

Strömungsgeschwindigkeit von 20m/s und einer Partikelbeladung von 0,2kg/s. Dies zeigt, dass die Partikel im ersten Rohrsegment vor der Rohrbiegung aufgrund der statistischen und scherfreien Einstreuung zunächst homogen verteilt sind und der Strömung uneingeschränkt folgen. Aufgrund der Massenträgheit der Partikel kann die Mehrzahl dieser der Strömung in der Biegung nicht mehr folgen und setzt die Bewegung in positive y-Richtung fort. Infolgedessen kollidieren die Partikel an der Außenseite des gebogenen Rohres, werden umgelenkt und verlieren infolge des dissipativen Stoßes an Geschwindigkeit. Die Partikel fallen dadurch ein Stück aus der Strömung ab und sind vor allem in der unteren Hälfte des Rohrsegments zu finden. In diesem Bereich werden die Partikel wieder von der Strömung aufgenommen und beschleunigt.



Abbildung 3: Momentaufnahme der Partikelverteilung innerhalb eines Rohrsegments bei einer Geschwindigkeit von 20m/s und einer Partikelbeladung von 0.2kg/s.

Für den Fall mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 10m/s fallen die Partikel aufgrund der Kollision und der Schwerkraft im Betrachtungsgebiet nahezu vollständig aus der Strömung aus. Dadurch befinden sich diese vor allem im unteren Bereich des Rohrsegments. Dies ist in Abbildung 4 dargestellt und deckt sich zudem mit den für solche Anlagen empfohlenen Richtgeschwindigkeiten. So wird von der Berufsgenossenschaft Holz und Metall für geringe Beladung eine Mindestgeschwindigkeit von 15m/s und für eine hohe Beladung 18m/s empfohlen [5].

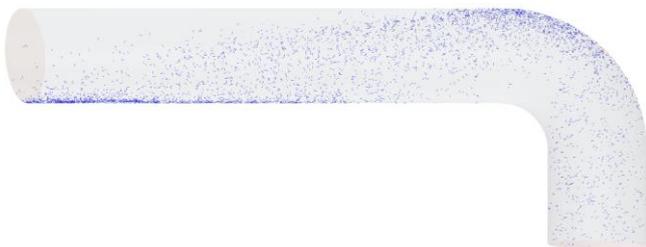


Abbildung 4: Momentaufnahme der Partikelverteilung innerhalb eines Rohrsegments bei einer Geschwindigkeit von 10m/s und einer Partikelbeladung von 0.2kg/s zeigt ein Ausfallen der Partikel aus der Strömung.

Geschwindigkeitsfeld

Das in Abbildung 5 dargestellte Geschwindigkeitsfeld zeigt eine homogene Zuströmung in das Rohrsegment. Infolge der Rohrbiegung bildet sich auf der innenliegenden Biegeseite ein Rezirkulationsgebiet mit einer tonalen Ablösung. Diese hat bei 20m/s eine Frequenz von etwa 25Hz. Mit einigem Abstand liegt hinter der Biegung liegt eine vollturbulente Rohrströmung vor. Dadurch kann im nachfolgenden der Effekt einer turbulenten Strömungsanregung auf das Rohrsegment untersucht werden.

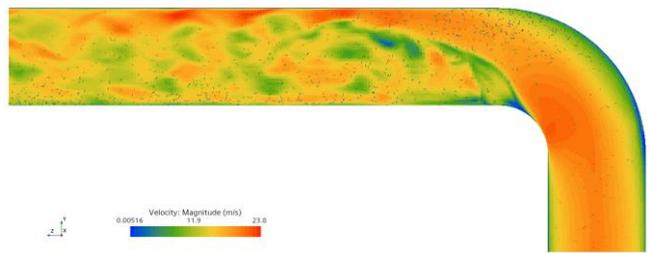


Abbildung 5: Momentaufnahme des Geschwindigkeitsfeldes im Rohrsegment bei einer Einströmgeschwindigkeit von 20m/s zeigt eine homogene Zuströmung und mit einigem Abstand eine vollturbulente Strömung.

