

Schwingungsreduzierung durch gezielte Verdichter- abstimmung

Dipl.-Ing. **Robert Missal** und Dr.-Ing. **Johann Lenz**
KÖTTER Consulting Engineers GmbH & Co. KG, Rheine
E-Mail: missal@koetter-consulting.com

Kurzfassung

Beim Betrieb einer Verdichterstation stellten sich in einem Bürogebäude in der Nachbarschaft erhebliche Erschütterungseinwirkungen ein. Diese überschritten die Richtwerte so stark, dass für die Mitarbeiter an den CAD-Arbeitsplätzen ein störungsfreies Arbeiten unmöglich war. Im Vorfeld hatte es bereits diverse Untersuchungen mit aufwendigen Lösungsvorschlägen gegeben, der Betreiber wünschte sich jedoch eine kostengünstige und praktikable Lösung.

Im Rahmen einer messtechnischen Untersuchung wurden starke Schwebungserscheinungen am Immissionsort festgestellt. Ursache hierfür war der Parallelbetrieb von zwei baugleichen Verdichtern. Je nach Phasenlage der beiden Kolbenverdichter zueinander kommt es zu einer Verstärkung oder teilweisen Auslöschung der Schwingungen. Durch eine geschickte Ansteuerung der Bypassventile war es möglich, eine kostengünstige und präzise Drehzahlregelung der Verdichter mit jeweils 1.400 kW Antriebsleistung zu realisieren. Die Nachmessung der Erschütterungen in der Nachbarschaft bestätigte die stabile Arbeitsweise der Regelung und die daraus resultierende deutliche Verbesserung der Schwingungssituation.

1. Einleitung

Kolbenverdichter werden zur Verdichtung von Gasen auf Enddrücke von bis zu 3.000 bar eingesetzt und erzeugen aufgrund ihrer Arbeitsweise nicht nur Druckpulsationen sondern auch Schwingungen, die über das Fundament in die Nachbarschaft übertragen werden. Bei großen Entfernungen klingen die Schwingungen aufgrund der Bodendämpfung meist soweit ab, dass keine Belästigung für die Anwohner der angrenzenden Wohnbebauung zu erwarten ist. Steht die Anlage jedoch in unmittelbarer Nachbarschaft zu einem sensiblen Ort, können die übertragenen Schwingungen zu erheblichen Problemen führen.

In diesem konkreten Beispiel wird mit derartigen Maschinen Ethylen verdichtet. Ethylen wird an vielen Standorten in Europa produziert und weiterverarbeitet. Zum kostengünstigen Transport dieses Produktes wurde zwischen 1970 und 1974 eine Pipeline gebaut, wodurch sichergestellt werden sollte, dass in den Zeiten, in denen der betriebseigene Steamcracker wegen Wartungs- oder Reparaturarbeiten außer Betrieb ist, weiterverarbeitende Anlagenteile genügend Ethylen zur Verfügung gestellt bekommen, um den Betrieb aufrecht zu erhalten. Angeschlossen an diese Pipeline sind in Deutschland u. a. die Standorte Marl, Gelsenkirchen, Bottrop, Rheinberg, Dormagen, Wesseling, Frankfurt und Ludwigshafen. Einige Eckdaten dieser Pipeline sind:

Länge:	ca. 495 km
Nennweite:	10"
Betriebsdruck:	ca. 40 bar
Transportkapazität:	2,5 Mio t/a.

Auf einigen Teilstrecken dieser Pipeline reicht der Pipelinedruck in der Regel aus, um die benötigten Mengen zu transportieren. In den Zeiten, in denen die Transportmenge aber aufgrund von Revisionen in den Anlagen der eigenen Erzeugung erhöht werden muss, reicht der Vordruck nicht mehr aus, um den Druckverlust auf dem Transportweg zu überwinden und es muss eine zusätzliche Druckerhöhungsstation in Betrieb genommen werden.

In diesem konkreten Beispiel besteht die Druckerhöhungsstation aus 2 baugleichen, parallel arbeitenden, 2-stufigen Kolbenverdichtern, die jeweils von einem Elektromotor mit einer Antriebsleistung von 1.400 kW und einer festen Drehzahl von 495 min^{-1} angetrieben werden. Bis zum Jahr 2005 wurde diese Verdichterstation nur dann gebraucht, wenn alle 4 Jahre ein Cracker bei einem Betreiber im Süden in Revision ging und während dieser Zeit von etwa 3 Wochen ein anderer Standort über diese Pipeline aus dem Norden mit zusätzlichem Ethylen versorgt werden musste.

Die Verdichterstation wurde damals auf der „grünen Wiese“ gebaut. Weit und breit war kein Nachbar, der sich durch den Betrieb der Anlage gestört fühlen konnte. Darüber hinaus ist die gesamte Anlage relativ klein, da sie nur aus einem kleinen Werkstattgebäude, dem Verdichtergebäude sowie einigen Hilfseinrichtungen wie Kühler und Fackel besteht.

