

Entwicklung eines Flach-Lautsprecher mittels Körperschallwandler

Bachelorthesis

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Eng. (B.Eng.)

Fakultät Fahrzeugtechnik

Ostfalia Hochschule Braunschweig/Wolfenbüttel

eingereicht durch

Jonathan Friehe

(Matr.-Nr. 70460252)

Erstprüfer: Prof. Dr. Udo Becker Ostfalia

Zweitprüfer: Martin Stahlberg Ostfalia

Datum der Ausgabe: 22. Januar 2026

Datum der Einreichung: Februar 28, 2026

Name

Adresse

-Land-

„Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form in keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.“

Wolfsburg

22. Januar 2026

Name,Unterschrift

Veröffentlichungen über den Inhalt dieser Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Firma XYZ zugelassen. Die Ergebnisse, Meinungen und Schlussfolgerungen dieser These sind nicht notwendigerweise die der Firma XYZ. Die vorliegende Arbeit ist nur den Mitarbeitern der Firma XYZ, den Korrektoren sowie den Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich zu machen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen meinen aufrichtigen Dank aussprechen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Erstprüfer Herrn Prof. Dr. Udo Becker, der mir die Möglichkeit eröffnet hat, diese Abschlussarbeit unter seiner Betreuung anzufertigen. Die Gelegenheit, mich im Rahmen dieser Arbeit im Labor einzubringen und dort einen bleibenden Beitrag zu hinterlassen, weiß ich sehr zu schätzen.

Ebenso möchte ich meinem Betreuer Herrn Martin Stahlberg meinen herzlichen Dank aussprechen. Seine engagierte Betreuung, die konstruktiven Ratschläge sowie die stets kompetente Unterstützung haben maßgeblich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen. Die fachlichen Diskussionen und seine wertvollen Anregungen waren für den Fortgang dieser Arbeit von unschätzbarem Wert.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
Nomenklatur	5
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	2
2 Grundlagen	3
2.1 DML-Technologie	3
2.1.1 Funktionsprinzip und Abstrahlcharakteristik	3
2.1.2 Material-Parameter und dessen Einfluss	3
2.2 Exciter-Position und dessen Einfluss	3
2.2.1 Multi-Exciter-Konfiguration	3
2.3 Messtechnik	3
2.3.1 Frequenzgang-Messung und Interpretation	3
2.3.2 Bewertung nach DIN 45500	3
2.4 VDI-2221: Systematische Produktentwicklung	3
2.5 PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act)	3
3 Lösung der Aufgabenstellung	4
3.1 Konzeptentwicklung	5

3.1.1	Lösungskonzepte für Systemarchitektur	5
3.1.2	Vergleichstabelle und Bewertung	5
3.1.3	Konzeptentscheidung für diese Arbeit	5
3.2	Simulation in COMSOL Multiphysics	5
3.2.1	Theoretische Grundlagen der Simulation	5
3.2.2	COMSOL-Modell-Aufbau	5
3.2.3	Durchgeführte Simulationsstudien	5
3.2.4	Zusammenfassung Simulations-Ergebnisse	5
3.3	Test im Freifeld-Raum	5
3.3.1	Versuchsaufbau	5
3.3.2	Getestete Exciter-Positionen	5
3.3.3	Messergebnisse und Auswertung (Messunsicherheit)	5
3.4	Validierung und Vergleich der Ergebnisse	5
3.4.1	Vergleich Simulation und Versuch	5
4	Umsetzung	6
4.1	Bau nach Testergebnissen	6
4.1.1	Materialliste	6
4.1.2	Finale Messungen	6
4.2	Subjektive Hör-Validierung	6
4.2.1	Test-Design (Fragebogen)	6
4.2.2	Ergebnis Diskussion	6
4.3	Wirtschaftliche Betrachtung	6
5	Fazit und Ausblick	7
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	7
5.2	Reflexion	7
Literaturverzeichnis		8

Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichenverzeichnis

<i>Formelzeichen</i>	<i>phys. Einheit</i>	<i>Bedeutung</i>
F	N	Kraft
m	kg	Masse
a	m/s^2	Beschleunigung

Abkürzungsverzeichnis

<i>Abkürzung</i>	<i>Bedeutung</i>
CAD	Computer Aided Design
DML	Distributed Mode Loudspeaker
FEM	Finite-Elemente-Methode

