Deutsche Forschungsgemeinschaft
German Research Foundation

HELMUT SCHMIDT UNIVERSITÄT
Universität der Bundeswehr Hamburg

Project Description

Project: Near-field Acoustical Holography - a new sensor concept for methods of active noise reduction

Funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) – 527249322

Dr.-Ing. Steffen Ungnad

Hamburg, 08.02.2023

Beschreibung des Vorhabens - Projektanträge

Ungnad, Steffen, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg

Akustische Nahfeldholografie als Sensorkonzept für aktive Lärmminderungsmaßnahmen

Beschreibung des Vorhabens

1 Ausgangslage

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten

Erste technisch relevante Konzepte zur aktiven Lärmminderung für den niederfrequenten Bereich des Hörschalls (20 Hz - 1000 Hz) in (Olson 1956) ergeben sich aus der Nachfrage nach Produkten mit geringem Bauraum und geringer Masse im Vergleich zu den bestehenden passiven Alternativen wie Absorptions- oder Resonanzkörpern. Frühe Untersuchungen zur aktiven Minderung der Schallabstrahlung von Strukturen in (Tartakovskii et al. 1965) weisen allerdings bereits darauf hin, dass das Erreichen einer Schwingungsreduktion nicht zwangsläufig zur Verminderung der Schallabstrahlung führen muss. In (Bschorr 1970) wird vielmehr gezeigt, dass zur Reduktion der Schallleistung einer Lärmquelle diese nach dem **Prinzip des schwachen Strahlers** in einen akustischen Strahler höherer Ordnung überführt werden muss. Nach (Jessel und Mangiante 1972) sollte dazu ein Kompensationsschallfeld zum Störschallfeld mit identischer Amplitude aber umgekehrtem Vorzeichen vorliegen. Die Idee besteht darin, dass jedes Schallfeld nach dem Huygens-Fresnel-Prinzip in Analogie zum Helmholtz-Integral durch eine Kombination von **Monopol- und Dipolquellen** erzeugt und folglich auch **aktiv kompensiert** werden kann (engl. Active Noise Control – **ANC**). Die praktische Umsetzbarkeit anhand des einfachsten Falles einer eindimensionalen Schallwelle wird z. B. in (Manzanikov und Tyutekin 1975) gezeigt. Sobald die Oberfläche einer Struktur in ihrer Ausdehnung die akustische Wellenlänge übersteigt und sich zu dem mit komplizierten Schwingungsmustern bewegt, benötigt man für eine globale Schallreduktion eine impraktikable große Anzahl von akustischen Gegenschallquellen. Deshalb nutzt man z. B. nach (Balas 1979) und (Bailey und Hubbard 1985) alternativ dazu auch das **Konzept der aktiven Schwingungsminderung** (engl. Active Vibration Control – **AVC**), um der Struktur als Lärmquelle durch äußere Kräfte Dämpfung zu verleihen. Bei der Verwendung einer endlichen Anzahl von Aktuatoren kann hierbei zusätzlich der sogenannte Effekt „control spillover“ auftreten. Bei diesem Phänomen wird Energie, die ursprünglich zur Minderung der Schwingung aufgewendet werden soll, ungewollt in vorher nur schwach erregte Strukturmoden geleitet.

Da bei dem Konzept AVC die Umwandlung von Körper- in Luftschall nicht berücksichtigt wird, erfolgt die Erweiterung auf ein Verfahren zur **aktiven Struktur-Akustik-Regelung** (engl. Active Structural Acoustic Control – **ASAC**) in (Vyalyshev et al. 1986). Es soll hierbei die sich aus einer Summe von Strukturmoden zusammensetzende Betriebsschwingung durch Kompensationskräfte in der Art beeinflusst werden, dass die damit zusammenhängende Schallabstrahlung, z. B: in das akustische Fernfeld (im Folgenden als Fernfeld bezeichnet), vermindert wird. Die dabei erzielbare Reduktion der Schallabstrahlung lässt sich auch bei der aktiven Schallreduktion mit Mikrofonen und Strukturaktuatoren in Raumschallfeldern bzw. akustischen Kavitäten (im Folgenden als Kavitäten) erreichen. Erste experimentelle Untersuchungen dazu sind z. B. in (Jones und Fuller 1987) dokumentiert. Die Dämpfung von abstrahlfähigen Strukturmoden (engl. - modal suppression) sowie die Neugewichtung der Partizipation von Strukturmoden zur

Betriebsschwingung (engl. - modal restructuring) führen hierbei zu der gewünschten Schallleistungsreduktion. Ein Nachteil ist die erforderliche Kenntnis über den Beitrag von Strukturmoden zur Schallabstrahlung bei realen Strukturen wie z. B. Fahr- oder Flugzeugkabinen mit einer hohen modalen Dichte. Es kommt erschwerend hinzu, dass sich Strukturmoden unterhalb der Koinzidenzfrequenz und außerhalb von Resonanzfrequenzen bezogen auf ihre abgestrahlte Schallleistung gegenseitig beeinflussen. Trotzdem finden sich zahlreiche Anwendungsbeispiele z. B. bei der Lärmtransmissionsunterdrückung an Helikopterkabinen in (O'Connel et al. 2001) und (Ma et al. 2017), an Raketennutzlastverkleidungen in (Glaese und Anderson 1999), bei Zügen in (Persson et al. 1999), in Autokabinen nach (Dehandschutter und Sas 1998) sowie bei Flugzeugkabinen in (Simpson et al. 1991), (Palumbo et al. 2000) und (Misol 2020b). Neben den genannten Herausforderungen ist die nötige **Positionierung von Mikrofonen** als Fehlersensoren **in einer Kavität oder im Fernfeld** nur bedingt praxistauglich und bisher ein noch zu lösendes **Problem**.
Im Folgenden werden dazu fünf Lösungsmöglichkeiten vorgestellt. Der letzte Ansatz erzeugt dabei die angestrebte Neuerung und ist Gegenstand der im vorliegenden Antrag aufgestellten Forschungshypothese.
Die **erste Möglichkeit** ist die Verwendung von in die Struktur implementierbarer Aktuatoren und Sensoren (engl. **structural sensing**). Deren Anwendbarkeit in Form von Piezoelementen zur Reduktion der Schallabstrahlung von Balken und Platten wird z. B. in (Fuller 1991) aufgezeigt. Dabei verwendet wird ein als bekannt vorausgesetztes **vibroakustisches Modell** z. B. nach (Song et al. 1991) oder (Baumann et al. 1991), welches die Beeinflussung des akustischen Abstrahlverhaltens einer Struktur **ohne** die **Messung des** abgestrahlten **Schalldrucks** durch Mikrofone ermöglicht. Anwendung findet dieses Vorgehen z. B. auch im Wellenzahl-basierten Ansatz nach (Maillard und Fuller 1995). Für komplizierte Strukturen und Anwendungen in Kavitäten geben diese Ansätze jedoch keine echtzeitfähige und experimentell realisierbare Lösung an. Eine Ursache dafür ist die Implementierung einer **zur Schallleistung proportionalen Messgröße** in ein Regelungs- oder Steuerungssystem nach (Petitjean und Legrain 1996) oder (Svaricek et al. 2001). Ein Ansatz zur Lösung dafür bietet die in (Baumann et al. 1991) vorgeschlagene Darstellung der Schallleistung durch orthogonale Strahlungsfunktionen (engl. radiation modes) durch die frequenzweise Cholesky-Zerlegung der Schallstrahlungsresistanzmatrix (Realteil der Schallstrahlungsimpedanz). Dieser Ansatz wird z. B. in (Elliott und Johnson 1993) oder (Snyder et al. 1993) zur Minimierung der Schallleistung von einfachen Strukturen weiterverfolgt. Damit verwandt ist der Volumenschnelle-basierte Ansatz nach (Johnson und Elliott 1995), welcher wiederum ein Sonderfall des Ansatzes mit Strahlungs-Clustern nach (Tanaka und Snyder 2002) ist. Die Erweiterung auf Innenraumprobleme erfolgt z. B. in (Cazzolato und Hansen 1998) und (Kaizuka und Tanaka 2007). Die **praktische Umsetzung** in realen Versuchsumgebungen bleibt allerdings bisher **weiterhin offen**.
Die **zweite** und praxisrelevantere **Möglichkeit** bieten AVC-Systeme, welche definitionsgemäß ebenfalls ohne Mikrofone funktionieren. Diese unterteilen sich in Systeme mit **Wege- oder Kraftausgleich**. Im erstgenannten Fall bietet sich eine lokale Anordnung von Strukturaktuatoren mit Struktursensoren zur Schwingungsisolation nach (Olson 1956) an. Die Verminderung des Körperschalls als Lärmquelle reduziert hierbei ebenfalls die Schallabstrahlung in die betreffende Kavität oder in das akustische Freifeld (im Folgenden als Freifeld bezeichnet). Anwendungsbeispiele sind die Übertragung der Schwingungen aus Rollbewegungen von Rädern an Autos oder Zügen in (Peiffer et al. 2004) und (Gäbel et al. 2018), das Durchlaufen von Strukturwellen durch Streben an Helikoptergetrieben in (Staple 1989) und (Pasco et al. 2014), die Weiterleitung von Vibrationen durch Motorenaufhängungen in (Graf und Shoureshi 1988) und (Hillis 2011) sowie Motor- und Getriebevibrationen in (Montague et al. 1994) und (Luft et al. 2013). Beim Kraftausgleich

hingegen sind Vibrationen als Schallquelle nicht lokal erreichbar. Es sind hierbei lediglich die dominanten Transmissionspfade bekannt, die durch die Positionierung seismischer Massenkräfte aktiv beeinflusst werden. (Elliott et al. 2002) und (Bianchi et al. 2004) greifen z. B. auf die Grundideen in (Tartakovskii et al. 1965) und (Bschorr 1970) zurück, wobei eine **lokale Rückkopplung** von kolokal angeordneten **Strukturaktuatoren** mit **Struktursensoren** nach (Engels et al. 2006) und (Michau et al. 2014) eine recheneffiziente Alternative zu den oben genannten modellbasierten Ansätzen von ASAC-Systemen generiert. Aufgrund der Sensitivität gegenüber der Sensor-Aktuator-Platzierung kann es dabei jedoch zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Aktuator-Sensor-Paare und damit zu **instabilem Verhalten** kommen. Vergleichbare Versuche in (Riley et al. 1995), (Grewal et al. 1998), (Haase et al. 2014) und (Algermissen und Monner 2017) verdeutlichen zusätzlich den damit verbundenen hohen Ressourcenaufwand durch die Verwendung sehr vieler Sensoren und Aktuatoren. Dem entgegen wirkt der Lösungsansatz von (Fisher et al. 2012) mithilfe einer gewichteten Summe von Strukturgradienten, die verhältnismäßig einfach messbar und proportional zur abgestrahlten Schallleistung sind. Praktische Anwendungen z. B. in (Ma et al. 2020) beschränken sich allerdings bisher auf einfache Strukturen im Freifeld. Weitere Anwendungen von AVC-Systemen mit dem Ziel der Lärmminderung betreffen sowohl Autokabinen in (Song et al. 2003) und (Misol et al. 2012), Helikopter in (Cabell et al. 2013) als auch Flugzeugkabinen in (Haase et al. 2016). Die **nicht vorhandene Kenntnis über den Prozess der Schallabstrahlung** vereinfacht zwar die Problemstellung, ist aber zugleich der **Hauptnachteil** dieser Methode, da Anwendungsfelder sowie Lärmminderungspotenziale begrenzt werden.

