersucht.

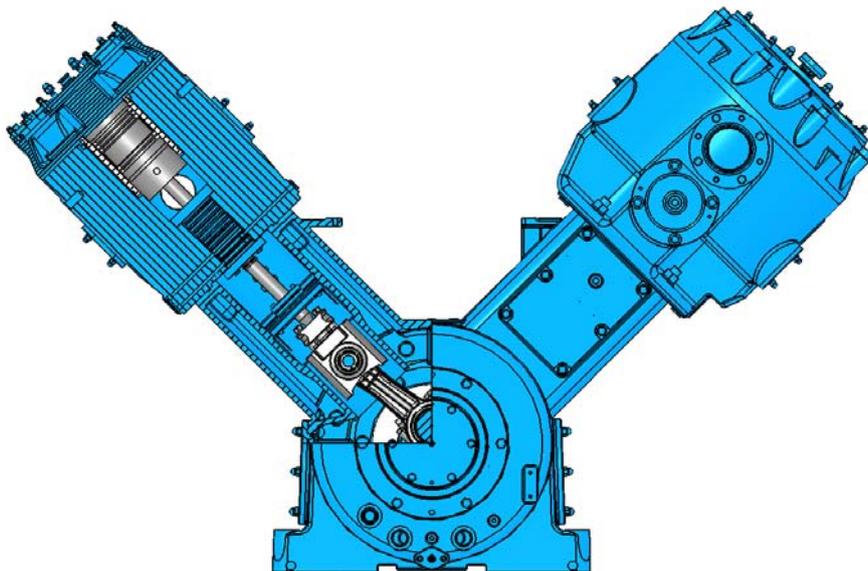
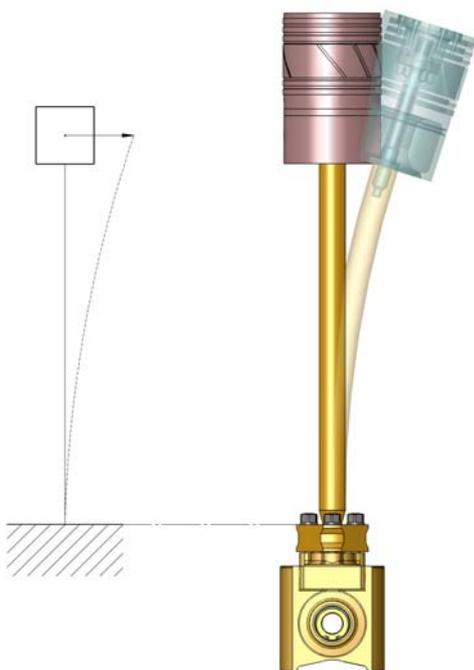


Abbildung 1: Aufbau des Verdichters.

Erhöhter Verschleiß der Kolben- und Führungsringe könnte z. B. durch eine Schwingung der Kolbenstange verursacht werden. Es wurden daher Abschätzungen der Eigenfrequenz der Kolbenstange durchgeführt, wobei folgende Annahmen getroffen wurden:

- Berechnung ohne Dämpfung
- Einmassenschwinger mit Kolben als Punktmasse
- Kolbenstange am Führungskolben fest eingespannt
- federnde Länge von der Einspannung am Führungskolben bis zum Ansatz des Kolbens.

Die Abschätzung wurde sowohl für eine Biegeschwingung der Kolbenstange (Abbildung 2) als auch für eine Schwingung in axialer Richtung durchgeführt (Abbildung 3).