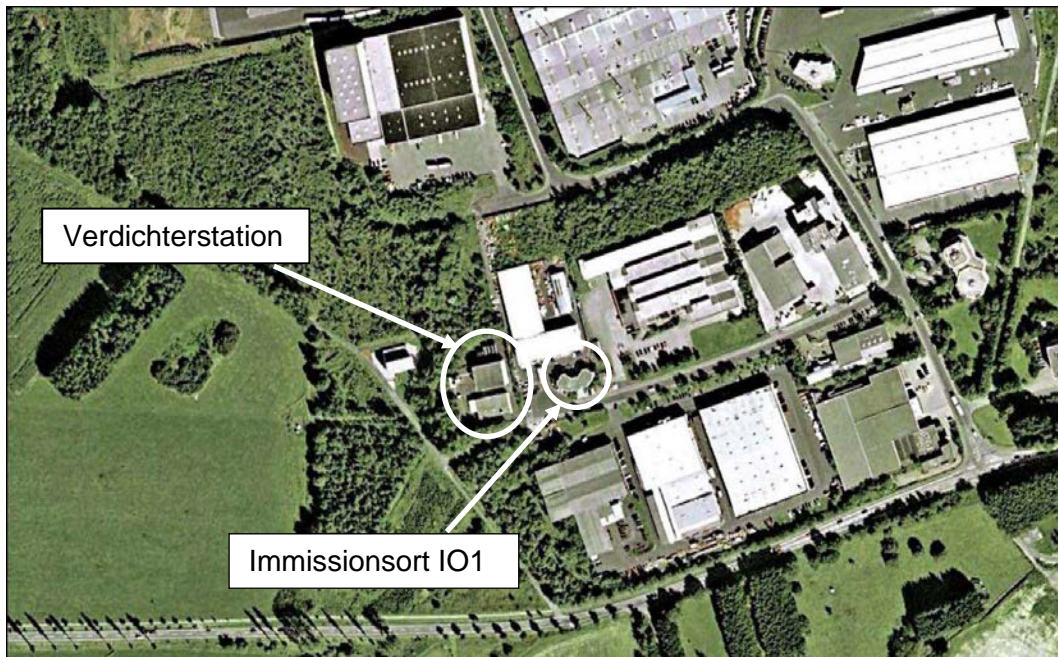


Bild 1: Lage der Verdichterstation

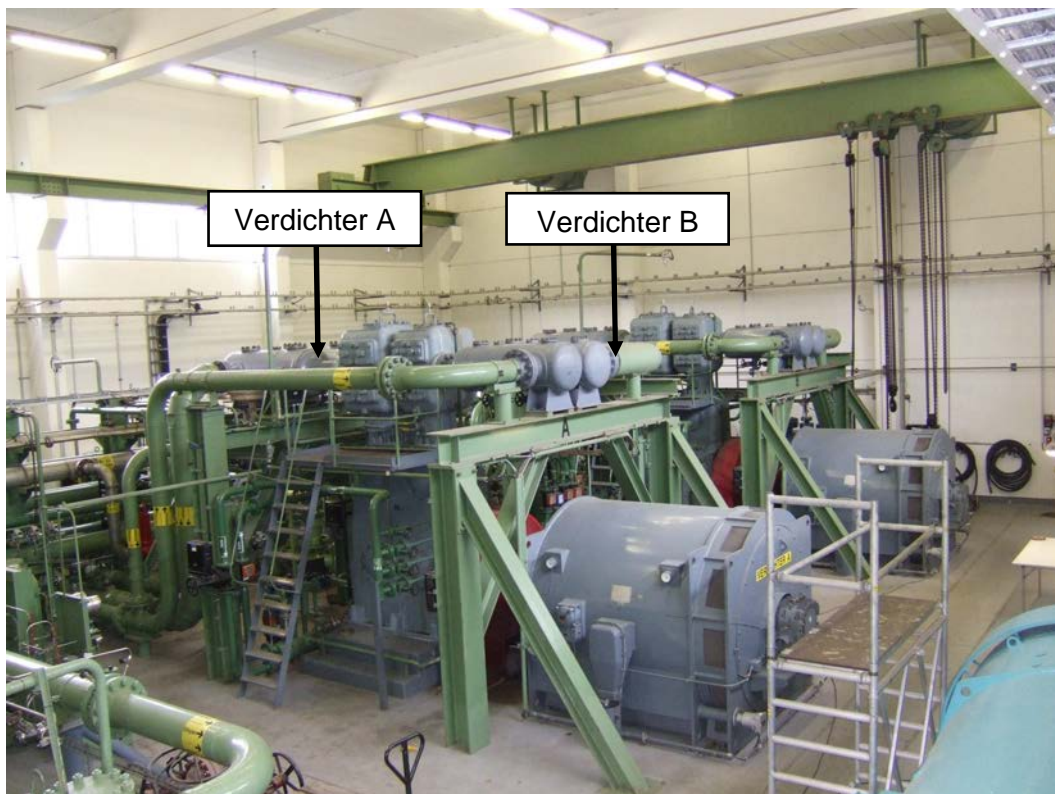


Bild 2: Verdichter A und B mit Antriebsmotor, Antriebsleistung 1.400 kW, Drehzahl 495 min⁻¹

Im Laufe der Jahre wurde jedoch das umliegende Gebiet als Industriegebiet ausgewiesen und es siedelten sich nach und nach Industriebetriebe in der Nachbarschaft der Station an. Anfänglich waren die neuen Nachbarn zwar verwundert über den Sinn und Zweck der Station. Da man aber weder auffällige Geräusche noch sonstige Aktivitäten auf dem Gelände bemerkte, machte man sich zunächst keine Gedanken. Als dann aber nach einem Zeitraum von ca. 4 Jahren die Station wieder turnusgemäß den Betrieb aufnahm, kamen plötzlich die Beschwerden aus der Nachbarschaft. So hatte sich z. B. unmittelbar neben der Verdichterstation in nur ca. 70 m Abstand ein Betrieb zur Herstellung von Kinderspielgeräten angesiedelt. In dem 1. Obergeschoss des Bürogebäudes befindet sich die CAD-Abteilung, in der die Spielgeräte konstruiert werden.

Als nun die Verdichterstation den Betrieb wieder aufnahm, hatten die Konstrukteure erhebliche Probleme, die CAD-Arbeitsplätze zu bedienen. Auch litt die Konzentration der Mitarbeiter unter der zusätzlichen Belastung durch Erschütterungen, so dass innerhalb kurzer Zeit berechtigte Beschwerden beim Betreiber der Station eintrafen.

Da man bemüht war, den Frieden in der Nachbarschaft wieder herzustellen, hat der Betreiber ein Institut mit der Untersuchung der vorliegenden Situation beauftragt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde festgestellt, dass unglücklicherweise die Verdichter die Deckeneigenfrequenz der Gebäudedecke beim Nachbarn anregten. Als Minderungsmaßnahme wurde daher vorgeschlagen, die Deckeneigenfrequenz z. B. durch den Einbau einer zusätzlichen Stütze unterhalb der Decke zu verschieben. In dem Raum, in dem diese Stütze eingebaut werden sollte, war aber das Büro des Geschäftsführers, der das neue Bürogebäude unter anderem deswegen gebaut hatte, um in seinem Büro mehr Platz zu erhalten. Dass dieser Vorschlag daher bei ihm auf taube Ohren stieß, war verständlich, zumal er der Meinung war, dass der Verursacher die Maßnahmen zur Sanierung übernehmen muss.

Eine weitere Möglichkeit der Sanierung bestand in der Drehzahländerung der Verdichter. Die Antriebsleistung der Verdichter beträgt jeweils 1.400 kW bei einer Drehzahl von 495 min^{-1} , so dass mit einer Nachrüstung von Frequenzumrichtern zur Drehzahländerung erhebliche Kosten verbunden gewesen wären.

Darüber hinaus wurden von dem Institut folgende alternative Lösungen vorgeschlagen:

- Aufwerfen eines mehrere Meter tiefen Grabens zwischen Verdichterstation und Nachbarn und Verfüllen dieses Grabens mit einer speziellen Dämmmasse
- Montage eines mehrere Tonnen schweren Schwingungstilgers oberhalb der Verdichter
- Trennung der gemeinsamen 1,5 m dicken Fundamentplatte unterhalb der Verdichter.

Auch hierbei stellte sich jedoch schnell heraus, dass erhebliche Kosten für die Sanierung anfallen würden. Eine Garantie, dass die Erschütterungssituation dann in der Nachbarschaft akzeptabel sein würde, wollte niemand geben. Also suchte der Betreiber weiter nach fachkundiger Unterstützung bei der Lösung des Erschütterungsproblems und nahm Kontakt zu KÖTTER Consulting Engineers auf. Er beauftragte eine entsprechende Untersuchung einschließlich der Ausarbeitung von kostengünstigen Minderungsmaßnahmen.