Die **dritte Möglichkeit** umfasst aktive Systeme mit **Mikrofonen im hydrodynamischen Nahfeld** (im Folgenden als Nahfeld bezeichnet) einer schallabstrahlenden Struktur. Experimentelle Untersuchungen dazu finden sich z. B. in (Berkhoff und Deolman 1999) und (Necati et al. 2000). Der gemessene Schalldruck im Nahfeld **beinhaltet allerdings** auch **nicht abstrahlfähige Schallfeldanteile**, die zu einer Lärmverstärkung führen können. Nach (Snyder et al. 2002) erhält man eine Lösung für diese Herausforderung durch die Kombination des Ansatzes der Elementarstrahlermethode (ESM) zur Schallleistungsminimierung nach (Song et al. 1991) mit inversen Methoden aus (Yoon und Nelson 2000). Das hat den Vorteil, dass beliebige akustische Quellen berücksichtigt werden können. Die Eigenwertzerlegung der durch Elementarstrahler erzeugten Schallstrahlungsresistanzmatrix für die Schallabstrahlung in das Fernfeld generiert hierbei zusammen mit der Verwendung von Hadamard-Walsh-Matrizen nach Kapitel 4, §6 in (Kaczmarz und Steinhaus 1936) orthogonale Basisfunktionen. Diese Variante stellt folglich eine hybride Form aus ASAC-Systemen mit Mikrofonen und Strahlungsmoden dar. Nach (Hill et al. 2012) ist das genannte Konzept dank eines holografischen Ansatzes auch auf die Minimierung der potenziellen akustischen Energie in einer Kavität anwendbar. **Nachteile** dabei sind, dass die Basisfunktionen die realen Schallvorgänge durch **Phasensprünge von 180°** nur bedingt abbilden und dass die Methode auf einem Fernfeldansatz basiert.

Eine **vierte Möglichkeit** entsteht durch die Verwendung sogenannter **virtueller Mikrofone** (engl. virtual sensing). Dieses durch (Roure und Albarrazin 1999) für ANC-Anwendungen und später durch (Cheer und Daley 2016) für ASAC-Anwendungen entwickelte Prinzip nutzt das aus der Mechanik z. B. nach (On 1967) bekannte Verfahren zur Verwendung von **Übertragungsfunktionen zwischen Sensorgruppen**. Mit dieser Methode wird der **Schalldruck** als Fehlergröße für eine adaptive Steuerung oder Regelung an vorher ausgewählten Positionen z. B. auf Basis von auf der schallabstrahlenden Struktur erfassten Messdaten **geschätzt**. Es existieren dazu in (Milton et al. 2020) auch erste Ansätze zur Ermittlung und Steuerung der Schallleistung. Praktische Anwendungen finden sich z. B. in Flugzeugkabinen in (Misol 2020a) oder bei der aktiven Beeinflussung der Wasserschallsignatur von Schiffen in (Ungnad et al. 2023). **Nachteil** dieses

Verfahrens ist, dass **Übertragungsfunktionen** zu den gewünschten virtuellen Positionen für jede neue Position oder bei Änderungen des Übertragungsverhaltens **erneut eingemessen** werden müssen.
Als **fünfte Möglichkeit** bietet die **akustische Nahfeldholografie** (engl. Near-field Acoustical Holography - NAH) nach (Williams et al. 1980) **Lösungen** zu den genannten Herausforderungen. Die NAH rekonstruiert Schallfeldgrößen auf Oberflächen von schallabstrahlenden Strukturen durch das Messen der Schalldruckverteilung im Nahfeld. Bezogen auf den jeweiligen Anwendungsfall können unterschiedliche mathematische Modelle verwendet werden. Dazu zählen z. B. die Summe ebener Wellen in Kombination mit der Fourier-Transformation nach (Williams et al. 1980), die Randelementemethode (engl. Boundary Element Method – BEM) nach (Maynard 1988), die Methode Green'scher Funktionen nach (Williams et al. 1996), die Helmholtz Equation Least-Squares Methode nach (Wang und Wu 1997), inverse Übertragungsstrecken nach (Yoon und Nelson 2000), die bereits erwähnte ESM nach (Sarkissian 2005) und die Finite-Elemente-Methode (FEM) nach (Ungnad und Sachau 2019). Tabellarische Übersichten zu inversen Methoden mit dazugehörigen Anwendungsfällen finden sich in (Ungnad 2021). Wichtig ist, dass dabei **akustische Modelle** zum Einsatz kommen. Dieses Vorgehen erzeugt **geringere Unsicherheiten im Vergleich zu** der Verwendung von **vibroakustischen Modellen** beim „structural sensing" oder beim „remote sensing". Die dafür nötige Messung im Nahfeld ist kein Bestandteil der Berechnungsmethode, sondern ein an die erforderliche Schallfeldauflösung angepasster Messort. **Aktuelle Forschungsarbeiten** in (Verburg et al. 2022) nutzen z. B. Reihenentwicklungen mit ebenen Wellen nach opto-akustischen Messdaten zur weiteren Auflösungsverbesserung.
Die NAH als Sensorprinzip in Anwendung auf Lärmminderungskonzepte mit Strukturaktuatoren entspricht der Verallgemeinerung des Ansatzes in (Hill et al. 2012). Im Vergleich zu den oben aufgeführten Ansätzen werden keine Sensoren auf der schallabstrahlenden Struktur verwendet, stattdessen kommen Mikrofone im Nahfeld zum Einsatz, wobei **nicht abstrahlfähige Schallfeldanteile** nach (Williams 1995) bzw. (Fernandez-Grande et al. 2012) **herausgefiltert** werden können. Die **berührungslos** und damit auch an schwer zugänglichen Positionen erfassbaren Messdaten sind Eingangsdaten für inverse mathematische Modelle zur Ermittlung des abgestrahlten Schallfeldes. Diese **Modelle können** je nach Änderung der Umgebung **angepasst werden**, ohne dabei einen zusätzlichen Messaufwand zu generieren. Nach Ansicht der antragstellenden Person kann die systematische Erarbeitung dieses Ansatzes die Lücke zwischen den oben genannten Anwendungsbeispielen und ASAC-Systemen schließen, die auf akustischen Modellen der Schallabstrahlung und akustischen Messdaten basieren.
Inverse Verfahren zur Schallfeldrekonstruktion als auch aktive Lärmminderungsmethoden gehören zu den **Tätigkeitsfeldern der antragstellenden Person** an der Professur für Mechatronik der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU). **Adaptive Systeme zur Schallreduktion** konnten erfolgreich an unterschiedlichen Versuchsträgern wie dem Nachbau einer Airbus-A320-Kabine in (Ungnad et al. 2016) und (Ungnad und Sachau 2017) sowie einem Schnellbootmodell der Tigerklasse im Maßstab 1:8 in (Ungnad et al. 2021a), (Ungnad et al. 2022) und (Ungnad et al. 2023) optimiert sowie implementiert werden. Es wurden dazu Systeme mit **Strukturaktuatoren** entwickelt. Nicht zuletzt wurde in (Ungnad und Sachau 2019), (Ungnad 2021), (Ungnad und Sachau 2021) und (Ungnad et al. 2021b) eine auf der **FEM basierende Methode der NAH entwickelt** und in einem Airbus A400M-Rumpf als auch in einem generischen Flugzeugkabinennachbau erfolgreich getestet. Es konnten hierbei **Erfahrungen** zur Anwendung unterschiedlichster Verfahren zur **Regularisierung** mathematisch schlecht gestellter Probleme dank der in Form von Matlab-Bibliotheken anwendbaren Vorarbeiten in (Hansen 2007) gesammelt werden.

2 Ziele und Arbeitsprogramm

2.1 Voraussichtliche Gesamtdauer des Projekts

Beantragt wird eine Förderung über 36 Monate.

2.2 Ziele

Die Forschungshypothese im vorliegenden Antrag umfasst den Entwicklungsprozess eines auf der NAH basierenden Sensorprinzips für aktive Lärmminderungssysteme mit Strukturaktuatoren. Das **Hauptziel** besteht darin, die im Stand der Forschung dargelegten **Sensorprinzipien** aus dem Bereich **der aktiven Lärm- und Schwingungskompensation** durch **inverse Verfahren** zur Schallfeldrekonstruktion zu **erweitern**. Im Speziellen soll dabei der Einfluss der inversen Projektion von Schallfeldgrößen auf die **Stabilität** von adaptiven Signalverarbeitungsprozessen untersucht werden. Es wird im Vergleich zu den unter den Begriffen „structural sensing“ und „remote sensing“ bereits existierenden Ansätzen eine **Erweiterung der wissenschaftlichen Erkenntnisse** erwartet. Grund dafür ist, dass die Verwendung akustischer Sensoren im Zusammenspiel mit modernen Verfahren der **inversen Akustik** eine **berührungslose Beobachtbarkeit der** zur **Schallleistung** proportionalen Schallfeldgrößen im Nahfeld beliebig geformter Strukturen ermöglicht. Man umgeht folglich Probleme, die dadurch entstehen, dass Struktursensoren wie Beschleunigungsaufnehmer nicht wie erforderlich befestigt werden können. Mit der NAH wird dabei ein Verfahren gewählt, welches aufwendige Messungen von Übertragungsfunktionen zwischen Sensorgruppen vermeidet. Es werden dazu **ausschließlich akustische Modelle** verwendet, wodurch **geringere Unsicherheiten** bezogen auf die Modellgüte **im Vergleich zu** der Verwendung **vibroakustischer Modelle** beim „structural sensing“ oder beim „remote sensing“ entstehen.

