

Reduzierung erhöhter Fundamentalschwingungen an einer Kolbenverdichteranlage

Dr.-Ing. Johann Lenz

KÖTTER Consulting Engineers KG

1.) Einleitung

Aufgrund von variablen Einsatzbedingungen haben Kolbenverdichter im chemischen Bereich, in Raffinerien und auch bei der Erdgasspeicherung eine feste Marktposition eingenommen. Viele Probleme an Kolbenverdichtern können vor dem Eintreten kostenintensiver Schäden bzw. Ausfälle durch ein verändertes Schwingungsverhalten festgestellt werden. Zur Analyse solcher Schwingungsprobleme ist eine auf die Arbeitsweise und die Betriebsbedingungen von Kolbenverdichtern abgestimmte Vorgehensweise einzusetzen.

Die Schwingungsanregung an Kolbenverdichtern wird bauartabhängig in der Regel durch nicht ausgeglichene Massenkräfte bzw. Massenmomente oder oft auch durch pulsierende Gaskräfte - z. B. im angeschlossenen Rohrleitungssystem - verursacht. Weil gerade am Kolbenverdichter bzw. am angeschlossenen Rohrleitungssystem die Schwingungsintensität sehr stark von den Betriebsbedingungen - wie z. B. Drehzahl, Gaszusammensetzung, doppelt oder einfach wirkende Arbeitsweise - abhängt, empfiehlt es sich, während oder nach der Inbetriebnahme unter realen Betriebsbedingungen eine messtechnische Überprüfung durchführen zu lassen. Hierbei ist zunächst die Ist-Situation hinsichtlich der Schwingungen und Betriebsbedingungen aufzuzeichnen. Im nächsten Schritt sind die Messwerte mit entsprechenden Richtwerten (VDI-Richtlinie 3842, DIN ISO 10816, API Standard 618) zu vergleichen. Werden Überschreitungen festgestellt, so sind die Ursachen hierfür zu ergründen und darauf aufbauend Maßnahmen zur Sanierung der Anlage zu erarbeiten.

Im nachfolgenden Beitrag wird anhand eines Praxisbeispiels die Vorgehensweise zur Erarbeitung und Umsetzung von abgestimmten Minderungsmaßnahmen bei erhöhten Fundamentalschwingungen vorgestellt.

2.) Situationsbeschreibung

Zur Verdichtung eines Wasserstoffgemisches werden in einer chemischen Fabrik unter anderem zwei 1-stufige Kolbenverdichter eingesetzt. Die Verdichter sind als „liegende“ Kompressoren in Einzylinderbauart konzipiert und verdichten bei einer konstanten Drehzahl (ca. 530 1/min) den Wasserstoff bis auf ca. 8,5 bar. Die geförderte Menge wird über einen Bypass sowie eine Rückstrom-Saugventilabhebung verfahren. Unter bestimmten Betriebsbedingungen sind im Bereich der Kolbenverdichter sowohl erhöhte Fundamenterschütterungen als auch stark überhöhte Rohrleitungsschwingungen beobachtet worden.

Der prinzipielle Aufbau des Verdichters und der Fundamentierung ist in Abbildung 1 dargestellt.

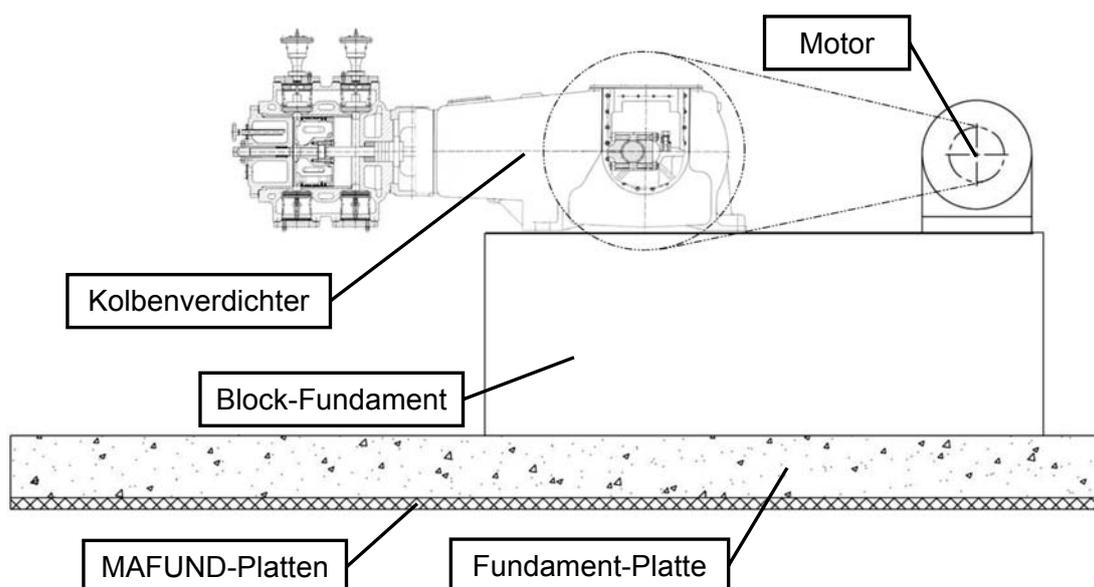


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau des Kolbenverdichters mit Fundament in „liegender“ Bauweise.