Eigenkreisfrequenz

$$\omega = \sqrt{c_B / m}$$

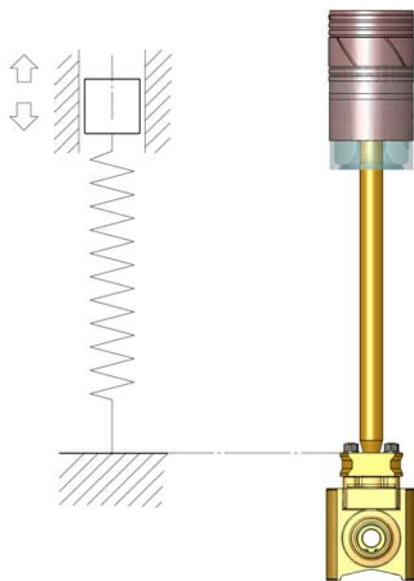
⇒ Je kleiner die Masse,
desto höher die Eigenfrequenz
ca. 2 Hz bzw. 30 U/min

⇒ weit unterhalb der
Betriebsdrehzahl

ω : Eigenkreisfrequenz [1/s]:

c_B : Federkonstante [N/mm²]

Abbildung 2: Abschätzung der Eigenfrequenz einer Biegeschwingung.



Eigenkreisfrequenz

$$\omega = \sqrt{c_L / m}$$

⇒ Je kleiner die Masse,
desto höher die Eigenfrequenz
Hier 17 Hz bzw. 1.050 U/min

⇒ außerhalb der
Betriebsdrehzahl

ω : Eigenkreisfrequenz [1/s]:

c_L : Federkonstante [N/mm²]

Abbildung 3: Abschätzung der Eigenfrequenz in axialer Richtung.

Die Eigenfrequenz der Biegeschwingung lag außerhalb des Bereiches einer möglichen Anregung im Betrieb. Allerdings lag die berechnete Eigenfrequenz in axialer Richtung in der Nähe der maximalen Betriebsdrehzahl von 1.000 U/min, so dass beschlossen wurde, diese Schwingungsanregung der Pleuellager an einem Verdichter im hauseigenen Prüfstand der Firma Mehrer von KÖTTER Consulting Engineers KG untersuchen zu lassen.

Zur Erfassung der Pleuellagerschwingungen während des Betriebes des Verdichters wurden Dehnungsmessstreifen auf die Pleuellager geklebt (Abbildung 5). Die Widerstandsänderungen der dünnen Drähte dieser Messstreifen werden in Spannungssignale umgewandelt und mit Hilfe einer Telemetrie-Anlage zu einem Messwerterfassungsrechner gefunkt. Problematisch war dabei, dass der gesamte Messaufbau auf der Pleuellager auf dem Bereich erfolgen musste, der nicht von Abstreifern oder Stopfbuchsbrillen überstrichen wird (Abbildung 4).

