

Antischall und Antivibration

Abstract:

Grundlagen der aktiven Regelungstechnik für akustische und vibratorische Problemstellungen: Rocket Science präsentiert eine kurze Übersicht über regelungstechnische und physikalische Anforderungen an Regelkreise, sowie die wichtigsten Regler und deren möglichen Einsatzgebiete.

Bei tiefen Frequenzen lassen sich Luftschall und Vibrationen mittels aktiver Regelungstechnik bekämpfen. Aktuell marktreife Anwendungen sind zum Beispiel der bekannte ‚active noise control‘ Kopfhörer von Bose, oder aktive Antivibrationssysteme in Helikoptern¹. In der Praxis steht eine Vielzahl von Reglertypen zur Verfügung, welche alle unterschiedliche Vor- und Nachteile haben.

Aus der puren Notwendigkeit heraus erarbeiteten wir während der letzten fünf Jahre diverse Regler, Sensoren, Simulatoren und Signalverarbeitungshardware, welche der Physik der komplexen Problemstellungen genügen.

Viele Projekte beginnen mit einer Bedarfsanalyse, in welcher der Kunde die Problemstellung klar priorisiert. Falsche Vorstellungen werden ausgeräumt - denn die aktive Regelungstechnik ist zwar per se universell einsetzbar, ist aber aus physikalischen Gründen nur im tieffrequenten Bereich sinnvoll umsetzbar.

In einer Machbarkeitsanalyse werden daher die wichtigsten physikalischen Anforderungen untersucht, um herauszufinden, ob eine gegebene Problemstellung prinzipiell lösbar ist und welcher Reglertyp verwendet werden soll. Anhand dreier Beispiele mit Problemstellungen aus der Eventakustik, der Raumakustik und der Vibrationskontrolle lässt sich der aktuelle Stand der Entwicklung präsentieren.

Mögliche Anwendungsgebiete finden sich aktuell in der Raum- und Bauakustik, in der Eventakustik und der Industrie- und Fahrzeugakustik.

¹J. Mendoza, K. Chevva, F. Sun, A. Blanc, and S. B. Kim, 2014, Active Vibration Control for Helicopter Interior Noise Reduction Using Power Minimization, United Technologies Research Center, [<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140005522.pdf>]

Antischall und Antivibration

Initiale Idee und Problemstellungen:

- ✦ In der Raumakustik, der Bauakustik und im Schall- und Lärmschutz bestehen für tieffrequente Schallanteile Probleme (z.B. Resonanzen, mangelhafte Schalldämmung etc).
- ✦ In Simulationen sind für diesen Frequenzbereich wellentheoretische Methoden (BEM, FDTD, FEM...) anzuwenden, einfache Berechnungsmethoden wie empirische Ausbreitungsmodelle oder ray-tracer liefern für viele Fragestellungen keine zuverlässigen Resultate.
- ✦ Für viele Aspekte der Akustik sind im Tieftonbereich zusätzliche und oft komplexere Beurteilungen und Massnahmen notwendig, welche ergänzend zur ‚klassischen‘ Akustik bei höheren Frequenzen sind.

Auslöschung von Schall durch Schall

Komplementär zur klassischen Akustik in mittleren und hohen Frequenzen bietet sich (aktuell ausschliesslich) für den tiefen Frequenzbereich von 5 Hz bis ca 150 Hz die Anwendung von aktiven Schall- und Vibrationsminderungsmassnahmen (ANVC, active noise and vibration control) an.

Geeignete Problemstellungen sind in etwa:

- ✦ Aktiver Lärmschutz für Grosskonzerte
- ✦ Aktiver Lärmschutz für Motoren und HKLS-Anlagen mit dominant tieffrequenten Emissionen
- ✦ Korrektur von Frequenzgangverzerrungen von Wiedergabesystemen in Tonstudios
- ✦ Erhöhung des Schalldämmwertes bei tiefen Frequenzen
- ✦ Lösungen zum ‚Brummtophonomen‘ - sofern akustisch messbar
- ✦ Industrieakustik (Windräder, BHKWs, etc)

