

# ACTIVE NOISE CANCELLING (ANC) - AKUSTIK, SIGNALWEG & GRENZEN

## 1. HISTORISCHE ENTWICKLUNG

**1933 - Paul Lueg (Die Theorie):** Der deutsche Physiker patentiert das Prinzip der Schallauslöschung durch phasenverschobenen Schall. Mangels schneller Elektronik bleibt die Erfindung zunächst rein theoretischer Natur.

**1950er - Lawrence Fogel (Erste Prototypen):** Entwicklung aktiver Systeme für die Luftfahrt (Hubschrauber-Cockpits), um die Kommunikation und Sprachverständlichkeit von Piloten bei extremem Triebwerkslärm zu schützen.

**1978/1989 - Dr. Amar Bose (Der Durchbruch):** Nach Frustration über Fluglärm skizziert Bose die mathematischen Grundlagen. 1989 erscheinen die ersten kommerziellen Lärmschutzkopfhörer für Piloten.

## 2. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Schall ist im Grunde nichts anderes als eine mechanische Welle, die sich durch periodische Luftdruckschwankungen ausbreitet. Wir haben Bereiche mit höherem Druck – die Wellenberge – und Bereiche mit niedrigerem Druck – die Wellentäler. Wenn sich nun zwei Schallwellen im selben Raum überlagern, greift das physikalische Prinzip der Superposition, was bedeutet, dass sich die Wellen addieren, und wir haben eine konstruktive Interferenz.

Wenn wir nun ein störendes Umgebungsgeräusch haben – zum Beispiel das tiefe Brummen eines Zuges – und künstlich eine zweite Schallwelle erzeugen, die exakt dieselbe Frequenz und dieselbe Amplitude besitzt, aber um genau 180 Grad phasenverschoben ist, passiert etwas Faszinierendes: Das Wellental der einen Welle trifft zeitlich und räumlich exakt auf den Wellenberg der anderen. Sie heben sich gegenseitig auf. Das Ergebnis ist eine destruktive Interferenz und somit Stille. Eine wichtige Anmerkung: Die Energie verschwindet nicht einfach im physikalischen Nichts. Sie wird lokal am Punkt des Aufeinandertreffens – also direkt im Gehörgang – neutralisiert, da sich die Luftmoleküle durch die entgegengesetzten Kräfte nicht mehr bewegen können. Außerhalb dieses Punktes breiten sich beide Wellen normal weiter aus.



## 3. SYSTEM-TOPOLOGIEN IM VERGLEICH

### A) Feedforward (Vorwärtskopplung):

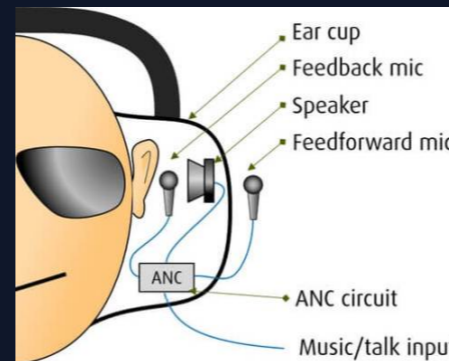
- *Mikrofon-Position:* Außen am Kopfhörergehäuse.
- *Funktion:* Erfasst Außenschall frühzeitig. DSP errechnet Gegenschall proaktiv.
- *Eigenschaften:* Sehr reaktionsschnell, effektiv bei mittleren bis hohen Frequenzen, anfällig für Windrauschen.

### B) Feedback (Rückkopplung):

- *Mikrofon-Position:* Innen in der Ohrmuschel, direkt vor dem Trommelfell.
- *Funktion:* Misst das reale Summensignal (Musik + Lärm) und korrigiert Abweichungen adaptiv.
- *Eigenschaften:* Hervorragende Bass-Dämpfung, unempfindlich gegen Verrutschen, Gefahr von akustischen Rückkopplungen (Pfeifen).

### C) Hybrid ANC:

Kombiniert Feedforward und Feedback durch Mikrofone innen und außen. Bietet die maximale Dämpfungsbandbreite, erfordert jedoch hohe DSP-Rechenleistung.