Da wiederholt Schäden aufgetreten waren, wurde eine gezielte Untersuchung an einer Verdichteranlage in Form einer Ursachenanalyse durchgeführt. Darauf aufbauend wurden effektive Maßnahmen zur Reduzierung der Schwingungen ausgearbeitet.

Folgende Ziele wurden hierbei verfolgt:

- Ermittlung der Ursachen für die erhöhten Schwingungen
- Beurteilung der Schwingungssituation und Ermittlung von bestehenden Gefährdungen
- Verhinderung von mechanischen Schäden
- Vorschläge zur Beseitigung der vorliegenden Ursachen bzw. Reduzierung der Schwingungen auch für eine geplante Drehzahlerweiterung

In den nachfolgenden Tabellen 1 und 2 sind die verwendeten Schwingungsmesspunkte am Verdichter und am Fundament aufgeführt und in der Abbildung 2 in der Draufsicht der Anlage eingetragen.

Messpunkt	Richtung	Ort/Bemerkung
KV1	x, y, z	Zylinderkopf des Kolbenverdichters
KV2	x, y, z	Kurbelgehäuse gegenüber der Antriebsseite
KV3	x, y, z	Kurbelgehäuse auf der Antriebsseite

Tabelle 1: Verwendete Schwingungsmesspunkte am Verdichter (Abbildung 2).

Messpunkt	Richtung	Ort/Bemerkung
BF1	x, y, z	Betonfundament
BF2	x, y, z	Betonfundament
BF3	x, y, z	Betonfundament
BF4	x, y, z	Betonfundament
BF5	x, y, z	Betonfundament
BF6	x, y, z	Betonfundament

Tabelle 2: Verwendete Schwingungsmesspunkte am Fundament (Abbildung 2).

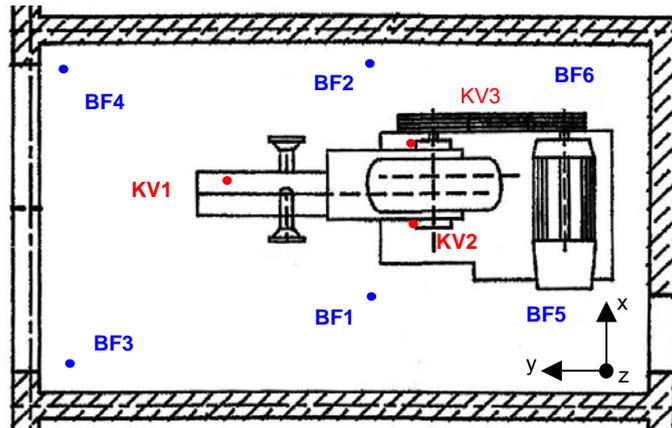


Abbildung 2: Lage der Messpunkte am Verdichter und Fundament.

Die am Fundament ermittelten Amplituden der Schwingwege sind in Abbildung 3 mit dem Richtwert für horizontale Schwingwege (durchgezogene Linie) auszugsweise vergleichend dargestellt.

