

Lösungsansätze für die Integration von aktiven Lärminderungsmaßnahmen in zukünftige Propellerflugzeuge

Kochan, K., Patel, B. V., Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau,
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

In der Luftfahrtindustrie werden derzeit erhebliche Anstrengungen unternommen die Emissionen zu reduzieren. Hierbei stehen vollelektrische und hybridelektrische Flugzeuge mit Wasserstoff als Energieträger besonders im Fokus. Propeller können dabei aufgrund deren Effizienz eine besondere Rolle einnehmen. Nachteilig beim Einsatz von Propellern sind jedoch die hohen tieffrequenten Töne im Kabinenlärmpektrum. Konventionelle passive Lärminderungsmaßnahmen erreichen bei diesem Lärmproblem jedoch schnell physikalische Grenzen. Aktive Lärminderungsmaßnahmen (engl. Active Noise Control, ANC) werden daher wieder als interessanter Lösungsansatz betrachtet.

Dieser Beitrag im Rahmen des Projektes CATECO (Cabin Acoustics of hearT of ECO-responsibility) beleuchtet die Herausforderungen bei der Integration von aktiven Lärminderungsmaßnahmen in zukünftige Propellerflugzeuge. Im Fokus steht dabei die Frage, welche Lösungsansätze für deutlich größere Propellerflugzeuge mit bis zu 150 Passagieren verfolgt werden könnten. Zunächst wird daher das Kabinenlärmpektrum sowie die Blattfolgefrequenzen heutiger und zukünftiger Propeller-Flugzeugkonfigurationen diskutiert. Es zeigt sich, dass zukünftig die Blattfolgefrequenzen beim Einsatz offener Rotoren höher liegen oder durch den Einsatz von Elektromotoren im Triebwerk auch variabler werden könnten. Anschließend wird der grundlegende Systemaufbau aktiver Lärminderungssysteme für die Reduktion von Propellerlärm in der Flugzeugkabine gezeigt. Hierbei wird insbesondere ein Rückblick auf ein kommerziell verfügbares System gegeben. In der darauf folgenden Diskussion wird auf die zum ANC-System gehörenden Aktuatoren und Sensoren eingegangen sowie die Integration von Hard- und Software in zukünftige Kabinenmanagementsysteme skizziert. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf verteilte ANC-Systeme basierend auf dem Edge Computing Ansatz. Hierbei wird die Systemintelligenz weg von einer zentralen Recheneinheit hin zu intelligenten Lautsprechern verschoben. Dadurch wird einem aktuellen Entwicklungstrend im Bereich der Kabinenmanagementsysteme Rechnung getragen, die Modularität erhöht und das Systemgewicht und die Systemkomplexität reduziert. Im letzten Kapitel wird gezeigt, wie ein intelligentes Lautsprechermodul hardware- und softwareseitig realisiert werden könnte. Der Beitrag schließt mit einem Ausblick auf die weiteren im Forschungsprojekt CATECO geplanten Arbeiten ab.

Keywords

Active Noise and Vibration Control, Kabinenlärm in Propellerflugzeugen, Verteilte Systeme, Kabinenmanagementsysteme, Time Sensitive Networking

1. EINLEITUNG

Das steigende Umweltbewusstsein und die hieraus resultierenden Auflagen der Gesetzgebung zwingen die Luftfahrtindustrie die Triebwerksemissionen weiter zu reduzieren. Die zahlreichen derzeit in der Entwicklung befindlichen elektrischen und hybridelektrischen Konzepte deuten darauf hin, dass Propellertriebwerke mit ihrer Effizienz eine alte Antwort auf ein aktuelles Problem sein könnten. Denn aufgrund der geringen Energiedichte von Batterien und Wasserstoff, muss die zur Verfügung stehende Energie durch Propeller effizient in Vortrieb gewandelt werden [1].

Abgesehen von der Effizienz bieten Propeller aber schon immer Vorteile, die Strahltriebwerke nicht bieten konnten. Bessere Start- und Landeleistungen ermöglichen die Beförderung von Passagieren zu und von kleinen Regionalflughäfen. Auch die niedrigeren Betriebskosten erlauben es Enthusiasten und privaten Piloten Propellerflugzeuge zu betreiben. Noch zu Beginn des 21. Jahrhunderts erset-

zen viele Airlines Regionalflugzeuge mit Propeller durch solche mit Turbofan-Triebwerk. Zuletzt stieg jedoch die Nachfrage nach Turboprop-Flugzeugen aufgrund der steigenden Treibstoffpreise, vor allem in Ländern, die nicht über eine entwickelte Flugplatzinfrastruktur verfügen.

Dieses Jahrhundert hat jedoch neue Prioritäten mit sich gebracht, wodurch das Comeback des Propellerantriebes in kommerziellen Luftfahrt möglich scheint [2]. Für die Kabinenakustik stellen solche Antriebe jedoch eine große Herausforderung dar, da hohe tonale Lärmpegel im niedrigen Frequenzbereich in der Kabine erwartet werden. Eine Lärminderung mit konventionellen passiven Maßnahmen stößt hier schnell an ihre Grenzen. Alternativ bietet die aktive Lärminderung die Möglichkeit die einzelnen hohen Töne im Lärmpektrum zu reduzieren. Diese aktiven Systeme haben bereits in zahlreichen Flugzeugen bewiesen, dass sie bei tonalen Lärmproblemen sehr effizient wirken. Herausfordernd ist jedoch die Systemintegration aktiver Lärminderungsmaßnahmen.

2. PROPELLERLÄRM IN FLUGZEUGKABINEN: HEUTE UND IN DER ZUKUNFT

Der Lärm in der Kabine propellergetriebener Verkehrsflugzeuge setzt sich im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten zusammen: Propeller-induzierte Töne mit der Blattfolgefrequenz (BPF) und deren Höherharmonischen, dem Grenzschichtlärm und die Systemlärmquellen (z.B. Luftverteilung, ATA 21; Hydraulik, ATA 29, Abwasserentsorgung, ATA 38).

Im BILD 1 ist ein typisches Kabinenlärmspektrum der ATR 72 – 600 für den Start und Reiseflug gezeigt. Im Abwerteten Spektrum ist deutlich zu erkennen, dass die Töne der Blattfolgefrequenz im niedrigen Frequenzbereich den dominierenden Lärmanteil bilden. Dies trifft auf alle Flugphasen zu, wobei beim Start die höchsten Pegel und etwas höhere Blattfolgefrequenzen zu beobachten sind.

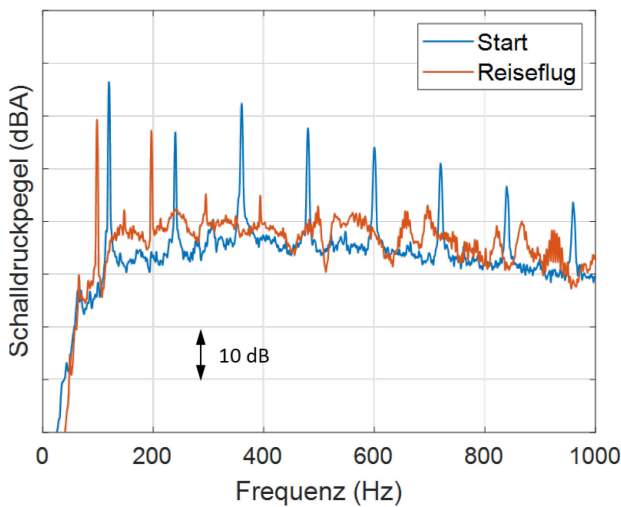


BILD 1. Typisches Kabinenlärmspektrum gemessen in einer ATR72 - 600 [3]

