

Erdgasverdichterstation

Gezielte Sanierung erspart aufwändige Neugründung

Zur Abdeckung von Verbrauchsspitzen eines regionalen mitteldeutschen Energieversorgers wurde das Gasnetz um einen Hochdruck-Röhrenspeicher erweitert. Die notwendige Druckerhöhung des Gases aus dem Ferngasnetz in den Röhrenspeicher wurde durch eine neu errichtete Kolbenverdichterstation sichergestellt. Der prinzipielle Aufbau des Verdichters mit elektromotorischem Antrieb und Gründung auf einem Blockfundament ist Abb. j1 zu entnehmen.

Bei ersten Probeläufen der zweistufigen drehzahlvariablen Verdichteranlage – Saugdruck 12 bar, Enddruck 100 bar, Drehzahlbereich 300 – 600 U/min – wurden durch das Inbetriebnahmepersonal deutlich überhöhte Schwingungen festgestellt. Der Anlagenbetreiber vermutete als ursächlich die unzureichende Fundamentierung des Verdichters und forderte vom Anlagenbauer eine kurzfristige Lösung inkl. Neugründung auf einem deutlich vergrößerten Blockfundament. Daraufhin wurde KÖTTER Beratende Ingenieure Berlin GmbH (KBI) durch den Anlagenbauer mit einer umfassenden Untersuchung der Schwingungssituation der Verdichteranlage beauftragt. Basierend auf einer objektiven Messung mit anschließender Analyse sollten gezielte Maßnahmen zur Ertüchtigung der Schwingungssituation ausgelegt und vorgeschlagen werden. Ein weiteres Ziel war die Sicherstellung einer hohen Anlagenverfügbarkeit und Einhaltung der vertraglich vereinbarten Garantiewerte unter Berücksichtigung eines günstigen Kosten-Nutzen-Verhältnisses.

Die Garantiebedingungen des Verdichterherstellers fordern u.a. für den uneingeschränkten Dauerbetrieb die Einhaltung von Schwinggeschwindigkeiten $v \leq 11 \text{ mm/s eff}$ an den Zylindern und Zylinderköpfen sowie $v \leq 2,5 \text{ mm/s eff}$ am Kurbelgehäuse in Höhe der Kurbelwellenlängsachse. Zum Vergleich werden für Kolbenverdichter nach VDI Richtlinie 3838 an vergleichbaren Messpositionen Schwinggeschwindigkeiten $v \leq 18 \text{ mm/s eff}$ zugelassen.

In einem ersten Schritt wurden im Rahmen einer umfangreichen Messkampagne Druckschwankungen und mechanische Schwingungen zeitsynchron an bis zu 32 Messpositionen über das gesamte Drehzahlband des Verdichters gemessen. Abb. j1 zeigt auszugsweise einige der verwendeten Schwingungsmesspunkte. Die in y-Richtung gemessenen mechanischen Schwingungen im Bereich des Verdichters fasst Abb. j2 als zeitlichen Verlauf der Effektivwerte über der Verdichterdrehzahl zusammen. Es zeigte sich, dass beim Hochlauf bis zur Drehzahl 540 U/min das Schwingungsniveau erwartungsgemäß geringfügig mit der Drehzahl anstieg. Um ca. 13:41 Uhr bei Erreichen der Drehzahl 570 U/min wurde ein sprunghafter Anstieg der Schwinggeschwindigkeiten auf 46 mm/s eff am obersten Messpunkt v1y gemessen. Damit wurde der Richtwert des Herstellers 11 mm/s eff hier und auch an den Messpunkten v2y mit 27 mm/s eff und v3y mit 17 mm/s eff drastisch überschritten. Mit Erreichen der Höchstdrehzahl 600 U/min reduzierten sich die mech. Schwingungen wieder deutlich, in diesem Betriebspunkt wurden max. 11 mm/s eff am Messpunkt v1y festgestellt.