2. Ergebnisse der Messungen

Im Rahmen einer ersten Messung vor Ort wurde zunächst die Schwingungssituation am Aufstellungsort der Verdichter sowie beim Nachbarn über einen repräsentativen Zeitraum aufgezeichnet. Zusätzlich wurden auch die Druckpulsationen in den Rohrleitungen aufgenommen, um die Verdichter und Pulsationsdämpfer unter dem Gesichtspunkt der Anregung von Rohrleitungsschwingungen durch Druckpulsationen bewerten zu können. Allerdings stellte sich dabei schnell heraus, dass die Druckpulsationen in den Rohrleitungen nicht für die bemängelte Situation verantwortlich waren.

An dem Arbeitsplatz im benachbarten Büro (Messpunkt IO1_z), an dem nach Aussage der Beschwerdeführer die höchsten Schwingungen zu spüren waren, wurden die höchsten Schwingungen in vertikaler Richtung gemessen. Die Frequenz der Schwingungen entsprach der doppelten Drehfrequenz der Verdichter. Der zeitliche Abstand zwischen den Schwingungsbäuschen betrug 0,06 Sekunden (siehe Bild 3).

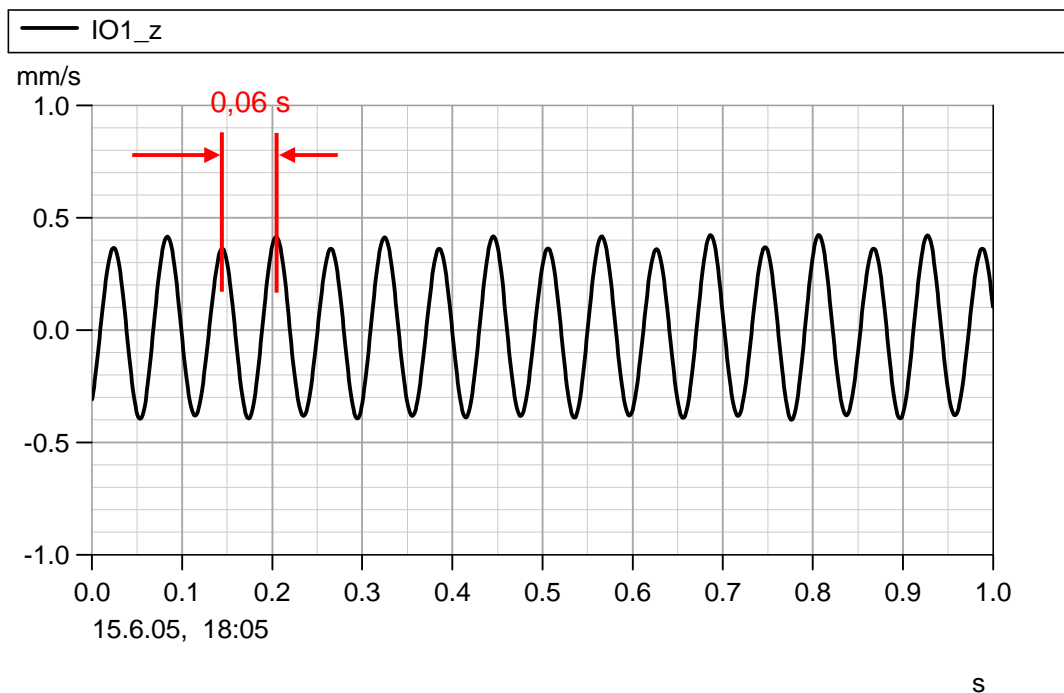


Bild 3: Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeit am Messpunkt IO1_z im benachbarten Bürogebäude in vertikaler Richtung, Betrieb von Verdichter A

Für die Beurteilung der Erschütterungen in der Nachbarschaft gibt die entsprechende Richtlinie DIN 4150 [1] vor, dass der Maximalwert der Schwingungen in einem Zeittakt von jeweils 30 Sekunden für die Beurteilung der Situation heranzuziehen ist. Für die weitere Betrachtung der Situation wurde daher zu besserer Übersicht aus den aufgezeichneten Zeitverläufen der Schwinggeschwindigkeit der Maximalwert innerhalb eines Zeitfensters von jeweils einer Sekunde berechnet. Die Erschütterungssituation, die sich beim Betrieb der Verdichter am Immissionsort in der Nachbarschaft einstellte, ist in dem nachfolgenden Bild 4 dargestellt.

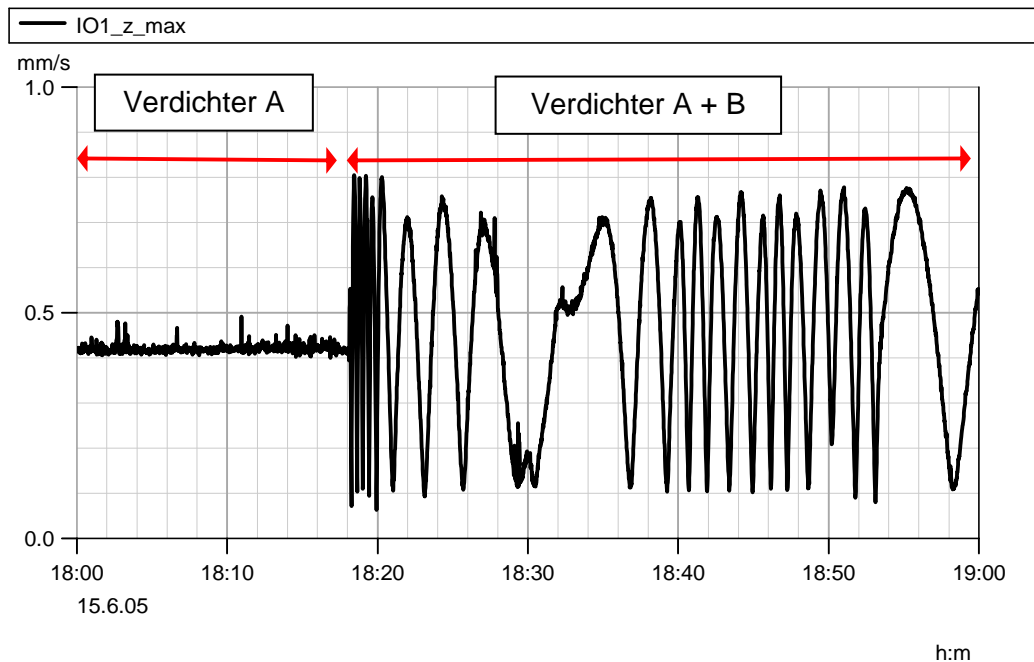


Bild 4: 1-Sekunden Maximalwerte der Schwingungen am Immissionsort IO1_z

Auffällig an dem Kurvenverlauf aus dem Bild 4 ist der relativ konstante Verlauf bis ca. 18:18 Uhr. Danach sind sehr starke Schwankungen der Schwinggeschwindigkeit zwischen etwa dem doppelten Wert und nahezu Null erkennbar. Die Erklärung für diesen Verlauf ist die Zuschaltung des zweiten Verdichters um 18:18 Uhr. Ab diesem Zeitpunkt waren die beiden Verdichter parallel in Betrieb. Da man erwartet hatte, dass bei Parallelbetrieb die Schwingungen am Immissionsort auf den doppelten Wert ansteigen würden, stellte sich die Frage nach der Ursache dieser starken Schwankungen. Beide Verdichter sind baugleich und werden von baugleichen Elektromotoren angetrieben. Die Bedingungen auf der Saug- und Druckseite sind identisch, da die beiden Verdichter aus einer gemeinsamen Saugleitung ansaugen und in eine gemeinsame Druckleitung einspeisen.