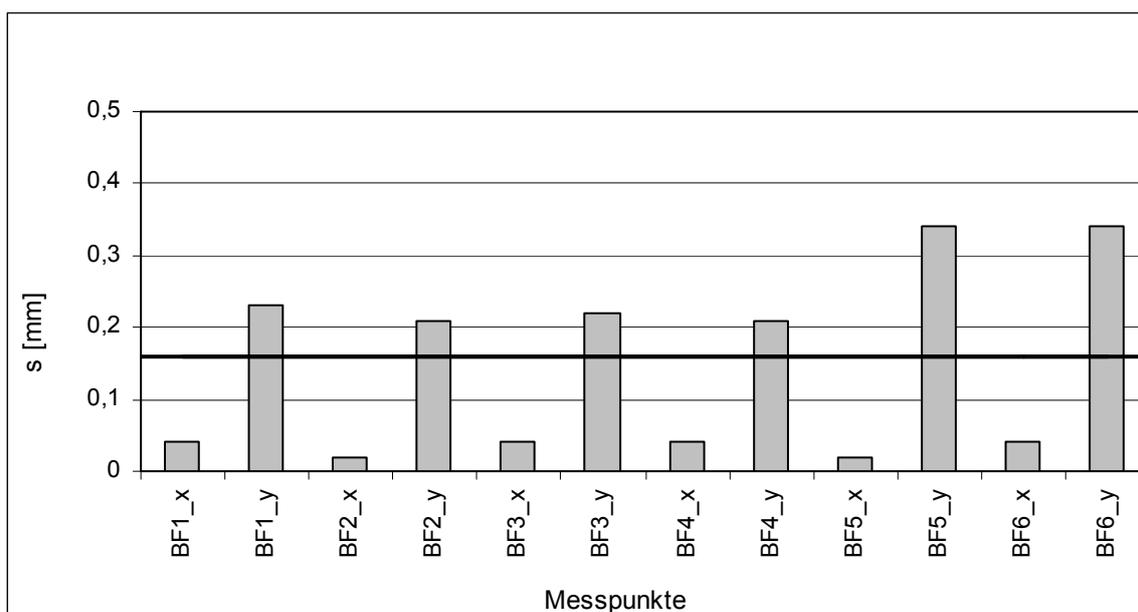


Abbildung 3: Vergleich des Richtwertes mit den gemessenen Amplitudenwerten des horizontalen Schwingweges am Fundament.

Der Richtwert wird durchgehend in Richtung des Verdichterzylinders (y-Achse in Abbildung 2) überschritten.

Die Abbildung 4 zeigt die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten am Verdichter und am Betonfundament über einen Zeitraum von einer Sekunde. Der Verdichter wurde mit einer Drehfrequenz von $f = 8,9 \text{ Hz}$ (ca. 530 1/min) betrieben.

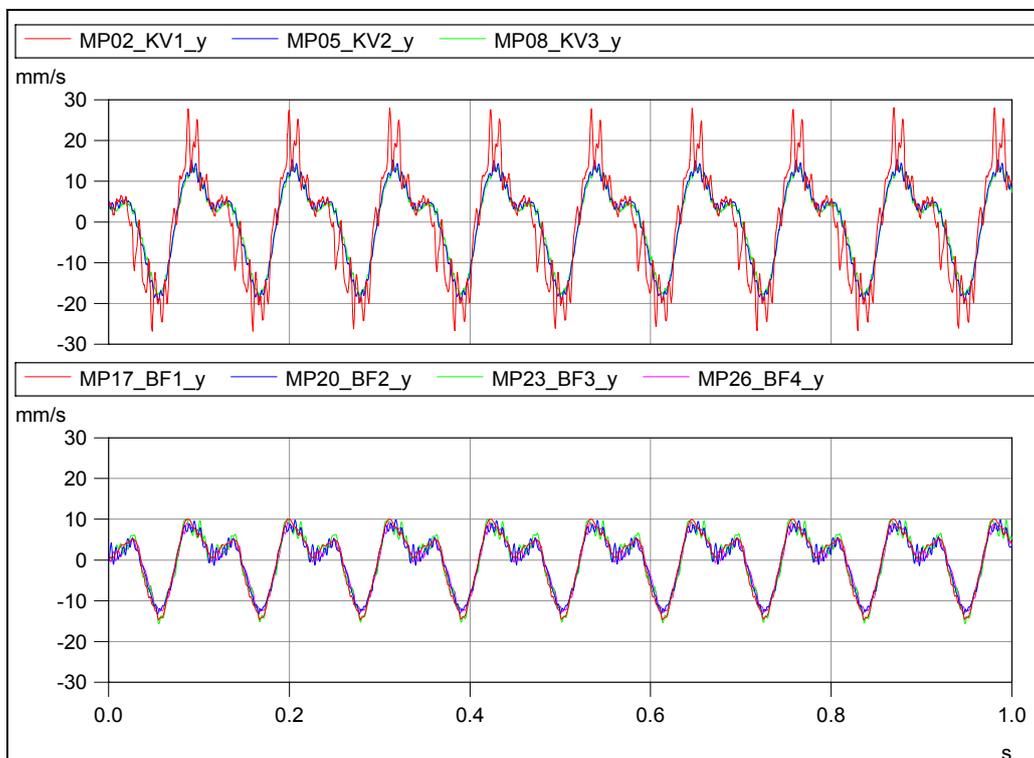


Abbildung 4: Zeitverlauf der gemessenen Schwinggeschwindigkeit am Verdichter und Fundament.

Die höchsten Schwingungen sind erwartungsgemäß am Zylinderkopf aufgetreten. Die weiteren Schwinggeschwindigkeiten auf der Betonfundamentplatte (BF1 bis BF4) sind nur wenig gemindert gegenüber den Schwinggeschwindigkeiten auf dem Verdichterblockfundament (KV1 bis KV3).