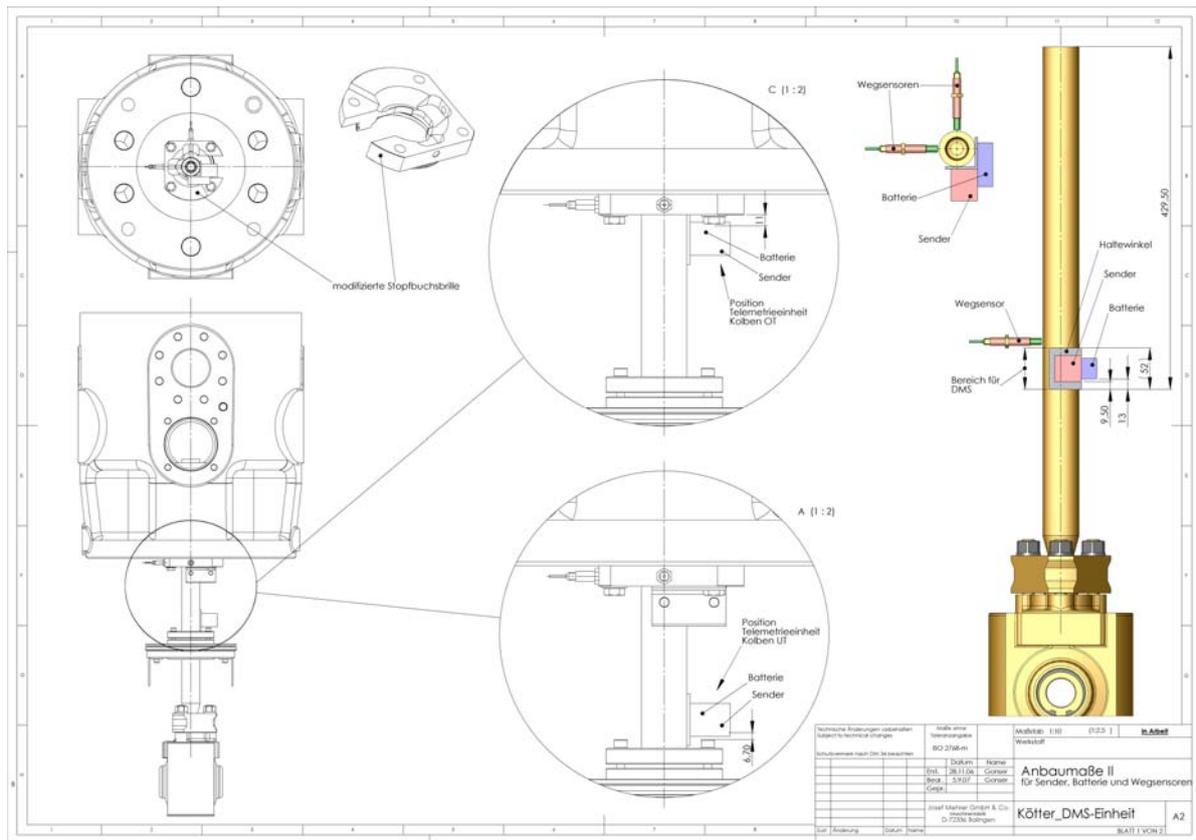


Abbildung 4: Position der Dehnmessstreifen und Telemetrie im oberen und unteren Totpunkt.