Der Volumenstrom, den die beiden Verdichter liefern können, ist größer als der tatsächliche Bedarf. Aus diesem Grund wird immer ein Teilvolumenstrom über eine sogenannte „Bypassregelung“ von der Druckseite der ersten Verdichterstufe zurück auf die Saugseite der Verdichter geleitet. Diese Regelung wirkt aber auf beide Verdichter gleich, um zu gewährleisten, dass die Belastung der beiden Verdichter möglichst identisch ist (Bild 5).

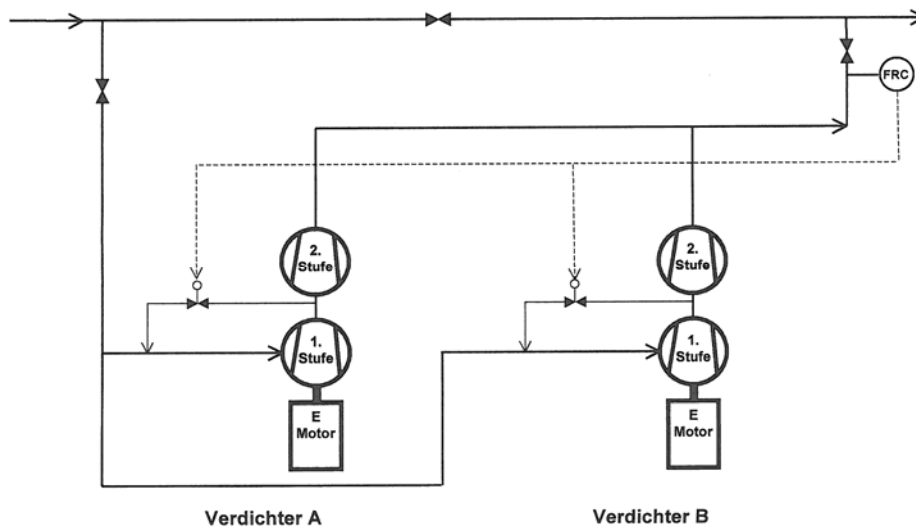


Bild 5: Regelschema der Verdichtieranlage

Dennoch gab es offensichtlich einen geringen Drehzahlunterschied zwischen den beiden Motoren, der dazu führte, dass die Phasenlage der beiden Verdichter zueinander sich ständig veränderte. Je nach Phasenlage löschten sich die Schwingungen der einzelnen Maschinen teilweise aus oder aber addierten sich bis auf den doppelten Wert im Vergleich zum Einzelbetrieb. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Minima der Schwingungen betrug bei stationärem Betrieb ca. 73 s.

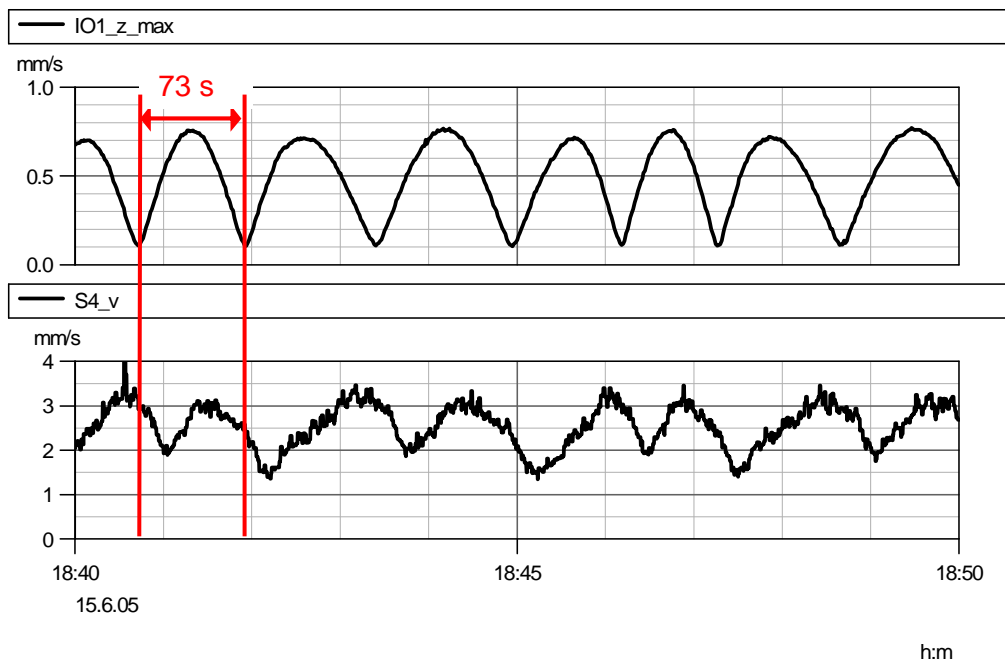


Bild 6: 1-Sekunden-Maximalwerte der Schwingungen am Immissionsort und am Fundament der Verdichter (Messpunkt S4_v, unteres Diagramm)

Die Erklärung für dieses Verhalten war der geringfügig unterschiedliche Schlupf der Elektromotoren. Diese Abweichung der Läuferdrehzahl von der synchronen Drehzahl ist lastabhängig. Um diese Vermutung zu bestätigen, wurde ein Messsignal benötigt, welches den aktuellen Phasenversatz der Verdichter beschreibt. Leider waren die Verdichter bereits in Betrieb als die Messtechnik installiert wurde, so dass eine OT-Markierung (OT = oberer Totpunkt, siehe Bild 8) nicht zur Verfügung stand. Es wurde daher versucht, mit Hilfe der aufgezeichneten Drucksignale eine OT-Markierung zu generieren.