Frequenz- und Signalabhängigkeit

Tiefe und hohe Frequenzen

Um einen breitbandig wirksamen Regler zu bauen, muss dieser für alle Frequenzen im gewünschten Einsatzbereich Amplitude und Phasenlage des Korrektursignals einstellen können. Konkret geschieht dies in einem Convolver (Faltungsalgorithmus), welcher mittels eines adaptiven FIR Filters (finite impulse response) das Originalsignal per Impulsantwort zum Korrektursignal filtert. Problematisch dabei ist, dass für die Faltung bei hohen Frequenzen (im Bereich, in dem das ANVC nicht sinnvoll eingesetzt werden kann) eine hohe Filterauflösung besteht und im tieffrequenten Bereich (wo das ANVC sinnvoll eingesetzt werden kann) die Filterauflösung schlecht wird.

Nyquist Theorem und Sampling

Um die Filterauflösung zu verbessern, kann bei der Digitalisierung der Signale eine kleinere Abtastrate verwendet werden, was aber automatisch die Signallaufzeit der Signalbearbeitung und die Phasenauflösung der Regler verschlechtert.

Periodische und stochastische Signale

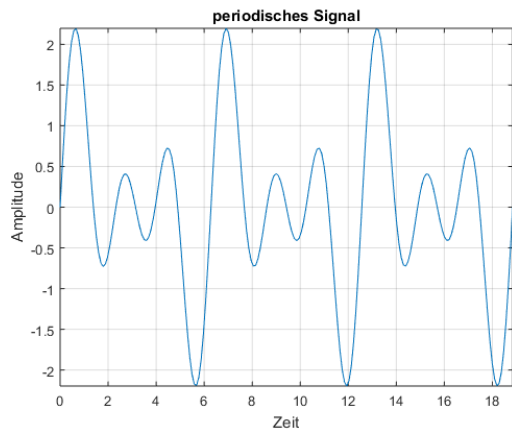


Abbildung 1: Periodisches Signal

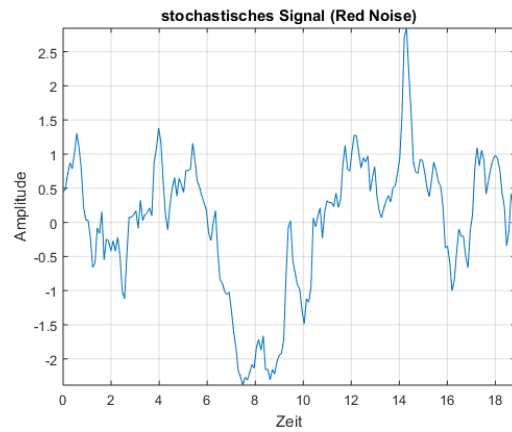


Abbildung 2: Stochastisches Signal (,rotes' Rauschen)

Stochastische Signale werden durch zufällige Prozesse erzeugt (z.B. das Rauschen einer Heizung) und können nicht, respektive nur statistisch vorausgesagt werden (z.B. Frequenzspektrum, Lautstärkepegel). Jedoch ist es nicht möglich (auf Grund der fehlenden Autokorrelation), dass die zukünftige Wellenform abgeschätzt werden kann.

Periodische Signale enthalten im Zeitbereich repetitive Signalformen. Die Signalform lässt sich für die unmittelbare Zukunft sehr genau vorausbestimmen.

Hardware

Anfängliche Fehlversuche erlauben die Definition von Anforderungen an einen funktionalen Algorithmus:

- ☛ Kleine Latenz der Signalbearbeitung und ,schnelle' (möglichst impulstreue Aktuatoren (Luftschall- oder Vibrationsaktuatoren)
- ☛ Stabil und preiswert
- ☛ FIR Kernel mit hoher Auflösung im tieffrequenten Bereich
- ☛ Grosse Rechenleistung

Erste Tests mit einer Speedgoat (Real-Time Target Computer für Simulink Realtime) zeigten klar, dass das Problem berechenbar und in quasi-Echtzeit lösbar ist - jedoch mit einem Hardwareaufwand von ca 15'000 CHF pro aktivem Regler nicht marktauglich.