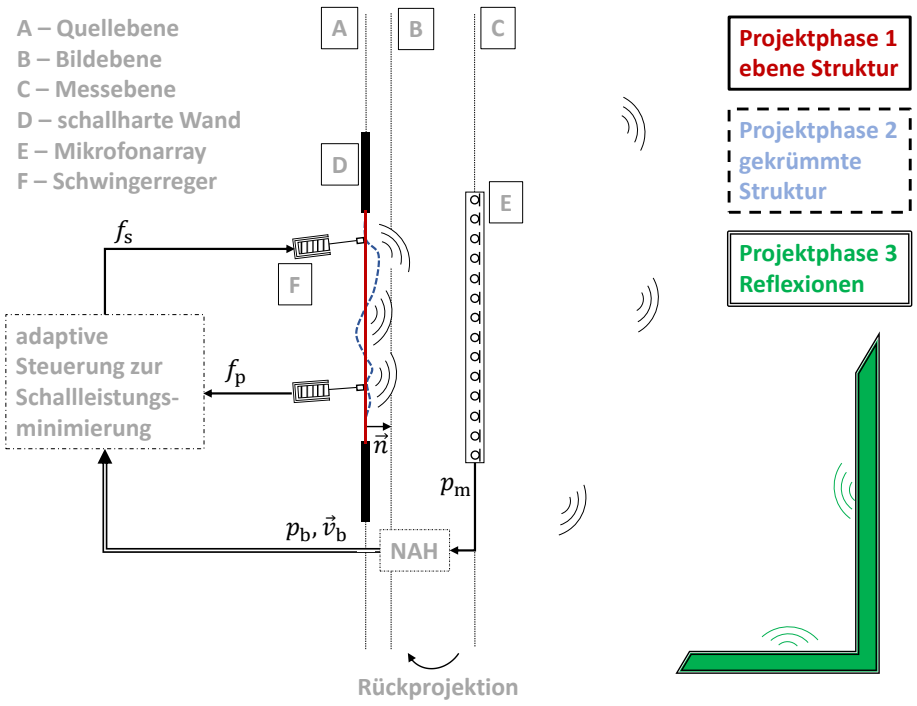

Abbildung 1: Schematische Darstellung aller drei Projektphasen zur Erreichung der Zielstellung

Experimente werden nach dem Schema in der Abbildung 1 in einem **Transmissionsprüfstand** zunächst an analytisch beschreibbaren und anschließend an komplexen Strukturbauteilen im Frequenzbereich bis 1 kHz durchgeführt. Dieser Frequenzbereich ist typisch für aktive Lärmminderungsmethoden als Ergänzung zu passiven Maßnahmen, die bei höheren Frequenzen wirksamer sind.

Als Aktuatoren zur Erzeugung der sinusförmigen Stör- und Kompensationskräfte $\boldsymbol{f}_\mathbf{p}$ und $\boldsymbol{f}_\mathbf{s}$ werden dabei Schwingerreger verwendet. Unter Freifeldbedingungen dient die auf der Fourier-Transformation basierende NAH (im Folgenden als FB-NAH bezeichnet) im ersten Schritt als Sensorprinzip für die aktive Schallreduktion an einer allseitig momentenfrei gelagerten Platte. Mit dem Zusammenhang zwischen der Fourier-Transformierten der Schnelleverteilung in der Bildebene $\vec{\boldsymbol{v}}_\mathbf{b}$ (Bildebene = Quellebene) und der Richtungsverteilung des abgestrahlten Schalls ins Fernfeld, z. B. nach (Heckl 1977), wird die **Minimierung der abgestrahlten Schallleistung** erreicht.
Mit den dabei erzielten Erkenntnissen über die grundlegenden Einflüsse inverser Schallfeldrekonstruktionsverfahren als Sensorprinzip auf Methoden der aktiven Schallreduktion erfolgt die experimentelle **Erweiterung** des Verfahrens **auf Bauteile mit komplizierteren Geometrien**. Hierbei ist es das Ziel, Verfahren wie die BEM oder die ESM als Grundlage der NAH einzusetzen. Wichtig ist dabei, dass die zu rekonstruierenden Schallfeldgrößen auf der Oberfläche der schallabstrahlenden Bauteile mittels experimenteller Verfahren wie Laser-Vibrometrie geprüft werden. Da ebenfalls Grundlagen zur **Anwendung des untersuchten Konzepts auf Kavitäten** wie Fahr- oder Flugzeugkabinen geschaffen werden sollen, erfolgt in der letzten Phase des Arbeitsplans die konsequente Erweiterung des NAH-basierten Sensorprinzips auf modal geprägte Raumschallfelder durch das Einbringen von Reflexionsflächen. Ein gesetztes Ziel ist hierbei der Vergleich invers ermittelter Schallfeldgrößen ($\boldsymbol{p}_\mathbf{b}$ und $\vec{\boldsymbol{v}}_\mathbf{b}$) mit Messdaten und der daraufhin berechneten **optimalen Filter,** z. B. nach (Johnson und Elliott 1995), mit Ergebnissen adaptiver Algorithmen. Abschließende Vergleiche mit herkömmlichen Sensorprinzipien zur aktiven Schallleistungsminimierung sollen die oben genannte **Forschungshypothese beantworten**.

2.3 Arbeitsprogramm inkl. vorgesehener Untersuchungsmethoden

Das für drei Jahre beantragte Projekt untergliedert sich in drei Arbeitspakete (AP). Übersichten zur Projektplanung finden sich in Tabelle 1 und in der Abbildung 2.

- AP1 „Modellbildung und Echtzeitanalyse für ein schallleistungsbasiertes ASAC-System“
- AP2 „Verallgemeinerung des holografischen Ansatzes als Sensorkonzept“
- AP3 „Benchmark mit komplexen Geometrien in Raumschallfeldern“

Aus der oben genannten Literatur sind sowohl Methoden der aktiven Lärmminderung mit Strukturaktuatoren als auch die Bestimmung von Schallfeldgrößen auf einer schallabstrahlenden Strukturoberfläche mittels der NAH bekannt. Die Entwicklung einer Kombination aus beiden Methoden soll im ersten Arbeitspaket im Vordergrund stehen.

Tabelle 1: Gantt-Diagramm zum Projekt; SU–Steffen Ungnad; HK–Hilfskraft; VÖ–Veröffentlichung; MS–Meilenstein

Quartal →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Bearbeitung
AP 1.1													SU
AP 1.2													HK
AP 1.3													SU (MS1, VÖ)
AP 1.4													HK
AP 1.5													HK (VÖ)
AP 1.6													SU (MS2)
AP 1.7													HK
AP 1.8													SU+HK (VÖ)
AP 2.1													SU
AP 2.2													HK
AP 2.3													SU (MS3, VÖ)
AP 2.4													SU+HK (VÖ)
AP 3.1													SU
AP 3.2													HK (MS4)
AP 3.3													SU+HK (VÖ)

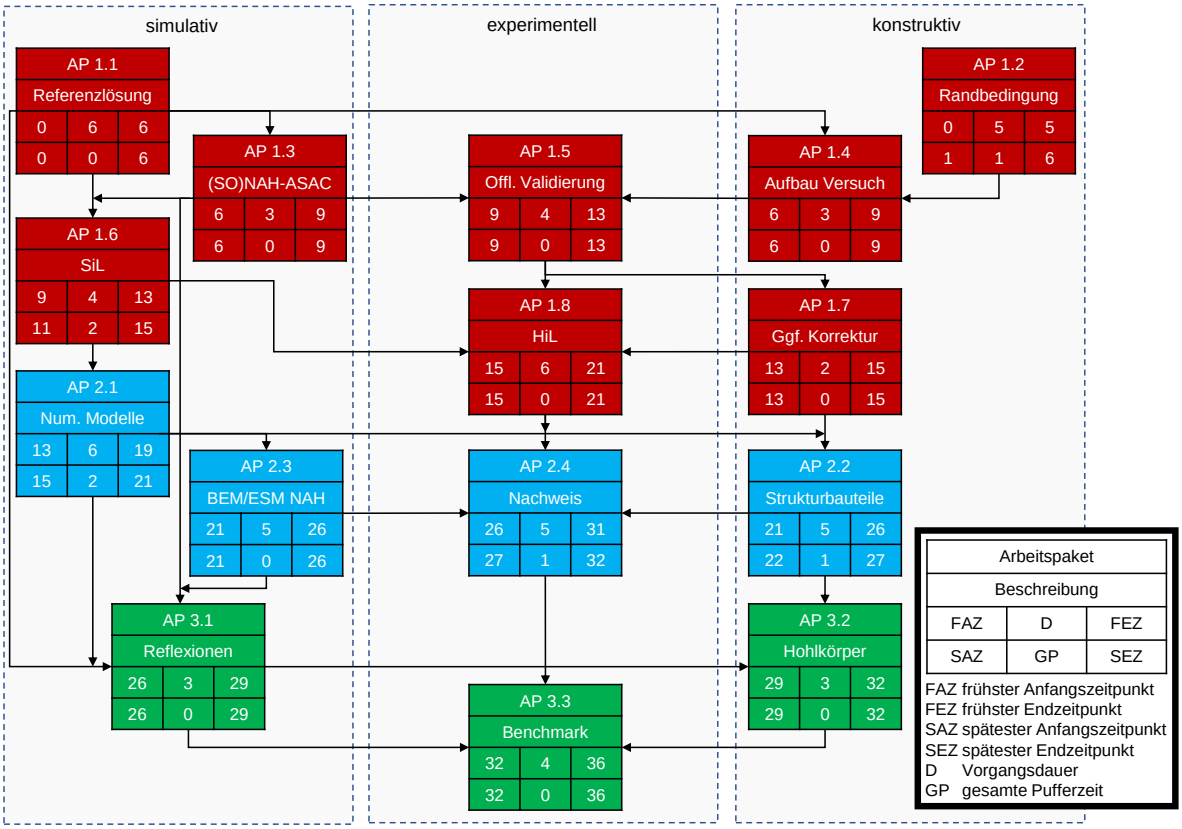

Abbildung 2: Netzplan für die beantragte Projektlaufzeit nach DIN 69900; Erläuterungen sind schwarz umrandet

Da es bisher keine der antragstellenden Person bekannten Untersuchungen dazu gibt, ist die Anwendung auf das analytisch beschreibbare Beispiel der allseitig momentenfrei gelagerten dünnen Platte in einer schallharten Wand der logische Folgeschritt zum Stand der Technik. Analog zur historischen Entwicklung von NAH-Methoden wird zunächst die FB-NAH verwendet. Diese Entscheidung bietet mehrere Vorteile. Die schnelle diskrete Fourier-Transformation (engl. Fast Fourier Transformation - FFT) ist leicht zu implementieren und ist im Vergleich zu den oben genannten möglichen Methoden der inversen Schallfeldrekonstruktion ein schnelles Verfahren, welches sich dadurch auch für Echtzeitimplementierungen eignet. Zusätzlich überführt man die Beschreibung der Schallabstrahlung in ein inverses Beugungsproblem im Wellenzahlbereich. Man erhält dadurch die wichtige Information über die auftretenden akustischen Wellenzahlen. Diese sind maßgeblich für die Interpretation der Änderung des Abstrahlverhaltens hin zu einem schwachen Strahler durch ein aktives System zur Schallreduktion mit Strukturaktuatoren.