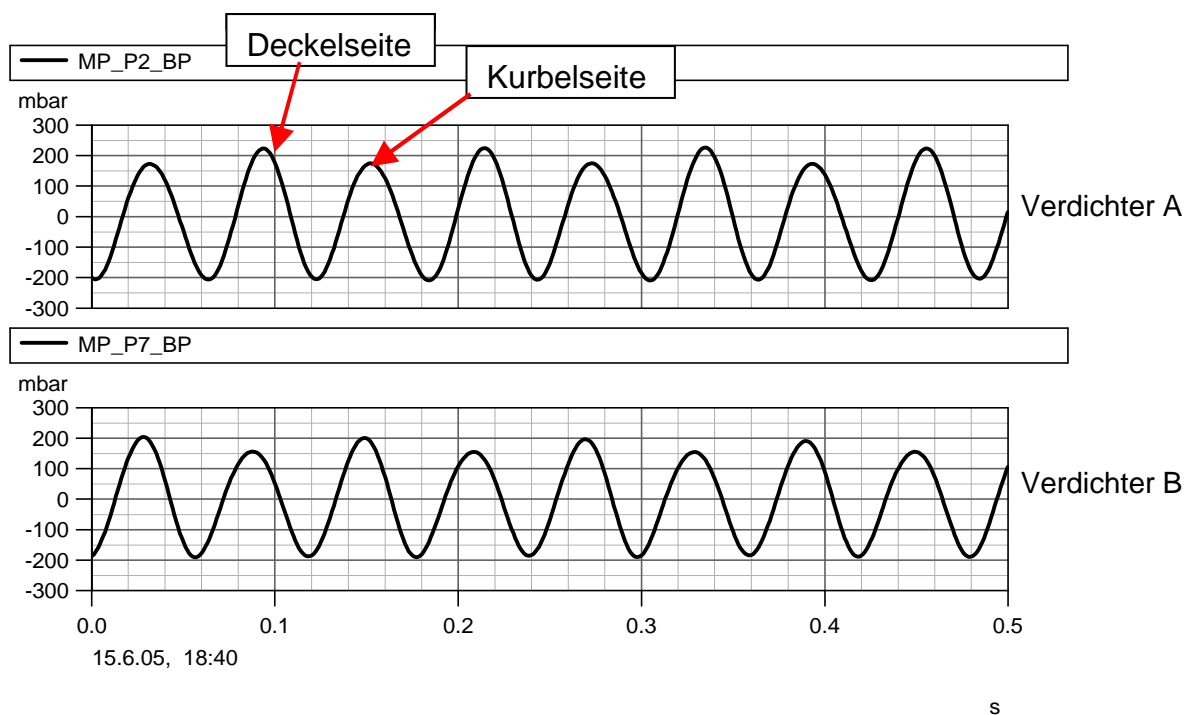


Bild 7: Zeitverlauf der bandpassgefilterten Drucksignale nach der 1. Stufe

Die Kurvenverläufe aus dem Bild 7 zeigen, dass die Druckpulsationen in den Druckrohrleitungen der beiden Verdichter jeweils abwechselnd höhere und niedrigere Werte aufweisen. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass die beiden Zylinder doppelwirkend sind und die beiden Verdichtungsräume aufgrund der Kolbenstange im kurbelseitigen Zylinder unterschiedliche Toträume aufweisen.

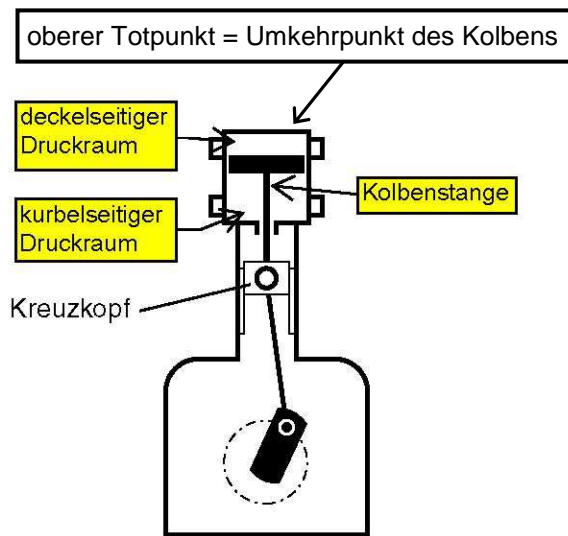


Bild 8: Schema des doppelwirkenden Zylinders am Kolbenverdichter

Mit Hilfe dieser Drucksignale konnte eine OT-Markierung generiert und der Phasenversatz der beiden Verdichter in Kombination mit dem Schwingungszustand am Immissionsort dargestellt werden (Bild 9).

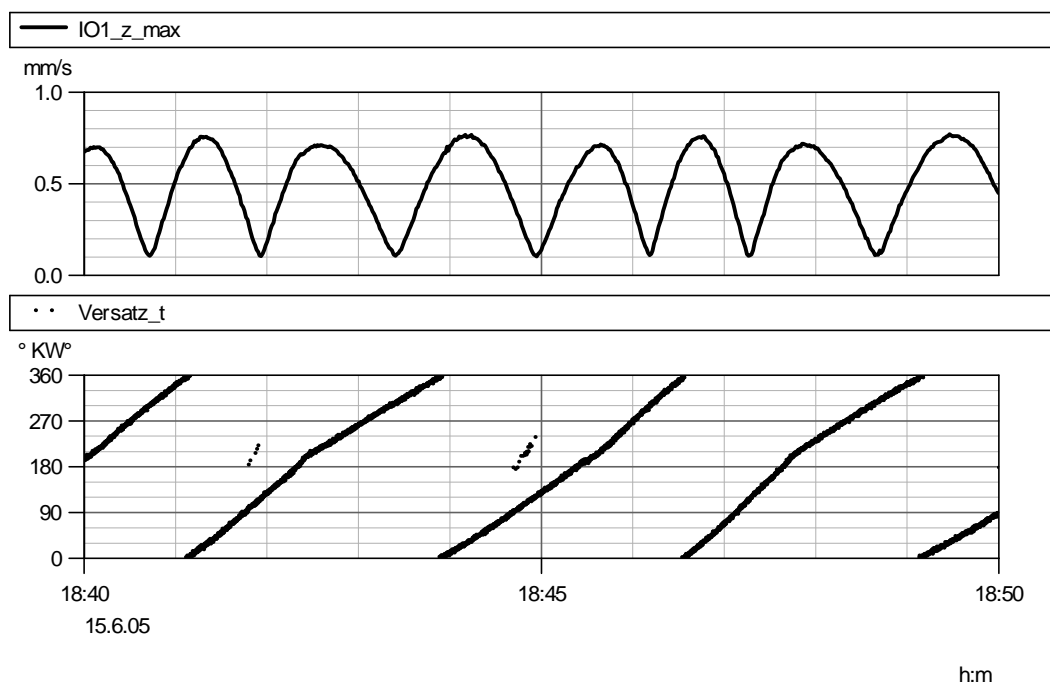


Bild 9: 1-Sekunden-Maximalwerte der Schwingungen am Immissionsort (oberes Diagramm) und Phasenversatz der beiden Verdichter

3. Lösungsansatz zur Verbesserung der Schwingungssituation

Die Anregung der Schwingungen in der Nachbarschaft erfolgte durch die translatorischen Kräfte der Verdichter. Die Höhe dieser Anregung änderte sich offensichtlich mit dem Versatz der Verdichter. Ein erster Ansatz zur Verbesserung der Schwingungssituation war daher, mit Hilfe eines Referenzsensors die Schwingungssituation zu erfassen und den Phasenversatz mit den Bypassarmaturen zu regeln. Das Regelkonzept sah wie folgt aus:

Zunächst wird abgewartet bis das Minimum der Schwingungen durchlaufen wird und die Schwingungen wieder ansteigen. Bei dem Überschreiten einer voreingestellten Schwelle werden die Bypassarmaturen der beiden Verdichter dann derart angesteuert, dass eine Armatur geringfügig (ca. 2 %) weiter geschlossen wird, während die zweite Armatur um den gleichen Betrag geöffnet wird. Dadurch wird ein Verdichter geringfügig entlastet, was zu einer Erhöhung der Drehzahl führt, während der zweite Verdichter geringfügig mehr belastet wird und dadurch in der Drehzahl abfällt. Dieses wiederum führt zu einer Trendumkehr der Schwingungen auf der gemeinsamen Fundamentplatte bzw. am Immissionsort.

