

Design und Herstellung eines Beam Steering-fähigen Saiteninstruments

Nathanael Gubler



Juventus Technikerschule HF

Betreuer: Martin Burger

11. September 2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
1 Einleitung	3
1.1 Abstract	3
1.2 Theorie	3
1.2.1 Das Prinzip des Linienstrahlers	3
1.2.2 Das Prinzip des Monochord	3
1.2.3 Signaltransport	3
1.2.4 Elektronische Klangerzeugung	3
1.3 Vorarbeiten	3
1.3.1 Konstruktion und Herstellung Prototyp	4
1.3.2 Schwingspulen	4
1.3.3 Erkenntnisse	6
1.3.4 Konstruktion Korpus mit sechs Elementen	6
2 System Engineering	6
2.1 Situationsanalyse	6
2.1.1 SWOT Analyse	7
2.1.2 Ishikawa Diagramm	7
2.2 Zieldefinition	8
2.3 Zielbeziehungen	9
2.4 Zielgewichtung	10
2.5 Variantendefinition	11
2.6 Variantenauswertung	11
2.7 Variantenauswahl	11
2.8 Terminplanung	11
3 Umsetzung	12
3.1 Systemaufbau	12
4 Tests	12
5 Fazit	12
13 Tabellenverzeichnis	13
Quellenverzeichnis	14

Abbildungsverzeichnis

1	Rendering des Prototyps	4
2	verschiedene Schwingspulentyphen	5
3	DAEX25QLP-4 Exciter von Dayton Audio	6
4	SWOT-Analyse	7
5	Ishikawa-Analyse	8

1 Einleitung

1.1 Abstract

1.2 Theorie

1.2.1 Das Prinzip des Linienstrahlers

Ein jeder kennt die markanten Lautsprechersysteme von grösseren Eventveranstaltungen. Jedoch kennen nur die wenigsten deren Wirkungsweise, da immer mehr die visuellen Effekte im Vordergrund stehen. Jedoch könnte ein Stadion ohne diese Technologie wohl kaum effizient und in genügender Audioqualität beschallt werden.

Die Wirkungsweise eines solchen *Line Arrays* ist schnell erklärt: Mittel- und Hochtontreiber werden gleichmässig auf einer Linie angeordnet so dass sich durch Schallinterferenzen die einzelnen Wellensignale gezielt gegenseitig auslöschen und dadurch akustische Energie nur in bestimmte Richtungen abgestrahlt wird.

Wie so oft ist dieser Effekt allerdings von mehreren Faktoren abhängig: Zum einen verschieben sich mit einer Änderung der Frequenz alle Phasenlagen, so dass sich alle Auslöschungszonen verschieben. Zum anderen spielen die genauen Dimensionen, Charakteristiken und Abstände zwischen den einzelnen Klangquelle eine entscheidende Rolle. So wirkt ein Line Array nur in einem bestimmten Frequenzband als Linienstrahler. Unterhalb dieses Frequenzbereichs interferieren die einzelnen Schallwellen wegen der langen Wellenlängen kaum noch und agieren mit tieferer Frequenz zunehmend als eine einzelne sphärische Schallquelle. Oberhalb des Frequenzbereiches ist die Wellenlänge kurz im Vergleich zu den Dimensionen der einzelnen Arrayelemente. Dadurch kommt es bereits zu Auslöschungen noch im Nahfeld des Elements, wodurch die Schallenergie direkt senkrecht abgestrahlt wird und nicht mehr mit dem restlichen Array interagiert. **ABBILDUNG SIMULATION**

Dynamisches Line Array Dieser Durch geschickte Verzögerungen der elektrischen Signale lässt sich die Abstrahlcharakteristik auf modernen Linienstrahlern auch softwaremässig programmieren¹.

Dreidimensionales Beam Steering

1.2.2 Das Prinzip des Monochord

1.2.3 Signaltransport

1.2.4 Elektronische Klangerzeugung

1.3 Vorarbeiten

Vorgängig zu dieser Arbeit wurden einige Teile davon in Vorleistung angegangen. Dies mit dem Ziel, sich in der eigentlichen Projektzeit voll und ganz auf die Elektronik und ggf. die Software zu konzentrieren.