Für die Auslegung aktiver Lärminderungsmaßnahmen ist die Kenntnis dieser Blattfolgefrequenzen von entscheidender Bedeutung. Die Blattfolgefrequenzen können mit Methoden des Flugzeugvorentwurfs auch für andere Flugzeuge abgeschätzt werden: Die Bahn der Propellerblattspitzen durch die Luft beschreibt durch die Überlagerung der Vorwärts- und Rotationsbewegung eine Helix-Bahn. Die Rotationsgeschwindigkeit der Propellerblattspitzen $[v_{tip}] = m/s$ ergibt sich aus der vektoriellen Differenz aus der Geschwindigkeit auf dieser Helix-Bahn $[v_{helix}] = m/s$ und der Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung durch die Luft $[v_{TAS}] = m/s$:

$$(1) \quad v_{tip} = \sqrt{v_{helix}^2 - v_{TAS}^2}$$

Stehen keine detaillierten Daten zur Verfügung, kann als maximale Geschwindigkeit der Propellerblattspitze $v_{helix} = 0,85 \text{ Ma}$ angenommen werden [4]. Die Blattfolgefrequenz f kann dann über die Anzahl der Propellerblätter N_R und dem Durchmesser der Propellerscheibe $[D] = m$ bestimmt werden:

$$(2) \quad f = N_R \cdot \frac{v_{tip}}{\pi D}$$

Die Blattfolgefrequenz steigt somit für kleinere Reisefluggeschwindigkeiten, niedrigere Flughöhen und einer höheren Propellerblattanzahl. Je größer jedoch der Propellerdurchmesser ist, desto kleiner ist die mögliche Blattfolgefrequenz.

In Tabelle 1 sind die Propellerdrehzahlen sowie die Blattfolgefrequenzen für ausgewählte Regionalflugzeuge mit konventionellen Antrieb gezeigt. Im Reiseflug sind Blattfolgefrequenzen von 85 bis 98 Hz üblich. Typisch sind höhere Blattfolgefrequenzen von 102 bis 120 Hz bei Start und Steigflug. Im Landeanflug werden bei den hier ausgewählten Flugzeugen die Triebwerke mit der gleichen Drehzahl wie im Reiseflug betrieben. Die Triebwerke sind immer in Drehzahl und Phasenlage synchronisierbar [5], sodass diese immer mit konstanter Geschwindigkeit drehen. Eine Ausnahme bildet dabei das Taxiing sowie in Einzelfällen der Landeanflug. In diesen Flugphasen können größere Schwankungen der Propellerdrehzahlen auftreten. Der Wechsel zwischen den stationären Drehzahlen des Steig- und Reiseflugs dauert ca. 5 – 10 Sekunden [6].

Tabelle 1: Blattfolgefrequenzen ausgewählter konventioneller Regionalflugzeuge

		ATR 72-600	Saab 2000	De Havilland Dash 8 Q400
max. Passagieranzahl		74	53	90
Anzahl Propellerblätter		6	6	6
maximale Reisefluggeschwindigkeit [km/h]		511	685	667
Start und Steigflug	Drehzahl [rpm]	1200	1100	1020
	1. BPF [Hz]	120	110	102
Reiseflug; Anflug und Landung	Drehzahl [rpm]	984	950	850
	1. BPF [Hz]	98,4	95	85

Propellertriebwerke spielen auch in der Entwicklung hybrid-elektrischer Antriebskonzepte bei Flugzeugen ab 50 Passagieren eine wichtige Rolle [7]. Oben genannte Flugzeuge werden zum Beispiel auch als Entwicklungsplattformen für wasserstoffbetriebene Flugzeuge eingesetzt [8]

[9]. Elektromotoren als Propellerantrieb lassen sich dabei im Vergleich zu konventionellen Turbinen einfacher bei der optimalen Propellerdrehzahl betreiben. Es ist daher zu erwarten, dass in Zukunft während unterschiedlicher Flugphasen auch verschiedene Blattfolgefrequenzen auftreten.

Neben Turboprop-Flugzeugen wird auch wieder der Einsatz von Triebwerken mit offenen Rotoren diskutiert. Ein Beispiel ist das von CFM International verfolgte RISE-Konzept (BILD 2), bestehend aus 12 drehenden Luftschaufeln und einem Stator mit 10 feststehenden Schaufeln [10]. Diese Triebwerke könnten in der nächsten Generation von Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge mit 150 Passagieren zum Einsatz kommen. Mit dem RISE-Triebwerk sollen dann ähnliche Reisefluggeschwindigkeiten wie mit heutigen Turbofan-getriebenen Flugzeugen erreicht werden.

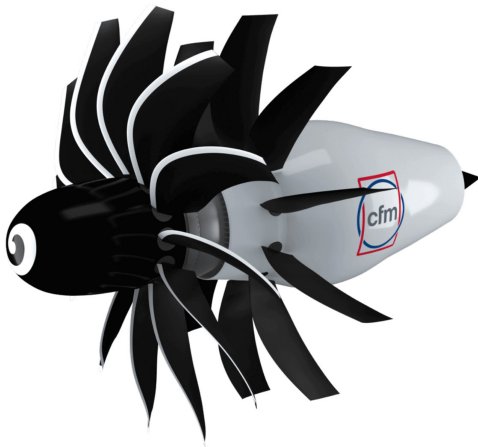


BILD 2. Triebwerk mit offenem Rotor des RISE Projektes von CFM International [10]

Auch wenn heute noch wenige technische Informationen zu diesem Triebwerk öffentlich verfügbar sind, können die Blattfolgefrequenzen mit Gleichung (1) und (2) abgeschätzt werden. Setzt man in Gleichung (1) eine Flughöhe von 8.230 m, eine Reisegeschwindigkeit $v_{TAS} = 0,62 \text{ Ma}$ und eine Geschwindigkeit $v_{helix} = 0,85 \text{ Ma}$ ein [11], ergibt sich für die Blattspitzengeschwindigkeit $v_{tip} = 261 \text{ m/s}$. Für die Blattfolgefrequenz folgt $f = 187 \text{ Hz}$ aus der Gleichung (2) mit $D = 3,65 \text{ m}$ und mit 12 Rotorblättern [10]. Die Blattfolgefrequenz liegt damit erheblich oberhalb konventioneller Propellerflugzeuge. Reduziert man die Flughöhe und Fluggeschwindigkeit weiter, um z.B. die Effizienz des Flugzeuges weiter zu erhöhen, kann die Blattfolgefrequenz noch höher liegen.

Um Kabinenlärmpiegel in solchen Regional- und Kurzstreckenflugzeuge ähnlich wie in turbofan-getriebenen Flugzeugen zu erreichen, ist insbesondere die Reduktion der dominanten Töne anzustreben. Die bei Triebwerken mit offenen Rotor erwarteten hohen Blattfolgefrequenzen stellen für aktive Lärminderungssysteme eine besondere Herausforderung dar, da durch die höhere Frequenz die Wellenlänge des akustischen Feldes in der Kabine ab-

nimmt. Weiterhin kann durch den Einsatz von Elektromotoren bei der Auslegung aktiver Lärminderungssysteme nicht mehr von zwei quasistationären Propellerdrehzahlen für Start und Reiseflug ausgegangen werden. Insbesondere dem Konvergenzverhalten aktiver Lärminderungssysteme muss daher zukünftig besondere Beachtung geschenkt werden.

3. TONALE AKTIVE LÄRMMINDERUNGSSYSTEME IM FLUGZEUG

Zur Reduktion dieser dominanten tieffrequenten Töne sind konventionelle passive Lärmierungsmaßnahmen nur bedingt geeignet. Diese sind erst oberhalb der Resonanz der Doppelwand von Kabinenverkleidung und Rumpfstruktur effizient wirksam. Die Doppelwandresonanzfrequenz kann verringert werden durch die Vergrößerung des Abstandes zwischen Flugzeugrumpf und Innenverkleidung [12]. Eine Vergrößerung des Abstandes zwischen Flugzeugrumpf und Innenverkleidung würde jedoch zu Lasten des nutzbaren Kabinenvolumens gehen. Entfällt die Möglichkeit die Doppelwandresonanz hin zu niedrigeren Frequenzen zu verschieben, verbleibt als akustische Maßnahme noch die Erhöhung der Masse entsprechend dem Berger'schen Massegesetzes. Bei Verdopplung der Masse einer Wand, kann die Schalltransmission um 6 dB reduziert werden. Für ein Flugzeug mit offenem Rotor und 155 Passagieren wurde z.B. in [13] ermittelt, dass ca. 28% der Kabinenlänge mit zusätzlichen, mehreren kg/m^2 -schweren, passiven akustischen Maßnahmen auszustatten sind. Um die Grenzen konventioneller Schallsolierungen weiter zu niedrigeren Frequenzen zu verschieben, wird daher an akustischen Metamaterialien geforscht [14] [15]. Diese akustischen Metamaterialien sind zwar bei tieferen Frequenzen als konventionelle Materialien wirksam, sie erreichen jedoch nicht den Frequenzbereich der Blattfolgefrequenz und werden immer nur für ein sehr schmales und festes Frequenzband ausgelegt. Bei Änderungen der Blattfolgefrequenz sowie der Lufttemperatur in der Kabine verlieren diese akustischen Metamaterialien daher ihre Wirkung.

