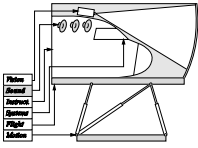


## Überblick

- **Aufgabenstellung**
  - Entwicklung eines Sound-Moduls
    - Hardware
    - Software
  - Simulation der Geräusche im Cockpit
  - Höchste Realitätsstufe (Stufe D der Joint Aviation Authorities)

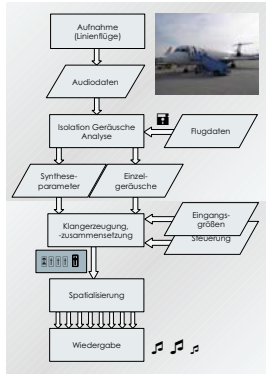


### Rahmenbedingungen

- Laufzeit ca. 15 Monate
- Aufnahmen aus Linienflügen

### Funktionaler Ansatz

- Keine physikalische Modellierung
- Aufnahme
- Geräuschisolation
- Information aus Flugdaten
- Resynthese anhand physikalisch motivierter Modelle
- Eingangsgrößen
  - Wertkontinuierlich: TAS, Flughöhe usw.
  - Wertdiskret/binär: Bodenkontakt, Fahrwerkstellung usw.
- Signalverarbeitung in Echtzeit
- Spatialisierungsmodul
- 3-dimensionale Wiedergabe



## Geräusche im Cockpit

### Kontinuierliche Geräusche

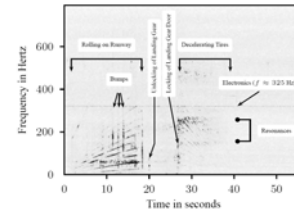
- Abhängigkeit von regelmäßig aktualisierten Parametern
- Vorhanden je nach Flugphase (Stand, Start/Landung, Reiseflug)
- Beispiele
  - Aircondition, Elektronik
  - Auxiliary Power Unit (APU)
  - Triebwerksgeräusch
  - Rollgeräusch auf Landebahn
  - Strömungsgeräusch
  - Regen und Hagel

### Diskrete Geräusche

- Als Reaktion auf bestimmte Ereignisse
- Keine Abhängigkeiten von Parametern
- Nicht unterbrechbar in der Synthese
- Beispiele
  - Dumpfes Geräusch beim Überfahren von Landebahnlichtern
  - Abbremsen der Reifen bei eingezogenem Fahrwerk
  - Vogelschlag
  - Crash
  - Schleifen auf Landebahn
  - Donner

### Schallausbreitung

- Luftschall
- Körperschall



## Aufnahmeverfahren

### Binaurales Aufnahmesystem

- Einfache Montage durch geringes Gewicht
- Positionierung (fast) an der Stelle der Ohren
- Qualitativ hochwertigste Messmikrophone
- Kalibrierbar
- ⇒ objektive Messung



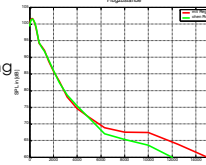
### Mehrkanalige Aufnahmetechnologie mit Mikrofonarray

- Frequenzbereich preiswerter Mikrofone ausreichend
- Montage im Eingangsbereich des Cockpits
- ⇒ räumliches Sampling durch Beamforming



## Analyseverfahren

- Lineare Prädiktion
- Lineare Filterung, Notch-Filterung
- Matching Pursuit
- Beamforming



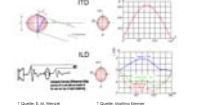
## Syntheseverfahren

- Filterung, Resonanzfilterung
- Additive Synthese
- Synthese mit Frequenzmodulation (FM) für Triebwerksgeräusch

## Spatialisierung

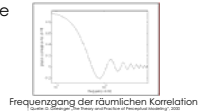
Nachbildung räumlicher Attribute der Geräuschquellen durch Richtungsabbildung und räumliche Diffusität

- Richtungsabbildung (räumliches Hören)
  - Interaurale Laufzeitdifferenz (ITD)
  - Interaurale Pegeldifferenz (ILD)



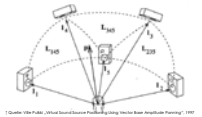
### Räumliche Diffusität – Einhüllende

- Räumliche Information durch teilweise kohärente Signale an den Ohren
- Druckkammer
- Raummoden