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Konventionelle Membranlautsprecher weisen inherente Limitationen auf: gerichtete Schallabstrahlung mit begrenztem Sweet Spot sowie voluminöse Gehäuse mit Bautiefen über 20 cm limitieren Designfreiheit und Raumintegration. Distributed-Mode-Loudspeaker (DML) bieten als Alternative omnidirektionale Abstrahlung ($150\text{-}170^\circ$) und flache Bauformen (<2 cm) durch Biegewellen-Anregung in Platten. Dies eröffnet Anwendungen in Wandintegration, Automotive-Audio und architektonischen Installationen. Die zentrale Herausforderung besteht jedoch in Frequenzgang-Unregelmäßigkeiten von $\pm 8\text{-}12$ dB (Bai & Huang 2001), welche aus komplexer modaler Struktur resultieren. Die akustische Performance wird maßgeblich durch die Exciter-Position determiniert. Trotz existierender Hersteller-Empfehlungen (z.B. Dayton Audio „2/5x3/5-Regel“) fehlt eine systematische, FEM-gestützte Optimierung für spezifische Panel-Materialien wie Kappa-Sandwichplatten. Zudem besteht Forschungsbedarf bezüglich der optimalen Systemarchitektur (Fullrange, 2-Wege, 3-Wege) unter Berücksichtigung der Vokalbereich-Integrität (500-4000 Hz). Für die Ostfalia Hochschule ergibt sich die Relevanz, durch Integration alternativer Schallwandler-Konzepte das Lehrangebot zu erweitern und die Innovationskompetenz angehender Ingenieure zu fördern. Es besteht somit der Bedarf an systematischer DML-Optimierung mittels Simulation und Experiment sowie der Entwicklung eines kostengünstigen, reproduzierbaren Prototyps für Lehrzwecke.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit verfolgt sowohl technische als auch pädagogische Zielsetzungen. Im technischen Kontext gilt es, einen funktionsfähigen Flachlautsprecher auf Basis der DML-Technologie zu entwickeln, welcher den Anforderungen der DIN 45500 für HiFi-Lautsprecher entspricht. Parallel dazu soll die Arbeit zur Erweiterung des Lehrangebots der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften beitragen, indem Studierenden eine erweiterte Varietät von Akustik-Modulen geboten wird, um das technische Verständnis zu schärfen sowie Innovationskraft und Pioniergeist der zukünftigen Ingenieurgeneration zu fördern.

Im Zentrum der technischen Zielsetzung steht die systematische Optimierung der Exciter-Positionierung auf einem Flachpanel sowie die optimale Größe der Paneele bei gegebenen Materialien. Die Positionierung der Körperschallwandler aber auch die Größe und Eigenschaften der Paneele beeinflusst maßgeblich die Anregung der Schwingungsmoden und determiniert folglich den resultierenden Frequenzgang. Diese Arbeit adressiert die bestehende Forschungslücke durch einen integrierten methodischen Ansatz, welcher experimentelle Freifeld-Messungen, Finite-Elemente-Simulationen in COMSOL Multiphysics sowie den Bau eines funktionsfähigen Flachlautsprechers kombiniert.

Übergeordnet leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Erweiterung des an der Ostfalia verfügbaren Spektrums von Lautsprechertechnologien und bietet angehenden Ingenieuren einen fundierten Einblick in alternative Schallwandler-Konzepte. Durch die Auseinandersetzung mit innovativen Technologien wird die Innovationskompetenz und das kritische analytische Denken der Studierenden gefördert, was für ihre zukünftige Tätigkeit als Ingenieure von fundamentaler Bedeutung ist.

2 Grundlagen

2.1 DML-Technologie

2.1.1 Funktionsprinzip und Abstrahlcharakteristik

2.1.2 Material-Parameter und dessen Einfluss

2.2 Exciter-Position und dessen Einfluss

2.2.1 Multi-Exciter-Konfiguration

2.3 Messtechnik

2.3.1 Frequenzgang-Messung und Interpretation

2.3.2 Bewertung nach DIN 45500

2.4 VDI-2221: Systematische Produktentwicklung

2.5 PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act)

Die PDCA-Methode ist ein etabliertes Vorgehensmodell zur systematischen Steuerung und kontinuierlichen Verbesserung von Prozessen. Der Begriff PDCA steht für die vier aufeinanderfolgenden Phasen Plan, Do, Check und Act, die

gemeinsam einen geschlossenen Regelkreis bilden. Ziel dieses Modells ist es, Prozesse nicht einmalig zu optimieren, sondern sie durch wiederholte Anwendung des Zyklus schrittweise weiterzuentwickeln und dauerhaft zu stabilisieren. Die PDCA-Methode wird insbesondere im Qualitätsmanagement, im Projektmanagement sowie in technischen Entwicklungsprozessen eingesetzt und dient dort als strukturierte Grundlage für methodisches Arbeiten (Der Prozessmanager, PDCA-Zyklus).