Die Analyse der drehzahlabhängig überhöhten Schwingungssituation zeigte eine Kippbewegung des Verdichters um eine parallel zur Kurbelwellenrichtung gedachte Längsachse am Fuß des Kurbelgehäuses in y-Richtung, siehe Amplitudenverhältnisse und Phasenlagen in Abb. j3. Am Fundament und auf der Oberseite des Grundrahmens (v5y) hingegen wurden nur sehr kleine Schwinggeschwindigkeiten $v \leq 1,0 \text{ mm/s eff}$ gemessen. Damit konnte eine unzureichende Fundamentierung des Verdichters nachweislich ausgeschlossen werden. Zur weiteren Analyse zeigt die Farbkarte in Abb. j4 den zeitlichen Verlauf der am Messpunkt v1y gemessenen Frequenzspektren. Es zeigte sich, dass die festgestellten Schwingungen primär durch die 2te-Harmonische des Fördervorganges (Massenkräfte, Gaskräfte) angeregt wurden, das max. Schwingungsniveau

MASCHINENDYNAMIK

im Zeitfenster bei der Drehzahl 570 U/min (vgl. Abb. j2 und Abb. j4) wurde bei ca. 19 Hz ($570 \text{ U/min} = 9,5 \text{ Hz} \times 2 = 19 \text{ Hz}$) gemessen. Zusätzlich wurden am Hilfsrahmen zur Detailanalyse gezielte Anschlagversuche mit einem Modalhammer, deren Ergebnisse Abb. j5 zusammenfasst, durchgeführt. Hiermit konnte der Ursache-Wirkungsmechanismus eindeutig nachgewiesen werden. Die Verdichterkonstruktion wies eine schwach bedämpfte mech. Eigenfrequenz $f_e = 19,3 \text{ Hz}$ in y-Richtung auf. Das Zusammentreffen aus mech. Eigenfrequenz und Anregung durch die 2te-Harmonische der Drehzahl führte zu der resonanzartig verstärkten Schwingungen bei Drehzahlen um 570 U/min.

Noch vor Ort wurden erste Ergebnisse den beteiligten Projektpartnern mitgeteilt und empfohlen, den Drehzahlbereich um 570 U/min vorerst durch eine Umprogrammierung der Anlagensteuerung zu sperren. Drehzahlbereiche 300 – 540 U/min und die Höchstdrehzahl 600 U/min konnten ohne Einschränkungen für den Dauerbetrieb freigegeben werden. Als weiterer Schritt wurde empfohlen, die mech. Eigenfrequenz in y- Richtung durch gezielte Aussteifungen des Hilfsrahmens aus dem Anregungsspektrum der 2ten Harmonischen auf mindestens 22 Hz zu verschieben. Hierzu wurde noch während der Messung eine provisorische Aussteifung realisiert und die Wirksamkeit messtechnisch nachgewiesen.

Im Nachgang zu den Messungen der Ausgangssituation wurde ein theoretisches Berechnungsmodell mittels FEM-Simulation aufgestellt und auf die Messergebnisse abgestimmt. Anschließend wurden mögliche Lösungsansätze implementiert und die favorisierte Variante vorgeschlagen.

Nach der bauseitigen Umsetzung des in Abb. j6 skizzierten favorisierten Lösungsvorschlags wurde eine Kontrollmessung der Schwingungssituation durchgeführt. Die Eigenfrequenz wurde durch die Aussteifung von 19,3 Hz auf 24,1 Hz verschoben, s. Abb. j5. Die „Vorher-Nachher“-Gegenüberstellung in Abb. j7 zeigt den Erfolg der vorgeschlagenen Maßnahme.

Fazit:

Die Gegenüberstellung der vor und nach der Umsetzung der Modifikation gemessenen mechanischen Schwingungen zeigt eine deutliche Verbesserung der Schwingungssituation der Verdichteranlage. Die Richtwerte des Verdichterherstellers werden nun im gesamten Drehzahlbereich durchweg eingehalten. Die Verdichteranlage wird seit Umsetzung der Modifikation zur vollsten Zufriedenheit der Projektpartner betrieben.