<u>AP 1.1 – Erstellung einer analytischen Referenzlösung</u>

Ziel des ersten Arbeitspaketes ist die inverse Berechnung der Schallschnelle auf der Plattenoberfläche (**Bildebene = Quellebene**, siehe Abbildung 1) und der daraus resultierenden Schallleistung als Referenzlösung. Die Erzeugung der Strukturschnelleverteilung der Platte erfolgt durch Punktkräfte an Positionen der Stör- und der Kompensationserregung. Die Berechnung der resultierenden Schalldruckverteilung in der **Messebene** $\boldsymbol{p}_{\mathbf{m}}$ als Eingangsdaten für die NAH erfolgt z. B. nach (Tanaka et al. 1994) und (Johnson und Elliott 1995) mithilfe des Rayleigh-Integrals. Die anschließende **inverse Ermittlung** der Schallschnelleverteilung in der **Bildebene** $\vec{\boldsymbol{v}}_{\mathbf{b}}$ aus der Schalldruckverteilung in der Messebene erfolgt nach (Williams et al. 1980). Im Vergleich zu dem oben genannten holografischen Ansatz in (Hill et al. 2012) ist die Regularisierung des aus der NAH resultierenden mathematisch schlecht gestellten Problems nötig, da kleinste Messungenauigkeiten in den Eingangsdaten sonst zu Fehlern führen. Die **Berücksichtigung von zufälligen** und systematischen **Fehlern** erfolgt deshalb nach (Nam und Kim 1999). Die **Regularisierung**

wird nach (Williams 2001) durchgeführt. Bei der FB-NAH wird die Wellenzahl als Bewertungsmaß für unterschiedliche Parametersuchverfahren verwendet. Eine Anleitung zur Durchführung der FB-NAH mit zugehörigen Matlab-Befehlen findet sich dazu z. B. im Kapitel 50 in (Crocker 2007). Die Minimierung der Schallleistung wird als maximal erreichbare Reduktion und deshalb als Referenz für das angestrebte Lärmminderungskonzept verwendet. Deshalb wird der Wert der Schallleistung aus der FB-NAH, z. B. nach (Williams 1983), mit Lösungen zur Ermittlung der Schallleistung nach (Heckl 1977) und (Elliott und Johnson 1993) verglichen.
Im **Ergebnis** erhält man für die spätere experimentelle Umsetzung eine Aussage über die zu erwartende maximale Genauigkeit der rekonstruierten Schallfeldgrößen in der Bildebene in Abhängigkeit von der Messdynamik, der Beobachtungslänge sowie der Anzahl von Aufpunkten in der Messebene (Mikrofonpositionen pro Wellenlänge). Die beiden zuletzt genannten Einflussfaktoren hängen wiederum von den **Dimensionen der Platte** und dem gewählten Material ab, denn die aufzulösende akustische Wellenlänge ergibt sich im Nahfeld aus den auftretenden Biegewellenlängen der Platte. Hierbei muss folglich ein Kompromiss gefunden werden, der eine zielführende Untersuchung am späteren Plattenversuchsträger unter **Berücksichtigung** der gegebenen **Einbaubedingungen** ermöglicht. Als Grundlage für AP 2.1 werden Berechnungen an einem FEM-Strukturmodell ergänzt und anhand der analytischen Lösung überprüft. Am Ende dieses Arbeitspaketes erhält man also neben **Vergleichslösungen für** alle noch folgenden **experimentellen Arbeitsschritte** auch das Material sowie die Dimensionen der Platte als Ausgangsbasis für das AP 1.4.

AP 1.2 – Konstruktion und Fertigung der Plattenaufnahme
Für die geplanten Untersuchungen steht ein nach (DIN EN ISO 3745:2017-10) Genauigkeitsklasse 1 zertifizierter Schallmessraum als Transmissionsprüfstand zur Verfügung. Zwischen dem reflexionsarmen Raum und dem Hallraum ist eine eingerahmte rechteckige Öffnung mit den Maßen $B \times H = 1200\ \text{mm} \times 1500\ \text{mm}$ vorhanden. Für diese Öffnung soll ein Konzept zur Realisierung der allseitig **momentenfreien Lagerung** und einer allseitigen **Einspannung** konstruiert und gefertigt werden. Eine Besondere Anforderung ist dabei, dass die Aufnahme für Platten **unterschiedlicher Größe** geeignet sein muss, da in AP 2 und AP 3 weitere Versuchsträger im Transmissionsprüfstand untersucht werden sollen. Hierbei finden neue Erkenntnisse aus der Fachliteratur in (Dumond et al. 2019) zum Aufbau von Plattenlagerungen Anwendung.

AP 1.3 – Algorithmen der NAH zur optimalen Steuerung und der Echtzeitanalyse
Im Anschluss an die Schallschnelle wird in diesem Arbeitspaket die Schalldruckverteilung in der Bildebene $\boldsymbol{p_b}$ auf Basis der Ergebnisse aus AP 1.1 ermittelt und überprüft. Danach stehen beide Schallfeldgrößen als Ortsverlauf in der Bildebene und in Form von Wellenzahlspektren zur Verfügung. Als Vorbereitung für die Echtzeitverarbeitung der Eingangsdaten aus NAH-Methoden wird diese analytische Lösung nun in ein **Simulink-Modell** überführt. Als Vorbereitung für AP 2 und AP 3 bietet es sich in diesem Arbeitsschritt an, das aus den Arbeiten von (Steiner 1997) resultierende Prinzip der statistisch optimierten akustischen Nahfeldholografie (engl. Statistically Optimized Near-Field Acoustical Holography -**SONAH**) ebenfalls zu implementieren. Die SONAH ist ein für die akustische Schallquellenortung etabliertes Verfahren. Sie ist für nicht planare Geometrien geeignet und **verringert** die durch die endliche Abtastung des Schallfeldes mit Mikrofonen entstehenden **Leck-Effekte** der Orts-FFT.
Zusammen mit den Ergebnissen aus dem AP 1.1 erhält man Übertragungsfunktionen zwischen der Stör- und der Kompensationserregung und der resultierenden Schalldruck- und Schallschnelleverteilung in der Bildebene bzw. den Wellenzahlspektren beider Schallfeldgrößen. Damit hat man alle Daten zur Hand, welche für die Berechnung einer optimalen Steuerung zur Schallleistungsminimierung im Sinne des kleinsten Fehlerquadrates nach (Fuller und Burdisso

1991) und nach (Johnson und Elliott 1995) nötig sind. Diese kann nun ebenfalls auf das unter AP 1.1 erstellte FEM-Modell angewendet und mit der analytischen Lösung verglichen werden. Als Vorbereitung für die Echtzeitimplementierung interessieren hierbei vor allem die **Auswirkungen** der Änderung der Wellenzahlspektren in der Bildebene nach (Clark und Fuller 1992) auf die festzulegenden Regularisierungsparameter der FB-NAH und der SONAH. Diesen Zusammenhang gilt es bezogen **auf die Stabilität** der adaptiven Algorithmen in Abhängigkeit vom jeweiligen Zeitschritt während der Einlaufphase der Kompensationserregung des ASAC-Systems von null bis hin zum Resultat der optimalen Steuerung zu untersuchen. Als Annäherung an diesen Prozess, wird der auf der Seite 60 in (Widrow und Stearns 1985) dokumentierte Algorithmus verwendet. Daraus erhält man für jeden gewählten Zeitschritt die zu rekonstruierende Schallschnelle- und Schalldruckverteilung in der Bildebene. Mit dieser Untersuchung kann die Aussage getroffen werden, ob sich der Regularisierungsparameter in Abhängigkeit von der Kompensationskraft ändert und, wenn ja, welchen Einfluss das auf die geplante Steuerung der abgestrahlten Schallleistung hat. Dieser Zusammenhang ist von entscheidender Bedeutung, weil das Design des daraufhin zu entwickelnden Lärmminderungssystems mit Strukturaktuatoren von diesem Ergebnis abhängt (**MS1**, siehe Tabelle 1).
Am Ende dieses Arbeitspaketes steht ein für AP 1.6 notwendiges Subsystem eines Simulink-Modells zur Verfügung, welches auf Basis von simulierten und später auch gemessenen Eingangsdaten die Ortsverläufe der Schallschnelle und des Schalldrucks in der Bildebene als auch die Wellenzahlspektren beider Schallfeldgrößen in Echtzeit berechnet. Für das AP 1.8 wird die notwendige Berechnung des optimalen Filters zur Schallleistungsminimierung erzeugt.

AP 1.4 – Aufbau der Versuchsumgebung

Die in AP 1.1 ausgelegte Platte wird konstruiert, gefertigt und in der unter AP 1.2 konstruierten **Plattenaufnahme** eingebaut. Im Anschluss an den Einbau wird ein **Mikrofongestell** errichtet. Es werden die benötigten und zuvor nach Abschnitt 3.1 in (Ungnad und Sachau 2017) phasenabgeglichenen Mikrofone auf dem Mikrofongestell befestigt. Zum Abschluss dieses Arbeitspaketes wird die **Reproduzierbarkeit** der erzeugten Messdaten durch Messungen mit unterschiedlicher Schallfeldauflösung durch Mikrofone **überprüft**. Der Abstand der Mikrofone zueinander in der Messebene sollte für die FB-NAH nach (Maynard et al. 1985) gleich dem Abstand der Messebene zur Bildebene sein. Weiterhin orientiert sich die Auflösung nach AP 1.1 anhand des gewählten Frequenzbereiches **bis 1 kHz** durch die kleinste sich einstellende Strukturwellenlänge. Diese resultiert aus der Wellenzahl der auftretenden Strukturmoden und sollte zur Einhaltung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems mit mindestens zwei Mikrofonen abgetastet werden. Wichtig ist auch, dass das Mikrofonarray zur Verminderung von Leck-Effekten über die Platte hinaus geht.

AP 1.5 – Experimentelle Überprüfung der analytischen Referenzlösung

An dem aus AP 1.4 resultierenden Versuchsaufbau werden die Ergebnisse aus AP 1.1 überprüft. Für die **Verifikation** des Aufbaus wird die aus der **Laser-Scanning-Vibrometer**(LSV)-Messung resultierende Strukturschnelleverteilung mit dem aus Schalldruckmessungen in der Messebene berechneten Rekonstruktionsergebnissen der Schallschnelle aus der FB-NAH und der SONAH verglichen. Zusätzlich erlaubt die NAH die Rekonstruktion von Schalldrücken auf der Plattenoberfläche. Diese sollen zum Vergleich mit einem für Nahfeldmessungen geeigneten Mikrofon (Modell GRAS 40SC) im extremen Nahfeld der Platte nach (Prezelj et al. 2013) gemessen werden, siehe Abbildung 3. Mit der Durchführung aller Messungen unter Laborbedingungen kann der im AP 1.1 quantifizierte Einfluss von Messrauschen verringert werden. Im Anschluss erfolgt ein Vergleich der berechneten Schallleistung mit Ergebnissen aus einer Strahlungsmoden-basierten **Vergleichsmessung** der Schallleistung nach (Elliott und Johnson 1993) und der Messung der

Schallleistung nach (DIN EN ISO 3745:2017-10). Es werden hierbei die Ergebnisse der Referenzlösungen, die errechneten Schalldruckeingangsdaten sowie die prognostizierten Schallleistungen aus den Vorarbeiten aus AP 1.1 zur Überprüfung herangezogen. Dieser Vorgang erfolgt für die Stör- sowie für die Kompensationserregung. Die Positionen beider Erregerpunkte werden nach (Tanaka et al. 1994) gegenüberliegend gewählt. Mit einer gegebenen Störkrafterregung kann das unter AP 1.3 errechnete optimale Filter für die Kompensationskraft im Anschluss mittels des Kompensationskrafterregers auf die Platte appliziert werden. Das ermöglicht den Vergleich der Schallfeldgrößen in der Bild- und in der Messebene mit und ohne optimaler Steuerung. Die gewonnenen Daten werden mit den berechneten Ergebnissen verglichen und bilden die Grundlage zur Bewertung der Ergebnisse nach der Adaptionsphase der geplanten ASAC-Steuerung in AP 1.8.