In Abbildung 5 sind die Schwinggeschwindigkeiten in Kolbenmittelachse (y-Richtung) zur Verdeutlichung der Frequenzanteile als Amplitudenspektrum dargestellt.

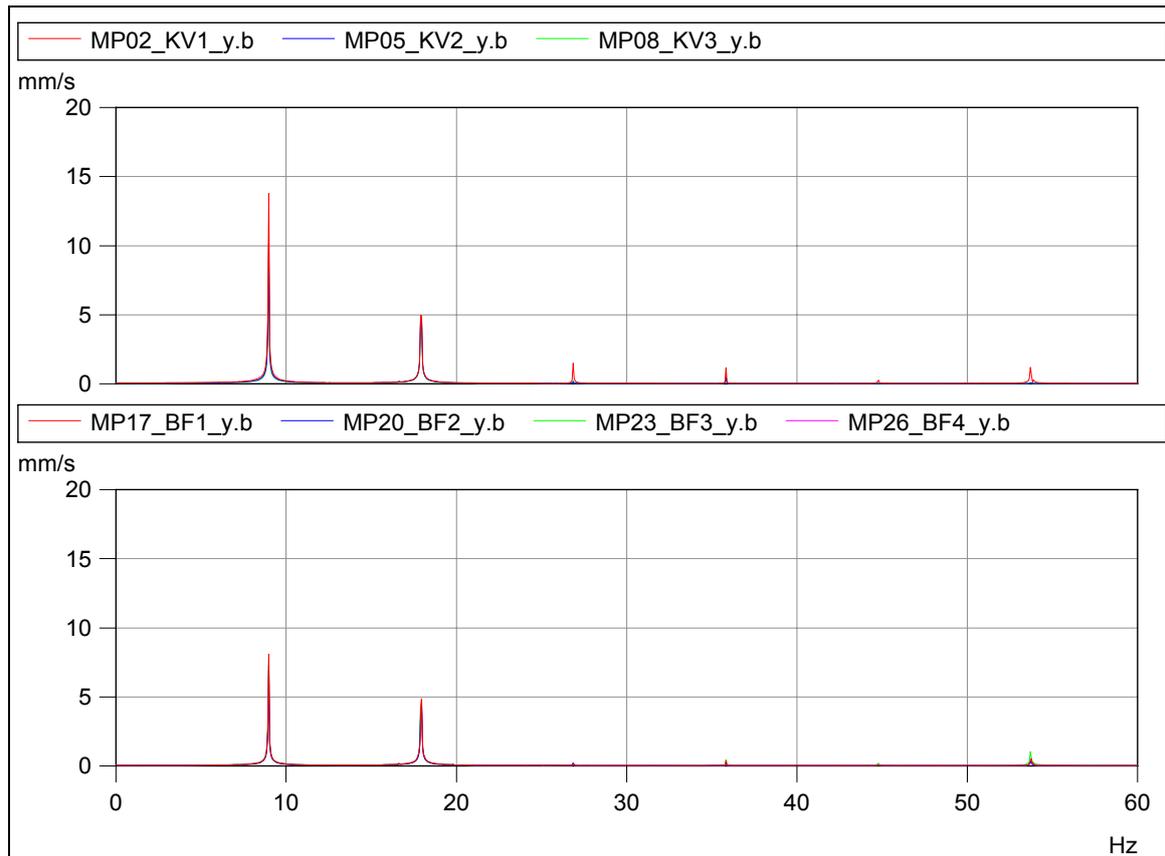


Abbildung 5: Amplitudenspektrum der gemessenen Verdichter- und Fundamentalschwingungen.

Die Hauptfrequenz entspricht der ersten Drehzahlharmonischen mit $f = 8,9$ Hz. Die 2. Harmonische liegt bei der Frequenz von $f = 17,8$ Hz.

Zur Überprüfung, ob auch ein resonantes Verhalten auftritt, wurden zuerst die freien Massenkkräfte der 1. und 2. Ordnung des Kurbeltriebes überschlägig berechnet. Die Parameter sind schematisch in Abbildung 6 dargestellt und aufgeführt.

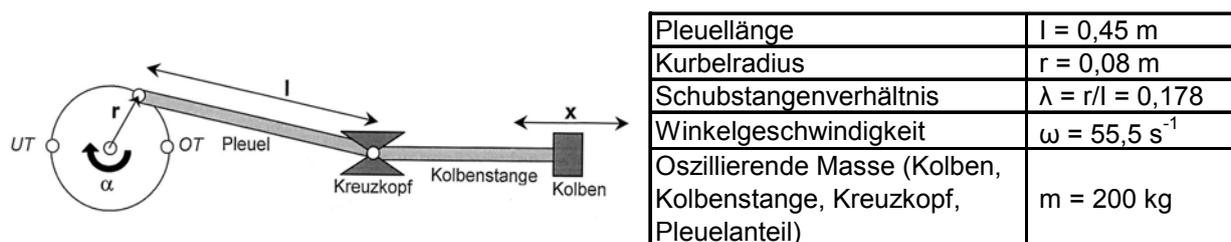


Abbildung 6: Schematischer Aufbau des Schubkurbeltriebes und vorliegende Kurbeltriebsparameter.