Die gezielte Modifikation der Verdichteranlage, basierend auf der messtechnischen Untersuchung und abgestimmten Auslegung durch KBI, hat eine aufwändige und kostenintensive Neugründung des Verdichters auf einem vergrößerten Fundament erspart. Die Verdichteranlage war während der gesamten Periode der Sanierung praktisch vollständig einsatzbereit.

MASCHINENDYNAMIK

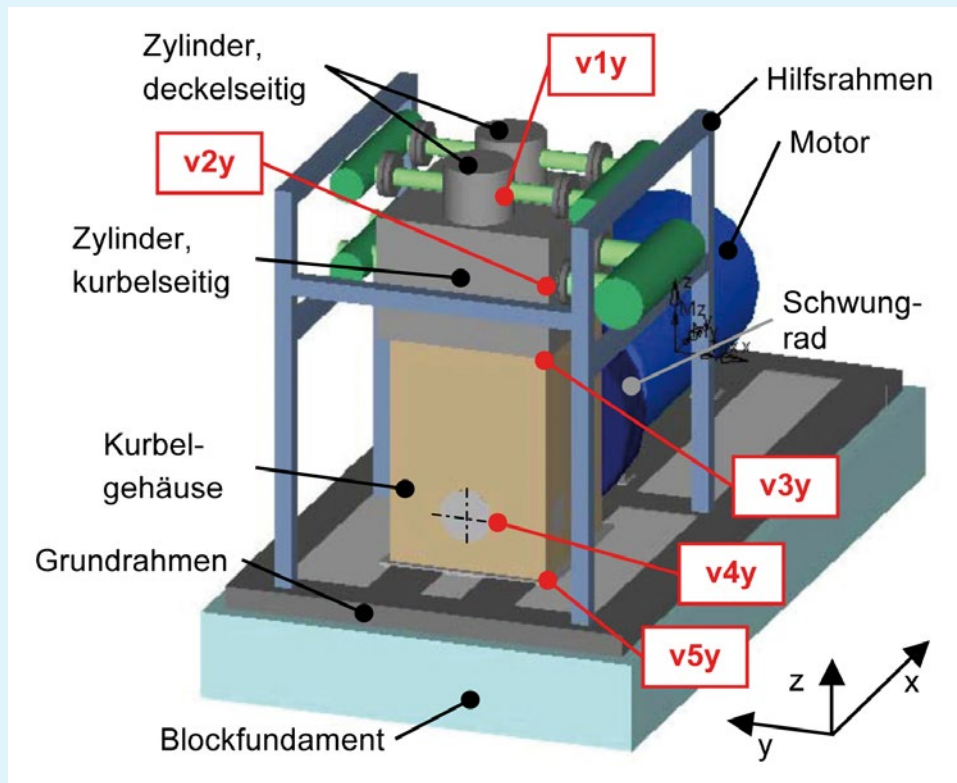


Abbildung j1: Verdichteranlage (Prinzipkizze) mit Messpunkten und Koordinatensystem im Originalzustand.