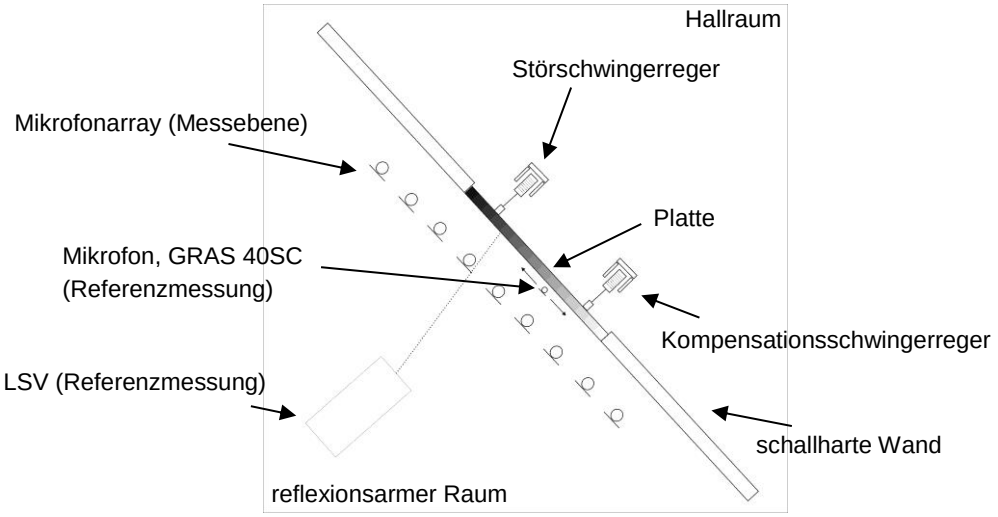

Abbildung 3: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus im Transmissionsprüfstand (Projektphase 1)

AP 1.6 – Entwurf der echtzeitfähigen Steuerung mit NAH-Methoden (Software in the Loop - SiL)

Auf Basis der Vorarbeiten aus AP 1.1 und AP 1.3 soll an dieser Stelle ein aktives System für eine Steuerung mit einem Kompensationsaktuator und Mikrofonen im Nahfeld der schallabstrahlenden Struktur programmiert werden. Ziel ist hierbei die Annäherung des zuvor in AP 1.3 berechneten Optimums zur Minimierung der abgestrahlten Schallleistung.

Die in AP 1.8 geplante praktische Umsetzung eines adaptiven Systems zur Lärmminderung erfordert nach (Morgan 1991), (Snyder und Hansen 1992) und (Dehandschutter und Sas 1998) die Berücksichtigung von Faktoren wie der Kohärenz zwischen Referenz- und Störsignalen, den Totzeiten und der Stationarität der Übertragungsstrecken, der Kausalität der Steuerung, den Konvergenzeigenschaften sowie der Amplitude der benötigten Kompensationskraft. Im ersten Ansatz soll von einer **sinusförmigen Erregung** mittels Schwingerreger als aufzuschaltendes Störsignal ausgegangen werden, um die Kausalität der Steuerung zu gewährleisten. Die Kompensationskraft wird durch deren Gewichtung mit dem sogenannten „Leakage-Faktor“ in der Kostenfunktion zur Schallleistungsminimierung nach (Elliott et al. 1992) begrenzt.

Die Implementierung einer NAH-basierten Steuerung zur Schallleistungsminimierung ist ein neuer Ansatz und erfolgt deshalb zunächst auf **drei unterschiedlichen Wegen**, um eine geeignete Methode herauszuarbeiten. Im Arbeitsplan in der Abbildung 2 ist dazu ein Zeitpuffer von zwei Monaten vorgesehen, um den aufkommenden Unsicherheiten durch die angestrebte Neuentwicklung entgegenzuwirken. Der erstgewählte Ansatz basiert auf der **Wellenzahlanalyse** der rekonstruierten Schallschnelle nach (Mathur und Tran 1993) und (Maillard und Fuller 1995). Die Formulierung der Problemstellung im Wellenzahlbereich ist hierbei von Vorteil, da nur abstrahlfähige Biegewellen nach (Williams 1995) und (Fernandez-Grande et al. 2012) berücksichtigt

werden können. Im Anschluss erfolgt nach (Sanada und Tanaka 2012) eine Schallleistungsminimierung auf Grundlage der oben bereits erwähnten **Strahlungsmoden**. Hierbei bildet ebenfalls die mit der NAH rekonstruierte Schallschnelle die Eingangsgröße. Der Letzte Ansatz nutzt beide Schallfeldgrößen in der Bildebene und zielt auf die Minimierung der Summe der senkrecht zur Plattenoberfläche gerichteten akustischen **Schallintensitätsvektoren** ab. Die Vorarbeiten aus (Sommerfeldt und Nashif 1994) können hierfür im Zusammenspiel mit der FB-NAH und der SO-NAH verwendet werden. Eine Herausforderung bildet der Umstand, dass die Schallintensität eine vorzeichenbehaftete Größe ist und damit die nach Seite 20 in (Widrow und Stearns 1985) zu invertierende „input correlation matrix" nicht zwangsläufig positiv definit sein muss. Für die **Umsetzung** eines im **Frequenzbereich** ausgeführten Filtered x Least Mean Squares Algorithmus (**FxLMS**) können die Vorarbeiten in (Ungnad et al. 2023) genutzt werden. Mit Abschluss dieses Arbeitspaketes steht ein Simulink-Modell zur Verfügung, mit dem sich das zuvor in AP 1.3 ermittelte optimale Filter adaptiv erzielen lässt. Zudem bietet das Modell die Grundlage zur Verbindung des Adaptionsalgorithmus mit der Echtzeit-Hardware. Damit ist die Vorbereitung zur experimentellen Implementierung der adaptiven Steuerung abgeschlossen (**MS2**, siehe Tabelle 1).

AP 1.7 – Nachbesserungen am Versuchsaufbau

In den vorangehenden Arbeitspaketen werden neben Schallfeldgrößen in Mess- und Bildebene auch Schallenergiegrößen und Ergebnisse aus inversen Modellen mit Messdaten verglichen. Der Erfolg dieser Vergleiche hängt maßgeblich von der **Nachbildungsgüte der Modellannahmen** ab. Dadurch ergeben sich **Unsicherheiten**, denen durch Zurverfügungstellung eines ausschließlich für **Nachbesserungen** vorgesehenen Arbeitspaketes entgegengewirkt werden soll.

AP 1.8 – Experimente zur Steuerbarkeit der Schallleistung (Hardware in the Loop - HiL)

Die in AP 1.6 entwickelte Steuerungsstruktur wird über Ein-/Ausgabe-Schnittstellen mit allen notwendigen Sensor- und Aktuatorkanälen sowie über das Real-Time Interface der dSPACE GmbH mit der Echtzeithardware verknüpft. Bei der experimentellen Umsetzung am Plattenversuchsstand aus AP 1.4 erfolgt die Auswahl der **Steuerungsparameter** wie der Schrittweite, der Höhe des Leakage-Faktors, der Adaptionsrate und der Abtastfrequenz nach (Snyder 2001). Im Vordergrund steht hierbei die Kombination von analytischen und numerischen Modellen mit der **Echtzeithardware** wie der an der HSU zur Verfügung stehenden dSPACE MicroLabBox. Eine weitere Besonderheit für die Echtzeitumsetzung der in AP 1.6 entwickelten Steuerungsstrukturen ist, dass über den **holografischen Ansatz** der NAH Schallenergiegrößen wie die Schallintensität in der Bildebene als Eingangsgrößen für den Adaptionsprozess und für die Ergebnisinterpretation zur Verfügung stehen.

AP 2.1 – Referenzlösung anhand numerischer Modelle

Die bisherigen Arbeitspakete haben den großen Vorteil, dass eine analytische Referenzlösung zur eingehenden Untersuchung der erzielten Ergebnisse zur Verfügung steht. Um die Akzeptanz des auf der NAH basierenden ASAC-Prinzips zu steigern und um Herausforderungen für die praktische Umsetzung an realen Strukturen näher erarbeiten zu können, werden in diesem Arbeitspaket nicht geschlossen-analytisch beschreibbare Strukturen näher betrachtet. Die Schallabstrahlung in das akustische Halbfeld wird dabei vorerst beibehalten. Hierbei bieten sich **zwei Szenarien** an, die sich aus den Vorarbeiten und Anwendungsfällen aus der Fachliteratur ableiten: (Klos et al. 2005), (Liu et al. 2007), (Heintze und Rose 2010), (Luft et al. 2013) und (Forget et al. 2016). Im ersten Schritt wird demnach eine an die zylindrische Geometrie eines Flugzeugrumpfes angelehnte **leicht gekrümmte** Struktur betrachtet. Anschließende Untersuchungen konzentrieren sich auf Geometrien mit **starker Krümmung**, wobei im ersten Ansatz dazu eine an eine Ölwanne angelehnte Struktur gewählt wird. Mit der Abkehr von der ebenen

Schallabstrahlung wird nun das Helmholtz-Integral, z. B. nach Kapitel 8 in (Williams 1999), statt des sich daraus ableitenden und unter AP 1.1 verwendeten Rayleigh-Integrals genutzt. Analog zu den Arbeiten in AP 1.1 erfolgt in diesem Arbeitspaket die Auslegung der Geometrie sowie das Erstellen einer Referenzlösung. Dazu stehen numerische Methoden wie die **FEM** nach (Bathe und Zimmermann 2002) und die **BEM** nach (Müller und Möser 2017) zur Verfügung. Die Bildebene liegt hierbei wahlweise auf der Strukturoberfläche oder in einer zur Struktur parallelen ebenen Fläche (**Bildebene ≠ Quellebene**, siehe Abbildung 1). Es wird dabei auch eine zur Strukturoberfläche konforme Messebene nach Kapitel 8.3.4 in (Estorff 2000) näher untersucht.

AP 2.2 – Konstruktion und Fertigung gekrümmter Leichtbaustrukturen

Die unter AP 2.1 untersuchten Strukturen werden in diesem Arbeitspaket konstruiert und gefertigt. Die in AP 1.3 erstellte Aufnahme ermöglicht den **Einbau** in den **Transmissionsprüfstand** mit allseitig **momentenfreier** und allseitig **eingespannter** Lagerung bei beliebiger Strukturgröße. Das bisherige Mikrofongestellt als auch ein zu gekrümmten Strukturoberflächen **konformes Mikrofongestell** kommen zum Einsatz.