Mit den in Abbildung 6 angegebenen Parametern ergeben sich für die 1. und 2. Ordnung die folgenden freien Massenkräfte:

$$F_{1. \text{ Ord.}} = m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha \quad (1) \quad \Rightarrow \quad F_{1. \text{ Ord.}} = 49.300 \text{ N}$$

$$F_{2. \text{ Ord.}} = \lambda \cdot m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos 2\alpha \quad (2) \quad \Rightarrow \quad F_{2. \text{ Ord.}} = 8.800 \text{ N}$$

Die als Körperschallisolierung eingesetzten MAFUND-Platten weisen laut Herstellerangaben eine richtungsabhängige horizontale Gesamtsteifigkeit von 58,08 KN/mm (Richtung 1) bzw. 95,04 KN/mm (Richtung 2) auf. Berechnet man die statische Verschiebung aufgrund der freien Massenkräfte, so ergeben sich die in der Tabelle 3 aufgeführten Werte.

Freie Massenkräfte	Schwingweg Richtung 1	Schwingweg Richtung 2
1. Ordnung	0,85 mm	0,52 mm
2. Ordnung	0,15 mm	0,09 mm

Tabelle 3: Berechneter Schwingweg bei "statischer" Anregung durch die freien Massenkräfte für die beiden richtungsabhängigen Horizontalsteifigkeiten.

Zwischen der Gleichung 1 und 2 der 1. bzw. 2. Ordnung steht in erster Linie der Faktor des Schubstangenverhältnisses λ . Vergleicht man hierzu das gemessene Amplitudenspektrum des Schwingweges (Abbildung 7), ergibt sich eine ausreichende Übereinstimmung zur vereinfachten Berechnung in Richtung 2 (Angabe zur tatsächlich eingebauten Richtung der MAFUND-Platten lag nicht vor). Dabei wurde der Einfluss der Rohrleitungsanbindung bzw. der Seitenisolierung nicht weiter berücksichtigt.