Anregungsmechanismen

Im Folgenden wird näher auf den Einfluss der beiden Hauptanregungsmechanismen für Strukturschwingungen der Rohrwandung eingegangen. Zu diesen zählen die Anregung durch Druckkräfte und die Anregung durch Partikelkollisionen. Das für diese Analyse betrachtete Gebiet wurde hierbei als gesamte Rohr-Innenfläche gewählt.

Die Druckanregung wird komponentenweise durch Integration des Drucks in Richtung der Oberflächennormalen gebildet und die Partikelkollisionen durch komponentenweise Summation über die Partikel-Wand-Kontaktkräfte. Daraus ergeben sich die in Abb. 6 und Abb. 7 dargestellten zeitlichen Verläufe der Kräfte.

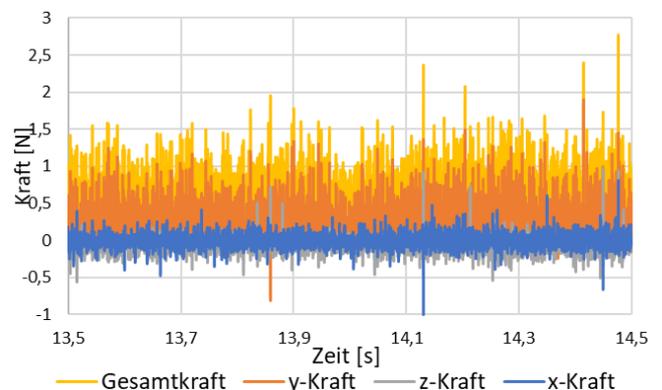


Abbildung 6: Zeitsignal der Summierten Partikelkräfte auf das Rohrsegment bei 20m/s und einer Beladung von 0.2kg/s.

Daraus geht hervor, dass durch die Partikel die größten Kräfte in Richtung der Einströmung (y-Koordinate) übertragen werden. Bei den Druckkräften hingegen wirken sowohl in Richtung der y-Koordinate, als auch in Richtung der negativen z-Koordinate annähernd gleiche große Kräfte. Der x-Anteil ist dabei für beide Mechanismen im Vergleich kleiner und regt um die Nulllage an. Daraus kann die y-Koordinate als dominante Richtung für die Gesamtanregung bestimmt werden.

In einem nächsten Schritt werden mit einer Frequenzanalyse die Frequenzanteile der Anregung aus den Zeitsignalen gewonnen. Dies ist für den Fall der Gesamtanregung in Abbildung 8 dargestellt. Hieraus lassen sich nun die folgenden Aussagen tätigen:

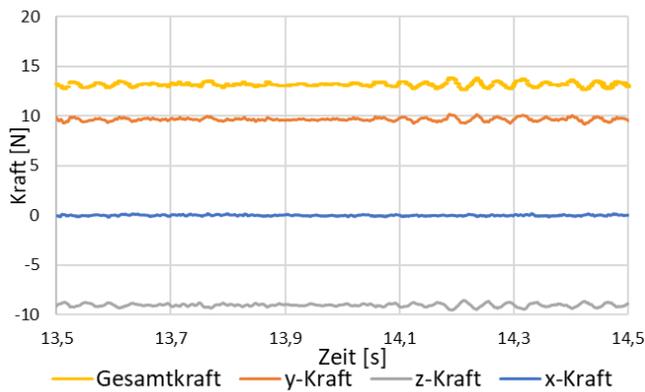


Abbildung 7: Zeitsignal der Integrierten Druckkräfte über das Rohrsegment bei 20m/s und einer Beladung von 0.2kg/s.

Bei der Anregung, welche durch die Partikel-Wand Kollisionen erfolgt, handelt es sich um eine breitbandige Anregung. So zeigen sich keine dominanten Frequenzanteile im Schmalbandspektrum. Dies entspricht ebenfalls der Erwartung, da es sich bei den Kollisionen mit diesem Modell um Impulsanregungen handelt.

Die Anregung infolge der Strömung zeigt sich vor allem im niederfrequenten Bereich. So liegt bei ca. 25Hz eine dominante Frequenz vor, welche durch die Strömungsablösung bestimmt ist. Darüber hinaus zeigen sich zudem kleinere Nebenpeaks. Global betrachtet fällt der Pegel ab ca. 500 Hz mit zunehmender Frequenz ab.

