Vergleich verschiedener Verfahren zur Erfassung einer Lautsprechermembranbewegung

Kai Simanowski und Delf Sachau

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Professur für Mechatronik, 22043 Hamburg
E-Mail: simanowski@hsu-hh.de

Einleitung

Für die Erfassung der Bewegung einer schwingenden Struktur gibt es verschiedene Verfahren. Bei der Anwendung an einer Lautsprechermembran haben diese unterschiedliche Eigenschaften.

Ein bewährtes Verfahren ist es, einen Beschleunigungsaufnehmer mittig auf der Staubkappe (Membranmitte) des Lautsprechers zu befestigen. Diese Sensoren haben einen großen Frequenz- und Amplitudenmessbereich und liefern bereits während der Messung ohne aufwändige Weiterverarbeitung ein zur Bewegung an diesem Punkt proportionales, elektrisches Signal. Nachteile liegen im zusätzlichen Gewicht, der Beschädigung der Lautsprecheroberfläche und der Gefahr, dass sich der Sensor teilweise löst und dadurch die Messung gestört wird, oder völlig löst, das Signal abbricht und eventuell der Sensor beim Herunterfallen beschädigt wird. Die Verwendung mehrerer, abgestimmter Sensoren ermöglicht eine zeitgleiche Erfassung an verschiedenen Orten, verstärkt jedoch die genannten Nachteile. Eine Erfassung der gesamten Fläche in ausreichender Genauigkeit ist somit praktisch ausgeschlossen.

Da Beschleunigungen erfasst werden, müssen für die Integration hin zur Geschwindigkeits- oder Wegmessung alle nötigen Annahmen und Sensoreigenschaften sorgfältig überprüft werden. Falls die zu messende Fläche sich nicht in Messrichtung des Sensors bewegt, z. B. wenn ein Punkt auf dem schrägen Bereich am Rand der Lautsprechermembran vermessen werden soll, wird ein geeigneter Zwischenbau benötigt. Andernfalls müssen die Messwerte, unter Annahme einer eindeutigen geometrischen Beziehung zwischen Mess- und Bewegungsrichtung, trigonometrisch umgeformt werden, wobei gegebenenfalls auch die Querempfindlichkeit des Sensors bedacht werden muss. Ein Triaxial-Beschleunigungssensor erleichtert dies, da hier die Bewegung in drei orthogonalen Raumrichtungen gleichzeitig gemessen wird.

Ein berührungsloses Verfahren stellt die Laser-Doppler-Vibrometrie dar. Hierbei wird ein Laserstrahl erzeugt und ein Teil direkt auf einen Detektor geleitet. Ein anderer Teil gelangt über eine Optik auf die schwingende Struktur. Auf Grund ihrer Bewegung ändert sich im reflektierten Strahl, durch den Doppler-Effekt, die Frequenz des Laserlichtes. Das durch die Optik wieder eingefangene Licht wird auf den Detektor geleitet und interferiert mit dem Direktstrahl. Ein Interferometer kann aus der Frequenzverschiebung die Schwinggeschwindigkeit der Struktur ermitteln.

Ein Einpunkt-Vibrometer misst immer in eine Richtung. Kann der Strahl, z. B. über einen dreh- und kippbaren Spiegel, umgelenkt werden, spricht man von einem Vollfeld- oder Scanning-Vibrometer. Mit diesem kann die Bewegung an vielen Punkten nacheinander ohne Umbau des Sensorkopfes gemessen werden. In Verbindung der Messwerte mit einem geometrischen Modell des Objektes, kann komfortabel, schnell und in hoher räumlicher Auflösung eine Lautsprechermembranbewegung erfasst werden.