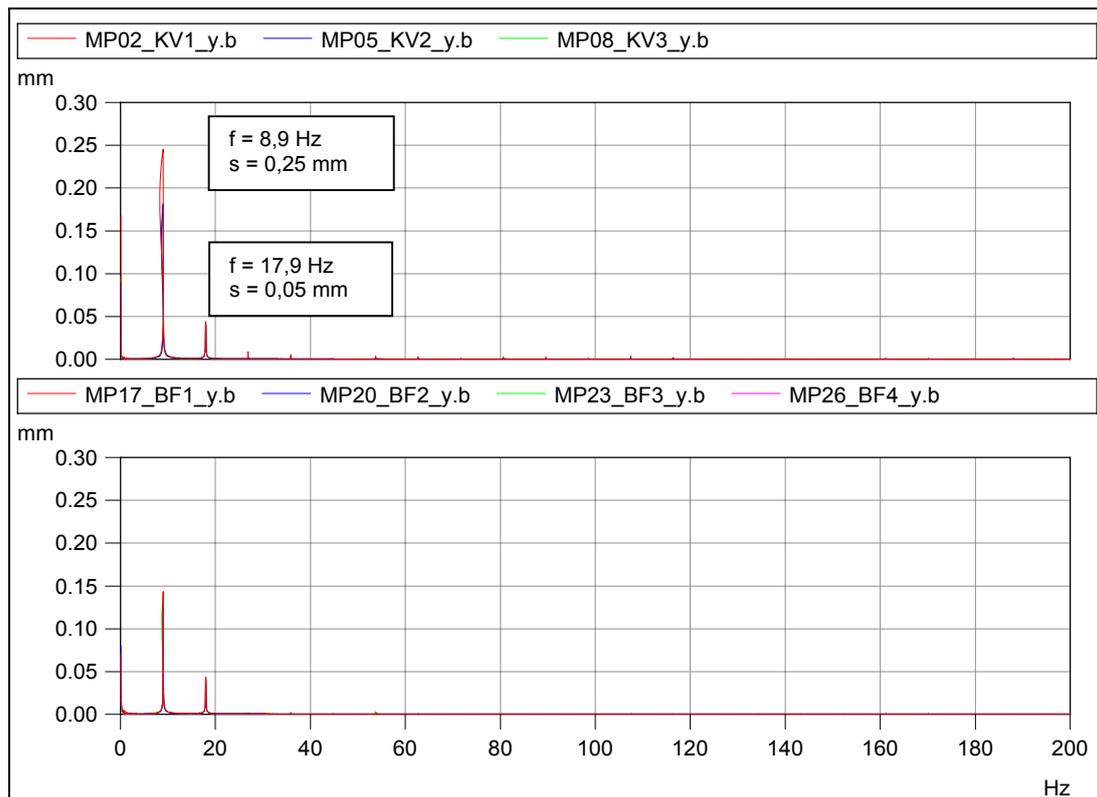


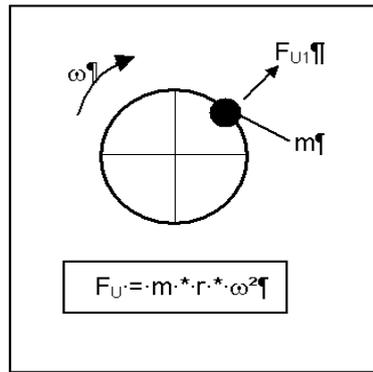
Abbildung 7: Amplitudenspektren der gemessenen bzw. integrierten Schwingwege am Verdichter und Fundament.

Aufgrund dieses Ergebnisses und der Randbedingungen des Kolbenverdichters, wie z. B. niedriges Druckverhältnis zwischen Saug- und Förderdruck, konnten die weiteren möglichen Kräfte zur Fundamentanregung vernachlässigt werden.

Zur Reduzierung der festgestellten Fundamentalschwingungen bestand die Möglichkeit, entweder die hohen Erregerkräfte zu reduzieren oder die Fundamentierung prinzipiell zu verändern.

Da eine Sanierung des Fundamentes bzw. der Umbau des Kolbenverdichters mit einem zusätzlichen vollständigen Massenausgleich sehr aufwendig ist, wurde überprüft, ob weitere Möglichkeiten zur Schwingungsreduzierung bestehen.

Prinzipiell kann neben einem vollständigen Massenausgleich auch durch die Erzeugung einer gegenläufigen Unwuchtkraft (siehe Abbildung 8) zumindest die Massenkraft der 1. Ordnung reduziert werden.



(m = Unwuchtmasse, r = Unwuchtradius, ω = Kreisfrequenz)

Abbildung 8: Beispiel einer einfachen Unwucht F_U als rotierender Kraftvektor.

Da der dabei auftretende Kraftvektor F_U rotiert, werden neben der benötigten horizontalen Ausgleichskraft auch zusätzliche störende - z. B. vertikale Kraftkomponenten - erzeugt. Um dies zu unterbinden, kann durch die gezielte Abstimmung mittels zweier Unwuchtscheiben eine gerichtete Horizontalkraft F_{Res} erzeugt werden. In Abbildung 9 ist dafür die Anordnung von zwei gegenläufigen Unwuchtscheiben für zwei unterschiedliche Winkelpositionen dargestellt.

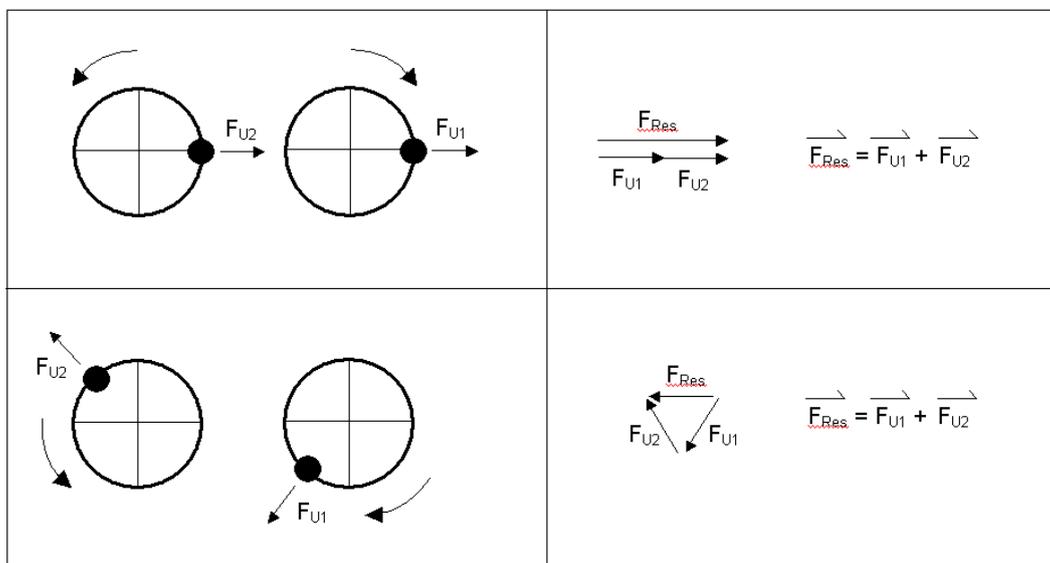


Abbildung 9: Gerichtete Horizontalkraft F_{Res} durch gegenläufige zweite Unwuchtkraft.