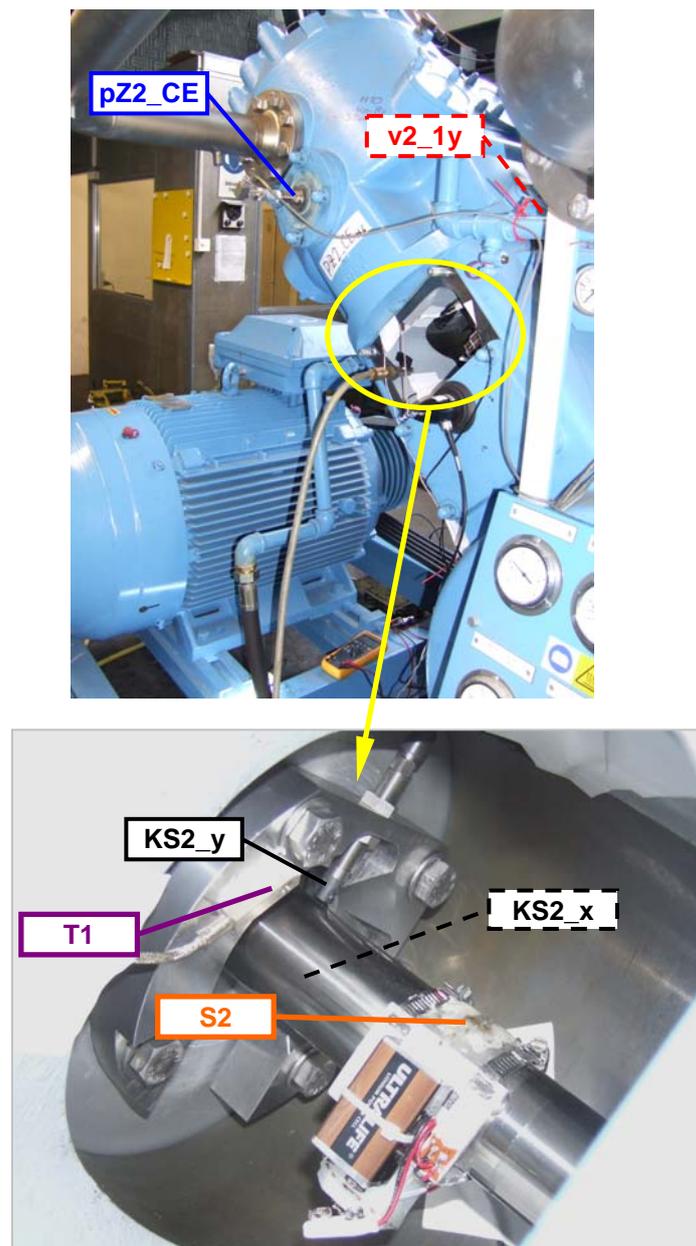


Abbildung 5: Telemetriesender mit Spannungsversorgung im Einbauzustand.

Als weitere Messgrößen wurden während der Untersuchung aufgezeichnet:

- die Indizierdrücke
- die Pulsationen in den Rohrleitungen