Generell wird nur die Schwinggeschwindigkeit in Richtung des Messstrahls gemessen. Üblicherweise ist bei Laser-Doppler-Vibrometern die Messebene senkrecht zum Sensorkopf definiert. Eine Winkelkorrektur kompensiert den Fehler, der bei schräg auf das Objekt treffenden Strahlen entsteht. Dabei gilt jedoch die Annahme, dass die bewegte Fläche eine plane Ebene ist. Der nicht orthogonal zur Ebene einfallende Strahl wird auch durch Strukturiertheiten beeinflusst. Die Oberfläche wirkt sich auf die Leistung des reflektierten Strahls aus. Nachteile liegen in der nötigen Sichtverbindung zu jedem Messpunkt, dem für den Sensorkopf nötigen Bauraum vor dem Lautsprecher, sowie dem hohen Anschaffungspreis.

Diese Untersuchung möchte zunächst einige Annahmen und Herstellerangaben des Lautsprechers überprüfen. Anschließend werden an ausgewählten Punkten Verfahren zur Messung der Lautsprechermembranbewegung mittels Beschleunigungsaufnehmer, Laser-Scannung- und Einpunktvibrometer verglichen.

Versuchsaufbau

Als Prüfling dient ein 18“-Subwoofer-Chassis des Herstellers Monacor, Typ SP-18/1000HP. Dieses hat eine große Membranfläche bei geringem Gewicht. Laut Hersteller beträgt der maximale lineare Hub ± 9,5 mm. Weitere Angaben sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Einige Lautsprecherparameter laut Hersteller

Impedanz	8 Ω
Resonanzfrequenz	35 Hz
Nennbelastbarkeit	1000 W_{RMS}
Mittl. Schalldr. (1W/1m)	99 dB
Nachgiebigkeit	0,11 mm/N
Gleichstromwiderstand	5.4 Ω
Kraftfaktor (BxL)	27.2 Tm
Gewicht	6,1 kg

Das Chassis ist ohne Gehäuse an einem Gestell aus Aluminiumprofilen befestigt, siehe Abbildung 1.

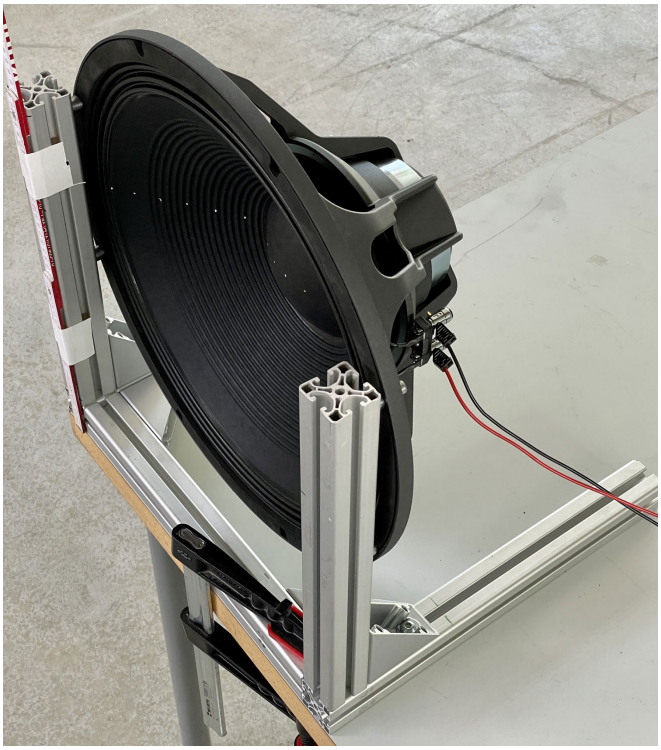

Abbildung 1: Lautsprecherchassis im Aluminiumgestell

Der verwendete Leistungsverstärker ist vom Hersteller Brüel&Kjaer, Typ 2732. Dieser verfügt über Monitorausgänge zur Messung der Momentanwerte von Spulenspannung und -strom. Die maximale Leistung ist mit 120 VA an 4 Ω angegeben. Von DC bis 15 kHz kann eine Spannung von bis zu 22 Vrms erzeugt werden. Er hat einen maximalen Verstärkungsfaktor von 17 dB (ca. 7 V/V) und ist umschaltbar zwischen einem spannungs- und einem stromgeregelten Modus.