Es zeigt sich, dass unabhängig von der jeweiligen Winkelage die resultierende Kraft F_{Res} der beiden Unwuchtkräfte F_{U1} , F_{U2} nur als Horizontalkomponente auftritt. Diese feste Relation und die gegenläufige Drehrichtung der beiden Unwuchtscheiben kann durch ein spezielles Unwuchtgetriebe umgesetzt werden.

Die gerichtete Massenkraft durch das Unwuchtgetriebe muss den entstehenden Massenkraften am Verdichter entgegen wirken. Die Größe der erforderlichen Massenkraften wurde auf die Massenkraften der 1. Ordnung des Kolbenverdichters angepasst.

Die folgende Skizze zeigt den Lösungsvorschlag zur Positionierung und zum Antrieb des Unwuchtgetriebes.

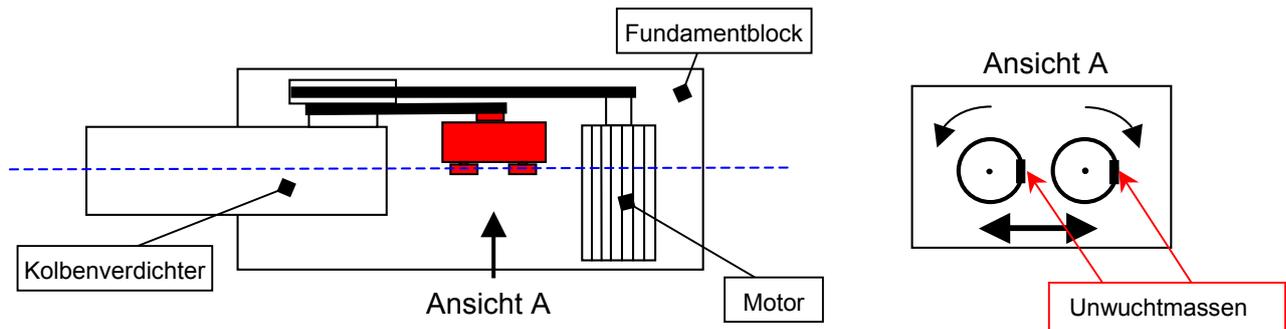


Abbildung 10: Prinzipskizze zur Montageposition des Unwuchtgetriebes zwischen Kolbenverdichter und Motor (links) sowie prinzipielle Anordnung der Unwuchtmassen und Drehrichtungen am Unwuchtgetriebe (rechts).

Durch das abgestimmte Unwuchtgetriebe kann die Amplitude der 1. Ordnung theoretisch vollständig ausgeglichen werden. Die verbleibenden Schwingungen aufgrund der Massenkraften der 2. Ordnung bleiben nach wie vor unbeeinflusst.

Die umgesetzte Ausführung dieser Maßnahme ist in der Abbildung 11 dargestellt. Der Antrieb erfolgte schlupffrei über direkte Ankopplung an der Kurbelwelle des Kolbenverdichters. Durch zwei Kegelradgetriebe wird die Drehbewegung auf das zwischen Kolbenverdichter und Motor positionierte Unwuchtgetriebe umgelenkt.