Als Referenzmesspunkt wollte der Betreiber nur einen Messpunkt akzeptieren, der auf dem Gelände der Verdichterstation lag. Daher wurde ein Fußpunkt des Antriebsmotors als Installationsort (S5_v) für den Referenzsensor gewählt. Problematisch war die Zusammensetzung der Schwingungen am Immissionsort bzw. am Referenzmesspunkt, da die dominanten Frequenzanteile an den Messpunkten unterschiedlich waren (Bild 10).

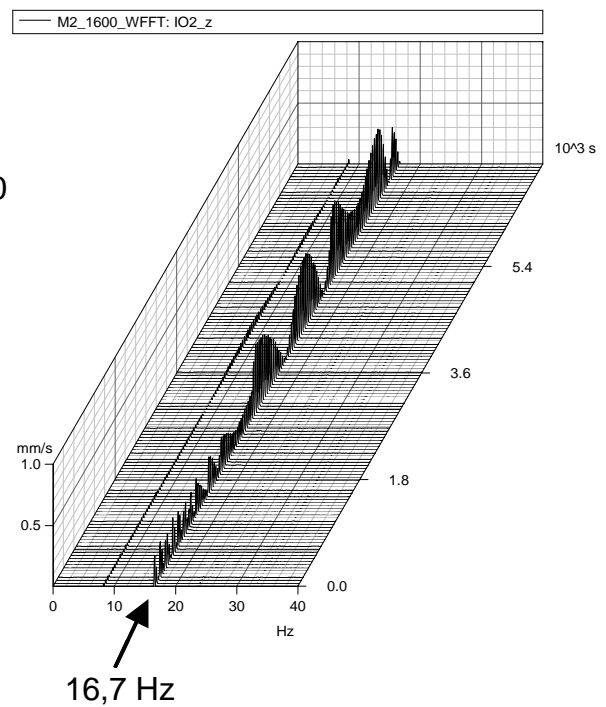
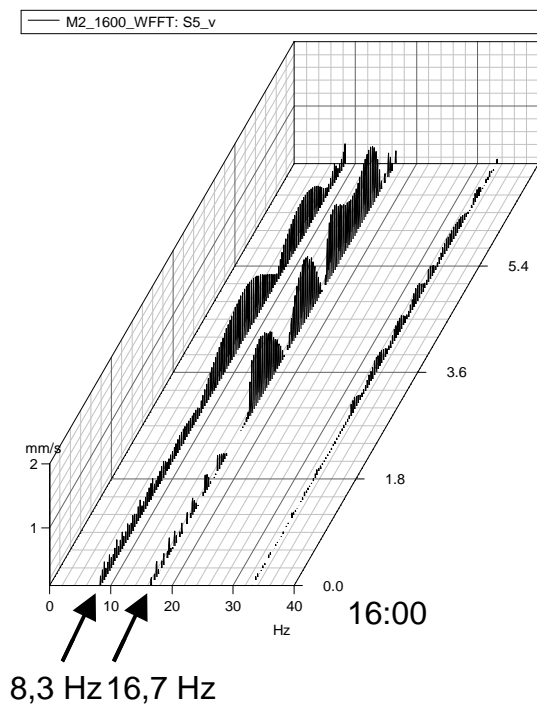


Bild 10: FFT-Analyse der Schwinggeschwindigkeiten am Referenzmesspunkt (links) und am Immissionsort (rechts)

Da am Referenzmesspunkt ein großer Anteil der Schwingungen auch bei der einfachen Drehfrequenz der Verdichter messbar war, musste das Schwingungssignal zunächst bandpassgefiltert werden, damit eine Verwendung dieses Signals für die Regelung möglich war.

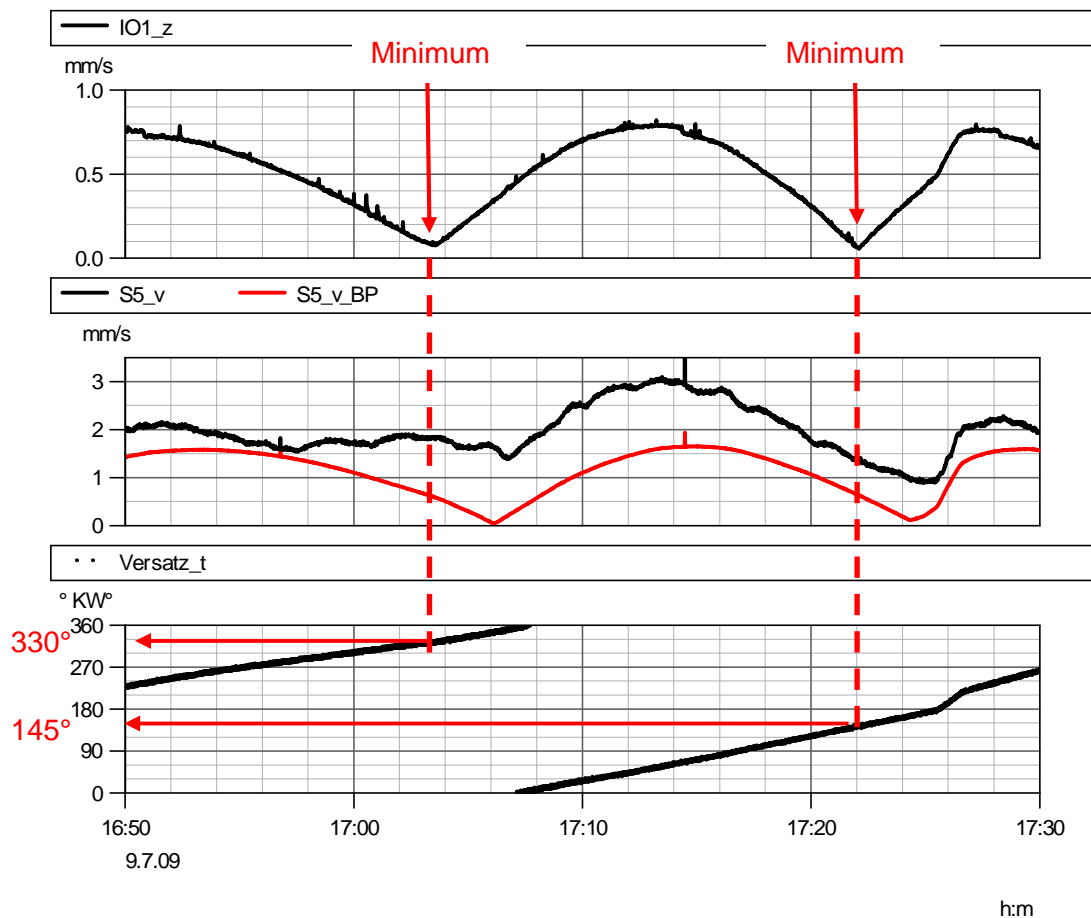


Bild 11: 1-Sekunden-Maximalwerte der Schwingungen am Immissionsort (oberes Diagramm) und am Fundament der Verdichter (S5_v = Originalsignal, S5_v_BP = bandpassgefiltert), Phasenversatz der beiden Verdichter

Wie aus dem Bild 11 zu erkennen ist, kann das Minimum der Schwingungen am Referenzort S5_v aus dem bandpassgefilterten Signal deutlicher ausgelesen werden als aus dem ungefilterten Signal. Allerdings ist auch erkennbar, dass das Minimum der Schwingung am Immissionsort nicht zeitgleich mit dem bandpassgefilterten Schwingungssignal am Referenzmesspunkt auftrat. Dennoch wurde dieses Signal im ersten Schritt für die Regelung herangezogen.