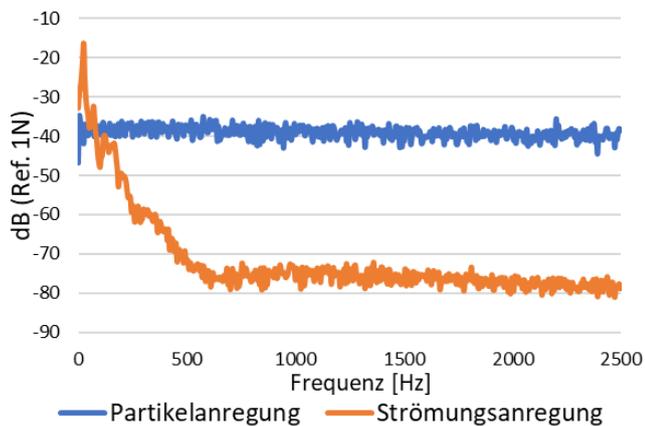


Abbildung 8: Frequenzspektrum infolge der Strömungs- und Druckkräfte auf das Rohrsegment bei 20m/s und 0.2kg/s

Analog kann dies ebenfalls unter Betrachtung der Terzspektren festgestellt werden (hier nicht dargestellt). So dominiert die Strömung aufgrund der niederfrequenten Anregung die unteren Terzen. Bei höheren Terzen zeigen sich vor Allem durch die größeren Frequenzintervalle die Partikelanregungen und führt zu einem Ansteigen des Pegels zu höheren Terzen.

Experimentelle Validierung

Die Simulationsergebnisse können mit Messungen an industriellen Absauganlagen verglichen werden. Dafür wurden mehrere Beschleunigungssensoren entlang der Rohrleitungen von Absauganlagen mit diversen Fertigungsmaschinen montiert und verschiedene Betriebszustände vermessen. Die dabei vorliegenden Rahmenbedingungen wie Geometrie der Verrohrung,

Strömungszustände und Partikelbeladung entsprechen nicht dem numerischen Setup und stellen daher eine Referenz einer realen Anlage dar. Die Ergebnisse einer Messreihe für einen Hobel sind in Abbildung 9 dargestellt. Darin enthalten sind eine Ruhemessung (schwarz), eine Messung mit der Absaugung (grün) und zwei Messungen mit Absaugung und Span (blau und pink).

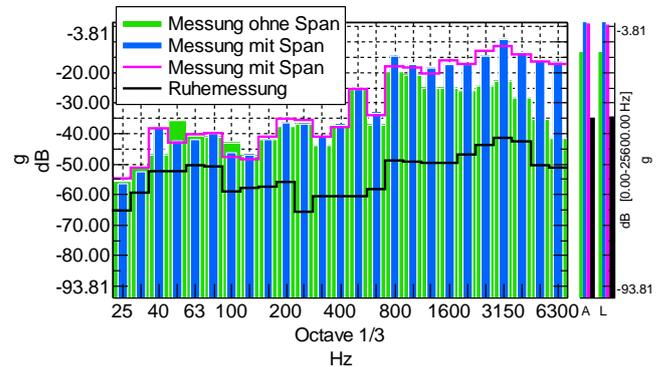


Abbildung 9: Messungen an industriellen Rohranlagen zeigen für einen Hobel in den Terzspektren ein allgemeines Ansteigen des Pegels durch die Strömung und den Einfluss der Späne ab ca. 1000Hz.

Die Messungen zeigen, dass die Präsenz einer Strömung im Allgemeinen zu einer Anhebung des Pegels oberhalb des Ruhepegels führt. Der Vergleich verschiedener Anlagen und Messpunkte (nicht dargestellt) zeigt eine Abhängigkeit des strömungsbasierten Terzspektrums vom Messort. Die Zugabe des Spans zeigt sich hingegen vor allem in den Terzspektren oberhalb von ca. 1000 Hz und führt zu keiner signifikanten Änderung der Terzen im unteren Frequenzbereich. Dies deckt sich qualitativ mit den numerisch gewonnenen Ergebnissen.