Aktive Lärminderungssysteme (Active Noise Control, ANC) können sich dagegen adaptiv an veränderte Bedingungen anpassen. Sie basieren auf dem Prinzip der Überlagerung des Kabinenlärmfeldes mit einem Gegenschallfeld, welches durch Lautsprecher oder die Primärstruktur anregende Aktuatoren erzeugt wird. Im BILD 3 ist der prinzipielle Aufbau eines aktiven Lärminderungssystems gezeigt. Die Aktuatoren sowie die Sensoren sind in der Berandung der Kabine integriert und können sich über die gesamte Länge der Kabine erstrecken. Die Ansteuerung der Aktuatoren erfolgt durch einen adaptiven Regelalgorithmus unter kontinuierlicher Berücksichtigung der Signale an den Fehlersensoren.

Der erfolgreiche Einsatz aktiver Lärminderung wurde bereits in mehr als 1000 Flugzeugen, wie z.B. der De Havilland DHC-8-100, -200, -300 und -400 (ehemals

Bombardier Q Series), der Saab 340, der Saab 2000, der ATR-42 und der Dornier 328, gezeigt. Abhängig von Flugzeugtyp, Frequenz und Passagiersitz konnten im Durchschnitt ca. 10 dB Pegelreduktionen für die erste Blattfolgefrequenz erreicht werden [16] [17] [18].

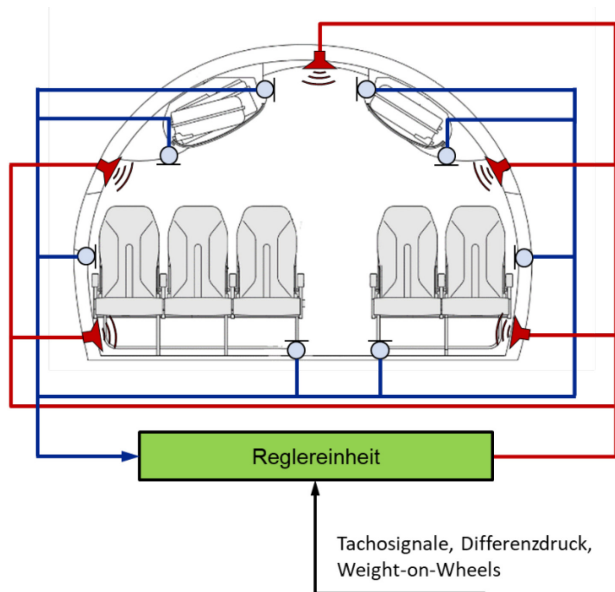


BILD 3. Aufbau eines konventionellen Systems zur aktiven Schallreduktion (Kabinenquerschnitt einer A220 als Beispiel im Hintergrund [19])

Im Gegensatz zu einer Implementierung im Zeitbereich kann die adaptive Regelung für tonale Lärmprobleme besonders effizient im Frequenzbereich umgesetzt werden [20]. Im Regler wird dabei kontinuierlich zu jedem diskreten Zeitpunkt n die folgende Iterationsgleichung gelöst:

$$(3) \quad \mathbf{u}(n + 1) = [1 - 2\mu\gamma]\mathbf{u}(n) - 2\mu\mathbf{G}^H\mathbf{e}(n)$$

In dieser Gleichung ist $\mathbf{u} = [u_1 \dots u_N]^T$ der komplexe Vektor der Aktuator-Ansteuerung, $\mathbf{e} = [e_1 \dots e_M]^T$ der komplexe Vektor der Schalldrücke an den Fehlersensoren und \mathbf{G} die komplexe $N \times M$ Matrix der Übertragungsfaktoren zwischen den N Aktuatoren und den M Fehlersensoren. Bedingt durch die Zeit-Frequenzbereichswandlung orientiert sich die höchste sinnvolle Aktualisierungsrate der Iterationsgleichung an der Blattfolgefrequenz. Wenn die Konvergenzgeschwindigkeit keine Rolle spielt, sind auch niedrige Aktualisierungsraten von 8 Hz ohne merkliche akustische Qualitätseinbußen anwendbar [21].

Marktverfügbar ist das durch Ultra Electronics Ltd. vertriebene Active Noise and Vibration Control System (ANVCS). Dies besteht aus einer zentralen Active Noise Control Unit (ca. 4 kg) mit analogen Schnittstellen für bis zu 96 Sensoren und 48 Aktuatoren [16] [22]. Als Aktuatoren werden wahlweise Lautsprecher (je ca. 0,5 kg) oder Active Tuned Vibration Absorbers (ATVA, je. ca. 0,5 – 1,2 kg) eingesetzt. Als Fehlersensoren werden vor allem Elektret-Kondensatormikrofone und ergänzend Beschleunigungsaufnehmer verwendet. Für ein Regional und Kurzstreckenflugzeug wie die DHC-8-400 werden Systeme mit

80 Fehlmikrofonen, 4 Beschleunigungsaufnehmern sowie 42 Aktuatoren eingesetzt. Ohne das Gewicht der Kabel und Sensoren resultiert damit ein Systemgewicht von mindestens 40 kg.

Da die Aktuatoren und Sensoren über die gesamte Kabine verteilt sind, stellen die Kabel und deren Gewicht ein nicht zu vernachlässigendes Problem dar. Im ANVCS wird jeder Aktuator mit 4 Kupferleitungen (GND, 28 VDC und zwei differentielle analoge Signalleitungen) und jedes Mikrofon mit 2 Kupferleitungen (GND, 28 VDC mit überlagerten analogen Signal) sternförmig an der zentralen Recheneinheit angebunden [23] (vgl. BILD 3). In der neuesten Version des ANVCS, welches für den Airbus A400M vorgesehen war, wurde diese analoge Technologie abgelöst. Hier sind an jeder Aktuator-Einheit zwei Fehlmikrofone direkt angeschlossen. Jeweils 20 Aktuator-Sensor-Einheiten kommunizieren wiederum über einen CAN-Bus mit der zentralen Recheneinheit [24]. Die Übertragung der Signale erfolgt somit erstmalig in digitaler Form.

4. AKTUATOREN UND SENSOREN

Die Menge der Aktuatoren und Sensoren steigt mit der Größe der Kabine bzw. der Passagierkapazität. Basierend auf der Literatur wurde ermittelt, wie viele Sensoren und Aktuatoren in der Beechcraft 1900D [17], der Dornier 328 [18], der DHC-8-100 bis -400 [23] sowie der Saab 2000 [25] eingesetzt wurden. Die Ergebnisse sind in der Ordinate im BILD 4 eingetragen. Auf der Abszisse ist das Kabinenvolumen dargestellt, welches vereinfacht durch Multiplikation der Kabinenfläche mit der maximalen Kabinenhöhe abgeschätzt wurde.