## 4. DSP-SIGNALWEG & LATENZBERECHNUNG

### Der elektroakustische Signalweg:

1. Mikrofon (Schall -> Analogspannung)
2. Analog-Digital-Wandler (ADC) (Digitalisierung des Signals)
3. Digitaler Signalprozessor (DSP) (Phaseninvertierung & Filterung)
4. Digital-Analog-Wandler (DAC) (Rekonstruktion des analogen Signals)
5. Treiber-Lautsprecher (Wiedergabe des Gegenschalls)

### Die Latenzgrenze (Das physikalische Nadelöhr):

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in Luft beträgt  $c \approx 343 \text{ m/s}$  (34,3 cm/ms). Die Distanz zwischen Mikrofon und Trommelfell beträgt oft nur ca. 15 mm. Der Schall benötigt für diesen Weg ca. **44 Mikrosekunden ( $\mu\text{s}$ )**.

Damit die Auslöschung funktioniert, muss das elektronische Anti-Signal (ADC + DSP + DAC) in weniger als **15 bis 20  $\mu\text{s}$**  am Ohr eintreffen. Ist das System langsamer, verschiebt sich die Phasenlage, und es kommt zur konstruktiven Interferenz (Lärmverstärkung).

## 5. FREQUENZSPEZIFISCHE DÄMPFUNG

### Warum versagt ANC bei hohen Tönen?

Betrachten wir einen tiefen Ton von 100 Hertz: Die Wellenlänge dieses Tons beträgt satte 3,43 Meter. Da der Gehörgang und der Kopfhörer im Vergleich dazu winzig klein sind, ist der Schalldruck an fast jeder Stelle im Gehörgang nahezu identisch. Kleinere Verrutschungen des Kopfhörers ändern nichts an der erfolgreichen Auslöschung. Nehmen wir nun aber einen hohen Ton von 5.000 Hertz. Hier beträgt die Wellenlänge nur noch knapp 6,8 Zentimeter. Ein halbes Wellental ist also nur 3,4 Zentimeter groß. Wenn sich der Kopfhörer im Ohr auch nur um wenige Millimeter verschiebt, passt die Phase des Gegenschalls nicht mehr zum Störschall. Anstatt einer Phasenauslöschung von 180 Grad erhalten wir eine unvollständige Phasenlage, und der Ton wird verstärkt. Daher stößt ANC bei etwa 1.000 Hertz an seine physikalische Grenze.

### Aufteilung: Aktiv vs. Passiv:

Für Frequenzen über 1.000 Hertz ist gar kein ANC notwendig. Hohe Frequenzen lassen sich mechanisch sehr leicht aufhalten. Das Gehäuse des Kopfhörers, der Schaumstoff der Polster und ein dichter Abschluss am Kopf wirken als physikalische Barriere. Das nennt man passive Dämpfung. Ein wirklich leiser Kopfhörer basiert also immer auf zwei Säulen: Aktives ANC für den Bassbereich und hervorragende passive Dämpfung für die Mitten und Höhen.

## 6. PSYCHOAKUSTIK

**Das Phänomen des 'Druckgefühls':** Aus Sicht der Audioproduktion und der Psychoakustik gibt es bei ANC einige hochinteressante Aspekte. Ein weit verbreitetes Phänomen ist das sogenannte Druckgefühl. Viele Menschen berichten, dass sie beim Einschalten der Geräuscherdrückung einen Druck auf den Ohren spüren, ähnlich wie bei einer schnellen Aufzugfahrt oder beim Sinkflug im Flugzeug. Das Spannende daran ist: Dieser Druck existiert physikalisch überhaupt nicht. Es handelt sich um eine reine Täuschung unseres Gehirns. In der Natur geht ein dichter Verschluss des Ohrs immer mit einer Dämpfung des Schalls und einer leichten Änderung des statischen Drucks einher. Wenn das ANC nun die tiefen Frequenzen plötzlich ausblendet, ohne dass sich der reale Luftdruck ändert, wird das Gehirn irritiert. Es interpretiert dieses akustische Vakuum fälschlicherweise als mechanischen Druck. Nach einer gewissen Gewöhnungszeit verschwindet dieses Gefühl meist.

## 7. QUELLEN & FACHLITERATUR

- Kuo, S. M. & Morgan, D. R. (1996): Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations. John Wiley & Sons, Inc.
- Hansen, C. H. et al. (2012): Active Control of Noise and Vibration. CRC Press. (Fundierte physikalische Herleitung der Interferenz)
- Bose, A. G. (1984): Patentschriften zur aktiven Schallreduktion in Kopfhörersystemen (US-Patentamt).
- Sound on Sound Magazine (2022): 'The Acoustics of Headphones and Active Noise Cancellation' (Fachartikel zur Studio-Praxis).
- Sennheiser & Neumann Whitepapers (2024): Transducer technology and DSP processing limits in professional monitoring.