Für die Referenzmessung wird ein Laser Scanning Vibrometer des Herstellers Polytec, Typ PSV500 Xtra verwendet. Mit Hilfe der Geometrie-Option kann die räumliche Struktur des Prüflings erfasst werden. Das Scanning-Vibrometer ist mittig vor dem Lautsprecher ausgerichtet. Zur Messung des Schalldrucks ist ein Mikrofon des Herstellers B&K, Typ 4188-A-021 in 1 m Entfernung vor dem Lautsprecher positioniert. Zusätzlich zielt ein Einpunkt-Vibrometer des Herstellers Polytec, Typ VibroGo auf einen Punkt am Lautsprecherrand. Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

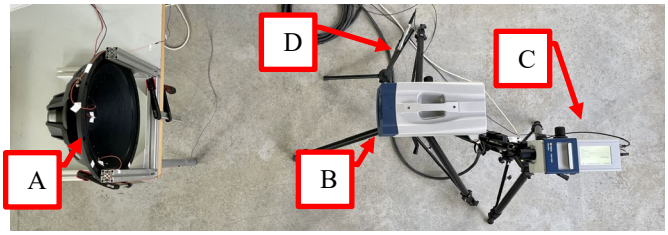

Abbildung 2: Lautsprecher (A), Scanning- (B) und Einpunkt- (C) -Vibrometer, sowie Mikrofon (D)

In Abbildung 3 ist die Kameraansicht des Vibrometers dargestellt. Dort sind auch die Positionen von 2 Beschleunigungsaufnehmern des Herstellers Brüel&Kjaer, Typ 4517 (0,65 g, 1 mV/ms^-2) gezeigt, ein Exemplar mittig auf der Staubkappe (AccMitte), ein weiteres auf dem Rand der Membran (AccRand). Dort beträgt die Schrägstellung zur Messebene ca. 35°. Die Sensoren wurden im Vorfeld kalibriert.

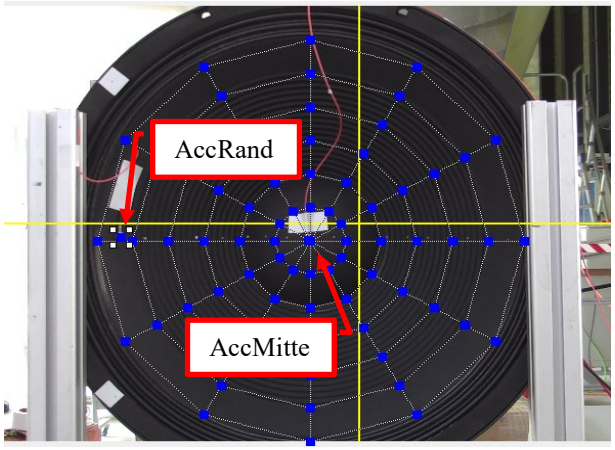

Abbildung 3: Bildbereich des Vibrometers und Lage der Beschleunigungsaufnehmer

Das verwendete Koordinatensystem liegt auf dem Montageflansch. Die X-Achse weist positiv nach rechts, die Y-Achse nach oben und die Z-Achse in Richtung des Vibrometers, siehe Abbildung 4.