Abbildung 3: speedgoat real-time target machine



Abbildung 4: RSc own DSP

Seit 2013 entwickeln wir aus diesem Grund eigene Hardware, welche schon bei Kleinserien preiswert erstanden werden kann. Der verwendete DSP (digitale Signalprozessor) ist sehr versatil einsetzbar und kann innerhalb kürzester Zeit an eine bestimmte Problemstellung angepasst werden.

Algorithmik

Feedforward vs. Feedback Regler

Prinzipiell sind zwei unterschiedliche Ausführungen der Regelung denkbar:

Feedforward controller:

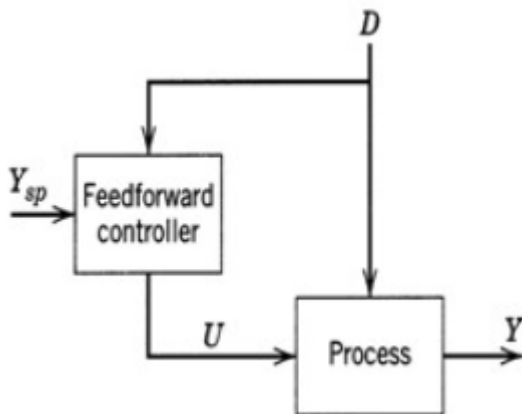


Abbildung 5: Feedforward Regler

Feedback controller:

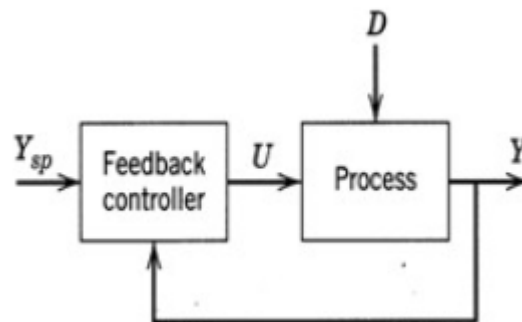


Abbildung 6: Feedback Regler

Legende: D = Störung, U = Kontrollsignal, Y = Sollwert (hier Fehlersignal), Y_{sp} = Sollwert (hier null)

Feedforward Regler: Diese Filtern das Signal adaptiv und in Abhängigkeit aus dem Fehlersignal aus einem Referenzsignal, welches durch den Regler per Definition nicht verändert wird (keine Rückwirkung).

Feedback Regler: Der Regler benutzt das Fehlersignal, welches zum Konditionieren des Filters benutzt wird auch als Referenzsignal. Die Wirksamkeit des Reglers ist beschränkt, da immer ein Restfehler bleibt, ansonsten fehlte das Eingangssignal in den Regler. Generell lässt sich sagen, dass

- ☛ je besser der Algorithmus funktioniert, desto schwächer wird das Eingangssignal in den Regler und desto grösser die Verstärkung in der Regelschleife
- ☛ es ist ein relevanter Restfehler einzuplanen, damit der Regler stabil läuft [kein Oszillieren, keine Divergenz].

Adaptiv versus statisch

Beide Reglertypen können entweder statisch oder adaptiv betrieben werden:

Die statische Variante eignet sich für unveränderliche Problemstellungen, welche nicht von zB meteorologischen Einflüssen abhängig sind. Dieses Kriterium ist über kurze Distanzen oft erfüllt.

Statische Regler können entweder manuell parametrierbar werden (im einfachsten Fall reicht ein simpler P-Regler) oder per one-shot Identifikation der im Regelkreis vorhandenen Transferfunktionen (Amplitudenfrequenzgang und Phasenfrequenzgang) automatisch parametrierbar werden.

Pros:

- ✦ Einmalige Parametrierung erzeugt ein klar beschreibbares und bekanntes Regelsystem
- ✦ Der Regler hat einen Eingang (Referenzsignal) und einen Ausgang (Reglerausgang).
- ✦ Schnelle Inbetriebnahme

Cons:

- ✦ Der Regler löst nur konstante Probleme, falls sich das Problem oder irgendeine Komponente des Regelkreises ändert, reduziert dies die Wirksamkeit massgeblich (im schlimmsten Fall wird das bestehende Problem sogar verstärkt).