- die Gehäuseschwingungen
- die Auslenkung der Kolbenstangen.

Die Positionen der Wegsensoren zur Erfassung der Auslenkung der Kolbenstange sind in der (Abbildung 6) dargestellt.

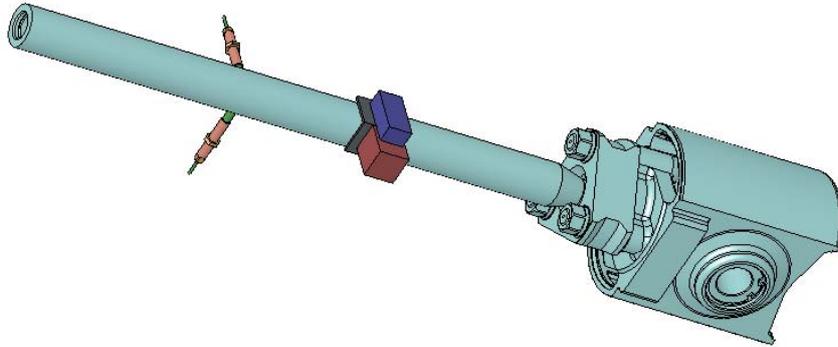
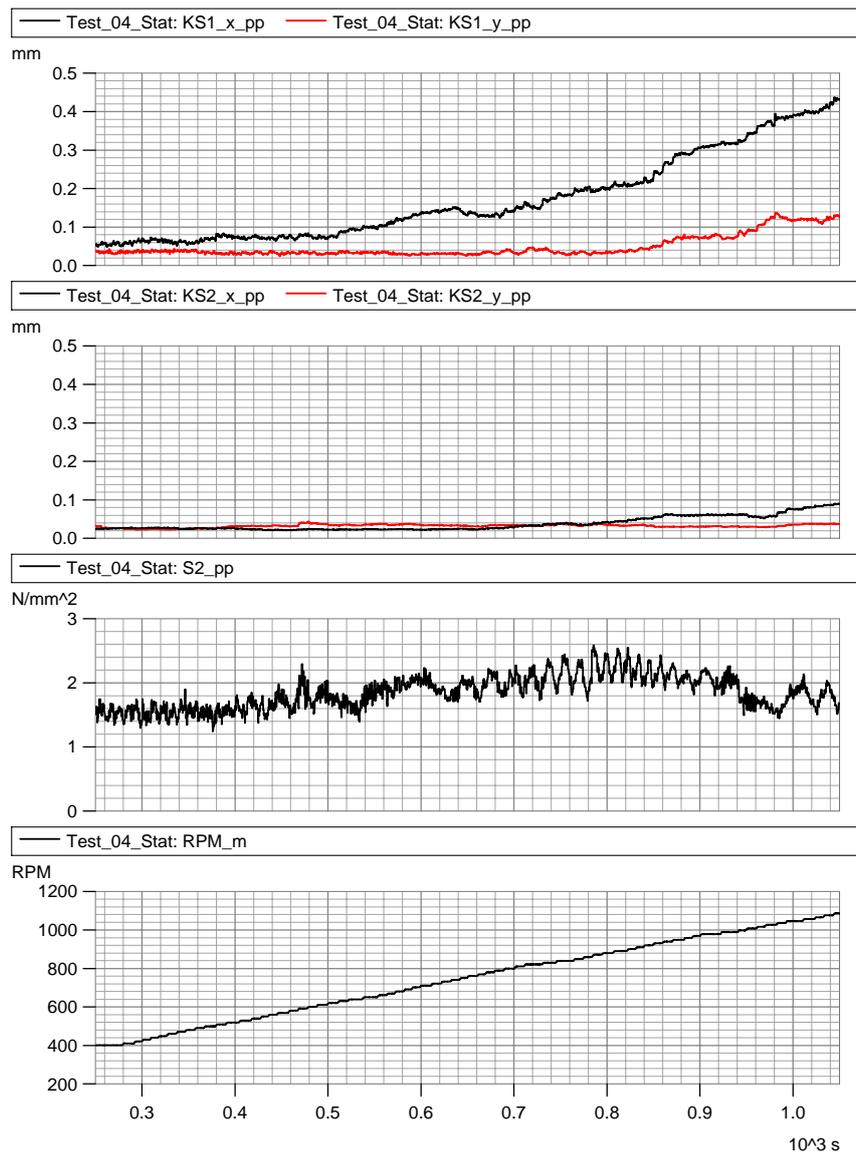


