

# Optimierungsverfahren zur Bestimmung der Aktuator- und Sensorpositionen für ein aktives Schallreduzierungssystem

Delf Sachau<sup>1</sup>, Christian Gerner<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Helmut-Schmidt-Universität, 22043 Hamburg, Deutschland, Email: sachau@hsuhh.de

<sup>2</sup> Helmut-Schmidt-Universität, 22043 Hamburg, Deutschland, Email: gerner@hsuhh.de

## Einleitung

In einigen Fahrzeugen tritt tonaler Lärm im unteren Frequenzbereich (<500Hz) mit hohen Schalldruckpegeln auf. Ein typisches Beispiel hierfür sind Propellerflugzeuge, bei denen die Anregungsfrequenz durch die Blattfolgefrequenz und ihre Höherharmonischen gegeben ist. Da die Profile der Propellerblätter unter aerodynamischen Gesichtspunkten optimiert sind, kann es zu hohen Lärmpegeln kommen. Dieser Effekt tritt auch im Arbeitsbereich des Lademeisters (LMWS) eines neu zu entwickelnden militärischen Transportflugzeuges auf. Dieser Arbeitsbereich befindet sich im vorderen Bereich des Frachtraums. Aufgrund verschiedener Anforderungen kann dieses halboffene Volumen nicht vom Frachtraum abgeschottet werden. Für diesen Bereich ist eine Reduzierung des Schalldruckpegels erforderlich.

Vielfach werden in solchen Fällen passive Maßnahmen wie z.B. das Einbringen von Dämmmaterial oder Schwingungsdämpfern ergriffen. Speziell bei tiefen Frequenzen führen diese Maßnahmen zu einer erheblichen und unerwünschten Gewichtssteigerung des Flugzeuges. Deshalb wird in diesem Fall die Geräuschreduzierung über aktive Maßnahmen - ein so genanntes Active Noise Reduction (ANR) System - erreicht.

Bei der Auslegung dieses Systems spielt die Positionierung der Aktuatoren und Sensoren eine entscheidende Rolle. Folgen einer ungünstigen Positionierung wären höherer Leistungsbedarf des Gesamtsystems und/oder eine verminderte Geräuschreduzierung.

## Problemstellung

Aufgabe des zu entwickelnden ANR-Systems ist es, den Schalldruckpegel an den Ohren des Lademeisters unter einen bestimmten Grenzwert zu reduzieren. Dies soll sowohl für verschiedene Sitzpositionen als auch für verschiedene Lastfälle (Propellerdrehzahlen) ermöglicht werden. Dabei sollen sowohl die Grundfrequenz als auch die erzeugten Höherharmonischen berücksichtigt werden.

In unmittelbarer Nähe der beiden Ohren befindet sich je ein Fehlersensor. Aufgrund der großen Wellenlängen für den betrachteten Frequenzbereich wird davon ausgegangen, dass der Schalldruck an den Fehlersensoren  $\mathbf{p}$  dem an den Ohren entspricht.

Für den Einbau der Aktuatoren kommen aufgrund technischer Gegebenheiten, wie z.B. verfügbarer Einbauraum, nur bestimmte Positionen in Betracht. Eine Konfiguration  $K$  von Aktuatoren besteht dabei aus einer

festen Anzahl Aktuatoren  $L$ , die sich an technisch realisierbaren Positionen befinden.

Gesucht ist die Konfiguration, die es schafft,

- den maximalen Schalldruckpegel an den Fehlersensoren unter einen bestimmten Grenzwert  $p_{max}$  zu reduzieren,
- ohne dabei die maximal zulässige Ansteuerung  $q_{max}$  der Aktuatoren zu überschreiten.

Ergeben sich dabei mehrere Konfigurationen, so ist diejenige auszuwählen, die möglichst wenig elektrische Leistung verbraucht.