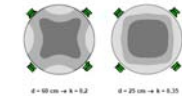
### Vector-Base Amplitude Panning

- Virtuelle Positionierung genau lokalisierbarer Geräusche
- Realisiert ILD

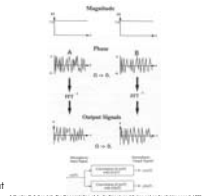


### Dekorrelation

- Allpass-Filterung
- Realisiert Quellenaufweitung, räumliche Einhüllende



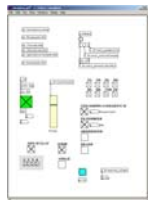
Auswirkung des Kohärenzgrades auf subjektive Diffusität



## Hardware

### Audio

- 6 breitbandige Einbaulautsprecher
- Subwoofer zur kraftvollen Wiedergabe tiefer Frequenzen
- Positionierung nach konstruktiven und akustischen Anforderungen
- Mechanische Belastung durch Motion Base: vierfache Erdbeschleunigung
- Körperschallgeber für Vibrationen



### Computer

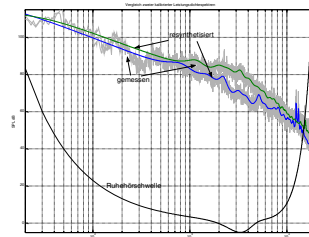
- Pure Data (PD) von Miller Puckette
  - Grafische Programmierumgebung zur Signalverarbeitung in Echtzeit
  - Open Source
- Standard PC
- Linux Betriebssystem
- Kommunikation mit anderen Modulen über gemeinsames Protokoll

## Ergebnis

- Simulation und Realität stimmen überein
  - Schalldruckpegel (Lautstärke)
  - Frequenzgang (Toleranz kleiner als ±5 dB, gemessen in unbewerteten Terzband-Spektren)
  - Lokalisierung der Geräusche
  - Räumliche Kohärenz/Diffusität
- Erhöhung des Realitätsgrades des gesamten Flugsimulators

## Strömungsgeräusch

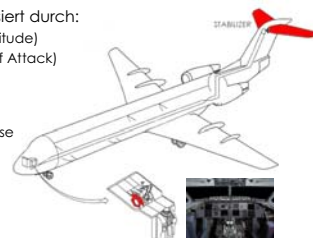
- Jedem Flugzustand entspricht bestimmte Leistungsdichte



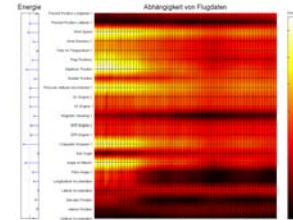
- Nachbildung durch gefiltertes Rauschen

### Filterkurven parametrisiert durch:

- Flughöhe (Pressure Altitude)
- Anstellwinkel (Angle of Attack)
- Geschwindigkeit entlang der Flugbahn (True Airspeed)
- Position der Höhenflosse (Stabilizer Position)

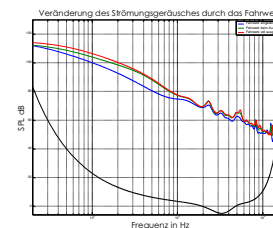


- Bestätigt durch Korrelationsanalyse



### Lineare Prädiktions-Analyse

- Bei nicht gemessenen Konstellationen Interpolation nach Modell zweiter Ordnung aus multipler Regressionsanalyse
- Zusätzliche Resonanzen und Anhebungen bei nicht eingefahrenem Fahrwerk

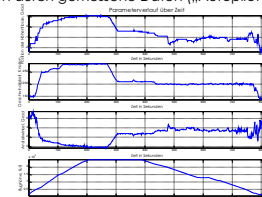


## Demonstration im Prototyp

- Grundgeräusch (permanent vorhanden)
  - Avionik, Inverter, Airconditioning
- Automatischer Start, getriggert durch Parkbremse
  - Stand an Startposition, Triebwerke auf voller Leistung
  - Beschleunigung auf Landebahn
  - Dumpfes Geräusch beim Überfahren von Landebahnlichtern
  - Abheben
  - Fahrwerk (Einfahren, Resonanz durch Fahrwerksschacht)

### Reiseflug

- „VIE-MUC in 2 Minuten“?
- Iteration durch gemessene Daten („Autopilot“) oder manuell



### Automatische Landung

- Fahrwerk
  - In transit und voll ausgefahren
- Witterung/Umgebungsgeräusche
  - Regen, Hagel, Donner
    - Intensität/spektrale Verteilung variiert mit Geschwindigkeit u. Flughöhe
  - Vogelschlag