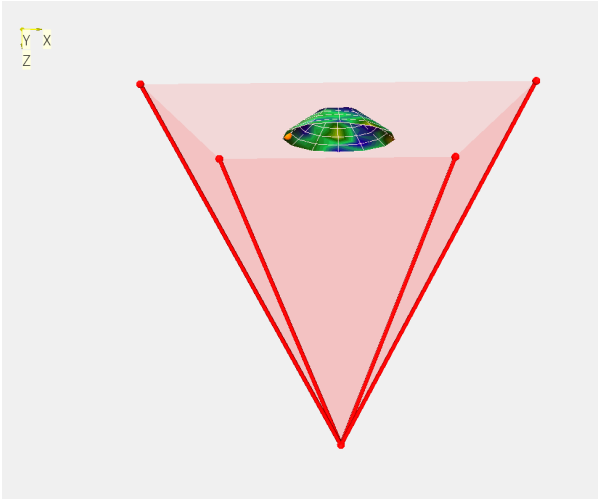

Abbildung 4: Koordinatensystem und Lage des Laser-Scanning–Vibrometers zum geometrisch eingemessenen Messobjekt

Für die Messung werden 75 Punkte verwendet. Ausgehend von einem kreisförmigen Gitter, begrenzt vom Rand des Korbes, liegen um die Mitte je 6 Punkte in 12 Speichen.

Mitgemessen werden die Spulenspannung und der -strom am Verstärker, sowie die mit dem Einpunktvibrometer auf dem Gehäuse des Beschleunigungsaufnehmers AccRand gemessene Geschwindigkeit.

Durchführung

Zunächst werden folgende für die Untersuchungen wichtigen Annahmen überprüft.

1) Membran verhält sich wie ein Kolbenstrahler

Für diese Messung werden zunächst die frequenzabhängigen Geschwindigkeitsamplituden an drei Orten gemessen: auf den

Gehäusen der Beschleunigungssensoren und an einem Punkt neben dem Sensor auf dem Rand. Dies geschieht unter Anregung mit einem periodischen Chirp-Signal zwischen 1 Hz und 6,4 kHz.

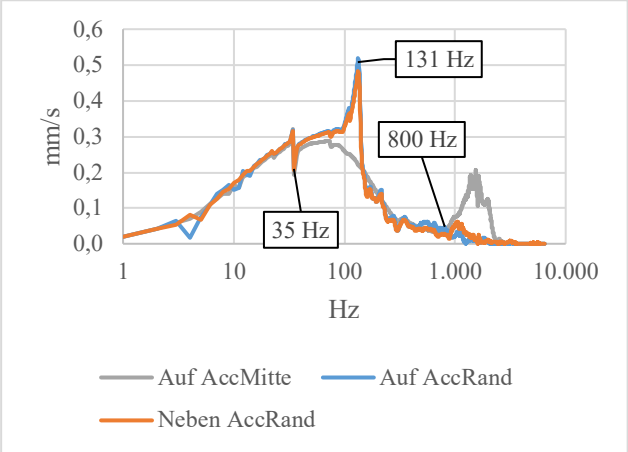

Abbildung 5: Spektren der Geschwindigkeitsamplituden an verschiedenen Orten

In Abbildung 5 ist erkennbar, dass sich die Verläufe in der Mitte und am Rand zwischen 35 Hz und 131 Hz deutlich unterscheiden, ebenso oberhalb von 800 Hz. Bei 35 Hz liegt laut Hersteller die Resonanzfrequenz, siehe Tabelle 1. Die Spektren der Messung auf und neben dem Sensor am Rand unterscheiden sich nur geringfügig.

In den folgenden Abbildungen wurden Flächen zwischen den Messpunkten angelegt und entsprechend der interpolierten Geschwindigkeitsamplituden eingefärbt, für Abbildung 6 bei 20 Hz und für Abbildung 7 bei 131 Hz. Man erkennt, dass bei 20 Hz die Amplituden gleichmäßiger verteilt sind und die Unterschiede geringer als bei 131 Hz.

Diese Unterschiede sind in Abbildung 8 als Profile in Form von senkrechten und horizontalen Schnitten dargestellt. Bei 20 Hz sind die räumlichen Unterschiede gering, bei 131 Hz steigen die Werte zum Rand hin an.

Exemplarisch für den Bereich oberhalb von 800 Hz sind in Abbildung 9 die Geschwindigkeitsamplituden auf der Membran dargestellt. Hier bewegt sich der Bereich in der Mitte der Membran deutlich mehr als am Rand.