Strömungsgeschwindigkeit

Um den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit zu bestimmen, wurde diese in dem Simulationsmodell von 10m/s mit einer Schrittweite von 5m/s auf 25m/s erhöht. Die sich daraus ergebenden Frequenzanteile aufgrund der Strömungsanregung sind in Abbildung 10 und für die Partikelanregung in Abbildung 11 dargestellt.

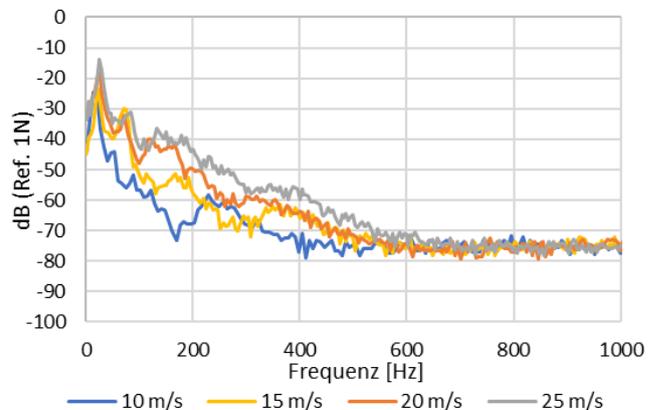


Abbildung 20: Schmalbandspektrum für die Druckanregung bei verschiedenen Geschwindigkeiten und 0.2kg/s Partikelbeladung.

Aus Abbildung 10 geht hervor, dass mit zunehmender Geschwindigkeit der gesamte Pegel im niederfrequenten Bereich angehoben wird. Der Verlauf des Frequenzspektrums zeigt ähnliche Charakteristiken. So bildet sich in allen Fällen

ein erster prägnanter Peak bei ca. 25 Hz (für 20m/s) aus. Dieser verschiebt sich mit abnehmender Geschwindigkeit zu niedrigeren Frequenzen. Darüber hinaus fällt der Pegel der Frequenzanteile bis ca. 600 Hz ab und geht dann für alle Geschwindigkeiten in ein gleiches Hintergrundrauschen über. Die speziellen Frequenzanteile sind hingegen von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig.

Der Einfluss der Partikelanregungen zeigt, dass der Charakter der Breitbandigen Anregung für alle untersuchten Strömungsgeschwindigkeiten erhalten bleibt. So zeigen sich neben kleineren Fluktuationen keine dominanten Frequenzanteile. Dahingegen wird über das gesamte Spektrum der Pegel mit zunehmender Geschwindigkeit angehoben. Dies lässt sich auf die höheren Kräfte infolge der Kollisionen mit höherer Geschwindigkeit zurückführen.

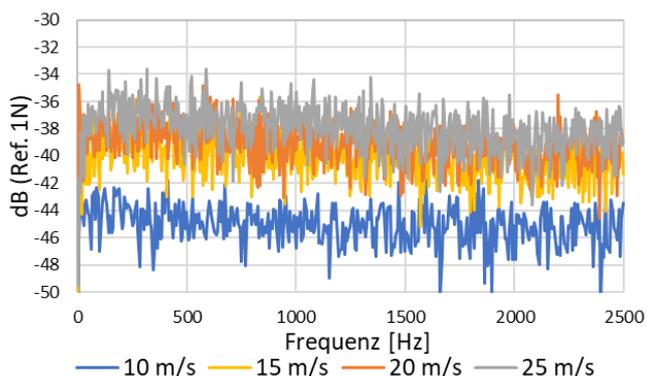


Abbildung 31: Schmalbandspektrum für die Partikelanregung bei verschiedenen Geschwindigkeiten und 0.2kg/s Partikelbeladung.

Partikel-Einstreuung

Durch Variation der Einstreumenge an Partikel kann der Einfluss dieser an der Wandanregung bestimmt werden. Hierfür wurden die Fälle von 0kg/s bis 0.3kg/s bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 20m/s betrachtet. Die Ergebnisse sind in den Schmalbandspektrum für die Strömungskräfte (Abb. 12) und in Terzspektrern für die Partikelkräfte (Abb. 13) dargestellt.