Abbildung 6: Positionen der Wegsensoren für die Messung der Auslenkung der Pleuellstange.

Die Messungen wurden sowohl mit dem Originalkolben als auch mit einem modifizierten, leichteren Pleuellbolzen durchgeführt, so dass mit Hilfe der Messdaten der Einfluss der Pleuellbolzenmasse auf die Schwingungen der Pleuellstange quantifiziert werden konnte. Darüber hinaus wurden die Messungen bei den unterschiedlichen Drehzahlen zwischen 400 U/min und 1.000 U/min und unterschiedlichen Enddrücken von 1 bar bis 19 bar in der Konfiguration als einfach- und doppelwirkender Zylinder durchgeführt.

Auszugsweise sind in den nachfolgenden Abbildungen einige Ergebnisse der Messungen dargestellt.

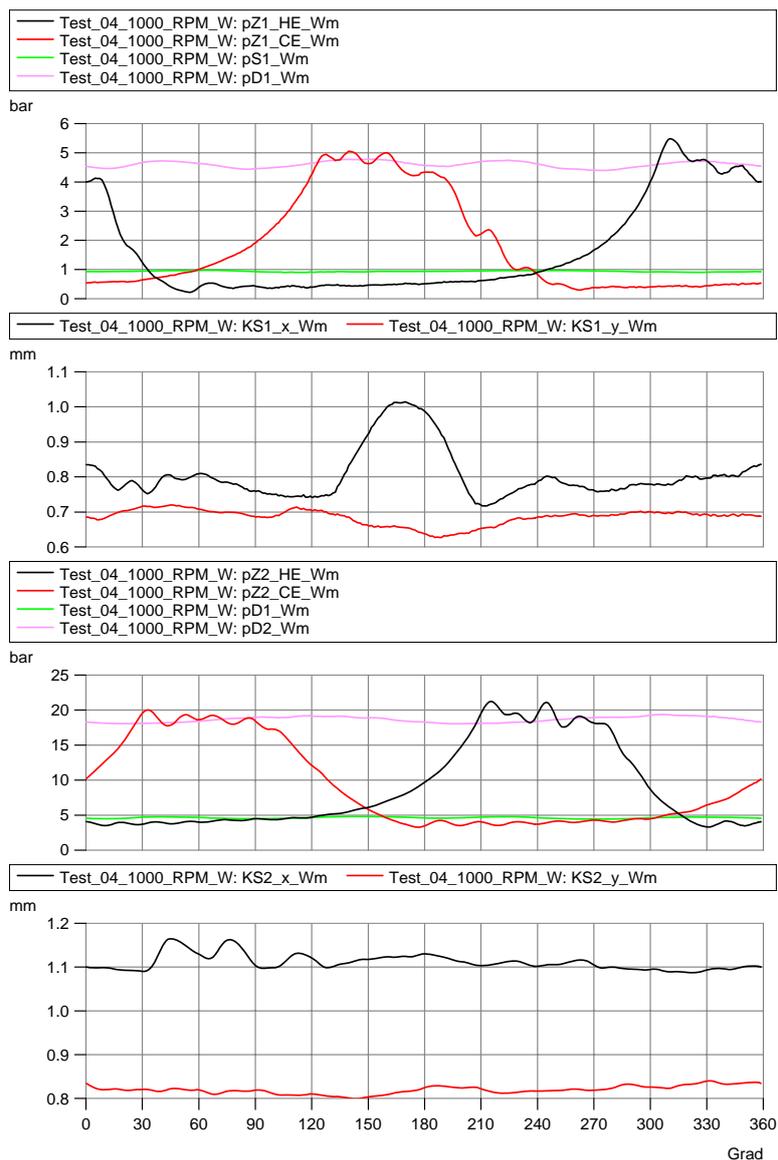


28.03.07 15:38:16

Abbildung 7: Spitze-Spitze-Werte der Kolbenstangenbewegung der 1. Stufe (oberes Diagramm), der 2. Stufe (2. Diagramm von oben), der Spannung in der Kolbenstange der 2. Stufe (3. Diagramm von oben) sowie der Drehzahl (unteres Diagramm), Test_04, Originalkolben, doppeltwirkend, Enddruck 19 bar.

Die gemessene Bewegung in x-Richtung ist bei beiden Kolbenstangen größer als in y-Richtung. Bei größerer Drehzahl werden auch die Kolbenstangenbewegungen größer. Die gemessenen Spannungen in der Kolbenstange der 2. Stufe sind sehr gering. Eine Abhängigkeit der Spannung von der Drehzahl ist in der (Abbildung 7) kaum zu erkennen.