MASCHINENDYNAMIK

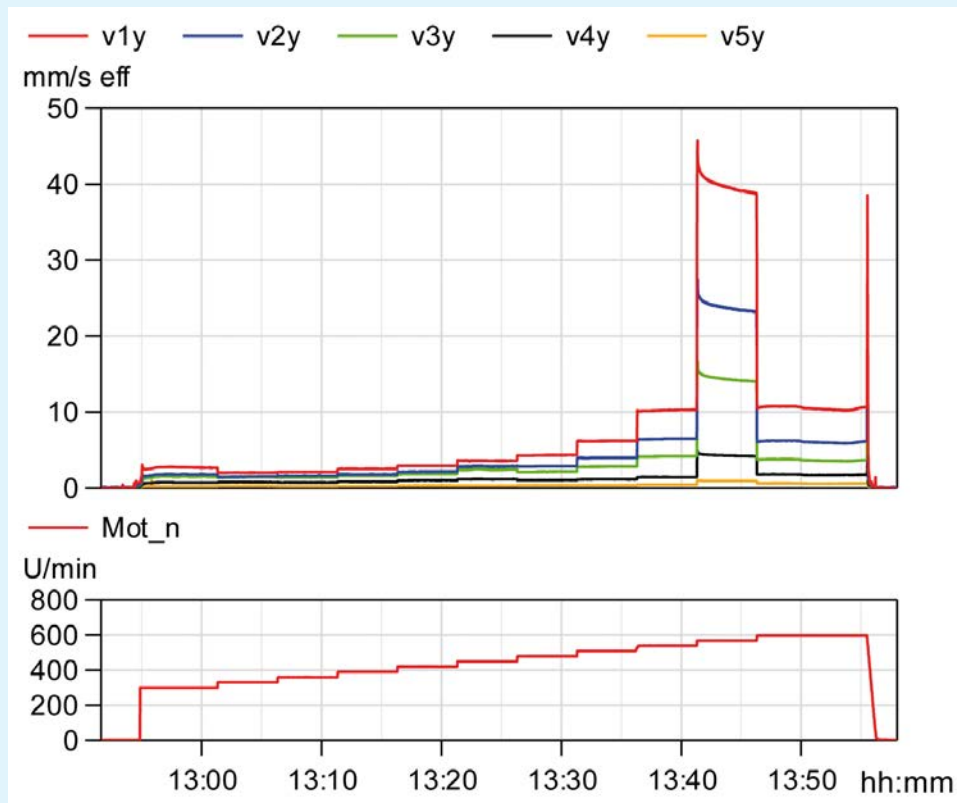
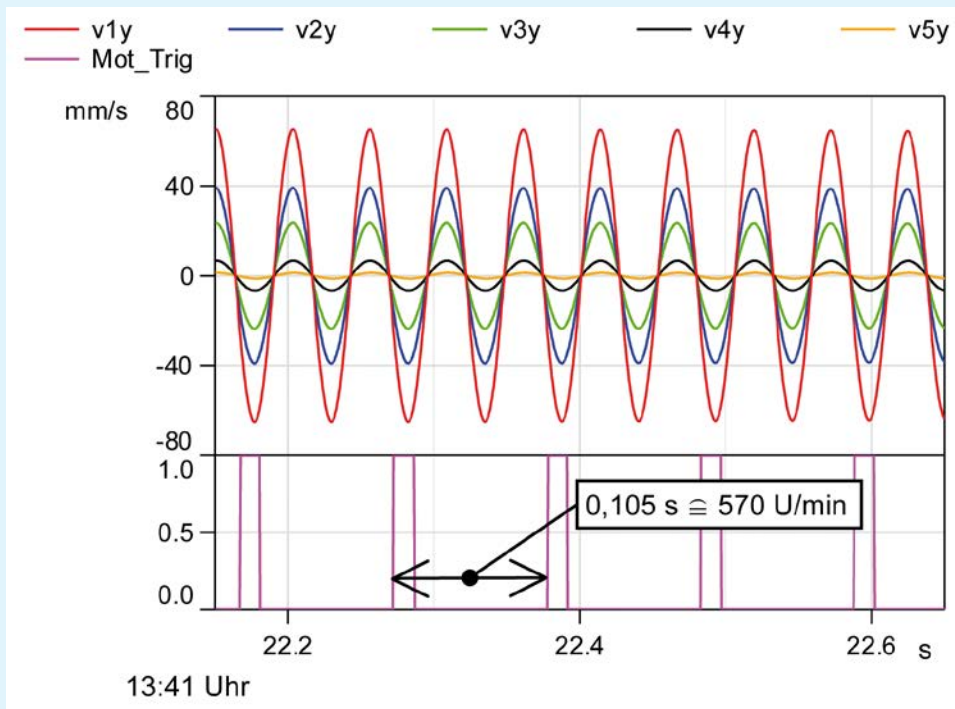


Abbildung j2: Zeitlicher Verlauf der gemessenen mechanischen Schwingungen (Effektivwerte) an Verdichter und Grundrahmen in y-Richtung und Drehzahlen beim enggestuften Hochfahren im Originalzustand vor Modifikation.