Es handelt es sich bei der Bestimmung der optimalen Konfiguration also um ein restringiertes, diskretes Optimierungsproblem mit der Kostenfunktion

$$\min J(K) = \frac{\mathbf{q}^2(K)}{q_{max}^2} \quad (1)$$

und den Nebenbedingungen

$$\max(\mathbf{p}) \leq p_{max}, \quad (2)$$

$$\max(\mathbf{q}) \leq q_{max}. \quad (3)$$

Wobei  $\mathbf{q}$  die Ansteuerung der Sekundärquellen ist.

## Optimierungsverfahren

### Bestimmung des Kostenwertes für eine Konfiguration

Aufgrund der physikalischen Zusammenhänge und des verwendeten adaptiven Reglers sind  $\mathbf{p}$  und  $\mathbf{q}$  voneinander abhängig. Der Regler optimiert die Kostenfunktion  $J_R$

$$J_R := a \frac{\mathbf{p}^2}{p_{max}^2} + (1-a) \frac{\mathbf{q}^2}{q_{max}^2}; \quad 0 < a < 1, \quad (4)$$

wobei sich über  $a$  die beiden Terme der Kostenfunktion gegeneinander gewichten lassen. Abbildung 1 zeigt den sich aus (4) ergebenden Zusammenhang zwischen  $\max(\mathbf{p})$  und  $\max(\mathbf{q})$  für verschiedene Konfigurationen. Für jede in der Optimierung zu untersuchende Konfiguration wird ermittelt, ob sie in der Lage ist, die Nebenbedingung (2) zu erfüllen. Ist sie es -wie hier die Konfigurationen II und III-, wird die zur Erfüllung von (2) minimal notwendige Ansteuerung  $\mathbf{q}_{min}$  ermittelt. Ist sie es nicht (I) wird  $\mathbf{q}_{min}$  für  $a \rightarrow 1$  bestimmt. Verletzt eine Konfiguration die Nebenbedingung (2) oder (3) (I, II) wird die Kostenfunktion (1) zusätzlich mit einem Strafterm  $j_o$  beaufschlagt. Mit  $j_o=L$  wird eine die Nebenbedingungen (2) oder (3) verletzende Konfiguration immer schlechter bewertet als eine, die dies nicht macht. (1)-(3) wird damit überführt auf

$$\min J(K) = \frac{q_{\min}^2}{q_{\max}^2} + j_o. \quad (5)$$

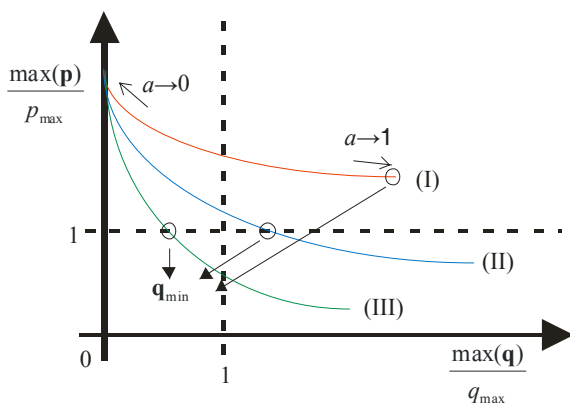


Abbildung 1: Gewichtungskurven für verschiedene Konfigurationen

### COSA-Algorithmus

Zur Optimierung von (5) wird das von Wendt in [1] vorgestellte COSA-Verfahren („Cooperative Simulated Annealing“) verwendet. Der für Tourenplanungsprobleme entwickelte Algorithmus vereinigt Elemente des „Simulated Annealing“ (vgl. [2-4]) und der genetischen Algorithmen (vgl. [5]). Für diskrete Tourenplanungsprobleme zeigt Wendt, dass der COSA Algorithmus besser geeignet ist, als andere diskrete Lösungsverfahren. Dabei bewährt sich COSA auch für restringierte Optimierungsprobleme. Deshalb soll COSA auch hier verwendet werden.

