

## Positionsoptimierung für ANR - Systeme

Sten Böhme<sup>1</sup>, Delf Sachau<sup>2</sup> und Harald Breitbach<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Helmut-Schmidt-Universität, 22043 Hamburg, Deutschland, Email: [stenboehme@hsu-hh.de](mailto:stenboehme@hsu-hh.de)

<sup>2</sup> Helmut-Schmidt-Universität, 22043 Hamburg, Deutschland, Email: [sachau@hsu-hh.de](mailto:sachau@hsu-hh.de)

<sup>3</sup> Abteilung für Akustik, Airbus Deutschland, Kreetslag 10, 22129 Hamburg, Deutschland

### Einleitung

Verschiedene Systeme und Strategien wurden entwickelt, um den Lärmpegel innerhalb von Luftfahrzeugzellen zu minimieren. Am gebräuchlichsten ist die Anwendung von passiven Methoden, wie das Auskleiden mit absorbierenden und dämpfenden Materialien. Allerdings ist es im Flugzeugbau notwendig so leicht wie möglich zu bauen, deswegen rücken aktive Maßnahmen zu Schallreduktion zunehmend in den Fokus der Forschung und Entwicklung. Die Leistungsfähigkeit solcher aktiven Systeme ist im besonderen Maße abhängig von der Positionierung der Aktuatoren und Sensoren [1]. Allerdings gibt es eine Unzahl an Alternativen für die Anordnung der Komponenten in einem dreidimensionalen Raum. Durch experimentelle Arbeit ist dieses Optimierungsproblem kaum zu lösen, deshalb werden numerische Methoden angewendet. Dieses Manuskript beschreibt die Anwendung eines hybriden naturanalogen Algorithmus, das „Cooperative Simulated Annealing“ (COSA), für die Positionsoptimierung eines „Active Noise Reduction“ (ANR) - Systems für das propellergetriebene Militärflugzeug A400M.

### Optimierungsproblem

In der A400M soll der Lärmpegel innerhalb des Lademeisterbereiches (LMA) auf die, in Arbeitsschutzbestimmungen geforderten, Schallpegel gesenkt werden, siehe Abbildung 1. Dabei handelt es sich um ein halboffenes Volumen. Der Lademeister ist verantwortlich für die Verladung und Überwachung von Transportgut. Der Lärmpegel innerhalb des Laderaums kann während des Fluges bis zu 110dB(A) erreichen. Hauptlärmquellen sind die Propellerblätter, diese streichen mit einer bestimmten Blattfolgefrequenz am Rumpf des Flugzeuges vorbei. Dabei regen sie den Flugzeugrumpf zum Schwingen an. Der verursachte Innenlärm entsteht im niederfrequenten Bereich unter 500 Hz. Die Blattfolgefrequenz und deren ersten zwei Harmonische werden in der Optimierung berücksichtigt[2]. Des Weiteren können die Lautsprecher und Mikrofone nur an bestimmten diskreten Stellen platziert werden. Diese werden aus Sicherheits- und Konstruktionsgründen von dem Flugzeughersteller vorgegeben. Zu dem werden für die Optimierung folgende Bedingungen formuliert:

1. Einhaltung des maximalen Ohrdruckes  $p_{max}$
2. Einhaltung der maximalen Ansteuerung der Lautsprecher  $q_{max}$
3. minimaler Energieverbrauch des Systems  $P_{elec}$

Das Positionierungsproblem kann als diskretes beschränktes kombinatorisches Optimierungsproblem klassifiziert werden [2].

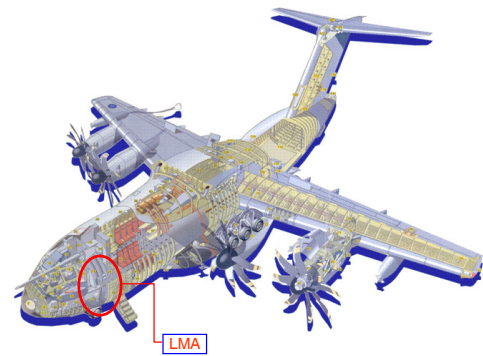


Abbildung 1: Ort der LMA in der A400M

### Akustische Grundlagen

Ein ANR – System besteht im Wesentlichen aus Referenzmikrofonen, die an einen Regler angeschlossen sind und den Primärlärm detektieren. Der Regler wiederum berechnet die Ansteuerungen für mehrere Lautsprecher, die ein sekundäres Schallfeld generieren, das den Primärlärm durch Superposition auslöschen soll. Der Regelungserfolg kann an den Referenzmikrofonen gemessen werden. Als Regelalgorithmus wird ein filtered x LMS- (engl.: least mean square) Algorithmus verwendet [4]. Der komplexe Druckvektor  $\underline{p}_M$  an den Mikrofonen und der komplexe Druckvektor an den Ohren  $\underline{p}_O$  kann beschrieben werden durch:

$$\begin{aligned}\underline{p}_M(\mathbf{L}, \mathbf{M}) &= \mathbf{M}(\underline{p}_P + \mathbf{Z}_S \mathbf{L} \underline{q}_S), \\ \underline{p}_O(\mathbf{L}, \mathbf{M}) &= \mathbf{M}(\underline{p}_{PO} + \mathbf{Z}_{SO} \mathbf{L} \underline{q}_S).\end{aligned}\quad (1)$$

$\underline{p}_P$  und  $\underline{p}_{PO}$  sind komplexe Vektoren, die den Druck des Primärfeldes für eine Frequenz an den Mikrofonen bzw. den Ohren beinhalten. Bei multifrequenter Regelung können damit die Gesamtschallpegel an den Ohren  $\underline{p}_{Otot}$  und an den Mikrofonen  $\underline{p}_{Mtot}$  berechnet werden. Die Matrix  $\mathbf{Z}_S$  umfasst alle Übertragungsfunktionen von  $L$  möglichen Lautsprecherpositionen zu  $M$  möglichen Sensorpositionen. Die Matrix  $\mathbf{Z}_{SO}$  bezeichnet  $2 \times L$  Übertragungsfunktionen von den Lautsprecherpositionen zu den Ohren. Die Übertragungsmatrizen müssen für jede Frequenz bestimmt werden. Für die  $\mathbf{L}$ - und  $\mathbf{M}$ - Matrix gilt [2]:

$$\begin{aligned}\mathbf{L} &= \text{diag}\{l_i\} \text{ with } l_i \in \square \{0,1\} \text{ and } i \in \square [1,L], \\ \mathbf{M} &= \text{diag}\{m_i\} \text{ with } m_i \in \square \{0,1\} \text{ and } i \in \square [1,M].\end{aligned}\quad (2)$$

Der Index  $i$  bezeichnet dabei eine bestimmte Position innerhalb des Lademeisterbereiches. Die Spur dieser Matrizen entspricht der festgelegten Anzahl an Aktuatoren bzw. Sensoren. Durch diese Matrizen kann jede mögliche Anordnung innerhalb der LMA binär kodiert werden. Die  $\mathbf{L}$  Matrix kodiert die Lautsprecherkonfiguration und die  $\mathbf{M}$  Matrix die Mikrofonanordnung. Dadurch wird eine effiziente Anwendung eines genetischen Algorithmus möglich. Der Vektor  $\mathbf{q}_s$  bezeichnet die frequenzabhängigen Ansteuerungen der Lautsprecher bei optimaler Regelung, d.h. bei maximal möglicher Schallreduktion an den Ohren oder erreichen von  $p_{max}$  für  $\max(\mathbf{p}_{Otot})$ , vgl. [3] und [4]. Diese frequenzabhängigen Vektoren werden für jede Konfiguration neu berechnet mit ihnen kann der Vektor für die Gesamtansteuerungen  $\mathbf{q}_{Stot}$  bestimmt werden.

## COSA – Verfahren

Das COSA – Verfahren wurde von O. Wendt entwickelt und auf das „Travelling Salesman“ Problem angewendet [5]. Dabei hat es seine Überlegenheit gegenüber anderen naturanalogen Suchalgorithmen gezeigt. Dieser Algorithmus kombiniert Merkmale zweier bekannter Suchverfahren dem „Simulated Annealing“ (SA) [5] und dem Genetischen Algorithmus (GA). Zu Beginn des Algorithmus wird eine Mehrzahl möglicher Lösungen generiert, auch Population genannt. Eine Lösung  $S$  entspricht einer möglichen Anordnung der Sensoren und Aktuatoren und wird durch eine  $\mathbf{L}$  und  $\mathbf{M}$  Matrix präsentiert. Die Startpopulation wird mit Hilfe der zu minimierenden skalaren Zielfunktion  $E_{COSA}$  bewertet. Diese berücksichtigt die vorher formulierten Randbedingungen und Ziele der Optimierung:

$$E_{COSA}(S) = c_0 \cdot P_{elec} + c_1 \cdot (\max(\mathbf{p}_{Otot}) - p_{max}) + c_2 \cdot (\max(\mathbf{q}_{Stot}) - q_{max}) \quad (3)$$