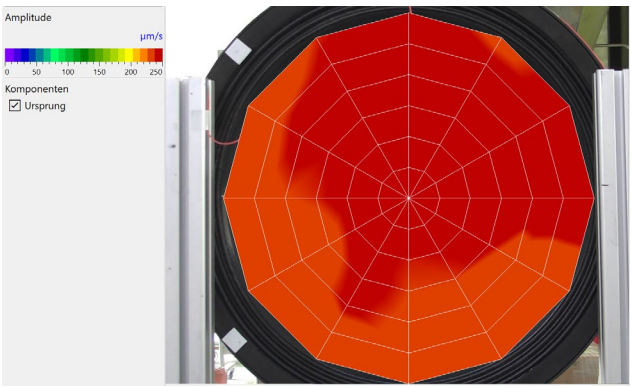

Abbildung 6: Geschwindigkeitsamplituden bei 20 Hz

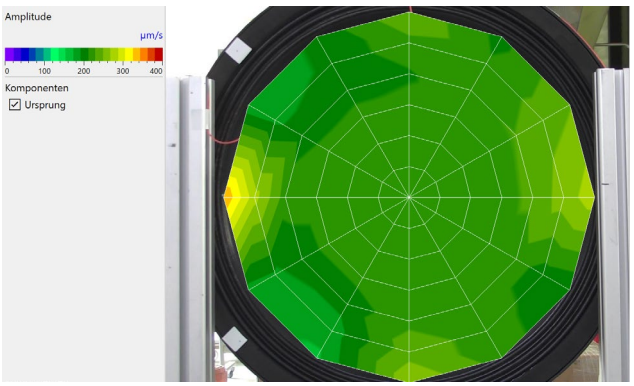

Abbildung 7: Geschwindigkeitsamplituden bei 131 Hz

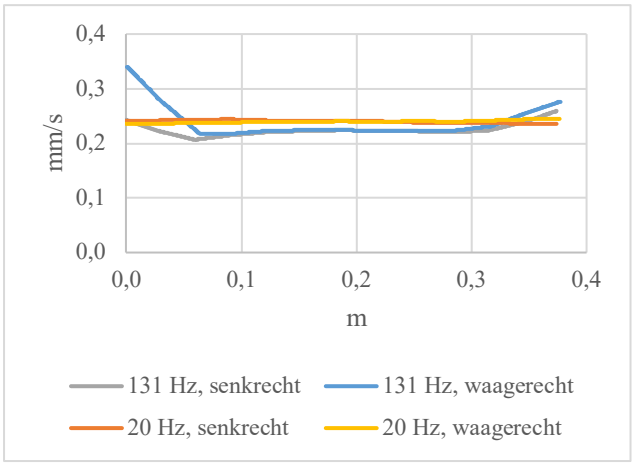

Abbildung 8: Profile der Geschwindigkeitsamplituden auf der Membran

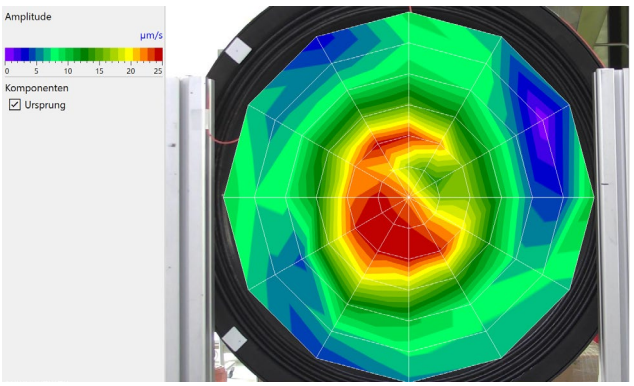

Abbildung 9: Geschwindigkeitsamplituden bei 2 kHz

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Membran nur bei tiefen Frequenzen, z. B. bei 20 Hz wie ein Kolbenstrahler verhält.