Der entscheidende Unterschied von COSA zum klassischen „Simulated Annealing“ besteht darin, dass die durchzuführende Änderung einer einzelnen Konfiguration – die Transition – nicht rein zufällig erfolgt, sondern unter Verwendung weiterer, bereits optimierter Konfigurationen. Dazu wird zunächst, wie auch bei den genetischen Algorithmen, eine Population aus mehreren Individuen gebildet. Innerhalb dieser findet dann eine Rekombination und unter bestimmten Bedingungen auch eine Mutation statt.

Diese „Kooperative Transition“ ([1], S. 155) wird für den hier vorliegenden Anwendungsfall modifiziert. Für die zur Transition anstehende Konfiguration  $K$  wird zunächst aus der Population ein Transitionspartner  $K^*$  zufällig bestimmt und aus beiden je ein aktiver Aktuator ausgewählt. Nun wird überprüft, ob der aus dem Transitionspartner ausgewählte Aktuator bereits in dem Ursprungsindividuum aktiviert ist. Falls nein, wird der aus dem Transitionspartner stammende Aktuator in das Ursprungsindividuum übernommen; falls ja, wird ein bisher in dem Ursprungsindividuum inaktiver Aktuator zufällig ausgewählt und aktiviert. Der anfangs in dem Ursprungsindividuum ausgewählte Aktuator wird deaktiviert. Durch die Transition entsteht das neue Individuum  $K'$  mit dem dazugehörigen Kostenwert  $J'$ . Über die Annahme oder Ablehnung der Änderung wird anhand der sog. Metropoliswahrscheinlichkeit entschieden (vgl. [4]).

### Vergleich mit anderen Verfahren

Das vorgestellte Verfahren wird auf Probleme angewendet, bei denen sowohl die Aktuator- als auch die Sensorpositionen optimiert werden.

Für ein Problem mit 11530 Kombinationsmöglichkeiten wird das globale Optimum durch Berechnung des Kostenwertes für alle Konfigurationen bestimmt. Bei der Verwendung von COSA kann das globale Optimum mit 7500 Transitionen ermittelt werden (vgl. [6]).

Bei einem anderen Problem mit  $5,9 \cdot 10^{11}$  Kombinationsmöglichkeiten wird durch schrittweise Erhöhung (vgl. [7]) eine Lösung mit  $J=0,247$  gefunden. Durch COSA lässt sich eine Konfiguration mit  $J=0,074$  ermitteln.

### Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das vorgestellte Verfahren zur Konfigurationsoptimierung für ANR-Systeme geeignet ist. Für kleine Probleme lässt sich das globale Optimum, mit geringerem Rechenaufwand als bei der kombinatorischen Lösung ermitteln. Bei großen Problemstellungen ergeben sich Lösungen mit deutlich geringerem Kostenwert als bei einfachen Verfahren, wenn auch bei höherem Rechenaufwand.

Eine weitere Verbesserung des Verfahrens ist bei der Bestimmung des Kostenwertes möglich. Hier werden zurzeit Untersuchungen durchgeführt, die Fehlersensoren nicht in unmittelbarer Nähe des Kopfes zu positionieren.

### Literatur

- [1] Wendt, O.: Tourenplanung durch Einsatz naturanaloger Verfahren. Dt. Univ.-Vlg.; Gabler, Wiesbaden, 1995
- [2] Cerny, V. Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm. Journal of Optimization Theory and Applications 45 (1985), 41-51
- [3] Kirkpatrick, C., et al. Optimization by Simulated Annealing. Science 220 (1983), 671-680
- [4] Metropolis, N., et al. Equation of State Calculations by fast Computing Machines. Journal of Chemical Physics 21 (1953), 1087-1092
- [5] Holland, J. H.: Adaption in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975
- [6] Böhme, S.: Optimierung und Dokumentation eines COSA-Programms zur Bestimmung von Aktuator- und Sensor- Positionen. Studienarbeit, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2005
- [7] Benzaria, E. und Martin, V.: Constrained Optimization of Secondary Source Locations: Multipolar Source Arrangements. Active95, Newport Beach, CA, USA, 1995, 499-510

Die Autoren danken Airbus Deutschland für die Unterstützung dieses Projektes.