MASCHINENDYNAMIK



Zeitlicher Verlauf der gemessenen Verdichterschwingungen über 4 vollständige Umdrehungen bei Drehzahl 570 U/min im Originalzustand vor Modifikation.

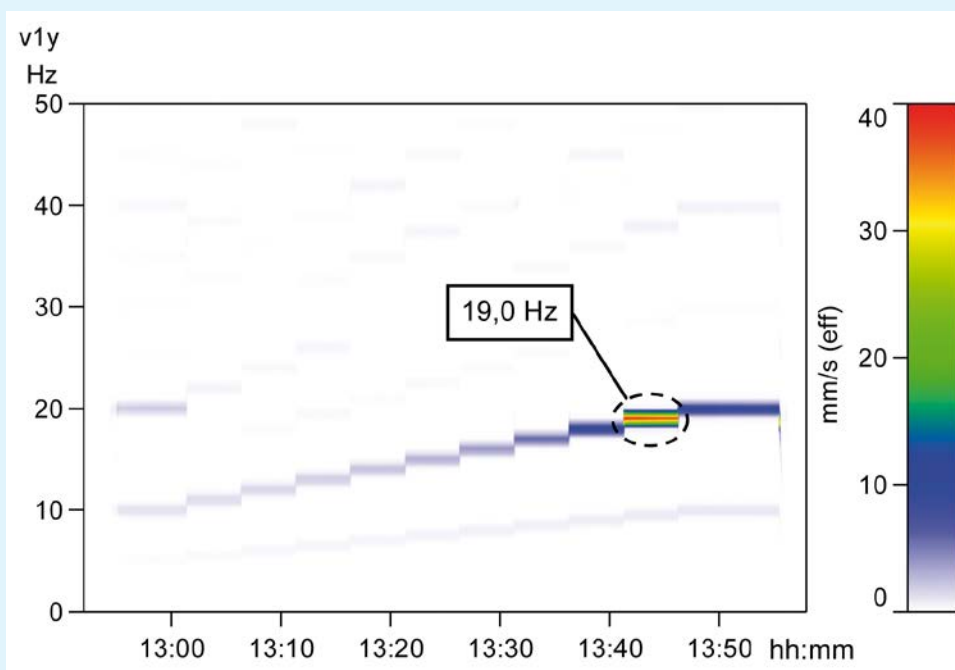


Abbildung j4: Farbkarte der Zeit-Frequenzspektren (FFT, Harmonische als Effektivwerte) der Schwingungen am Messpunkt v1y beim enggestuften Hochfahren des Verdichters im Originalzustand vor Modifikation.

