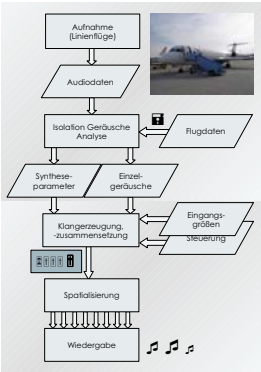
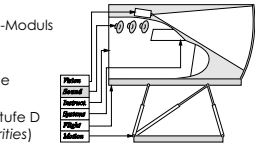


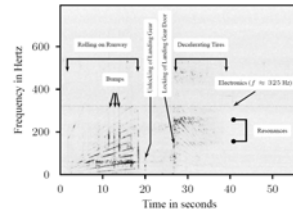
Überblick

- **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



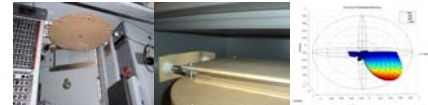
Geräusche im Cockpit

- **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 Landebahnlichtleitern
 - Abbremsen der Reifen bei eingezogenem Fahrwerk
 - Vogelschlag
 - Crash
 - Schleißen auf Landebahn
 - Donner
- **Schallausbreitung**
 - Luftschall
 - Körperschall



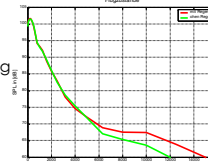
Aufnahmeverfahren

- **Binaurales Aufnahmesystem**
 - Einfache Montage durch geringes Gewicht
 - Positionierung (fast) an der Stelle der Ohren
 - Qualitativ höchstwertige 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



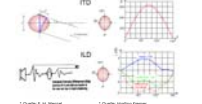
Syntheseverfahren

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

Spatialisierung

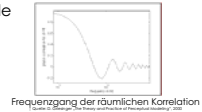
Nachbildung räumlicher Attribute der Geräuschquellen durch Richtungsabbildung und räumliche Diffusität

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



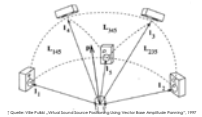
- **Räumliche Diffusität – Einhüllende**

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



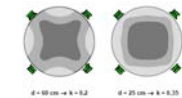
- **Vector-Base Amplitude Panning**

- Virtuelle Positionierung genau lokalisierbarer Geräusche
- Realisiert ILD



- **Dekorrelation**

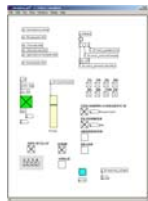
- Allpass-Filterung
- Realisiert Quellenaufweitung, räumliche Einhüllende



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

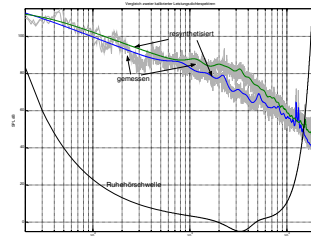


Ergebnis

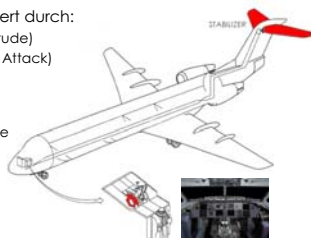
- Simulation und Realität stimmen überein
 - Schalldruckpegel (Lautstärke)
 - Frequenzgang (Toleranz kleiner als ±5 dB, gemessen in unbewerteten Terzband-Spektren)
 - Lokalisierung der Geräusche
 - Räumliche Kohärenz/Diffusität
- Erhöhung des Realitätsgrades des gesamten Flugsimulators

Strömungsgeräusch

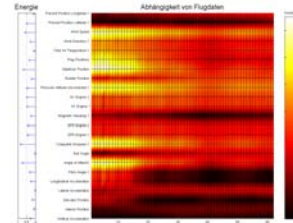
- Jedem Flugzustand entspricht bestimmte Leistungsdichte



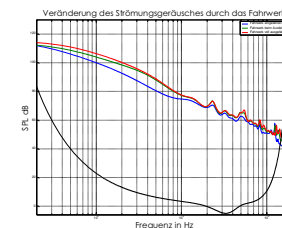
- Nachbildung durch gefiltertes Rauschen
- Filterkurven parametrisiert durch:
 - Flughöhe (Pressure Altitude)
 - Anstellwinkel (Angle of Attack)
 - Geschwindigkeit entlang der Flugbahn (True Airspeed)
 - Position der Höhenflosse (Stabilizer Position)



- Bestätigt durch Korrelationsanalyse

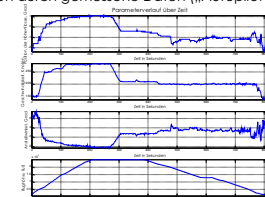


- Lineare Prädiktions-Analyse
- Bei nicht gemessenen Konstellationen Interpolation nach Modell zweiter Ordnung aus multipler Regressionsanalyse
- Zusätzliche Resonanzen und Anhebungen bei nicht eingefahrenem Fahrwerk



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 Landebahnlichtleitern
 - Abheben
 - Fahrwerk (Einfahren, Resonanz durch Fahrwerkschacht)
- **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