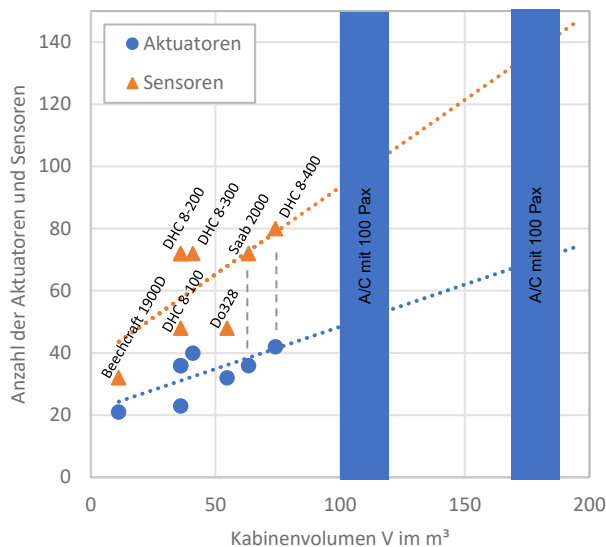


BILD 4. Aktuator und Sensoranzahl in verschiedenen Flugzeugen

Das BILD 4 zeigt, dass für ein Flugzeug mit ca. 100 Passagieren ca. 50 Aktuatoren und 100 Sensoren erwartet werden. Für ein Flugzeug mit 150 Passagieren kann man von ca. 70 Aktuatoren und 140 Sensoren ausgehen. Durch die höhere Blattfolgefrequenz von Triebwerken mit

offenen Rotoren, könnte sich die Anzahl jedoch noch weiter erhöhen. Auf der anderen Seite ist der Schalleintrag in die Kabine im Wesentlichen in der Propellerebene [26], sodass bei größeren Kabinen die Aktuatoren und Sensoren hauptsächlich in der Propellerebene verteilt werden. Genauere Antworten zur Aktuator- und Sensoranzahl können daher nur aufwendige numerische Untersuchungen liefern.

Jeder einzelne Aktuator ist schwer, teuer und benötigt einen entsprechenden Bauraum. Aus Sicht der Integration stellt damit die große Anzahl von Aktuatoren eine besondere Herausforderung dar. Als Aktuatoren kommen zwei verschiedene Prinzipien in Frage:

Zum einen können Lautsprecher in die Kabinenverkleidung integriert werden. Diese wirken damit unmittelbar auf das akustische Fluid. Für die Erhöhung der Effizienz sollte die Lautsprecherresonanzfrequenz auf die niedrigste Blattfolgefrequenz abgestimmt werden. Platz für die Integration findet man in heutigen Kabinen zum Beispiel im Deckenpaneel, zwischen bzw. rechts und links der Passenger Service Unit (PSU) sowie im Dado-Paneel. Akustisch sinnvoll ist auch eine Integration von Aktuatoren in die Seitenwand auf Höhe der Fenster. Durch die Fensteröffnung, die Sonnenblenden, Lüftungsrohre, thermalakustische Isolierung sowie den Spant verbleibt jedoch nur begrenzter Bauraum für Lautsprecher.

Eine Lösung des Platzproblems können elektrodynamische Körperschallwandler sein [27] [28]. Um die Leistungsfähigkeit von Körperschallwandlern für die Abstrahlung tieffrequenter Töne zu untersuchen, wurden mit Körperschallwandler vom Typ Visaton EX 45 S akustische Messungen in einem A320-Kabinendemonstrator durchgeführt. Die Wandler haben ein Einzelgewicht von 60 g und eine Nennleistung von 10 W. Mit diesem Wandler konnte mit 8 W Eingangsleistung ein Schalldruckpegel von 75 - 85 dB bei 100 Hz erreicht werden. Gemessen wurde der Schalldruckpegel dabei jeweils senkrecht vor dem Paneel in Ohrhöhe für eine stehende Person im Gang bzw. eine sitzende Person auf den Passagiersitzen. Die hier gemessenen

Schallpegel zeigen, dass solche Aktuatoren einen hinreichenden Pegel für aktive Lärmreduktionssysteme liefern. Nachteilig ist jedoch die Anregung von Höherharmonischen durch die nicht für diesen Zweck akustisch optimierte Aufhängung der Seitenwandpaneele.

Das zweite Aktuator-Prinzip basiert auf Aktuatoren die direkt auf die Primärstruktur wirken. Wie im BILD 5 dargestellt, werden diese Tunable Vibration Absorber (TVA) am Spant montiert und reduzieren durch aktive Regelung dessen Schwingung [29] [30]. Für die Schallpegelreduktion in der Kabine ist die Kopplung zwischen Strukturmoden und den Moden des Luftvolumens der Kabine entscheidend. Vergleichende experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass oberhalb von 70 Hz Lautsprecher und TVA in einem DHC Dash-7 Rumpfsegment vergleichbare Schallpegelreduktionen liefern [31]. Nur unterhalb von 70 Hz sind die Primärstruktur anregenden TVAs aus akustischer Sicht überlegen. Für die Auswahl einer geeigneten Aktuator-Prinzips oberhalb von 70 Hz spielen daher eher andere Anforderungen, wie das Gewicht, die elektrische Leistungsaufnahme, der notwendiger Bauraum sowie die Kosten eine Rolle.

Als Fehlersensoren können Mikrofone oder Beschleunigungsaufnehmer eingesetzt werden. Hat man zum Ziel den Schalldruckpegel in der Kabine zu reduzieren, sind Mikrofone als Fehlersensoren ausreichend. Denn auch hier spielt die Kopplung zwischen den Moden der primären Rumpfstruktur und des Luftvolumens in der Kabine eine große Rolle. Der Einsatz von Beschleunigungsaufnehmern, z.B. in Kombination mit Mikrofonen, ist nur relevant, wenn auch die Primärstruktur anregende Aktuatoren zum Einsatz kommen. Mit den Beschleunigungsaufnehmern ist dann ebenfalls eine Vibrationsreduktion möglich (Active Structural Acoustic Control, engl. ASAC).

In zukünftigen ANC-Systemen sind Mikrofone in der Bauform als mikro-elektromechanische Systeme (MEMS) die erste Wahl. Die Membran zur Wandlung der Schallwellen in ein elektrisches Signal, ein Verstärker sowie ggf. ein Analog-Digital-Wandler sind hier in einem Chip integriert.

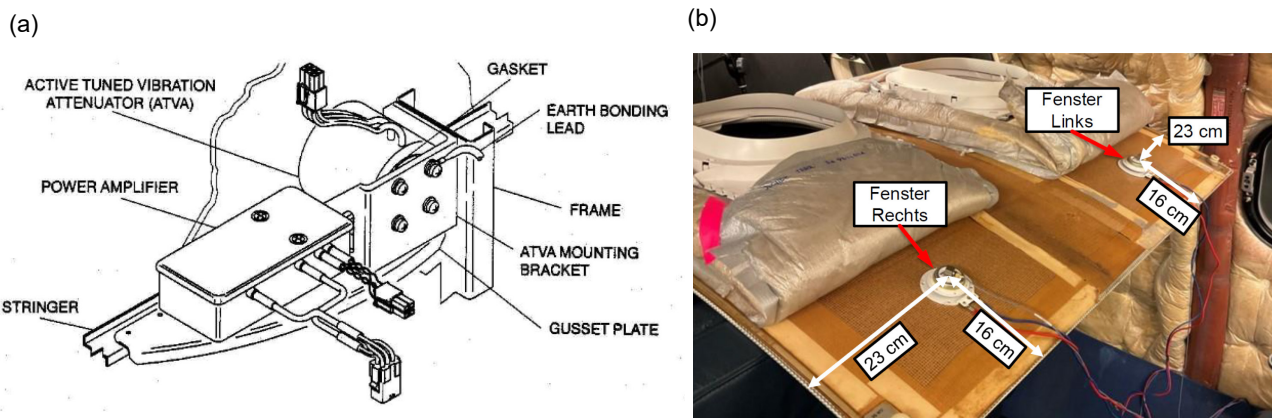


BILD 5. Aktuatoren für aktive Lärmreduktionssysteme: (a) am Spant montierter Tunable Vibration Absorber TVAs mit Verstärker [16], (b) elektro-dynamische Erreger auf der Rückseite eines Kabinenseitenwandpaneels [27].

