

# Automatisierte Raumakustik-Analyse und - Design: Whitepaper

## Zusammenfassung

Die Qualität der Raumakustik hat direkten Einfluss auf Sprachverständlichkeit, Wohlbefinden und Produktivität. Klassische raumakustische Analysen sind zeitaufwendig und erfordern spezialisierte Messtechnik sowie umfangreiche Berechnungen. Dieses Whitepaper stellt ein Konzept für eine App vor, die auf einem iPad Pro mit LiDAR-Sensorik eine automatisierte Flächenerfassung durchführt, die theoretische Nachhallzeit berechnet, die reale Nachhallzeit misst und aus diesen Daten sofortige Handlungsempfehlungen generiert. Sie unterstützt Ingenieur- und Planungsbüros bei der normgerechten Bewertung von Räumen nach DIN 18041 („Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung“) und ISO 3382-1 („Akustik – Messung der Nachhallzeit von Räumen“).

## 1. Einleitung

Moderne Arbeits- und Freizeitwelten verlangen Räume, die sowohl funktional als auch akustisch optimiert sind. Die nationale Norm DIN 18041 definiert Anforderungen und Empfehlungen zur Hörsamkeit für verschiedene Raumtypen wie Büros, Unterrichtsräume oder Konzertsäle und liefert Zielwerte für die Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Raumvolumen. Die internationale Norm ISO 3382-1 legt Verfahren zur Messung und Auswertung der Nachhallzeit fest. Gemeinsam bilden diese Normen den Rahmen für fundierte Planungs- und Sanierungsmaßnahmen.

Gleichzeitig stehen mit dem iPad Pro kompakte Geräte zur Verfügung, die dank integrierter LiDAR-Sensoren präzise 3D-Modelle von Räumen erfassen. In Kombination mit einer intelligenten Software kann daraus ein leistungsfähiges Werkzeug entstehen, das raumakustische Analysen vereinfacht und eine sofortige Bewertung ermöglicht.

## 2. Problemstellung

Konventionelle raumakustische Berechnungen basieren auf manueller Aufnahme von Raumgeometrie, Oberfläche und Materialien. Messungen der Nachhallzeit werden häufig erst im Anschluss an die Planung durchgeführt. Durch diese zweistufige Vorgehensweise können Planungsfehler erst spät erkannt werden, was Kosten und Aufwand erhöht. Zudem erfordern akustische Simulationen spezielle Software, die nicht überall verfügbar ist.

Die Vision ist eine mobile Anwendung, die folgende Aufgaben automatisiert:

- **Erfassung der Geometrie:** Mithilfe des LiDAR-Sensors des iPad Pro wird der Raum in Echtzeit gescannt. Flächen (Wände, Decken, Böden) werden segmentiert und ihre Flächeninhalte ermittelt.
- **Materialzuordnung:** Über ein Dropdown-Menü wählt der Nutzer für jede Fläche eine Textur aus (z. B. Putz, Holz, Glaswolle). Hinter den Texturen liegt eine Datenbank mit frequenzabhängigen Absorptionskoeffizienten.

- **Theoretische Berechnung:** Aus Volumen, Oberflächen und Absorptionskoeffizienten berechnet die App nach der Sabine-Formel die theoretische Nachhallzeit. Es wird geprüft, ob diese den Sollwerten gemäß DIN 18041 entspricht.
- **Messung der Nachhallzeit:** Ein Messmikrofon (Klasse 1) wird über USB-C angeschlossen und vor der Messung mit einer Korrekturkurve linearisiert. Der Raum wird durch einen Klatsch oder Ballonknall angeregt, und die Impulsantwort wird gemessen und ausgewertet (RT60). Das Messverfahren orientiert sich an ISO 3382-1.
- **Dokumentation:** Die App erzeugt einen Bericht mit Fotos, gemessenen und berechneten Nachhallzeit-Kurven sowie eine Bewertung, ob die Anforderungen eingehalten werden.
- **Empfehlungen:** Wenn die Sollwerte nicht eingehalten werden, schlägt die App geeignete Maßnahmen vor und benennt die notwendigen Materialien (z. B. Absorber aus Mineralwolle, Holz-Paneele oder PET-Recycling-Pads) sowie die zu behandelnden Flächen.