Adaptive Regler sind komplexer im Betrieb und müssen dauernd überwacht werden. Ihr Mehrwert besteht darin, sich einem veränderlichen Problem fortlaufend anzupassen. Dies kann für eine veränderliche Problemstellung oder einen nicht konstanten Regelkreis (auch beides gleichzeitig) durchgeführt werden.

Pros:

- ✦ Der Regler passt sich dem Problem fortlaufend an. Da der Regler auf der Abbildung zweier Impulsantworten (in Convolvern) basiert, ist theoretisch jedes kausale Problem lösbar.
- ✦ Die Abbildung der Impulsantworten funktioniert nur für kausale Systeme, bei welchen das Fehlersignal eine gewisse Kohärenz zum Referenzsignal hat. Dies macht den Regler auch gleich selektiv und unempfindlicher gegenüber Störsignalquellen.

Cons:

- ✦ Ein adaptives System kann nicht eindeutig beschrieben werden und bedarf der stetigen Überwachung aller relevanten Parameter.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass sich für die vielen Aufträge (welche oft Prototyp-Charakter haben) der folgende Algorithmus² am besten eignet. Es handelt sich um einen adaptiven Regler, welcher sich auf Grund der Fehlermessung im Aufpunkt dem Problem fortlaufend anpasst:

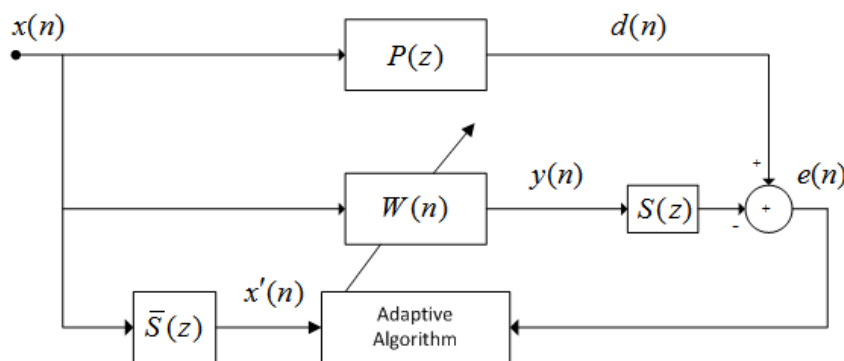


Abbildung 7: Error corrected, adaptive feed forward controller

Legende:

$x(n)$: verursachendes Störsignal
 $d(n)$: eintreffendes Störsignal
 $P(Z)$: Störsignal-Übertragungsfunktion, wird in $W(n)$ abgebildet
 $S(z)$: Regelkreis-Übertragungsfunktion, wird in $S(z)$ abgebildet
 $y(n)$: Korrektursignal
 $e(n)$: Fehlersignal

- ✦ Modifizierter LMS (least mean squares) Algorithmus
- ✦ Adaptiv - passt sich dem Problem fortlaufend an (480-48000 sec⁻¹)
- ✦ Bildet Impulsantwort der Störsignal-Übertragungsfunktion nach
- ✦ Optimiert für tiefe Frequenzen
- ✦ Impulsantwort bis ca 500 msec realisierbar
- ✦ Adaption steuerbar und konditional vom Steuersignal abhängig
- ✦ Kohärenz-sensitiv
- ✦ Statische (one-shot) oder auch adaptive Implementation der Sekundärpfadfehler-kompensation möglich

Eine Anekdote:

In der Praxis hat sich gezeigt, dass bestenfalls mit adaptiven feedforward Reglern gearbeitet werden kann.

Dies zeigte sich eindrücklich am Open Air Basel 2015: Beschallungsmässig gut ausgerüstet und mit einem statischen und manuell parametrierbaren Regler im Gepäck wurden die nachbarschaftlichen Lärmimmissionen im tieffrequenten Bereich gemindert.