Insbesondere eine digitale Übertragung der Signale an den Audioprozessor ist vorteilhaft, um die elektromagnetische Empfindlichkeit des ANC-Systems zu reduzieren. Andererseits begrenzt diese digitale Übertragung die Leitungslängen, wodurch die Freiheiten bei der Mikrofonplatzierung eingeschränkt werden.

5. INTEGRATION IN ZUKÜNFTIGE KABINENMANAGEMENTSYSTEME

Diverse Luftfahrtunternehmen forschen derzeit an der Entwicklung digitaler Kabinen-Service-Plattformen. Diese vereinen klassische Funktionen der Kabinen-Managementssysteme wie Public Address System, die Beleuchtung, die Hinweiszeichen, die Rauchmelder oder den Passagierruf, mit weiteren Systemen wie kamerabasierte Überwachungssysteme und vielen weiteren Funktionen. Die aktive Lärminderung könnte auf solchen Plattformen zu einer Applikation unter vielen werden und würde sich zentrale Ressourcen mit weiteren Kabinenfunktionen teilen. Dies kann zu einer erheblichen Kostenreduktion führen. Ein Trend ist dabei in vielen technischen Anwendungen die Verschiebung der Systemintelligenz. Der auch als Edge Computing bekannte Ansatz sieht eine Verlagerung der Datenverarbeitung von einem zentralen Knoten zum Rand des Netzwerkes (engl. Edge) vor. Das Ziel ist dabei die Datenströme ressourcenschonend an Ort und Stelle zu verarbeiten. Durch die lokale Datenverarbeitung können die Kosten reduziert sowie die Konvergenzgeschwindigkeit der ANC-Systeme erhöht werden, da ein Teil der Netzwerkkommunikation entfällt.

Eine zeilenweise Betrachtung der Iterationsgleichung (3) zeigt, dass für die Berechnung der Ansteuerung für einen

einzelnen Lautsprechers i jeweils die entsprechende Zeile i aus der Matrix \hat{G} und der Fehlersignalvektor \mathbf{e} notwendig sind:

$$(4) \quad u_i(n+1) = [1 - 2\mu\gamma]u_i(n) - 2\mu[\hat{g}_{1i} \quad \dots \quad \hat{g}_{Mi}]e(n)$$

Es ist daher möglich die entsprechende Berechnung der Lautsprecheransteuerung in Aktuator-nahe Rechereinheiten zu verschieben und die Fehlersignale über ein Netzwerk zur Verfügung zu stellen. Diese Aktuator-nahen Rechereinheiten könnten dabei deutlich kleiner als eine einzelne zentrale Recheneinheit dimensioniert werden. Ein weiterer interessanter Aspekt ergibt sich je nach Ausprägung der Matrix \hat{G} . Denn wenn Lautsprecher und Mikrofone in der Kabine nahe beieinander liegen, werden entsprechenden Matrixelemente \hat{g}_{ki} deutlich größer sein als bei Lautsprechern und Mikrofonen die weit auseinander liegen. Wenn einzelne Matrixelemente nahe Null sind, könnte in diesem Fall auch auf eine Übertragung des Fehlersignals verzichtet werden. Der größte Vorteil eines verteilten Ansatzes ergibt sich jedoch in der Skalierbarkeit, da die Systemleistung durch Hinzufügen weiterer baugleicher intelligenter Aktuator-Module einfach erweitert werden kann. Ein verteiltes ANC-System setzt jedoch voraus, dass die nun verteilten Rechereinheiten synchronisiert werden und die Datenübertragung hinreichend schnell und deterministisch ist.

Die Aktuatoren und Sensoren des verteilten aktiven Lärminderungssystems werden damit zu Endgeräten im Kabinennetzwerk. Hierbei ist es sinnvoll, zukünftig vor allem aus Kostengründen offene Industriestandards ein-

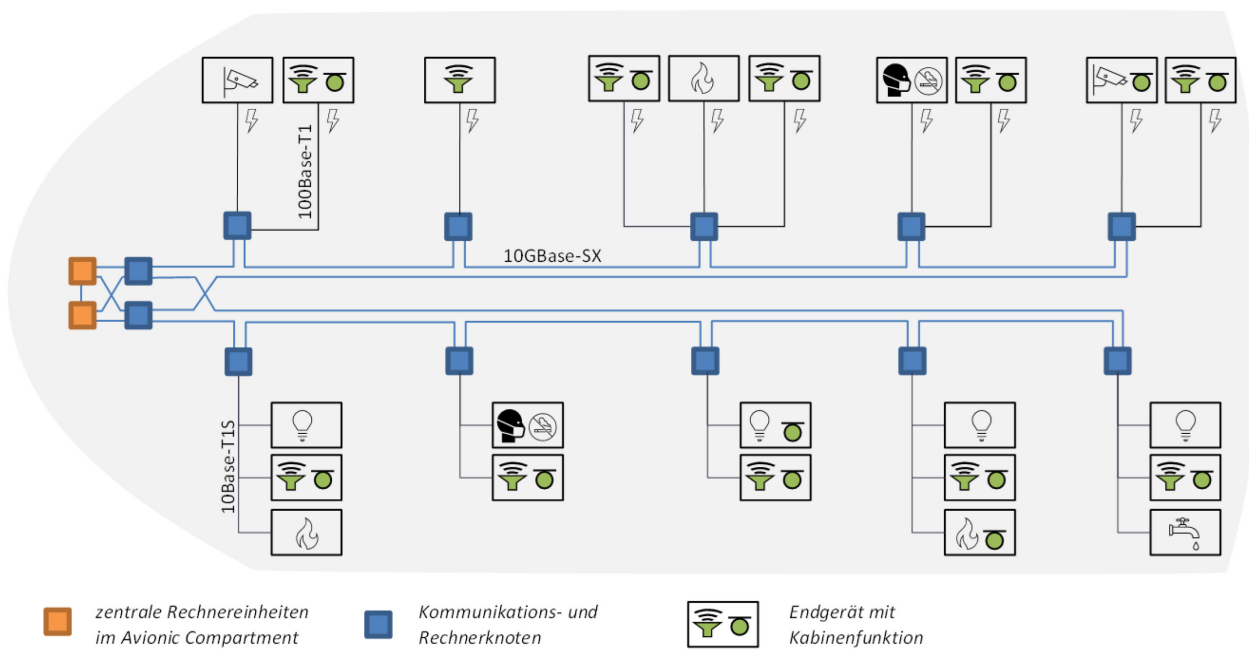


BILD 6. Komponenten eines ANC-Systems integriert in ein mögliches zukünftiges Kabinenmanagementsystem (in Anlehnung an [32] und [33])

zusetzen. Die hier notwendige Technologie wird unter anderem in der Time-Sensitive-Networking (TSN) Arbeitsgruppe IEEE P802.DP – TSN for Aerospace Onboard Ethernet Communications unter Beteiligung von AIRBUS, Boeing, GE und Collins Aerospace diskutiert [32] [33]. In BILD 6 ist das diskutierte Konzept des Kabinenmanagementsystems dargestellt. Unterschiedlichste Kabinengeräte sind an ein gemeinsames Kabinennetzwerk angeschlossen. Die physikalische Schicht des Kabinen-Netzwerkes bildet ein 10 Gbit-Ethernet mit Glasfaser als Übertragungsmedium. Die Kabinen-Endgeräte sind wiederum an die Kommunikations- und Rechnerknoten über 10/100 Mbit-Ethernet-Leitungen angebunden. Die Anbindung der Endgeräte kann basierend auf dem ARINC Standard 854 Cabin Equipment Network über 100Base-T1 erfolgen. Dieser nutzt ein verdrehtes Kupferleiterpaar und kann zusätzlich auch mit Power-over-Data Line mit bis zu 50 W Leistungsübertragung ergänzt werden (vgl. obere Endgeräte in BILD 6). Eine Alternative stellt 10Base-T1S insbesondere für die Anbindung von Modulen nur mit Fehlermikrofonen dar. 10Base-T1S-Ethernet nutzt eine Multidrop-Technologie, bei der mehrere Endgeräte über ein einziges Kabel verbunden sind. Im Gegensatz zu 100Base-T1-Ethernet können hiermit entsprechend mehrere Ports am Switch eingespart werden.