2) Der Lautsprecher verhält sich den Herstellerangaben entsprechend, bzw. die Messkette liefert plausible Werte.

Bei Anregung mit weißem Rauschen zwischen 1 Hz und 6,4 kHz bei einer Signalleistung von 1,03 W beträgt der mit dem Mikrofon in 1 m gemessene Schalldruckpegel 99,7 dB, was weniger als 1 dB oberhalb der Herstellerangaben, siehe Tabelle 1, also im Rahmen der Messgenauigkeit liegt.

Der Gleichstromwiderstand kann als Verhältnis von Spannung und Strom mit Hilfe der Monitorausgänge am Verstärker gemessen werden. Laut Hersteller beträgt dieser

5,4 Ω. Der bei 1 Hz gemessene Wert beträgt, siehe Abbildung 10, 5,7 Ω. Bei 35 Hz ist ein Sprung im Frequenzgang zu sehen, was der Resonanzfrequenz der Herstellerangaben entspricht. In diesem Bereich ist der elektrische Widerstand deutlich größer. Hin zu 200 Hz fällt er auf 6,9 Ω.

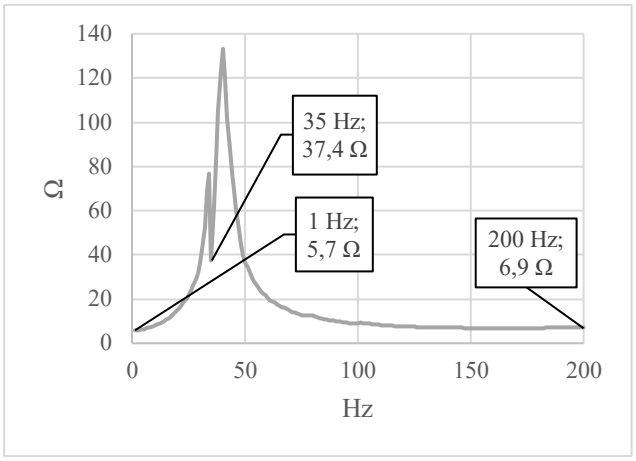

Abbildung 10: Frequenzabhängiger Widerstand

Das Produkt aus Kraftfaktor und Nachgiebigkeit entspricht einer Auslenkung bei 1 A. Diese beträgt, aus den Herstellerangaben berechnet, 2,99 mm/A. Die bei 1 Hz gemessene Auslenkung beträgt 2,84 mm/A, siehe Abbildung 11.

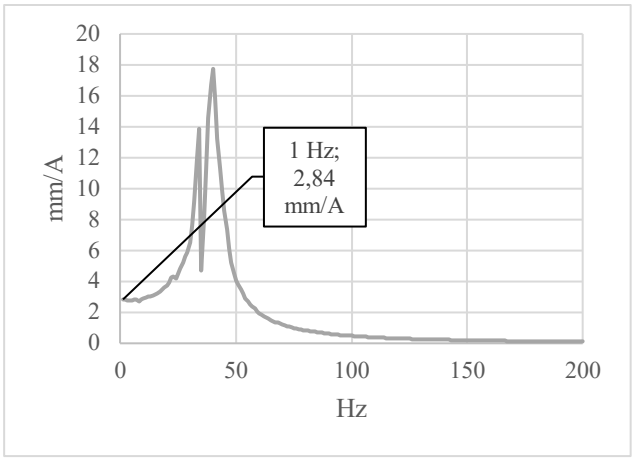

Abbildung 11: Frequenzabhängige Auslenkung bei 1 A

Zur Überprüfung auf Linearität wird mit unterschiedlichen Signalspannungen angeregt. Oberhalb von 15 Hz ist kein Einfluss mehr erkennbar, siehe Abbildung 12.