### 3. Systemübersicht

Die App besteht aus mehreren Modulen:

1. **Flächenerfassung (LiDAR-Modul):** Erzeugt ein 3D-Modell des Raums, segmentiert Flächen und berechnet deren Größen. Die Daten werden als 3D-Polygone gespeichert.
2. **Materialdatenbank:** Enthält frequenzabhängige Absorptionskoeffizienten für verschiedene Materialien. Die Datenbank kann erweitert werden (z. B. Glaswolle, Mineralwolle, Schafwolle, Holz, recycelte PET-Platten).
3. **Rechenmodul:** Berechnet die theoretische Nachhallzeit  $T_s$  mit der Sabine-Formel:

$$T_s = 0,161 \cdot V / A, \text{ mit } A = \text{Summe}(S_i \cdot \alpha_i),$$

wobei  $V$  das Raumvolumen,  $S_i$  die Fläche der  $i$ -ten Oberfläche und  $\alpha_i$  der mittlere Absorptionsgrad dieser Oberfläche ist. Für eine normgerechte Bewertung werden unterschiedliche Sollwerte je Nutzungsart (Büro, Vortragssaal, Musiksaal) berücksichtigt. 4. **Messmodul:** Verarbeitet das Signal des Messmikrofons. Die Impulsantwort wird im Zeit- und Frequenzbereich analysiert. Die Nachhallzeit RT60 wird aus dem Pegelabfall über 60 dB ermittelt. Eine Korrekturkurve sorgt dafür, dass das Mikrofon frequenzlinear ist. 5. **Dokumentationsmodul:** Erstellt automatisch einen Bericht mit Messdaten, theoretischem Soll-/Ist-Vergleich, Nachhallzeit-Kurve und Foto-Dokumentation der Oberflächen. 6. **Empfehlungsmodul:** Bewertet Abweichungen von Sollwerten und generiert konkrete Vorschläge zur akustischen Optimierung. Dabei wird die Materialdatenbank genutzt, um Flächen mit hoher Nachhallzeit zu identifizieren und geeignete Absorber bzw. Streuelemente vorzuschlagen. 7. **Lernmodul (KI):** Über einen langfristigen KI-Ansatz sollen die Messdaten zukünftige Empfehlungen verbessern. Ein Machine-Learning-Modell analysiert, welche Maßnahmen zu den gewünschten Nachhallzeiten geführt haben, und optimiert die Materialempfehlungen. 8. **Audiovorhersage (VST-Plugin):** Für eine hörbare Vorschau plant das Projekt die Entwicklung eines VST-Plugins, das auf Grundlage der berechneten akustischen Parameter den zukünftigen Klang des Raums simuliert. Es wird in eine DAW (Digital Audio Workstation) eingebunden und erlaubt eine Echtzeit-Vorschau.

### 4. Normative Grundlagen

#### 4.1 DIN 18041

Die deutsche Norm DIN 18041 definiert Anforderungen an die Hörsamkeit für Räume mit unterschiedlichen Nutzungen. Sie ordnet Räume in Kategorien ein (z. B. A1 Musik, A2 Sprache, B Unterricht, C Büro) und gibt Sollwerte für die Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Raumvolumen vor. Für Büro- und Verwaltungsräume werden kurze Nachhallzeiten gefordert (häufig zwischen 0,4 s und 0,6 s).

bei 500 Hz), während Musik- oder Konzertsäle längere Zeiten aufweisen dürfen (1,2 s bis 2,0 s oder mehr). Durch eine stufenlose Anpassung der Sollwerte kann die App einen Raum normgerecht einordnen.

## 4.2 ISO 3382-1

Diese internationale Norm regelt das Messverfahren der Nachhallzeit. Sie definiert unter anderem die Messung der Impulsantwort, die Auswertung der Pegelrückgangskurve und die Berechnung der RT60. Die App orientiert sich an diesen Messmethoden, um konsistente und vergleichbare Ergebnisse zu gewährleisten. Für den hochfrequenten Bereich (125 Hz bis 4 kHz) werden die Nachhallzeiten separat ermittelt und gemittelt.