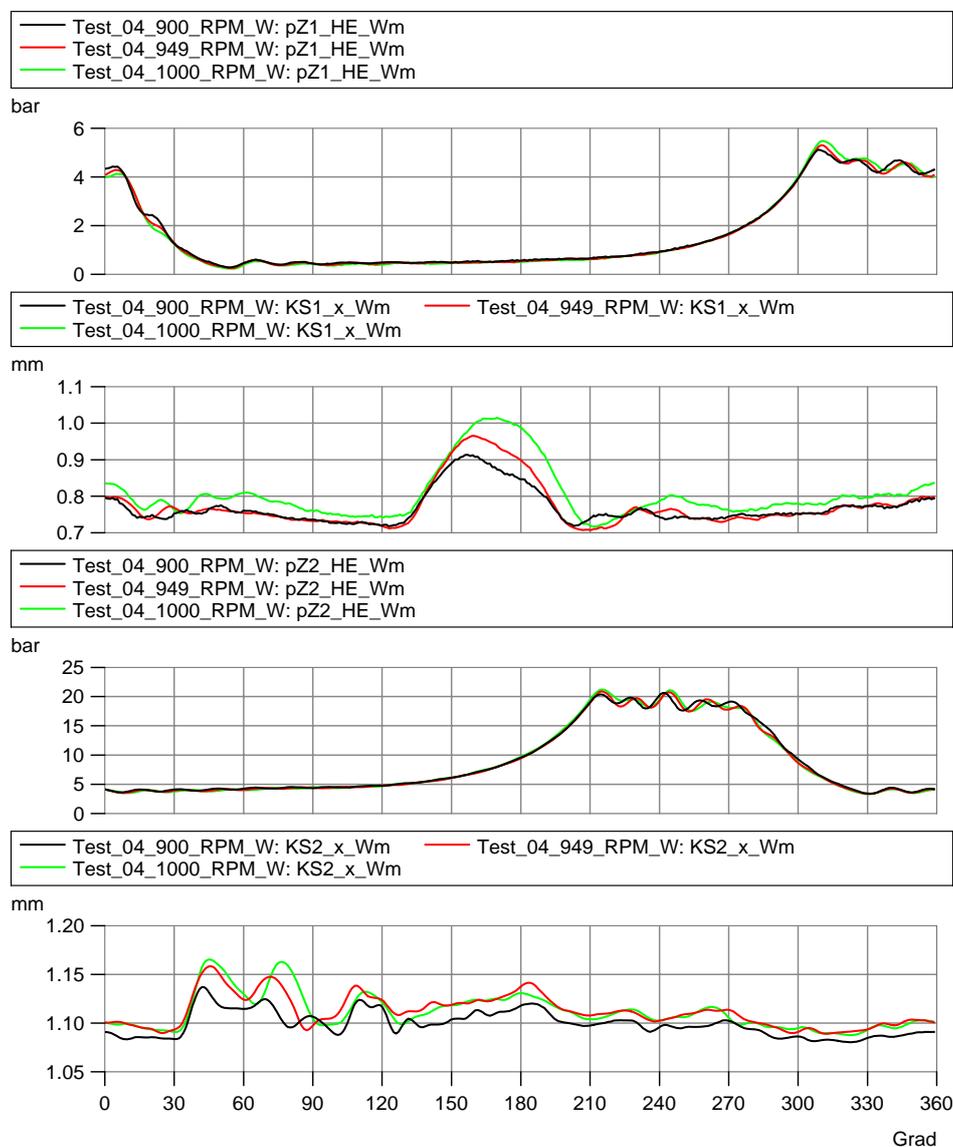
Zur Interpretation der Kolbenstangenbewegungen wurden die gemessenen Werte für eine feste Drehzahl gemittelt und über den Kurbelwinkel dargestellt (Abbildung 8).



28.03.07 15:53:59

Abbildung 8: Indizierdruckverlauf und Kolbenstangenbewegungen der 1. (1. und 2. Diagramm von oben) und 2. Stufe (3. und 4 Diagramm von oben), Test_04, Drehzahl 1.000 U/min, Originalkolben, doppeltwirkend, Enddruck 19 bar.

Wie aus der Abbildung 8 zu erkennen ist, treten die größten Bewegungen der Kolbenstange der 1. Stufe zwischen 135 und 210 Grad KW und bei der 2. Stufe zwischen 30 und 130 Grad KW auf. Auch wenn der Verdichter mit anderen Drehzahlen gefahren wird, treten die größten Kolbenstangenbewegungen bei ähnlichen Kurbelwinkeln auf (Abbildung 9).



28.03.07 15:51:59

Abbildung 9: Indizierdruckverlauf und Kolbenstangenbewegungen bei unterschiedlichen Drehzahlen (schwarze Kurven: 900 U/min, rote Kurven: 950 U/min, grüne Kurven: 1.000 U/min), oberes Diagramm: pZ1_HE, 2. Diagramm von oben: KS1_x, 3. Diagramm von oben: pZ2_HE, unteres Diagramm: KS2_x, Test_04, Originalkolben, doppeltwirkend, Enddruck 19 bar.