Beim Einstellen des Reglers war es ca 16 Uhr - die aufwendige Arbeit wurde auf Grund der sommerlichen Temperaturen parallel zum Verzehr eines leckeren Glaces erledigt. Zu dieser Zeit wurde die Überprüfung der Wirksamkeit der aktiven Schallauslöschung mittels Fehlersignal-Analyse und Transferfunktionsmessung durchgeführt. Die Messung der Transferfunktion liess sich (um die Sache noch ein bisschen zu komplizieren) nur durchführen wenn der Regler einen über dem Hintergrundgeräusch relevanten Fehler produzierte, was im Anwendungsfall natürlich nicht erwünscht ist.

² Hansen C., Snyder, S., 2013, Active Control of Noise and Vibration, 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, pp. 420-425

Nach circa einer Stunde war das System betriebsbereit und lieferte eine dB(C) Reduktion von gut 10 dB, was einer Reduktion von 90% der Schallenergie gleichkommt.

Kurz vor den ersten Konzerten querte eine Regenfront den Veranstaltungsplatz, wobei die Temperatur um 7 Grad Celsius sank. Auf Grund des Abstandes des ANC-Lautsprechersystems zum Hauptsystem (75 m) und der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit (ca. 0.6 m/s pro Grad Celsius) verlängerte sich die Schalllaufzeit zwischen Quelle und ANC-System um etwa 3 ms, was bei 100 Hz einem Phasenwinkel von ca 120 Grad entspricht.

Das ANC-Lautsprechersystem war somit komplett falsch parametrierung - statt mit einer Phasendifferenz von 180 Grad zum Hauptsystem arbeitete es mit einer Phasendifferenz von circa 60 Grad, was einer Addition von 4.8 dB entspricht. Leider lauter.

In einer halsbrecherischen Aktion musste das komplette System neu parametrierung werden.

Beispielhaft drei Anwendungsfelder und deren physikalischen Tücken:

Active noise control für Grossbeschallungssysteme



Abbildung 8: Hauptbeschallungsanlage Festival



Abbildung 9: ANC Array Festival (ca 60 kW)

Nyquist Theorem zum zweiten

Bei der Luftschallminderung gilt für Korrektur-Lautsprecher, dass diese in Arrays integriert werden müssen, da sonst die Auslöschung oft nur an einem kleinen Punkt (am Ort der Fehlermessung) stattfindet.

Generell gelten für Grossanwendungen der Luftschallminderung folgende Anforderungskriterien:

- ✦ Korrektur-Lautsprecher müssen den gesamten zu regelnden Frequenz- und Dynamikbereich verzerrungsfrei wiedergeben können.
- ✦ Lautsprecherdistanzen im Array sollen das Nyquist-Theorem erfüllen (Distanz kleiner als $\lambda/2$). Im Weiteren gelten die Regeln des ‚acoustic antenna design‘.
- ✦ Zusätzlich soll die Positionierung der Lautsprecher einem der folgenden Kriterien genügen:
 - ✦ Ein oder mehrere Lautsprecher möglichst nahe an der Quelle
 - ✦ Ein oder mehrere Lautsprecher möglichst nahe am Aufpunkt (Empfangspunkt)
 - ✦ Mehrere Lautsprecher, welche als Array das Abstrahlverhalten der Quelle nachbilden in beliebigem Abstand zur Quelle oder zum Aufpunkt

Geometrische Aspekte

Polardiagramme: Um flächendeckend Schall minimieren zu können, muss das verwendete ANC-Array zwingend das gleiche geometrische Abstrahlverhalten wie die Störschallquelle abbilden³ (Huygens-Fresnel Prinzip). Andernfalls findet die Auslöschung zwar an einigen Punkten statt, jedoch findet in anderen Richtungen eine Erhöhung der tieffrequenten Schalldruckpegel statt.