AP 2.3 – Algorithmen der NAH für aktive Maßnahmen an beliebig geformten Geometrien

Analog zum Übergang von analytischen zu numerischen Methoden in AP 2.1 müssen auch die inversen Verfahren angepasst werden. Dazu stehen in der Literatur mehrere Möglichkeiten von NAH-Methoden zur Verfügung (siehe Abschnitt 1). Da die BEM bereits für die Erstellung der Referenzlösung zum Einsatz kommt, soll diese auch für die inverse Rekonstruktion von Schallfeldgrößen verwendet werden. Dazu werden Übertragungsfunktionen zwischen Schallfeldgrößen auf der Bauteiloberfläche und Aufpunkten an späteren Mikrofonpositionen ermittelt und im Rahmen der inversen Rückprojektion von der Messebene hin zur Bildebene verarbeitet. Die bereits unter AP 1.3 erarbeitete SONAH als auch das Verfahren der ESM-basierten NAH (im Folgenden als **ESM-NAH** bezeichnet) sollen hierbei als Referenz für die Ergebnisgüte der Lösung der BEM-basierten NAH (im Folgenden als **BEM-NAH** bezeichnet) dienen. Die ESM-NAH wird auf Grund der einfachen Implementierbarkeit gewählt. Dadurch entsteht jedoch vor allem für beliebig geformte Strukturen ein Optimierungsproblem, welches zu sehr vielen freien Parametern führt. Dazu zählen der Schallfluss jedes Elementarstrahlers, die räumlichen Positionen der Elementarstrahler sowie die Positionen von Aufpunkten (Mikrofonpositionen). Im ersten Ansatz wird sich dazu an die Positionsvorgaben in (Oey et al. 2010) und (Bai et al. 2011) orientiert. Die unter AP 1.1 erarbeiteten Methoden zur Regularisierung des mathematisch schlecht gestellten Problems werden nun durch in (Hansen 2007) zur Verfügung stehende Matlab-Bibliotheken erweitert. Analog zum AP 1.3 stehen am Ende dieses Arbeitspaketes Subsysteme für die genannten NAH-Methode für die **Erweiterung des Simulink-Modells** zur Verfügung (**MS3**, siehe Tabelle 1). Als Grundlage für den experimentellen Nachweis in AP 2.4 erfolgen auf dieser Basis die **Berechnung des optimalen Filters** sowie die **SiL**-Simulation nach AP 1.6 zur Schallleistungsminimierung.

AP 2.4 – Experimenteller Nachweis zur Anwendung der aktiven Schallleistungsminimierung an beliebig geformten Geometrien

Um die in AP 2.3 entwickelten Algorithmen zu überprüfen, werden zunächst Versuche an der ebenen Platte mit den neu erstellten NAH-Methoden durchgeführt (**HiL**). Die dabei erzielten Ergebnisse werden mit denen aus AP 1.5 verglichen. Nach diesem **Validierungsschritt** werden erneut nacheinander die Arbeitsschritte zur Rekonstruktion von Schallfeldgrößen in der Bildebene, zur Ermittlung der daraus resultierenden Schallleistung sowie zur Applizierung der in AP 2.3 ermittelten optimalen Kompensationskraft an den in AP 2.2 erzeugten Strukturteilen durchgeführt. Aufgrund der Vorarbeiten in AP 1.8 können anschließend Experimente zum Nachweis der Möglichkeit zur **aktiven Reduktion der Schallleistung von beliebigen Leichtbaustrukturen** mit NAH-Methoden durchgeführt werden.

AP 3.1 – Referenzlösung für Raumschallfelder

Nach dem Übergang von der Schallabstrahlung aus der Ebene zur Schallabstrahlung gekrümmter Flächen erfolgt in diesem Arbeitspaket der Übergang von der Schallabstrahlung in das reflexionsfreie Halbfeld zur Schallabstrahlung in Raumschallfelder. Damit wird die der FB-NAH zugrundeliegende Ausstrahlungsbedingung nach §7 in (Sommerfeld 1912) verletzt. Folglich rücken andere wellenbasierte Methoden aus AP 1.3 und AP 2.3 wie die **SONAH** oder die **ESM-NAH** als Näherungsverfahren in den Vordergrund. Zusätzlich kann an dieser Stelle auf Vorarbeiten der antragstellenden Person in (Ungnad und Sachau 2019) zur FEM-basierten NAH (im Folgenden als **FEM-NAH** bezeichnet) zurückgegriffen werden. Um eine analytische Referenzlösung erstellen zu können, wird von einem an die ebene Platte angeschlossenen **quaderförmigen Luftvolumen** mit Neumann-Randbedingung (**schallhart**) ausgegangen. Die Plattenstruktur und das Luftvolumen werden dabei zunächst voneinander entkoppelt betrachtet. Die modale Dichte des Luftvolumens wird variiert, da das Schallfeld im unteren Frequenzbereich durch effektives Einkoppeln einer oder mehrerer Strukturmoden in die Kavität als auch durch raumakustische Moden dominiert sein kann, siehe (Snyder und Tanaka 1993). Beide Fälle sollen auch im Experiment separat voneinander betrachtet werden können. Nach der Erweiterung auf eine numerische Referenzlösung mit gekoppelten **Struktur-Akustik-Moden** nach (Müller und Möser 2017) erfolgt, wie in den bisherigen Arbeitspaketen, die Berechnung von Schallfeldgrößen in der Mess- und in der Bildebene. Danach wird ein Vergleich zwischen der gegebenen Strukturschnelle und der invers rekonstruierten Schallschnelle bei Berücksichtigung zufälliger Fehler in den Eingangsdaten durchgeführt. Die rekonstruierten Schallfeldgrößen stehen anschließend als Grundlage für die Berechnung der optimalen Steuerung und als Eingangsdaten für die in AP 1.6 und AP 2.3 erarbeiteten adaptiven Algorithmen zur Verfügung. Nach Betrachtung der analytisch überprüfbaren Lösung der ebenen Platte werden die unter AP2 verwendeten gekrümmten Strukturen untersucht.

AP 3.2 – Konstruktion, Fertigung und Einbau von Reflexionsflächen

Auf Basis der Vorarbeiten in AP 3.1 werden in diesem Arbeitspaket **quaderförmige Hohlkörper** gefertigt, die, zu einer Seite offen, auf der reflexionsarmen Seite des Transmissionsprüfstandes auf Höhe des Prüfkörpers befestigt werden. Hierbei müssen konstruktiv **verschließbare Öffnungen** vorgesehen werden, um Schalldruckmessung in der Mess- als auch in der Bildebene durchführen zu können. Das Material und die erforderliche **Wandstärke** der Hohlkörper sind hierbei **festzulegen**, wobei sich durchsichtige Materialen nach (Milton et al. 2020) anbieten (**MS4**, siehe Tabelle 1). Das Ziel der Verwendung von Hohlkörpern **mit unterschiedlichen Volumina** ist die Untersuchung des NAH-Sensorprinzips in Schallfeldern, die durch unterschiedliche physikalische Prozesse dominiert werden (siehe AP 3.1).

AP 3.3 – Benchmark und Vergleich mit herkömmlichen ASAC-Sensorprinzipien

Abschluss findet das angestrebte Projekt in einer Messreihe bei der die entwickelten NAH-Verfahren am finalen Versuchsaufbau getestet und miteinander verglichen werden. Offen bleibt bisher der in der Zielstellung angestrebte **Vergleich mit herkömmlichen Sensorprinzipien** für ASAC-Anwendungen. Aus diesem Grund erfolgt zur Vergleichbarkeit die aktive **Minimierung der akustischen potenziellen Energie** innerhalb der in AP 3.2 gefertigten Hohlkörper. Die Beobachtbarkeit der potenziellen Energie wird durch die Steuerung der Summe der Betragsquadrate von gemessen Schalldrücken in den Ecken und weitere Positionen innerhalb der Hohlkörper erzielt. Am Ende dieses Arbeitspaketes wird folglich die oben aufgestellte **Forschungshypothese beantwortet**. Insbesondere erhält man einen **Bezug** der **Ergebnisse** der unterschiedlichen Prinzipien **zu** den auf der Struktur und in der Luft **auftretenden Wellenzahlen im Frequenzbereich bis 1 kHz**.

2.4 Umgang mit Forschungsdaten

Im Rahmen des beantragten Vorhabens entstehen Zeitrohmessdaten mit einem Volumen von ca. 50 GB. Die anfallenden Daten werden im Hierarchical Data Format (HDF) abgelegt. Die Weiterverarbeitung erfolgt über den Abruf über die Software von: hdfgroup.org (geprüft am 30.01.2023, Open Source). Es ist keine besondere Software zur Nutzung erforderlich. Dokumentiert werden alle Messpositionen, der physikalische Aufbau über erstellte technische Zeichnungen und Parameter der Datenerfassung (Sensortyp, Abtastfrequenz etc.). Eine Abtastfrequenz von mindestens 48kHz und eine Abtasttiefe von mindestens 24 Bit gewährleisten eine hohe Datenqualität. Die Forschungsdaten werden vorerst in keinem zentralen Repositorium abgelegt, weil keine Infrastruktur in dem Fachbereich der Antragsstellung existiert. Mit der Vorrausicht auf die zukünftige Entwicklung im Bereich des interdisziplinären Umgangs mit Forschungsdaten, werden die erzielten Messergebnisse in einer lokalen Serverstruktur der HSU gespeichert. Es bestehen keine rechtlichen Besonderheiten im Zusammenhang mit dem Umgang der Messdaten. Die Bereitstellung von Daten erfolgt nach Veröffentlichung der daraus resultierenden Ergebnisse und auf Anfrage. Es bieten sich alle Messdaten zur Nachnutzung an. Das Kriterium zur Auswahl der Daten ist deren Qualität. Die erforderliche Zitation der Daten mit DFG Geschäftszeichen wird Nachnutzenden vorgegeben. Herr Dr.-Ing. Steffen Ungnad ist verantwortlich für den Umgang mit allen Forschungsdaten. Die erforderlichen Ressourcen sind bereits im konstruktiven Teil des Projektplans enthalten. Es besteht die Möglichkeit der Open-Access-Finanzierung, siehe Tabelle 6.

2.5 Relevanz von Geschlecht und/oder Vielfältigkeit

Die HSU als arbeitgebende Einrichtung für die antragstellende Person hat am 19.12.2019 einen Gleichstellungsplan verabschiedet:

hsu-hh.de/gleibziv/wp-content/uploads/sites/688/2020/01/Gleichstellungsplan-2020-2023.pdf

Konkret werden Frauen bei gleicher Eignung für die Stelle der einzustellenden Hilfskraft bevorzugt. Projektvorstellungen sind im Rahmen des Girls-Days an der HSU vorgesehen. Die Arbeitsstruktur der konstruktiven und experimentellen Arbeitspakete in der Tabelle 1 schließt Möglichkeiten zur kurzfristigen Kinderbetreuung nicht aus. Die Teilnahme an Veranstaltungen zur Weiterqualifizierung (z. B. von *Pro Exzellenzia*) wird unterstützt.

3 Projekt- und themenbezogenes Literaturverzeichnis

Algermissen, S.; Monner, H. P. (2017): On the stability of decentralized AVC/ASAC for large-scale structures. In: J. Intell. Mater. Syst. Struct. 28 (16), S. 2255–2264.

Bai, M. R.; Chen, C.-C.; Lin, J.-H. (2011): On optimal retreat distance for the equivalent source method-based nearfield acoustical holography. In: J. Acoust. Soc. Am. 129 (3), S. 1407–1416.

Bailey, T.; Hubbard, J. E. (1985): Distributed piezoelectric-polymer active vibration control of a cantilever beam. In: J. Guid. Control 8 (5), S. 605–611.