In einem solchen Kabinen-Netzwerk werden Standards aus dem Portfolio des Time-Sensitive-Networking (IEEE 802.1) eingesetzt. Eine Zeitsynchronisation gewährleistet, dass die internen Uhren aller Netzwerkteilnehmer synchronisiert werden. Scheduling und Traffic Shaping regelt den Zugriff verschiedener Dienste auf einem gemeinsamen Netzwerk. Zeitgarantien für die Datenübertragung können durch feste Zuteilung von sich wiederholenden Übertragungszyklen realisiert werden.

Da bei verteilten ANC-Systemen entsprechend der Iterationsgleichung (4) für jede Aktuator-Ansteuerung alle Mikrofon-signale notwendig sind, muss jeder Sensor eine Nachricht an alle Aktuatoren in Echtzeit übermitteln (1-zu-N Kommunikation). Die Umsetzung dieser Mehrpunktverbindung kann mittels OPC UA Pub/Sub erfolgen [34]. Mit OPC UA Pub/Sub können Nachrichten durch Sensormodule versendet werden (Publisher) und die Aktuator-Module können diese Nachrichten abonnieren (Subscriber). Dies gewährleistet ebenfalls eine sehr einfache Konfigurier- und Skalierbarkeit des ANC-Systems. Zusätzliche Sensoren oder Aktuatoren können ohne großen Konfigurationsaufwand des System hinzugefügt werden. Vorteilhaft ist weiterhin, dass ein solches System auch ohne zentralen Vermittler (Broker) realisiert werden kann. Dies bietet insbesondere im Sinne der Zuverlässigkeit große Vorteile.

Die notwendigen Datenraten für ein ANC-System einer Flugzeugkabine mit 100 bzw. 150 Passagieren kann wie

folgt geschätzt werden: Jedes Fehlermikrofon muss $x = 25$ Bytes (bei Regelung im Frequenzbereich der BPF und von 3 Höherharmonischen, 24 bit-Auflösung und einem zusätzlichen Zeitstempel) an alle Aktuator-Module übertragen. In Kombination mit OPC UA Pub/Sub ohne Verschlüsselung- und Sicherheitsmerkmale ergeben sich zunächst Ethernet-Pakete mit 85 Bytes (inkl. interframe gap). Unter Annahme einer zyklischen Updaterate von 100 Hz für die Iterationsgleichung (4) und damit auch einer zyklischen Datenübertragung in gleicher Größe, folgen durch Multiplikation mit der Anzahl der Fehler-sensoren die in der Tabelle 2 angegebenen Datenraten. Ein Vergleich der erwarteten Datenraten mit den zur Verfügung stehenden 10Gbit/s eines zukünftigen Kabinenmanagementsystem [33] zeigt, dass maximal nur 0,1 % der Ressourcen notwendig sind.

Tabelle 2: Datenrate für verteilte ANC-Systeme

	Aktuatoren	Sensoren	Datenrate
100 Pax	50	100	6,8 Mbit/s
150 Pax	70	140	9,5 Mbit/s

Eine weitere wichtige Größe für ein verteiltes ANC-System ist die erwartete Übertragungszeit vom Sensor zum Aktuator. Für OPC UA Pub/Sub über TSN kann dies mit

$$(5) \quad \tau = \frac{8 \cdot x}{C}$$

und

$$(6) \quad t = \frac{l}{299\,792\,458 \text{ m/s}} + n\delta + \tau$$

abgeschätzt werden [35]. Hierbei ist x die zu übertragende Datenmenge von 85 Bytes, n die Anzahl der Netzwerkknoten, C die Kapazität der Datenverbindung, l die Länge der Verbindungsleitung und $\delta = 3 \mu\text{s}$ die geschätzte Latenz eines Netzwerkknotens. Für ein Kabinennetzwerk mit $n = 15$ Netzwerkknoten ergeben sich die in Tabelle 3 angegebenen Zeiten.

Tabelle 3: Verzögerung der Datenübertragung über die individuellen Netzwerkabchnitte

	τ in μs	t in μs
Kabinen-Endgerät (100Base-T1) zu Netzwerkknoten ($l \approx 3 \text{ m}$)	6,8	12,8
Netzzugangsknoten zu Netzausgangsknoten ($l \approx 50 \text{ m}$)	0,068	45,2

Die Übertragung eines Datenpaket vom Sensor zum Aktuator benötigt daher im schlechtesten Fall ca. 71 μs . Bei 140 Sensoren würde es ca. 10 ms dauern, bis alle Sensorwerte an allen Aktuatoren aktualisiert wurden. Dies entspricht damit einer ausreichenden Aktualisierungsrate von 100 Hz.

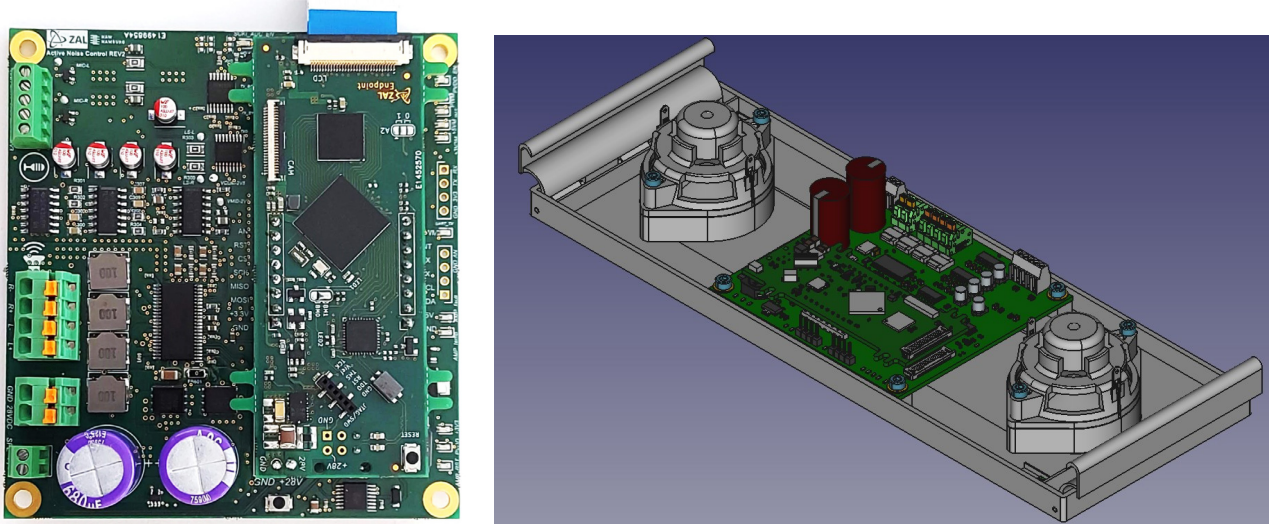


BILD 7. Prototypische Umsetzung eines Audio-Moduls mit Elektronikboard (rechts) und Konzept zur Integration in den PSU-Kanal (links, [36]).

Der Ansatz eines verteilten Lärmreduzierungssystems integriert in ein zukünftiges Kabinenmanagementsystem ist kommunikationstechnisch daher möglich. Etwaige Gateways, z.B. zum ARINC 625 – CANBus, sind nicht notwendig. Weiterhin ermöglicht dieser Ansatz, Mikrofone in beliebige Kabinen-Endgeräte wie Rauchmelder oder Lichtmodule zu integrieren.