## 5. Messung und Kalibrierung

Um verlässliche Ergebnisse zu erhalten, wird ein Messmikrofon mit Klasse-1-Zertifizierung eingesetzt. Vor der Messung wird eine Korrekturkurve aufgezeichnet, um Frequenzunlinearitäten zu kompensieren. Der Raum wird durch einen kurzen Impuls (Handklatschen oder mit einem platzenden Ballon) angeregt. Die App zeichnet das Signal auf, berechnet den Energienachhall und bestimmt die Nachhallzeit. Die Ergebnisse werden mit den theoretisch berechneten Werten verglichen. So können Abweichungen erkannt und direkt Maßnahmen abgeleitet werden.

## 6. Empfehlungen zur akustischen Optimierung

Basierend auf dem Soll-/Ist-Vergleich schlägt die App Materialien und Positionen für akustische Maßnahmen vor. Beispiele:

- **Poröse Absorber:** Glas- oder Mineralwolle-Paneele zur Reduktion der Nachhallzeit. Sie werden vorzugsweise an reflektierenden Wänden oder der Decke angebracht.
- **Natürliche Materialien:** Schafwolle oder Holzoberflächen bieten gute Absorption im mittleren Frequenzbereich und werden bei nachhaltigen Konzepten bevorzugt.
- **Diffusoren:** Strukturelle Elemente aus Holz oder Kunststoff streuen Schall und verbessern die räumliche Verteilung von Reflexionen.
- **Recycling-Materialien:** PET-basierte Akustik-Pads sind ressourcenschonend und bieten flexible Gestaltungsmöglichkeiten.

Durch die Variation der Flächenanteile und Materialtypen zeigt die App, wie sich die Nachhallzeit theoretisch ändern würde und welche Maßnahmen die größte Wirkung haben.

## 7. KI-basierte Weiterentwicklung

Um die Qualität der Empfehlungen langfristig zu verbessern, sammelt die App anonymisierte Messdaten und Ergebnisse der akustischen Maßnahmen. Mit Hilfe von Machine-Learning-Verfahren können daraus Muster abgeleitet werden, die bei ähnlichen Raumtypen zu besseren Vorhersagen führen. Das System lernt somit selbstständig, welche Materialien und Positionierungen in der Praxis den größten Effekt zeigen.

## 8. Echtzeit-Simulation und VST-Integration

Ein weiteres Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines VST-Plugins, das auf Basis der ermittelten Raumparameter eine Klangsimitation bereitstellt. Die Echtzeit-Simulation ermöglicht es, akustische

Veränderungen bereits vor der Umsetzung zu hören. Im Zusammenspiel mit der App kann der Nutzer unmittelbar beurteilen, wie sich unterschiedliche Materialien und Designs auf die Akustik auswirken. Das Plugin wird als Open-Source-Komponente bereitgestellt und lässt sich in gängige Digital-Audio-Workstations integrieren.

## **9. Open-Source-Ansatz**

Die gesamte Software soll unter einer offenen Lizenz (z. B. MIT oder GPL) veröffentlicht werden. Dadurch können andere Entwickler und Ingenieure die Lösung anpassen, weiterentwickeln und in ihre Arbeitsabläufe integrieren. Der offene Zugang zur Materialdatenbank fördert außerdem Transparenz und Austausch von akustischen Kennwerten. Bei der Entwicklung wird besonderer Wert auf Datenschutz gelegt: Messdaten verbleiben lokal auf dem Gerät, und nur anonymisierte Informationen werden zur Verbesserung des Systems verwendet.

## **10. Fazit und Ausblick**

Die vorgestellte App verbindet moderne LiDAR-Sensortechnik mit raumakustischem Know-how und automatisierten Berechnungs- sowie Messverfahren. Durch die Kombination von theoretischer Berechnung, normgerechter Messung und KI-basierten Empfehlungen entsteht ein leistungsfähiges Werkzeug für Planer und Ingenieure. Langfristig soll die Lösung durch eine hörbare Echtzeit-Simulation über ein VST-Plugin ergänzt werden. Der Open-Source-Ansatz bietet eine transparente Grundlage für die weitere Forschung und Anwendung. Insgesamt ermöglicht das System eine effizientere Planung, eine bessere Raumakustik und trägt damit zu nachhaltigeren und nutzerfreundlicheren Gebäuden bei.

---