Nach der Beschaffung der Hardware und dem Umbau der Ansteuerung der beiden Regelventile wurde der Regelalgorithmus in die Steuerung implementiert und in Betrieb genommen. Die Schwellwerte für die Regelung und die Schrittweiten für die Regelarmaturen wurden experimentell ermittelt und optimiert. Die Auswirkung dieser Regelung ist in dem nachfolgenden Bild 12 zusammengefasst.

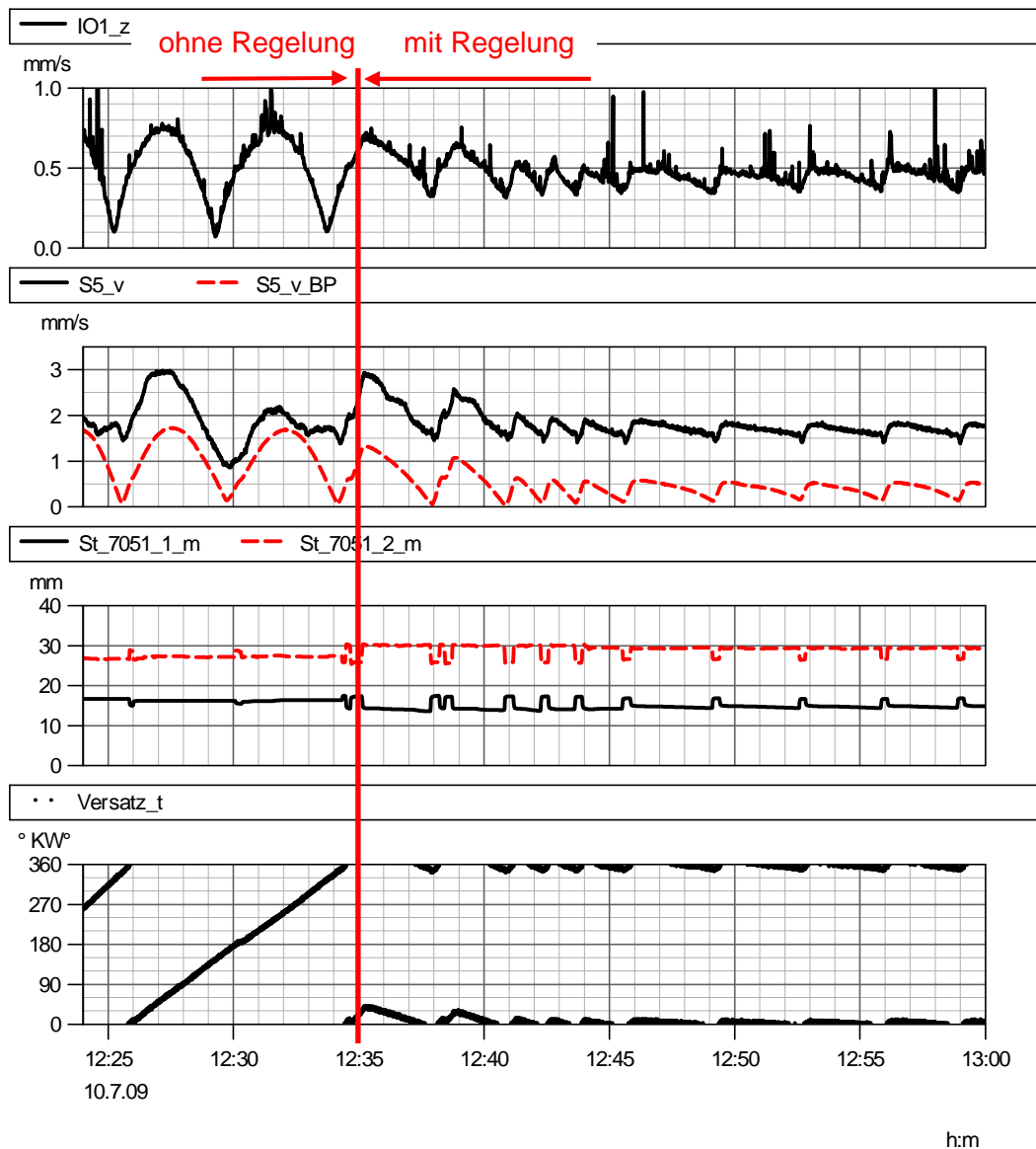


Bild 12: 1-Sekunden-Maximalwerte der Schwingungen am Immissionsort (oberes Diagramm) und am Fundament der Verdichter (S5_v = Originalsignal, S5_v_BP = bandpass-gefiltert), Stellung der Bypassarmaturen (St_7051_1_m = Bypassarmatur Verdichter A, St_7051_2_m = Bypassarmatur Verdichter B) und Phasenversatz der beiden Verdichter

Die Kurven des Bildes 12 zeigen, dass der Phasenversatz der beiden Verdichter wie gewünscht durch die geringfügige Veränderung der Positionen der Bypassarmaturen beeinflusst werden konnte. Allerdings war die Regelung zu grob, so dass die Schwingungen am Immissionsort zwar verringert wurden, aber weiterhin auf einem recht hohen Niveau lagen.

Es wurde daher beschlossen, die Regelung dahingehend zu optimieren, dass als Eingangsgröße nicht die Schwinggeschwindigkeit auf der Fundamentplatte sondern der Phasenversatz der Verdichter verwendet wird. Hierfür wurde eine OT-Markierung auf die beiden Schwungräder angebracht und mit Hilfe einer einfachen Zeitmessung wurde der zeitliche Abstand der beiden OT-Markierungen ermittelt. Der weitere Regelalgorithmus wurde nicht verändert. Da die Messung des Phasenversatzes die deutlich genauere Eingangsgröße ist, konnte jetzt der gewünschte Effekt an den Immissionsorten erzielt werden (siehe Bild 13).