ANC-Systeme benötigen auch Sensorinformationen von anderen Flugzeugsystemen. So werden die Tachometersignale aller Propeller als Referenz-Signale für den Regelalgorithmus benötigt. Da die im Regler notwendigen Übertragungsstrecken \hat{G} von der Bedruckung des Rumpfes abhängig sind, sind bei TVAs der Kabinendruck und die Temperatur (Klimaanlage, ATA 21), der statische Umgebungsdruck (Navigation, ATA 34) und das Weight-On-Wheels-Signal (Fahrwerk, ATA 32) notwendig. Beim Einsatz von Lautsprechern als Aktuatoren genügt die Kabinentemperatur, um die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit zu kompensieren.

6. ERSTE PROTOTYPISCHE UMSETZUNG EINES AUDIO-MODULES

Im BILD 7 ist die erste prototypische Umsetzung eines Audio-Moduls des verteilten ANC-Systems gezeigt. Das Elektronikboard basiert auf einem NXP RT1064 Crossover MCU mit 600 MHz. Auf dem Bord befinden sich Anschlüsse für zwei analoge MEMS-Fehlersensoren sowie zwei Lautsprecher inkl. der zugehörigen Class-D Verstärker mit 55 Watt Dauerleistung (Lautsprecherimpedanz von 8Ω). Das Board wird mit 28 VDC Gleichspannung versorgt. Als Kommunikationsschnittstelle dient eine 100Base-T Ethernet-Schnittstelle.

Im Zuge einer Integrationsuntersuchung für den PSU-Kanal wurden insgesamt 3 Konzepte entwickelt. Dabei wurde das Halterkonzept sowie die Breite von 254 mm des PSU-Kanals des Airbus A320 als Beispiel übernommen. In Kabinenlängsrichtung wurde eine möglichst

schmale Bauweise von 90 mm erreicht, da dies zu Lasten des bereits knappen Platzangebots geht. Für das im BILD 7 rechts dargestellte Konzept wurden zwei individuell ansteuerbare Lautsprecher vom Typ VISATON BF 45S gewählt. Mit dieser Kombination aus Lautsprechern und Verstärker ist es möglich, einen Schalldruckpegel von bis zu 84 dB in einem Meter Abstand zu erzeugen. Als Mikrofone werden zwei TDK ICS-40730 eingesetzt. Die Mikrofone sind jeweils an den äußeren Ecken platziert. Das Gesamtgewicht des gesamten Moduls mit zwei Lautsprechern beträgt 271 g [36]. Damit ist das Gewicht des PSU-Moduls inkl. zweier Lautsprecher, Mikrofone und Audio-Modul deutlich kleiner als das Gewicht des Lautsprechers von Ultra Electronics.

Im BILD 8 ist die Softwarearchitektur eines Audio-Moduls gezeigt. Da für eine aktive Regelung das Modell der Sekundärstrecke \hat{G} bekannt sein muss, muss zunächst die Sekundärstrecke messtechnisch ermittelt werden. Das Audio-Modul kann hierzu in zwei verschiedenen Modi betrieben werden: die Sekundärstreckenkalibrierung und die aktive Regelung. Die Sekundärstreckenkalibrierung ist vor der aktiven Regelung einmalig vor Inbetriebnahme des Systems durchzuführen. In beiden Betriebsmodi sind die Fehlersignale der Mikrofone notwendig. Im Analog-Digital-Wandler werden daher die beiden Signale der an das Audio-Modul angeschlossene Mikrofone mit der Abstrakte $1/\Delta t$ gewandelt und der Zeit-Frequenzbereichswandlung zugeführt. Am Ausgang steht der Teilvektor $\mathbf{e}'(n) = [e_i(n); e_{i+1}(n)]^T$ der Fehlersignale beider Mikrofone im Frequenzbereich zur Verfügung. Anschließend wird dieser Teilvektor mit dem Fehlersignalvektor der Mikrofone der anderen Audio-Module $\mathbf{e}''(n)$ zum Fehlervektor $\mathbf{e}(n)$ kombiniert. Die Elemente des Teilvektors $\mathbf{e}''(n)$ werden dabei über das Netzwerk bezogen.

Der Fehlervektor $\mathbf{e}(n)$ wird anschließend der Sekundärstreckenkalibrierung und der aktiven Regelung zugeführt. Die Sekundärstreckenkalibrierung steuert die beiden am Modul angeschlossenen Lautsprecher so an,

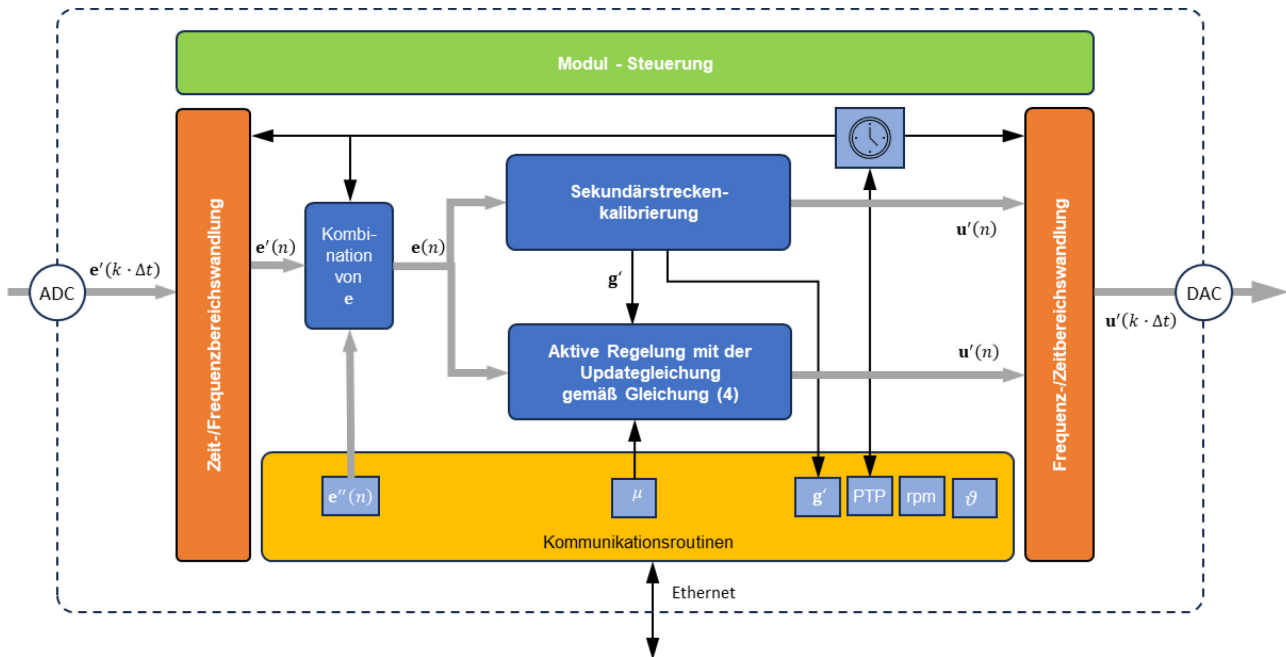


BILD 8. Zusammenwirken der einzelnen Softwarekomponenten in einem Audio-Modul

dass über ein LMS-Verfahren das Sekundärstreckenmodell g' identifiziert werden. Beim Sekundärstreckenmodell g' handelt es sich um die zu den entsprechenden Lautsprechern gehörenden Zeilen der Übertragungsmatrix \hat{G} . Nach der Sekundärstreckenkalibrierung wird g' über das Netzwerk an ein Master-Modul gesendet, um dort die Schrittweite μ zu berechnen. Die Schrittweite μ sowie g' werden dann der aktiven Regelung zugeführt, um dort mit Hilfe der Iterationsgleichung (4) die Lautsprecheransteuerungen zu berechnen. Die Lautsprecheransteuerung $u'(n)$ wird anschließend mittels Frequenz-Zeitbereichswandlung konvertiert und dem Digital-Analog-Wandler zugeführt.

Im nächsten Entwicklungsschritt wird die Software mit Hilfe von Matlab®/Simulink® modellbasiert entwickelt und mittels Matlab® Embedded Coder auf die Hardware portiert.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der hier vorliegenden Veröffentlichung wurden die Herausforderungen und Lösungsansätze für die Integration aktiver Lärminderungs-systeme in zukünftige Propellerflugzeuge skizziert. Weiterhin wurde ein erstes Konzept eines intelligenten Audio-Moduls eines verteilten ANC-Systems vorgestellt.