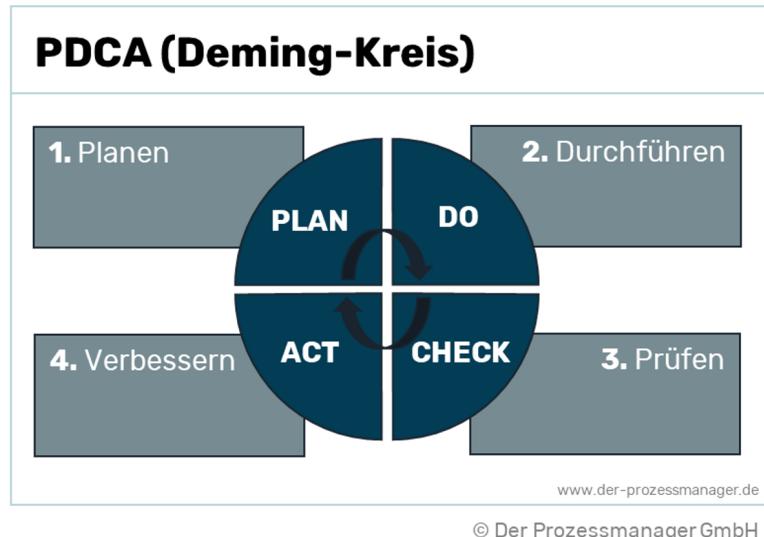


Abbildung 2.1: PDCA-Zyklus (?)

In der Plan-Phase erfolgt zunächst eine Analyse des bestehenden Ist-Zustands des betrachteten Prozesses. Auf Basis dieser Analyse werden Schwachstellen, Abweichungen oder Verbesserungspotenziale identifiziert. Anschließend werden konkrete Ziele definiert, die innerhalb eines festgelegten Zeitraums erreicht werden sollen. Darauf aufbauend werden Maßnahmen geplant, mit denen diese Ziele umgesetzt werden können. Eine präzise Zieldefinition sowie eine realistische Planung sind in dieser Phase von zentraler Bedeutung, da sie die Grundlage für alle nachfolgenden Schritte darstellen und maßgeblich über den Erfolg des gesamten Zyklus entscheiden (Der Prozessmanager, PDCA-Zyklus).

Die Do-Phase umfasst die praktische Umsetzung der in der Plan-Phase definierten Maßnahmen. Dabei werden die geplanten Prozessänderungen oder Ver-

besserungen realisiert, häufig zunächst in einem begrenzten Umfang oder als Pilotanwendung. Ziel dieser Phase ist es, praktische Erfahrungen zu sammeln und erste Ergebnisse zu erzeugen, ohne den gesamten Prozess sofort vollständig umzustellen. Parallel zur Umsetzung werden relevante Daten erhoben, die später zur Bewertung der Maßnahmen herangezogen werden können (Der Prozessmanager, PDCA-Zyklus).

In der Check-Phase erfolgt die systematische Überprüfung der in der Do-Phase erzielten Ergebnisse. Hierbei werden die gemessenen oder beobachteten Resultate mit den zuvor definierten Zielen verglichen. Abweichungen werden analysiert, um festzustellen, ob die umgesetzten Maßnahmen die gewünschte Wirkung erzielt haben. Die Check-Phase dient damit der objektiven Bewertung der Prozessänderungen und stellt sicher, dass Entscheidungen nicht auf subjektiven Eindrücken, sondern auf überprüfbaren Ergebnissen basieren (Der Prozessmanager, PDCA-Zyklus).

Die Act-Phase bildet den Übergang von der Bewertung zur erneuten Planung. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse werden erfolgreiche Maßnahmen standardisiert und dauerhaft in den Prozess integriert. Falls die angestrebten Ziele nicht erreicht wurden, werden Korrekturmaßnahmen definiert oder die ursprüngliche Planung angepasst. Mit dem Abschluss der Act-Phase beginnt der PDCA-Zyklus erneut, wodurch ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess entsteht. Durch diese iterative Vorgehensweise können Prozesse schrittweise optimiert und langfristig an veränderte Anforderungen angepasst werden (Der Prozessmanager, PDCA-Zyklus).

3 Lösung der Aufgabenstellung

3.1 Konzeptentwicklung

3.1.1 Lösungskonzepte für Systemarchitektur

3.1.2 Vergleichstabelle und Bewertung

3.1.3 Konzeptentscheidung für diese Arbeit

3.2 Simulation in COMSOL Multiphysics

3.2.1 Theoretische Grundlagen der Simulation

3.2.2 COMSOL-Modell-Aufbau

3.2.3 Durchgeführte Simulationsstudien

3.2.4 Zusammenfassung Simulations-Ergebnisse

3.3 Test im Freifeld-Raum

3.3.1 Versuchsaufbau

3.3.2 Getestete Exciter-Positionen

3.3.3 Messergebnisse und Auswertung (Messunsicherheit)

3.4 Validierung und Vergleich der Ergebnisse⁸

3.4.1 Vergleich Simulation und Versuch

4 Umsetzung

4.1 Bau nach Testergebnissen

4.1.1 Materialliste

4.1.2 Finale Messungen

4.2 Subjektive Hör-Validierung

4.2.1 Test-Design (Fragebogen)

4.2.2 Ergebnis Diskussion

4.3 Wirtschaftliche Betrachtung

5 Fazit und Ausblick

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Literaturverzeichnis

(1) AUTHOR: *Title*, year