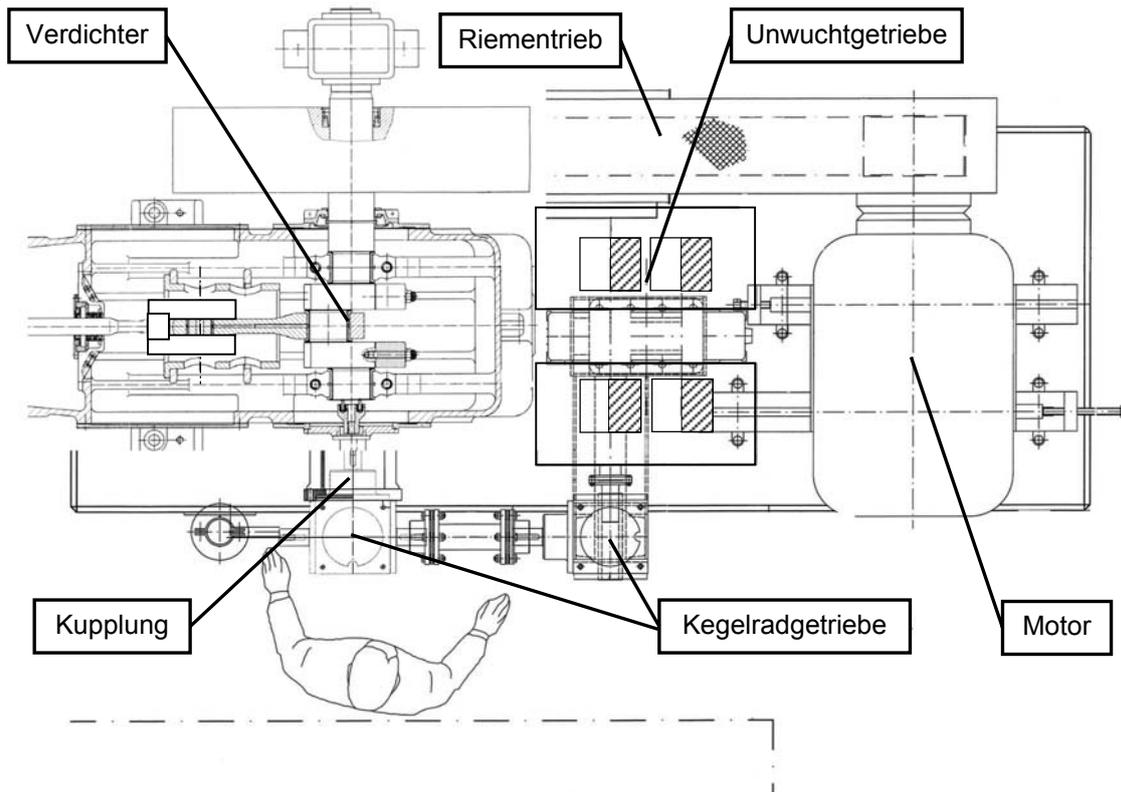


Abbildung 11: Konstruktive Detailausführung der Minderungsmaßnahme Unwuchtgetriebe zwischen Kolbenverdichter und Antriebsmotor.

Nach Realisierung der Maßnahme wurde im Betrieb des Verdichters eine Nachmessung der Fundamentalschwingungen durchgeführt. Die Abbildung 12 zeigt den Vergleich der Schwingungssituation im Originalzustand und nach Umsetzung der Maßnahme.

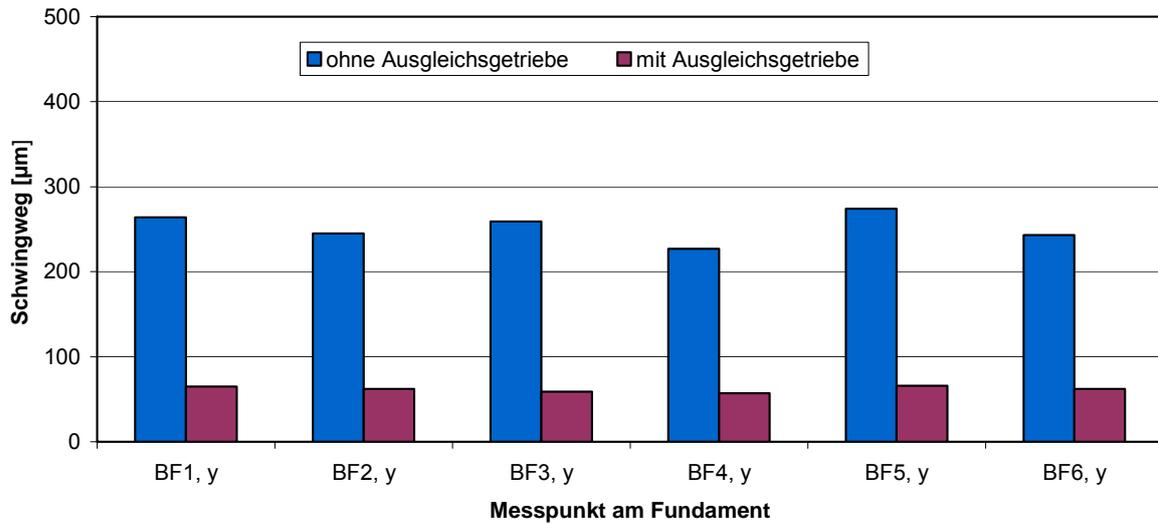


Abbildung 12: Vergleich der Fundamentalschwingungen vor und nach Einbau des Unwuchtgetriebes.

Es zeigt sich, dass die Fundamentalschwingungen durch das Unwuchtgetriebe deutlich reduziert wurden. Der Richtwert für maximale horizontale Fundamentalschwingungen von 160 µm wird deutlich unterschritten. Damit konnte ein aus schwingungstechnischer Sicht problemloser Betrieb der Verdichteranlage garantiert werden.