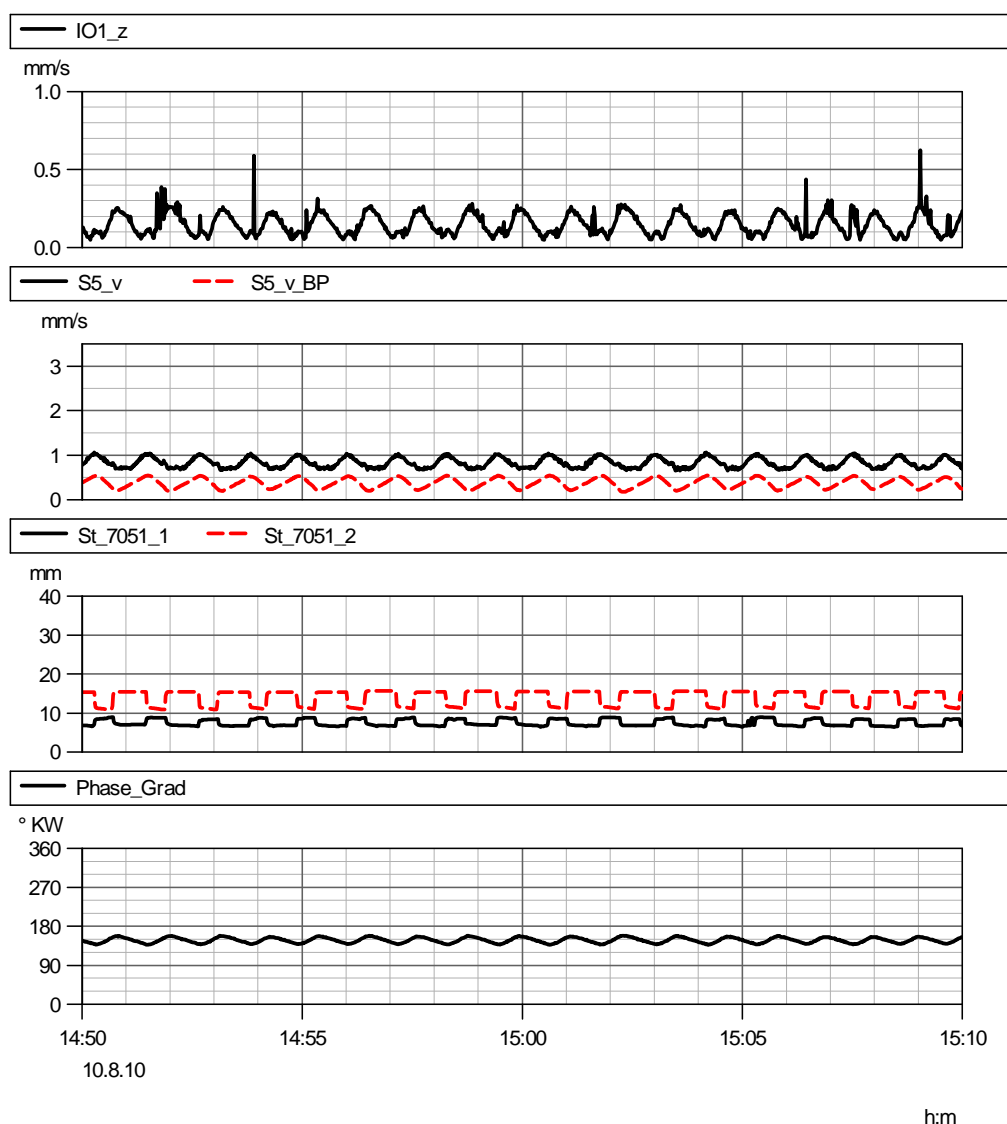


Bild 13: 1-Sekunden-Maximalwerte der Schwingungen am Immissionsort (oberes Diagramm) und am Fundament der Verdichter (S5_v = Originalsignal, S5_v_BP = bandpassgefiltert), Stellung der Bypassarmaturen und Phasenversatz der beiden Verdichter

4. Fazit

Die Auswirkung dieser Regelung auf die Schwingungssituation an dem Immissionsort in der Nachbarschaft wird deutlich, wenn die Schwinggeschwindigkeiten für die Ausgangssituation den durch die Regelung erzielten Werten direkt gegenübergestellt werden (Bild 14).

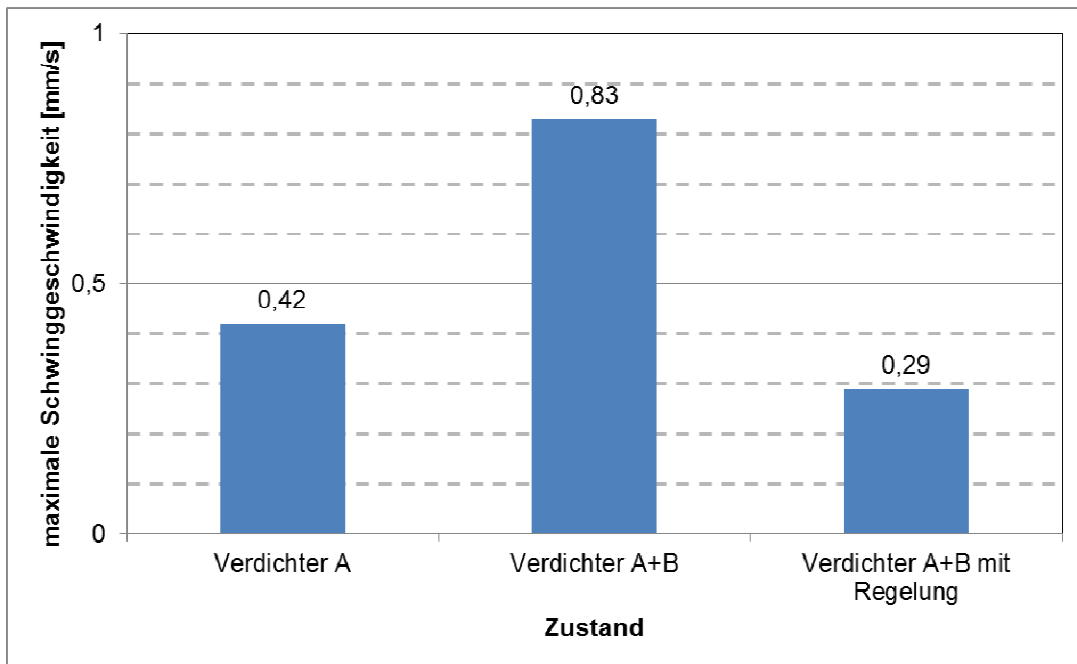


Bild 14: 1-Sekunden-Maximalwerte der Schwinggeschwindigkeit am Immissionsort (Messpunkt IO1_z) für die Ausgangssituation (Verdichter A, Verdichter A und B) sowie die Situation nach Inbetriebnahme der Regelung

Mit der Optimierung der Eingangsgröße für die Regelung konnte die Schwingungssituation an den Immissionsorten in der Nachbarschaft deutlich reduziert werden. Das Schwingungsniveau liegt nach der Inbetriebnahme der optimierten Regelung unterhalb der Schwingungen, die bei Einzelbetrieb der Verdichter gemessen wurden. Die Beschwerdeführer waren mit der erzielten Verbesserung sehr zufrieden und auch der Betreiber war froh, diesen Zustand mit einer derart kostengünstigen Maßnahme erreicht zu haben.

5. Literaturhinweis

- [1] DIN 4150 – Teil 2: Erschütterungen im Bauwesen – Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, Ausgabedatum 1999-06