In weiterführenden Arbeiten soll insbesondere die Entwicklung der Software des verteilten ANC-Systems vorangetrieben werden. Ferner ist zu analysieren, inwieweit der Netzwerkverkehr der anderen Kabinenapplikationen die Echtzeitregelung des ANC-Systems beeinflusst. Zum Abschluss des CATECO Forschungsprojektes ist geplant, den Einsatz eines verteilten ANC-Systems im Acoustic Flight Lab im ZAL Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung zu demonstrieren.

8. DANKSAGUNG

Die hier vorliegende Arbeit ist im Rahmen des Forschungsprojekts CATECO - Cabin Acoustics of hearT of ECO-responsibility, gefördert durch das Förderprogramm Green Aviation Technologie der Investitions- und Förderbank Hamburg, entstanden. Die Projektpartner sind die AIRBUS Operations GmbH sowie das DLR Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt.

LITERATUR

- [1] M. A. Rendón, C. D. Sánchez, J. Gallo und A. H. Anzai, „Aircraft Hybrid-Electric Propulsion: Development Trends, Challenges and Opportunities,“ *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Bd. 32, pp. 1244-1268, 2021.
- [2] P. Alves, M. Silvestre und P. Gamboa, „Aircraft Propellers - Is There a Future?,“ *Energies*, Bd. 13, Nr. 16, 11 August 2020.
- [3] Aviation, Southend, „TRIP REPORT #37 | Stobart Air ATR 72 | Dublin to Kerry | EI3204,“ [Online]. Available: <https://youtu.be/phdouFxDrmk>. [Zugriff am 8 Februar 2023].
- [4] D. P. Raymer, *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, 4th Edition, Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [5] EASA, *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes*, Köln, 2023.
- [6] T. Ibrahim, „Kabinenlärmanalyse von Propellerflugzeugen auf Basis von YouTube-Videoclips,“ Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2023.
- [7] Heart Aerospace, „Heart Aerospace - Electrifying regional air travel,“ [Online]. Available: <https://heartaerospace.com/>. [Zugriff am 18 August 2023].

- [8] Universal Hydrogen Co., „Universal Hydrogen Successfully Completes First Flight of Hydrogen Regional Airliner,“ [Online]. Available: <https://hydrogen.aero/press-releases/universal-hydrogen-successfully-completes-first-flight-of-hydrogen-regional-airliner/>. [Zugriff am 17 August 2023].
- [9] Universal Hydrogen Co., „Universal Hydrogen Inaugurates Engineering Design Center and European Headquarters in Toulouse, France,“ [Online]. Available: <https://hydrogen.aero/press-releases/universal-hydrogen-inaugurates-engineering-design-center-and-european-headquarters-in-toulouse-france/>. [Zugriff am 17 August 2023].
- [10] CFM International, „CFM Rise Program,“ CFM, 2021.
- [11] G. Atanasov, „Aircraft Modeling Results, Short-Range Turbo Prop Baselines (D250 321TP 2040, D220 320TP 2040),“ DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Hamburg, 2022.
- [12] M. Möser, Technische Akustik, Berlin: Springer Vieweg, 2015.
- [13] I. M. Goldsmith, „A Study to Define the Research and Technology Requirements for Advanced Turbo/Propfan Transport Aircraft,“ NASA, Long Beach, 1981.
- [14] F. Langfeldt, A. Khatokar und W. Gleine, „Plate-type acoustic metamaterials with integrated Helmholtz resonators,“ Applied Acoustics, Nr. 199, 2022.
- [15] F. Langfeldt und J. Cheer, „Evaluation of Active Control Concepts for a Self-adjusting Membrane-type Acoustic Metamaterial,“ in Deutsche Jahrestagung der Akustik - DAGA 2022, Stuttgart, 2022.
- [16] R. Hinchliffe, „Tonal Active Control in Production on a Large Turbo-Prop Aircraft,“ in International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, 2002.
- [17] D. Palumbo, R. Cabell, B. Sullivan und J. Cline, „Active Structural Acoustic Control of Interior Noise on a Raytheon 1900D,“ NASA, 2000.
- [18] S. Johansson, „Comparison of Multiple- and Single-Reference MIMO Active Noise Control Approaches Using Data Measured in a Dornier 328 Aircraft,“ International Journal of Acoustics and Vibrations, Bd. 5, Nr. 4, pp. 77-88, 2000.
- [19] Airbus Canada Limited Partnership, „A220 - Airport planning publication, Issue No. 031,“ Mirabel, 2022.
- [20] K. Kochan, Robuste Aktive Schallreduktion in Flugzeugen, Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2009.
- [21] K. Kochan, D. Sachau und H. Breitbach, „Robust active noise control in the loadmaster area of a military transport aircraft,“ Journal of the Acoustical Society of America (JASA), Bd. 129, pp. 3011-3019, 2011.
- [22] Ultra Electronics Ltd., „Active Noise and Vibration Control: Increasing Passenger Comfort,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.ultra-pcs.com/media/3534/pcs-active-noise-vibration-control-v2.pdf>. [Zugriff am 16 August 2023].
- [23] Ultra Electronics Ltd., „ANVS Troubleshooting Quick Reference Cards,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.ultra-pcs.com/media/3464/anvs-qrc-issue-2-new.pdf>. [Zugriff am 16 August 2023].
- [24] C. Köhne, D. Sachau, K. Renger und M. Wandel, „Active Structural Acoustic Control (ASAC) im Airbus A400M,“ in DAGA - Jahrestagung für Akustik, Aachen, 2016.
- [25] U. Emborg, „Cabin Noise Control in the Saab 2000 high-speed turboprop aircraft,“ in ISMA - International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, 1998.
- [26] J. Mixson und J. Wilby, „Interior Noise,“ [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19920005567/downloads/19920005567.pdf>. [Zugriff am 22 August 2023].
- [27] T. F. L. Simsek, „Numerische und experimentelle Voruntersuchungen für ein System zur aktiven Schallreduktion in Propellerflugzeugen,“ in Deutsche Jahrestagung der Akustik, Hamburg, 2023.
- [28] S. Algermissen und M. Misol, „Experimental Analysis of the ACASIAS Active Lining Panel,“ in European Conference on Multifunctional Structures, Barcelona, 2020.
- [29] M. Arena, A. De Fenza und M. Di Giulio, "Progress in studying passive and active devices for fuselage noise reduction for next generation turboprop," CEAS Aeronautical Journal, vol. 8, pp. 303-312, 2017.
- [30] G. Aurillob, „Fuselage Frame Vibration Control Using Magnetostrictive Hybrid Dynamic Vibration Absorbers,“ in EURONOISE, Naples, 2003.
- [31] D. Rossetti und M. Norris, „A comparison of actuation and sensing techniques for aircraft cabin noise control,“ Noise Control Engineering Journal, Bd. 44, Nr. 1, pp. 53-58, 1996.
- [32] IEEE 802.1DP and SAE AS6675, Aerospace TSN Use Cases, Traffic Types and Requirements, Rev. 0.6, 2021.
- [33] W. Fischer, „TSN Use-Case Commercial Aircraft Cabin, 802.1 TSN – P802.1DP,“ 2021. [Online]. Available: <https://1.ieee802.org/tsn/802-1dp/>. [Zugriff am 16 August 2023].
- [34] OPC Foundation, „Unified Architecture: Part 14 Pub-Sub - OPC UA Online Reference,“ 2023. [Online]. Available: <https://reference.opcfoundation.org/Core/Part14/v104/docs/>. [Zugriff am 16 August 2023].
- [35] D. Bruckner, R. Blair und M. Stănică, „OPC UA TSNA new Solution for Industrial Communication,“ Computer Science, 2018.
- [36] A. Abba, „Integrationskonzept für ein Modul zur aktiven Schallreduktion im PSU-Kanal,“ Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2023.