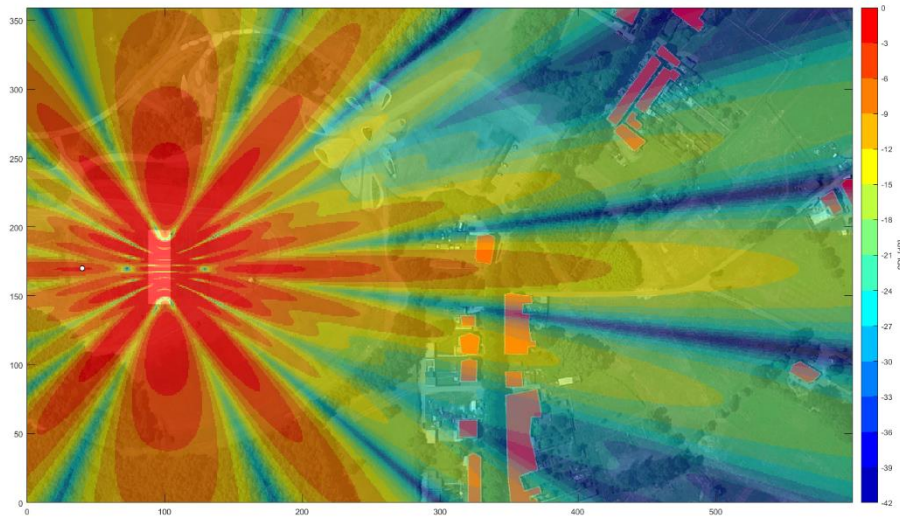


Abbildung 10: Abstrahlverhalten einer grossen Openair Beschallungsanlage (50 Hz)

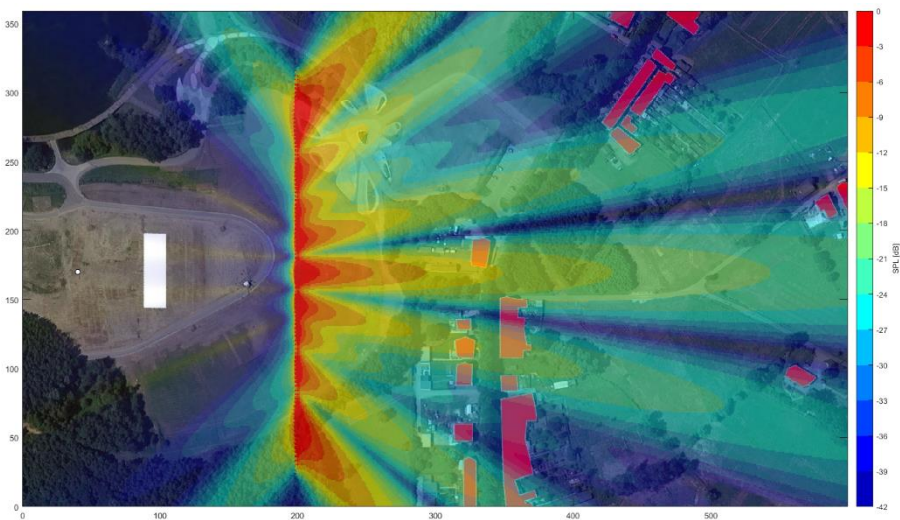


Abbildung 11: Abstrahlverhalten einer grossen Openair Beschallungsanlage (50 Hz)

Ausbreitungsrichtung

Der Gegenschall soll ausschliesslich in der Ausbreitungsrichtung des Störschalls abgestrahlt werden. So finden auch keine nennenswerten Immissionen auf die kulturelle Nutzung (Dancefloor) statt.

Abstandsabhängigkeit

³ Frick, C., Nüesch, P., 2017, A study on parametrization and implementation of subwoofer arrays for active noise control in event noise management, Proceedings of the Institute of Acoustics

Je nach Wahl der Standorte der Fehlermessmikrofone (dieses muss sich für Quellen und Löschung im Fernfeld befinden), lässt sich so für eine kleine bis sehr grosse Distanz hinter dem ANC-Lautsprecher-system eine sehr gute Effizienz erreichen.