Balas, M. J. (1979): Direct velocity feedback control of large space structures. In: J. Guid. Control 2 (3), S. 252–253.

Bathe, K.-J.; Zimmermann, P. (2002): Finite-Elemente-Methoden. Berlin: Springer.

Baumann, W. T.; Saunders, W. R.; Robertshaw, H. H. (1991): Active suppression of acoustic radiation from impulsively excited structures. In: J. Acoust. Soc. Am. 90 (6), S. 3202–3208.

Berkhoff, A. P.; Deolman, N. J. (1999): Efficient radiation mode sensing strategies for active structural acoustic control. In: Proceedings of Active. Fort Lauderdale, FL, S. 411–422.

DIN EN ISO 3745:2017-10: Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen.

Bianchi, E.; Gardonio, P.; Elliott, S. J. (2004): Smart panel with multiple decentralized units for the control of sound transmission. Part III: control system implementation. In: J. Sound Vib. 274 (1-2), S. 215–232.

Bschorr, O. (1970): Schwingungsreduktion durch Antischwinger. Veröffentlichungsnr: 1918747.

Cabell, R. H.; Schiller, N. H.; Simon, F. (2013): Application of a broadband active vibration control system to a helicopter trim panel. In: Proceedings of Noise-Con. Denver, CO.

Cazzolato, B. S.; Hansen, C. H. (1998): Active control of sound transmission using structural error sensing. In: J. Acoust. Soc. Am. 104 (5), S. 2878–2889.

Cheer, J.; Daley, S. (2016): Active structural acoustic control using the remote sensor method. In: J. Phys.: Conf. Ser. 744.

Clark, R. L.; Fuller, C. R. (1992): Active Structural Acoustic Control with Adaptive Structures Including Wavenumber Considerations. In: J. Intell. Mater. Syst. Struct. 3 (2), S. 296–315.

Crocker, M. J. (2007): Handbook of Noise and Vibration Control. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
Dehandschutter, W.; Sas, P. (1998): Active control of structure-borne road noise using vibration actuators. In: J. Vib. Acoust. 120 (2), S. 517–523.
Dumond, P.; Monette, D.; Alladkani, F.; Akl, J.; Chikhaoui, I. (2019): Simplified setup for the vibration study of plates with simply-supported boundary conditions. In: Methods 6, S. 2106–2117.
Elliott, S. J.; Boucher, C. C.; Nelson, P. A. (1992): The behavior of a multiple channel active control system. In: IEEE Trans. Signal Process. 40 (5), S. 1041–1052.
Elliott, S. J.; Gardonio, P.; Sors, T. C.; Brennan, M. J. (2002): Active vibroacoustic control with multiple local feedback loops. In: J. Acoust. Soc. Am. 111 (2), S. 908–915.
Elliott, S. J.; Johnson, M. E. (1993): Radiation modes and the active control of sound power. In: J. Acoust. Soc. Am. 94 (4), S. 2194–2204.
Engels, W. P.; Baumann, O. N.; Elliott, S. J.; Fraanje, R. (2006): Centralized and decentralized control of structural vibration and sound radiation. In: J. Acoust. Soc. Am. 119 (3), S. 1487–1495.
Estorff, O. von (Hg.) (2000): Boundary elements in acoustics. Advances and applications.
Fernandez-Grande, E.; Jacobsen, F.; Leclère, Q. (2012): Direct formulation of the supersonic acoustic intensity in space domain. In: J. Acoust. Soc. Am. 131 (1), S. 186–193.
Fisher, J. M.; Blotter, J. D.; Sommerfeldt, S. D.; Gee, K. L. (2012): Development of a pseudo-uniform structural quantity for use in active structural acoustic control of simply supported plates: an analytical comparison. In: J. Acoust. Soc. Am. 131 (5), S. 3833–3840.
Forget, S.; Totaro, N.; Guyader, J. L.; Schaeffer, M. (2016): Source fields reconstruction with 3D mapping by means of the virtual acoustic volume concept. In: J. Sound Vib. 381, S. 48–64.
Fuller, C. F. (1991): Active structural acoustic control and smart structures. Report: AD-A248341.
Fuller, C. R.; Burdisso, R. A. (1991): A wavenumber domain approach to the active control of structure-borne sound. In: J. Sound Vib. 148 (2), S. 355–360.
Gäbel, G.; Millitzer, J.; Atzrodt, H.; Herold, S.; Mohr, A. (2018): Development and implementation of a multi-channel active control system for the reduction of road induced vehicle interior noise. In: Actuators 7 (3), S. 52.
Glaese, R. M.; Anderson, E. H. (1999): Active structural-acoustic control for composite payload fairings. In: Proceedings of Smart Structures and Materials. Newport Beach, CA, S. 450–461.
Graf, P. L.; Shoureshi, R. (1988): Modeling and implementation of semi-active hydraulic engine mounts. In: J. Dyn. Sys., Meas., Control 110 (4), S. 422–429.
Grewal, A.; Nitzsche, F.; Zimcik, D. G.; Leigh, B. (1998): Active control of aircraft cabin noise using collocated structural actuators and sensors. In: J. Aircraft 35 (2), S. 324–331.
Haase, T.; Algermissen, S.; Unruh, O.; Misol, M. (2014): Experiments on active control of counter-rotating open rotor interior noise. In: Acta Acustica united with Acustica 100 (3), S. 448–457.
Haase, T.; Unruh, O.; Algermissen, S.; Pohl, M. (2016): Active control of counter-rotating open rotor interior noise in a Dornier 728 experimental aircraft. In: J. Sound Vib. 376, S. 18–32.
Hansen, C. H. (2007): Regularization Tools Version 4.1. (for MATLAB Version 7.3). Technische Universität Dänemark. Online verfügbar unter https://www.imm.dtu.dk/~pcha/Regutools/, zuletzt geprüft am 18.01.2023.
Heckl, M. (1977): Abstrahlung von ebenen Schallquellen. In: Acoustica 37, S. 155–166.
Heintze, O.; Rose, M. (2010): Active structural acoustic control for a truck oil pan: Actuator placement and efficiency estimation. In: Acta Acust. United. Ac. 58 (3), S. 292–301.
Hill, S. G.; Tanaka, N.; Iwamoto, H. (2012): A generalised approach for active control of structural–interior global noise: Practical implementation. In: J. Sound Vib. 331 (14), S. 3227–3239.
Hillis, A. J. (2011): Multi-input multi-output control of an automotive active engine mounting system. In: Proc. IMechE Part D: J. Automobile Engineering 225 (11), S. 1492–1504.
Jessel, M. J. M.; Mangiante, G. A. (1972): Active sound absorbers in an air duct. In: J. Sound Vib. 23 (3), S. 383–390.
Johnson, M. E.; Elliott, S. J. (1995): Active control of sound radiation using volume velocity cancellation. In: J. Acoust. Soc. Am. 98 (4), S. 2174–2186.
Jones, J. D.; Fuller, C. R. (1987): Active control of sound fields in elastic cylinders by vibrational inputs. In: Proceedings of the National Conference on Noise Control Engineering. State College, PA, S. 413–418.
Kaczmarz, S.; Steinhaus, H. (1936): Theorie der Orthogonalreihen: Chelsea Publishing (Mathematische Monographien, 6).
Kaizuka, T.; Tanaka, N. (2007): Radiation clusters and the active control of sound transmission into a symmetric enclosure. In: J. Acoust. Soc. Am. 121 (2), S. 922–937.
Klos, J.; Palumbo, D. L.; Buehrle, R. D.; Williams, E. G.; Valdivia, N. P.; Herdic, P. C.; Sklanka, B. (2005): Comparison of different measurement technologies for the in-flight assessment of radiated acoustic intensity. In: J. Acoust. Soc. Am. 118 (3), 1886 (Kurzfassung).
Liu, B.; Feng, L.; Nilsson, A. (2007): Sound transmission through curved aircraft panels with stringer and ring frame attachments. In: Journal of Sound and Vibration 300 (3-5), S. 949–973.
Luft, T.; Ringwelski, S.; Gabbert, U.; Henze, W.; Tschöke, H. (2013): Noise reduction potential of an engine oil pan. In: Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. Peking, S. 291–304.
Ma, X.; Lu, Y.; Wang, F. (2017): Active structural acoustic control of helicopter interior multifrequency noise using input-output-based hybrid control. In: J. Sound Vib. 405, S. 187–207.
Ma, X.; Chen, K.; Xu, J. (2020): Active control of sound radiation from rib stiffened plate using the weighted sum of spatial gradients as the cost function. In: Applied Acoustics 157, S. 1–13.
Maillard, J. P.; Fuller, C. R. (1995): Advanced time domain wave-number sensing for structural acoustic systems. Part III. Experiments on active broadband radiation control of a simply supported plate. In: J. Acoust. Soc. Am. 98 (5), S. 2613–2621.