Die Koeffizienten  $c_i$  sind dabei frei wählbar und gewichten die Optimierungsziele untereinander. Danach wird für jedes Individuum in der Phase der Cooperativen Transition ein Nachkomme  $S'$  erzeugt. Dabei werden Aktuator- und Sensorpositionen zwischen den Individuen der Elterngeneration ausgetauscht. Die entstandene Lösung  $S'$  wird wiederum mit der Zielfunktion bewertet. Hat dieses Individuum einen kleineren Wert  $E_{COSA}$  wird die Lösung  $S$  durch  $S'$  in der aktuellen Population ersetzt. Schlechtere Lösungen ersetzen ihre Eltern mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, auch als Metropoliswahrscheinlichkeit bezeichnet [6]:

$$p_{Met} = e^{\frac{-\Delta E}{T}} \quad (4)$$

Diese wird berechnet mit dem Maß der Verschlechterung  $\Delta E$  gegenüber den Eltern und einem Parameter  $T$  in Analogie zum Abkühlungsprozess (SA) Temperatur genannt. Nachdem die Population einen Iterationsschritt durchlaufen hat, wird die Temperatur adaptiv gesenkt, d.h. wenn noch Verbesserungen der Population möglich sind wird der Lösungsraum bei konstanter Temperatur weiter durchsucht. Das Verfahren wird abgebrochen, wenn die Population keine Verbesserung auch nach mehrmaligem

Senken der Temperatur erzielen kann. Der Lösungsraum wird also durch mehrere untereinander kommunizierende Lösungen durchsucht, wobei für das Erreichen eines lokalen oder globalen Optimums zwischenzeitliche Verschlechterungen hingenommen werden. Die in der letzten Population enthaltenen Lösungen sind die Ergebnisse der Optimierung.

## Ergebnisse

Für die Berechnung der Konfigurationen wurden die Übertragungsstrecken in einem Versuchsstand zwischen 67 verfügbaren Lautsprecherpositionen zu 51 möglichen Mikrofonpositionen und den Lademeisterohren und zusätzlich das Primärfeld vermessen. Insgesamt gibt es damit ca. 1Mrd. Kombinationsmöglichkeiten. Für eine feste Anzahl von 4 Lautsprechern und 2 Mikrofonen waren alle in der letzten Population enthalten Möglichkeiten in der Lage die Optimierungsziele zu erfüllen [3]. Die Rechenzeit betrug durchschnittlich 4 Stunden. Bei der experimentellen Überprüfung der Ergebnisse wurde eine gute Übereinstimmung zu der vorhergesagten und der gemessenen Performance deutlich [2]. Dabei wurde der Druck an den Ohren durch die aktive Schallreduktion bis zu 15dB(A) reduziert [3].

## Zusammenfassung

Mit Hilfe des verwendeten COSA – Algorithmus wurde das Positionierungsproblem für ANR – Systeme gelöst. Dabei ist es notwendig das Primärfeld an den möglichen Mikrofonpositionen und im eigentlichen Zielbereich der Schallreduktion (Ohren) zu kennen, zu dem müssen die Übertragungsstrecken der Aktuatoren zu den Sensoren vermessen werden. Die Optimierungsergebnisse müssen nicht das globale Optimum enthalten, bilden aber einen guten Ausgangspunkt für weitere Berechnungen und Experimente bei vergleichsweise niedrigem Rechenzeitaufwand. Für zukünftige Anwendungen kann der Algorithmus dahingehend angepasst werden, dass er zu den Positionen auch die Anzahl der Aktuatoren und Sensoren optimiert.

## Literatur

- [1] Elliott, Stephen: *Signal Processing for Active Control*. London: Academic Press, 2001
- [2] Gerner, C.: *Optimale aktive Geräuschreduzierung in Flugzeugkabinen für hohe tonale Lärmpegel*. Hamburg, Helmut-Schmidt Universität, Institut für Mechanik, Mechatronik, Dissertation, 2005
- [3] Böhme, S.: *Optimierungsverfahren zur Bestimmung der Aktuator- und Sensorpositionen für ein aktives Geräuschreduzierungssystem*. Hamburg, Helmut-Schmidt Universität, Mechatronik, Diplomarbeit, 2005
- [4] Kuo, M; Morgan, R.: *Active Noise Control Systems, Algorithms and DSP implementations*. New York: John Wiley & Sons, 1996
- [5] Wendt, Oliver: *Tourenplanung durch Anwendung naturanaloger Verfahren: Integration von Genetischen Algorithmen und Simulated Annealing*. Wiesbaden: Dt. Univ. Vlg., 1995
- [6] Kirkpatrick, C.: *Optimization by Simulated Annealing*. In: Science (1983), Nr. 220, S. 671-680