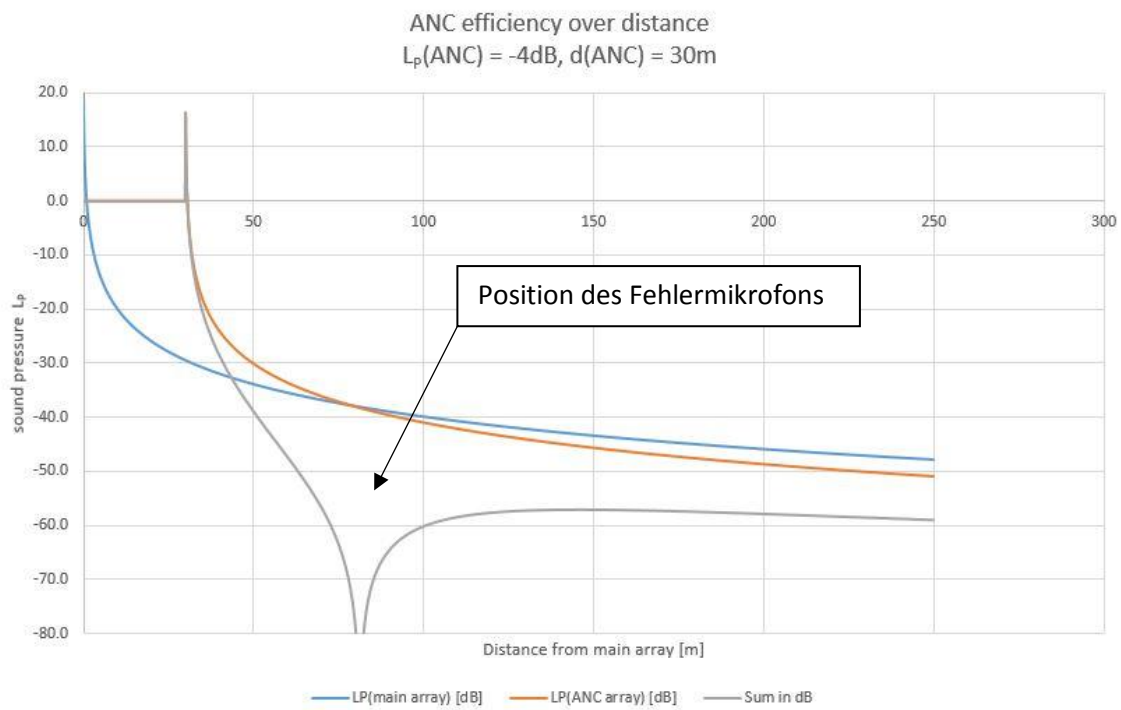


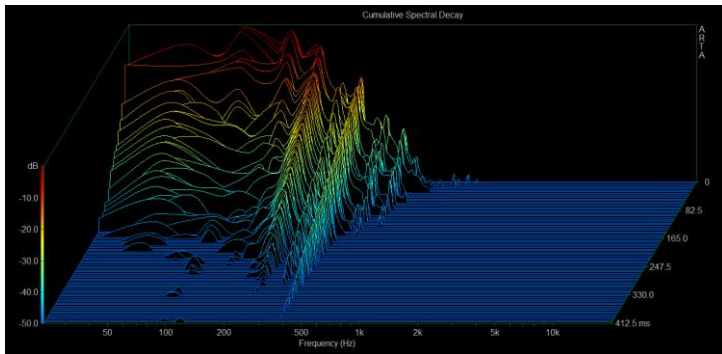
Abbildung 12: ANC Minderungseffizienz als Funktion des Abstandes zur Quelle

Raummodenunterdrückung

In Räumen und in Bauteilen treten unerwünschte Resonanzen auf (Raummoden, Plattenresonanzen und dergleichen), welche aktiv bedämpft werden können.