MASCHINENDYNAMIK

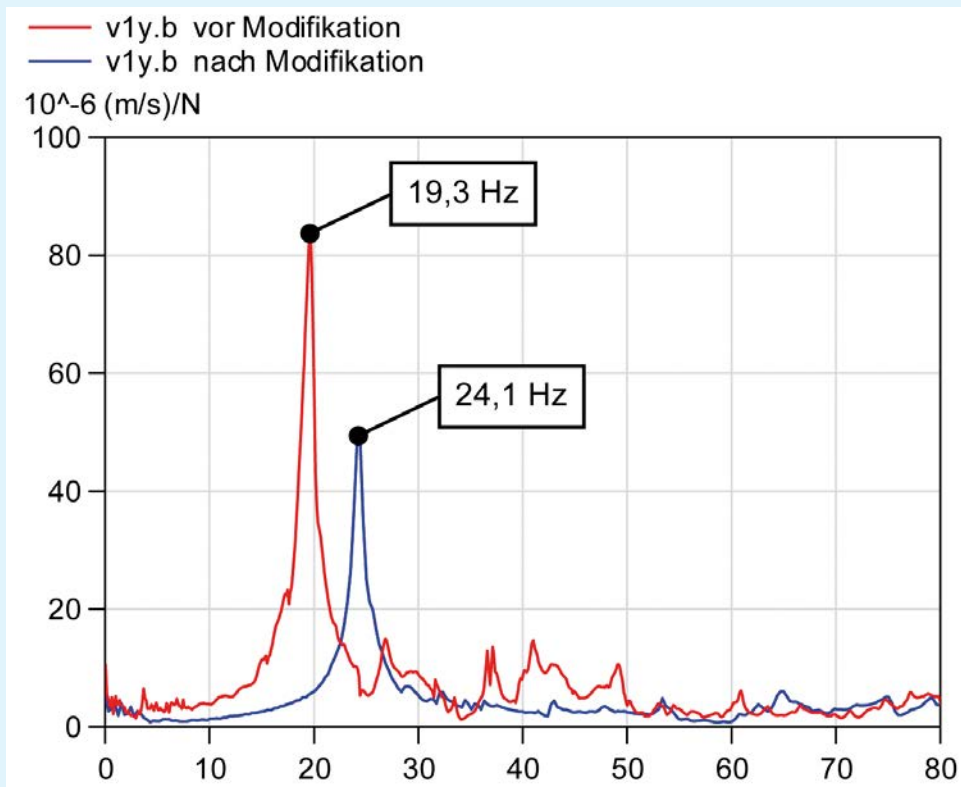


Abbildung j5: Betragsspektren der Übertragungsfunktionen für Messpunkt v1y aus Anschlagversuchen mit Impulshammer vor und nach Umsetzung der Modifikationen.

MASCHINENDYNAMIK

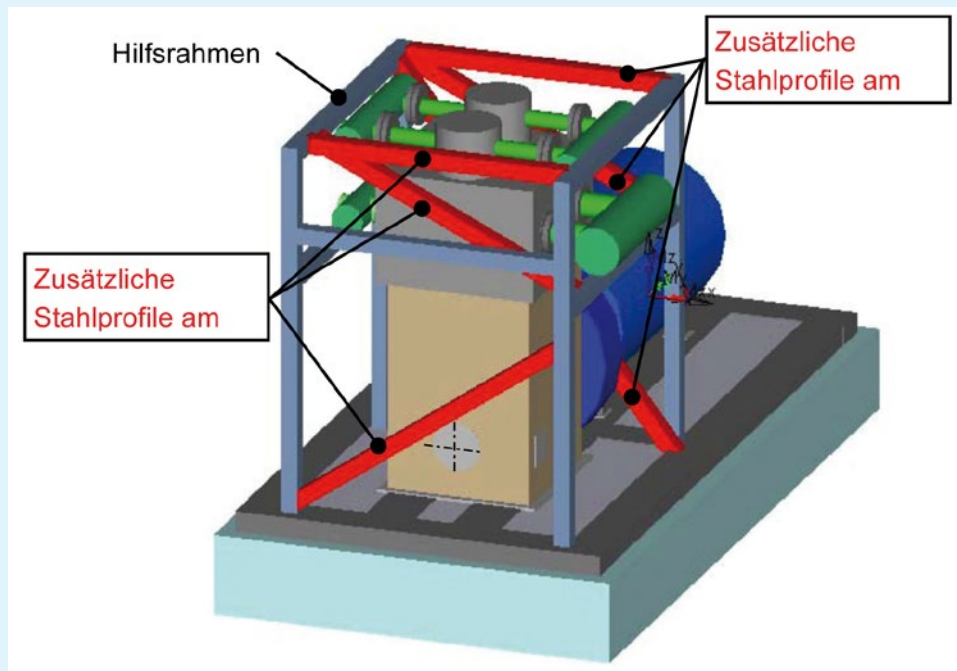


Abbildung j6: Verdichter (Prinzipkizze) nach Umsetzung der Modifikation am Hilfsrahmen.