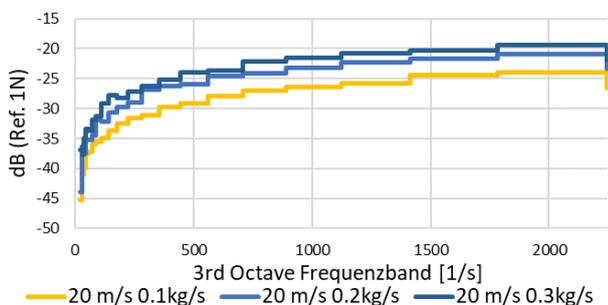


Abbildung 42: Terzspektrern der Partikelanregung bei einer Geschwindigkeit von 20m/s und diverser Partikelbeladung

Abbildungen 12 und 13 zeigen, dass durch die Zunahme an Einstreuung der Einfluss der Partikelkollisionen zunimmt. Dies zeigt sich in einer allgemeinen Verschiebung des Terzspektrums mit der Partikelmenge zu höheren Pegeln. Dies hängt damit zusammen, dass im Zusammenhang mit der Menge auch mehr Kollisionen stattfinden und somit auch ein höherer Impuls auf die Wand ausgeprägt wird.

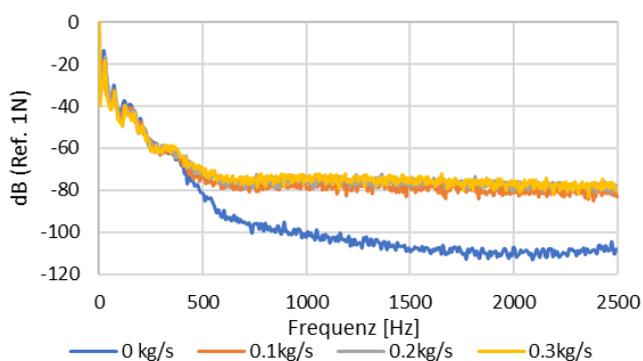


Abbildung 53: Schmalbandspektrum der Druckanregung bei einer Geschwindigkeit von 20m/s und diverser Beladung

Die Anregung infolge der Strömung wird im niederfrequenten Spektrum durch die Partikelmenge nur geringfügig beeinflusst. So bleiben die Frequenzanteile sowie das Spektrum bis ca. 500 Hz von den Partikeln weitestgehend unbeeinflusst. Ab 500Hz beginnt die Partikelmenge die Strömungsanregung zu beeinflussen.

Fazit

In dieser Untersuchung wurde ein numerisches Modell eines Rohrelements mit einer Biegung aufgebaut, mit dem die Anregung des Rohres infolge einer turbulenten Strömung und einer Partikelbeladung untersucht wurde. Hierbei dominiert die Strömung die niederfrequenten Anregungen, wobei vor allem eine dominante Frequenz infolge einer Strömungsablösung vorliegt. Die Partikel hingegen regen das Rohr breitbandig an, weshalb sich diese bei höheren Terzen von dem Strömungseinfluss abheben. Dies konnte zudem in Referenzmessungen bestätigt werden. Bei der Variation der Strömungsgeschwindigkeit zeigte sich, dass infolge der höheren Partikel-Aufprallgeschwindigkeit der Pegel durch Partikel breitbandig angehoben wird und die Strömung eine Geschwindigkeitsabhängige niederfrequente Anregung zeigt. Letzteres zeigt sich beispielsweise in der Verschiebung der tonalen Anregungsfrequenz. Aufgrund der zunehmenden Anzahl an Kollisionen nimmt zudem die Partikelanregung infolge einer Erhöhung der Partikelbeladung zu.

Literatur

- [1] Ausschuss für Gefahrenstoffe, Technische Regeln für Gefahrenstoffe, Gemeinsames Ministerialblatt [Nr.42] 2022 S. 950-964
- [2] Ausschuss für Gefahrenstoffe, Technische Regeln für Gefahrenstoffe, Gemeinsames Ministerialblatt [Nr.20-21] 2022 S. 469
- [3] DDM GmbH & Co. KG, URL: <https://www.ddm-sensors.de/messung-druck-durchfluss/durchflussmesser/>
- [4] Cundall, P. A., Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, 29 (1979), pp. 47-65
- [5] Berufsgenossenschaft Holz und Metall, BG-Information Absauganlagen und Silos für Holzstaub und -späne, Brand- und Explosionsschutz, BGI 739-2 (2012.07), S. 11