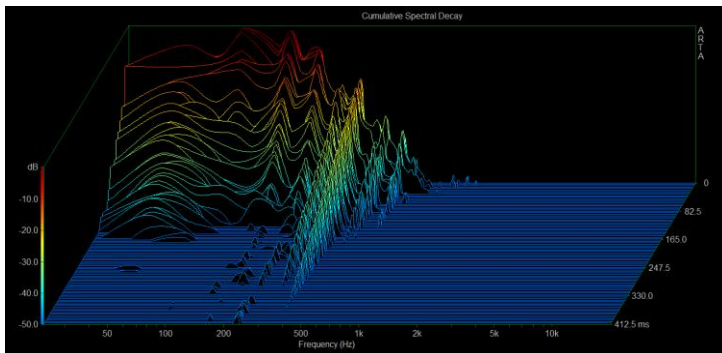
Für aktive Schallminderungsmaßnahmen gegen Resonanzen gelten folgende Anforderungen:

- ✿ Lautsprecher, welche als Schalldruckaktuatoren verwendet werden sollen sich an Positionen mit maximalem Schalldruckpegel (lokales Maximum) befinden.
- ✿ Lautsprecher, welche als Schallschnelleaktuatoren verwendet werden, sollen sich an Positionen mit maximaler Schallschnelle (lokales Maximum) befinden.



Das Wasserfalldiagramm eines Messraumes zeigt mehrere Resonanzen.

Abbildung 13: Zerfallsdiagramm eines modalen Messraumes



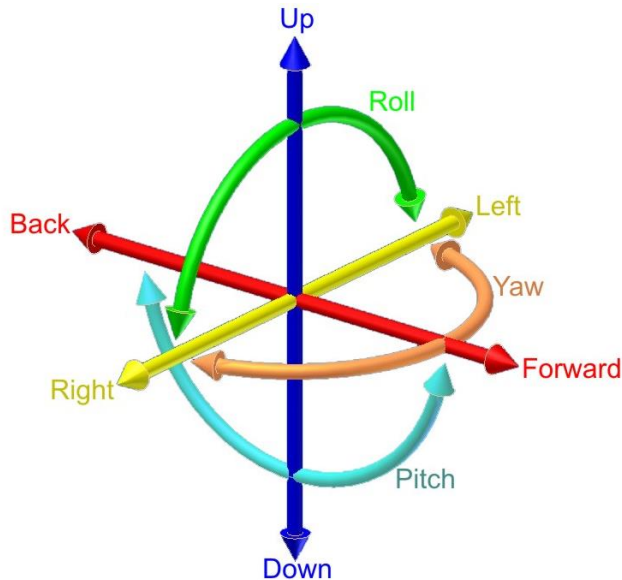
Durch einbringen eines feed back Reglers kann die Resonanz bei 220 Hz selektiv gemindert werden. Für dieses Experiment wurde ein schmalbandiger statischer Regler verwendet.

Abbildung 14: wie Abbildung 13, mit geminderter Resonanz bei 220 Hz

Active vibration control am dreidimensional schwingenden starren Körper

6-degrees-of-freedom Problem

Ein beweglicher starrer Körper hat 6 vibratorische Freiheitsgrade. Dies sind drei translatorische, orthogonale und drei rotatorische, orthogonale Freiheitsgrade.



Im dreidimensionalen Raum sind demnach für jede Sensorposition ein translatorischer und ein rotatorischer Freiheitsgrad superpositioniert, welche durch den Sensor als Summenvibration ausgelesen werden.

Abbildung 15: 6 Freiheitsgrade (Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Sechs_Freiheitsgrade, abgerufen am 04.06.2018)



Abbildung 16: Ein Versuchsaufbau zur Messung und Orthogonalisierung zweier Sensorssignale in getrennte translatorische und rotatorische Bewegungskomponenten.

Abbildung 16: 2 DOF Vibration Modell

In der Regelungstechnik sind die zwei superpositionierten Freiheitsgrade je Raumdimension voneinander zu trennen, da die Gegenbewegungen durch unterschiedlich implementierte (und für den jeweiligen Freiheitsgrad spezifische) aktive Aktuatoren / Tilger ausgeführt werden müssen.

Dies kann durch eine einfache Orthogonalisierungsmatrix oder unter gewissen Annahmen noch einfacher bewerkstelligt werden⁴.

⁴ Tellenbach, A., Zurbrügg, T., 2017, Aktive Vibrationskontrolle von Schwingungen mit mehreren Freiheitsgraden in einer Ebene, Projektarbeit ZHAW