MASCHINENDYNAMIK

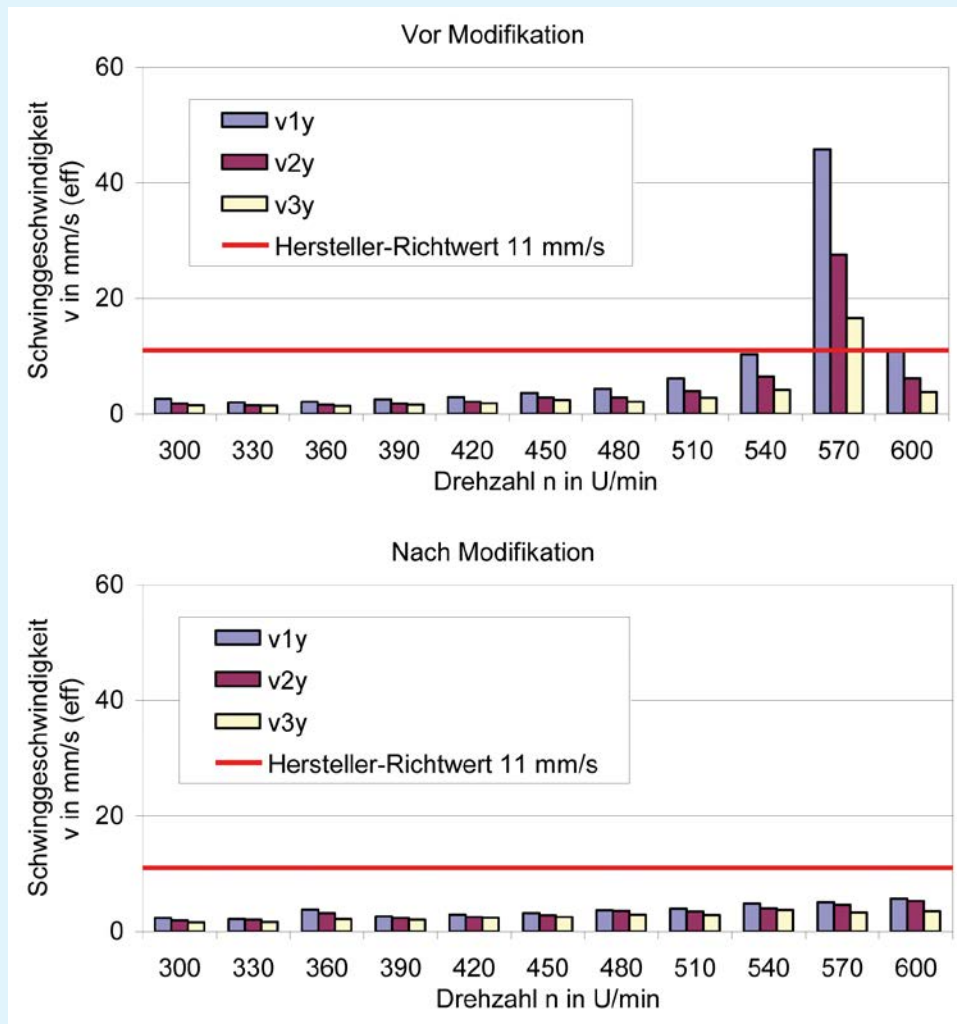


Abbildung j7: Vergleich der gemessenen mechanischen Zylinderschwingungen vor und nach der Modifikation bei typischen Drehzahlen und Hersteller-Richtwert 11 mm/s (eff).



Kontakt:

Dipl.-Ing. Joachim Holstein
 Telefon: +49 30 526788-23
 j.holstein@koetter-consulting.com