Manzanikov, A. A.; Tyutekin, V. V. (1975): Experimental study of an active system for the suppression of sound fields. In: Sov. Phys. Acoust. 20 (5), S. 493–494.
Mathur, G.; Tran, B. (1993): Wavenumber active structural acoustic control for smart structures. In: Proceedings of the 15th Aeroacoustics Conference. Long Beach,CA, Paper 93-4422.
Maynard, J. D. (1988): Acoustic holography for wideband, arbitrarily shaped noise sources. In: J. Acoust. Soc. Am. 84 (1), 171 (abstract).
Maynard, J. D.; Williams, E. G.; Lee, Y. (1985): Nearfield acoustic holography: I. theory of generalized holography and the development of NAH. In: J. Acoust. Soc. Am. 78 (4), S. 1395–1413.
Michau, M.; Micheau, P.; Boulandet, R.; Berry, A.; Herzog, P. (2014): Decentralized complex envelope controller for ASAC by virtual mechanical impedances. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Besançon.
Milton, J.; Cheer, J.; Daley, S. (2020): Active structural acoustic control using an experimentally identified radiation resistance matrix. In: J. Acoust. Soc. Am. 147 (3), S. 1459–1468.
Misol, M. (2020a): Active sidewall panels with virtual microphones for aircraft interior noise reduction. In: Applied Sciences 10 (19), Artikel 6828.
Misol, M. (2020b): Full-scale experiments on the reduction of propeller-induced aircraft interior noise with active trim panels. In: Appl. Acoust. 159, Artikel 107086.
Misol, M.; Algermissen, S.; Monner, H. P. (2012): Experimental investigation of different active noise control concepts applied to a passenger car equipped with an active windshield. In: J. Sound Vib. 331 (10), S. 2209–2219.
Montague, G. T.; Kascak, A. F.; Palazzolo, A.; Manchala, D.; Thomas, E. (1994): Feed-forward control of gear mesh vibration using piezoelectric actuators. NASA Technical Memorandum 106366.
Morgan, D. R. (1991): A hierarchy of performance analysis techniques for adaptive active control of sound and vibration. In: J. Acoust. Soc. Am. 89 (5), S. 2362–2369.
Müller, G.; Möser, M. (Hg.) (2017): Numerische Methoden der Technischen Akustik. 1. Aufl.: Springer Berlin Heidelberg (Fachwissen Technische Akustik).
Nam, K.-U.; Kim, Y.-H. (1999): Errors due to sensor and position mismatch in planar acoustic holography. In: J. Acoust. Soc. Am. 106 (4), S. 1655–1665.
Necati, G.; Doppenberg, E.; Antila, M. (2000): Noise radiation reduction of a car dash panel. In: Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering. ISMA25. Leuven, S. 855–862.
O'Connel, J.; Mathur, G.; Janaki, R.; Johnson, M.; Rosetti, D. (2001): Helicopter cabin noise reduction using active structural acoustic control. In: Proceedings of the American Helicopter Society 57th Annual Forum. Washington, DC, S. 588–595.
Oey, A.; Jang, H.-W.; Ih, J.-G. (2010): Effect of sensor proximity over the non-conformal hologram plane in the near-field acoustical holography based on the inverse boundary element method. In: J. Sound Vib. 329 (11), S. 2083–2098.
Olson, H. F. (1956): Electronic control of noise, vibration, and reverberation. In: J. Acoust. Soc. Am. 28 (5), S. 966–972.
On, F. J. (1967): Mechanical impedance analysis for lumped parameter multi-degree of freedom / multi-Dimensional systems. Hg. v. NASA (Technical Note, D-3865).
Palumbo, D.; Cabell, R.; Cline, J.; Sullivan, B. (2000): Active structural acoustic control of interior noise on a Rayheon 1900D. Report: NASA/TM-2000-209846. ARL-TR-2205.
Pasco, Y.; Berry, A.; Grewal A.; Chapleau, S. L. (2014): Active control of transmission noise in a Bell 407 helicopter. In: Proceedings of the American Helicopter Society 70th Annual Forum. Montreal, S. 174–182.
Peiffer, A.; Storm, S.; Röder, A.; Maier, R.; Frank, P.-G. (2004): Active vibration control for high speed train bogies. In: Smart Mater. Struct. 14 (1), S. 1–18.
Persson, P.; Lagö, T. L.; Norberg, A. (1999): Active control of sleeper induced sound in a high speed train. In: Proceedings of the Sixth International Congress on Sound and Vibration. Kopenhagen, S. 1747–1752.
Petitjean, B.; Legrain, I. (1996): Feedback controllers for active vibration suppression. In: J. Struct. Control 3 (1-2), S. 111–127.
Prezelj, J.; Lipar, P.; Belšak, A.; Čudina, M. (2013): On acoustic very near field measurements. In: Mech. Syst. Signal Process. 40 (1), S. 194–207.
Riley, B.; Bodie, M.; Hoying, J.; Majeed, K.; Tewani, S. (1995): Active vibration and noise cancellation control of four cylinder engines - An application. In: SAE Technical Paper Series, S. 539–547.
Roure, A.; Albarrazin, A. (1999): The remote microphone technique for active noise control. In: Proceedings of ACTIVE. Institute of Noise Control Engineering: Institute of Noise Control Engineering of the USA, S. 1233–1244.
Sanada, A.; Tanaka, N. (2012): Theoretical and experimental study on active sound transmission control based on single structural mode actuation using point force actuators. In: J. Acoust. Soc. Am. 132 (2), S. 767–778.
Sarkissian, A. (2005): Method of superposition applied to patch near-field acoustic holography. In: J. Acoust. Soc. Am. 118 (2), S. 671–678.
Simpson, M. A.; Luong, T. M.; Fuller, C. R.; Jones, J. D. (1991): Full-scale demonstration tests of cabin noise reduction using active vibration control. In: J. Aircraft 28 (3), S. 208–215.
Snyder, S. D. (2001): Active control - a bigger microprocessor is not always enough. In: Noise Control Eng. J.
Snyder, S. D.; Burgan, N. C.; Tanaka, N. (2002): An acoustic-based modal filtering approach to sensing system design for active control of structural acoustic radiation: Theoretical development. In: Mech. Syst. Signal Process. 16 (1), S. 123–139.
Snyder, S. D.; Hansen, C. H. (1992): Design considerations for active noise control systems implementing the multiple input, multiple output lms algorithm. In: J. Sound Vib. 159 (1), S. 157–174.

Snyder, S. D.; Hansen, C. H.; Tanaka, N. (1993): Shaped vibration sensors for feedforward control of structural radiation. In: Proceedings of the Second Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration. Blacksburg, VA, S. 177–188.

Snyder, S. D.; Tanaka, N. (1993): On feedforward active control of sound and vibration using vibration error signals. In: J. Acoust. Soc. Am. 94 (4), S. 2181–2193.

Sommerfeld, A. (1912): Die Greensche Funktion der Schwingungsgleichung. In: Jhrber. Deutsch. Math. Verein 21, S. 309–353.

Sommerfeldt, S. D.; Nashif, P. J. (1994): An adaptive filtered- x algorithm for energy-based active control. In: J. Acoust. Soc. Am. 96 (1), S. 300–306.

Song, C. Ki; Hwang, J. K.; Lee, J. M.; Hedrick, J. K. (2003): Active vibration control for structural–acoustic coupling system of a 3-D vehicle cabin model. In: J. Sound Vib. 267 (4), S. 851–865.

Song, L.; Koopmann, G. H.; Fahnline, J. B. (1991): Active control of the acoustic radiation of a vibrating structure using a superposition formulation. In: J. Acoust. Soc. Am. 89 (6), S. 2786–2792.

Staple, A. (1989): An evaluation of active control of structural response as a means of reducing helicopter vibration. Paper Nr.:51. In: Proceedings of the Fifteenth European Rotorcraft Forum. Amsterdam, S. 1–18.

Steiner, R. (1997): Rekonstruktion des Schallfeldes von bewegten Schallquellen mit Hilfe der akustischen Holographie. Dissertation. ETH Zürich. Institut für Signal- und Informationsverarbeitung.

Svaricek, F.; Bohn, C.; Karkosch, H.-J.; Härtel, V. (2001): Aktive Schwingungskompensation im Kfz aus regelungstechnischer Sicht. In: AT-AUTOM 49 (6).

Tanaka, N.; Snyder, S. D. (2002): Cluster control of a distributed-parameter planar structure-middle authority control. In: J. Acoust. Soc. Am. 112 (6), S. 2798–2807.

Tanaka, N.; Snyder, S. D.; Kikushima, Y.; Kuroda, M. (1994): Vortex structural power flow in a thin plate and the influence on the acoustic field. In: J. Acoust. Soc. Am. 96 (3), S. 1563–1574.

Tartakovskii; B., D.; Knyazev, A., S. (1965): Theoretical and experimental results on negative feedback systems for reduction of noise and vibrations. In: Proceedings of the International Congress on Acoustics, paper F43. Lüttich.

Ungnad, S. (2021): Eine FEM-basierte Nahfeldholografiemethode zur Schallquellenidentifikation in Kavitäten. Dissertation. Helmut-Schmidt-Universität - Universität der Bundeswehr Hamburg. Professur für Mechatronik. Online verfügbar unter https://openhsu.ub.hsu-hh.de/handle/10.24405/11836, zuletzt geprüft am 11.01.2023.

Ungnad, S.; Brüggemann, H.; Müller, A.; Zerbs, C.; Sachau, D.; Homm, A. (2021a): Untersuchungen zur gezielten Beeinflussung der akustischen Signatur an einem Schiffsmodell. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik (Hg.): Tagungsband der DAGA. Wien, S. 725–728.

Ungnad, S.; Müller, A.; Zerbs, C.; Sachau, D.; Homm, A. (2022): Simulation der aktiven Beeinflussung der Wasserschallsignatur eines Schiffsmodells auf Basis von Messdaten. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik (Hg.): Tagungsband der DAGA. Stuttgart, S. 723–726.

Ungnad, S.; Müller, A.; Zerbs, C.; Sachau, D.; Homm, A. (2023): Experimenteller Nachweis zur Beeinflussung der Wasserschallsignatur eines Schiffsmodells mittels aktiver Struktur-Akustik-Regelung. In: Proceedings of DAGA. Hamburg, zur Veröffentlichung angenommenen (siehe Anhang).

Ungnad, S.; Sachau, D. (2017): Measurement of the influence of an active noise control system on the sound energy flow into an aircraft cabin mock-up. In: Proceedings of the 6th International Workshop on Aircraft System Technologies 2016, S. 205–214.

Ungnad, S.; Sachau, D. (2019): Interior near-field acoustic holography based on finite elements. In: J. Acoust. Soc. Am. 146 (3), S. 1758–1768.

Ungnad, S.; Sachau, D. (2021): Verbund Flight-LAB - Messsystem zur akustischen Identifikation von Rumpfstrukturen. Helmut-Schmidt-Universität - Universität der Bundeswehr Hamburg.

Ungnad, S.; Sachau, D.; Wandel, M. (2016): Evaluation of robust position optimization of loudspeakers and microphones for an adaptive active noise control system. In: InterNoise. Hamburg, S. 3903–3909.

Ungnad, S.; Sachau, D.; Wandel, M.; Thomas, C. (2021b): Experimental noise source identification in a fuselage test environment based on nearfield acoustical holography. In: CEAS Aeronaut. J. 12 (4), S. 793–802.

Verburg, S. A.; Williams, E. G.; Fernandez-Grande, E. (2022): Acousto-optic holography. In: J. Acoust. Soc. Am. 152 (6), S. 3790–3799.

Vyalyshev, A. I.; Dubini, A. I.; Tartakovskii, B. D. (1986): Active acoustic reduction of a plate. In: Sov. Phys. Acoust. 32 (2), S. 96–98.

Wang, Z.; Wu, S. F. (1997): Helmholtz equation–least-squares method for reconstructing the acoustic pressure field. In: J. Acoust. Soc. Am. 102 (4), S. 2020–2032.

Widrow, B.; Stearns, S. D. (1985): Adaptive signal processing: Prentice-Hall.

Williams, E. G. (1983): Numerical evaluation of the radiation from unbaffled, finite plates using the FFT. In: J. Acoust. Soc. Am. 74 (1), S. 343–347.

Williams, E. G. (1995): Supersonic acoustic intensity. In: J. Acoust. Soc. Am. 97 (1), S. 121–127.

Williams, E. G. (1999): Fourier acoustics. San Diego: Academic Press.

Williams, E. G. (2001): Regularization methods for near-field acoustical holography. In: J. Acoust. Soc. Am. 110 (4), S. 1976–1988.

Williams, E. G.; Houston, B. H.; Herdic, P. C. (1996): Using nearfield acoustical holography to reconstruct the surface velocity and interior acoustic intensity from interior pressure measurements. In: Proceedings of Internoise. Liverpool, UK, S. 2553–2558.

Williams, E. G.; Maynard, J. D.; Skudrzyk, E. (1980): Sound source reconstructions using a microphone array. In: J. Acoust. Soc. Am. 68 (1), S. 340–344.

Yoon, S. H.; Nelson, P. A. (2000): Estimation of acoustic source strength by inverse methods: part II, experimental investigation of methods for choosing regularization parameters. In: J. Sound Vib. 233 (4), S. 665–701.