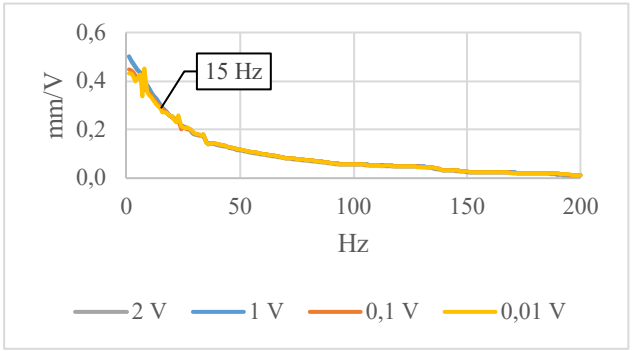

Abbildung 12: Frequenzabhängige, auf die Spulenspannung bezogene Auslenkung bei verschiedenen Signalspannungen

Vergleich der Verfahren

Schließlich werden die, mit dem Laser-Scanning-Vibrometer gemessenen Geschwindigkeiten mit den weiteren Verfahren verglichen. Analog zu Abbildung 5 sind in Abbildung 13 weitere Geschwindigkeitsspektren dargestellt.

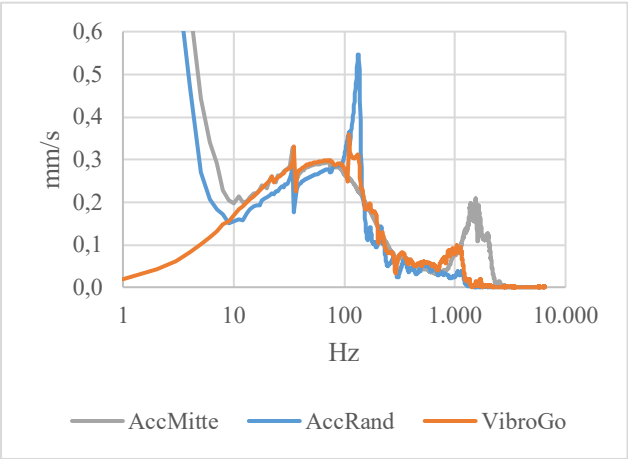

Abbildung 13: Spektren der Geschwindigkeitsamplituden, gemessen mit Beschleunigungssensoren und Einpunktvibrometer

Generell sind die gemessenen Werte nicht rauschfrei, insbesondere die verwendeten Beschleunigungssensoren messen am unteren Ende ihrer Messdynamik und haben dadurch wenig Signal-Rausch-Abstand. Deshalb werden beim Aufintegrieren die Amplituden bei tiefen Frequenzen sehr groß, unter 10 Hz kann den Werten daher nicht vertraut werden. Oberhalb davon sieht man zu den Vibrometermessungen ähnliche Verläufe. Der Sensor am Rand misst jedoch im tiefen Frequenzbereich geringere Werte, was durch die Schrägstellung des Sensors gegenüber der Messebene erklärt werden kann. Das senkrecht zur Messebene stehende, und auf den Beschleunigungsaufnehmer AccRand gerichtete Einpunktvibrometer liefert ähnliche Werte wie dort auch das Scanning Vibrometer unter schrägem, aber in der Messsoftware bereits kompensierten Strahleinfall.

Zusammenfassung

Es konnten wichtige Herstellerangaben erfolgreich überprüft werden. Die Membranbewegung und deren frequenzabhängige Effekte können mit Beschleunigungsaufnehmern, einem Laser-Scanning- und einem Einpunktvibrometer beobachtet werden. Mit dem Laser-Scanning–Vibrometer kann an vielen Punkten innerhalb von kurzer Zeit gemessen werden. Dessen Software ermöglicht die Darstellung der Messwerte als Fläche, sowie die Verknüpfung mit der räumlichen Geometrie.

Bei der Messung mit einem Beschleunigungsaufnehmer auf dem Rand der Membran muss deren Schrägstellung gegenüber der Messebene berücksichtigt werden. Die Integration der Beschleunigungs- hin zu Geschwindigkeitswerten wird bei sehr tiefen Frequenzen gestört.