Werden die gemessenen Spannungen in der Kolbenstange bei den unterschiedlichen Betriebszuständen gegenübergestellt, ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 10).

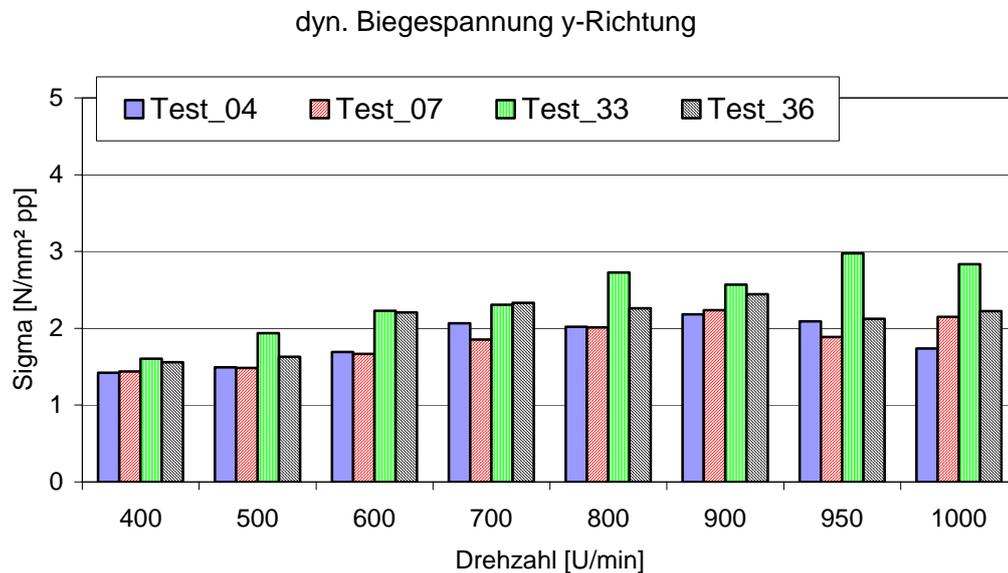


Abbildung 10: Spannungen in der Kolbenstange der 2. Stufe bei unterschiedlichen Drehzahlen und einem Enddruck von 19 bar,
Test_04: Originalkolben, doppeltwirkend
Test_07: Originalkolben, einfachwirkend
Test_33: leichte Kolben, doppeltwirkend
Test_36: leichte Kolben, einfachwirkend.

Die vermutete Abhängigkeit der Spannungen in der Kolbenstange von der Drehzahl und der Masse der Kolben kann mit Hilfe der Messdaten nicht bestätigt werden.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Spannungsmessungen an den Kolbenstangen zeigen, dass die gemessenen Werte sehr gering sind. Ein Zusammentreffen der Eigenfrequenz der Kolbenstange mit der Drehfrequenz bei 1.000 U/min lässt sich auf der Grundlage der aufgezeichneten Messwerte nicht belegen. Darüber hinaus zeigen die Messergebnisse keine deutlich verringerten Spannungen in der Kolbenstange durch die kleinere Kolbenmasse. Der Umbau der Verdichter auf die Ausführung mit dem leichteren Kolben war auf der Grundlage der Messergebnisse nicht zu empfehlen.

Die deutlich größere Bewegung der Kolbenstange der 1. Stufe war auf die unterschiedlichen Toleranzen der Bauteile für die 1. und 2. Stufe zurückzuführen. Ein erhöhter Verschleiß der Kolben- und Führungsringe war durch diese Bewegung der Kolbenstange aber nicht zu begründen.

Wenn auch die beschriebene Untersuchung nicht den erhofften Beweis geliefert hat, dass der erhöhte Verschleiß der Kolben- und Führungsringe auf eine Schwingungsanregung der Kolbenstange zurückzuführen ist, konnte diese Ursache auf der Grundlage der Messdaten eindeutig ausgeschlossen werden.