¹FOHNLINK

Diese Vorarbeiten beinhalten darum hauptsächlich Konstruktions- sowie Testaufbauten und werden im folgenden aufgezeigt. Dementsprechend sind alle in Kapitel [1.3](#) behandelten Komponenten und Tests als bereits vorhanden, bzw. als Ausgangslage anzusehen.

1.3.1 Konstruktion und Herstellung Prototyp

Um das mechanische Verhalten einer Saite und die Herstellungsmethode mit Lasergeschnittenem MDF zu testen, wurde ein Prototyp konstruiert und hergestellt. Dieser bestand aus einem Resonanzkasten mit einer einzelnen Saite, Steg sowie einer Halterung für einen Rundmagneten. Abbildung [1](#) zeigt ein 3D-Rendering der Konstruktion, welche in Autodesk Fusion 360 konstruiert wurde. Anschliessend wurden MDF-Platten mit einem CO2-Lasercutter des Fablab Winterthur zugeschnitten und diese dann aufeinander geleimt. Somit konnten schon erste Tests durchgeführt werden.



Abbildung 1: Rendering des Prototyps

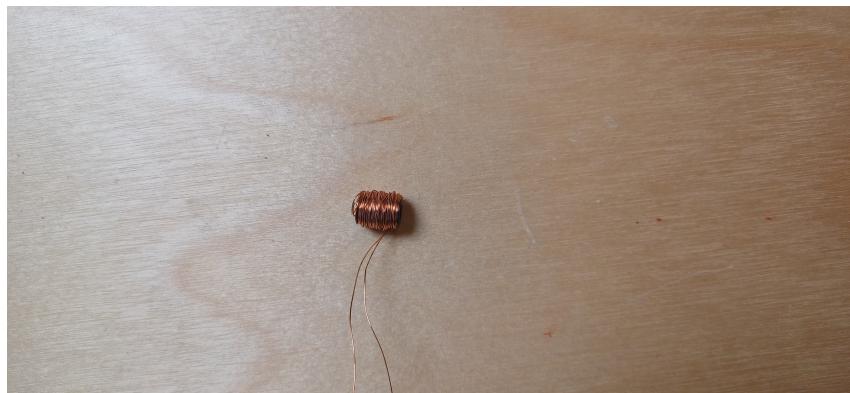
1.3.2 Schwingspulen

Da noch unklar war, wie eine Saite am besten in Schwingung versetzt werden kann, wurden verschiedene Methoden getestet. Dabei wurden hauptsächlich drei Ansätze verfolgt:

Anregung mittels Schwingspule Hierfür wurde Kupferdraht verschiedener Dicke um verschiedene Bobinen gewickelt und dann auf die Saite geleimt. Durch die Anwesenheit eines Magnetfeldes bewegt sich die Spule in Abhängigkeit des durchflossenen Stromes (Lorentzkraft). In Abbildung [2](#) sind einige Varianten aufgeführt. Getrieben wurde der Aufbau von einer analogen Endstufe. Hier zeigten sich schnell einige Herausforderungen: Oftmals war die Impedanz zu niedrig, oder die Hitzeentwicklung war zu stark. Ausserdem war ein grundsätzliches Problem, dass die Schwingspule sehr schnell zu rotieren begann, anstatt zu vibrieren und somit die Zuleitungen aufwickelte.



(a) lange Schwingspule auf 5 Polymerbobinen



(b) kurze Schwingspule auf 3 Polymerbobinen



(c) Schwingspule mit Eisenbobine, vergossen mit hitzebeständigem Kautschuk

Abbildung 2: verschiedene Schwingspulentypen

Des weiteren zeigte sich, dass ein einzelner Magnet neben einer Schwingspule die Spule nicht genügend mit einem Magnetfeld umschließt. Die Bewegung blieb so sehr schwach. Weitaus besser funktionierte der Aufbau als zwei Magnete parallel montiert wurden und die Saite mit der Schwingspule dazwischen geführt wurde. So erzeugte die Schwingspule mit der Eisenbobine eine sehr starke Bewegung, konnte aber wegen des Rotationsproblems nicht verwendet werden.

Anregung mittels blanker Saite Eine sehr einfache Methode war es dann, den Signalstrom schlichtweg direkt durch die Saite zu leiten. Dabei wurde eine alte Instrumentensaite auf den Prototypen gespannt und Kontaktklemmen an den Enden angebracht. Zufälligerweise hatte die Saite eine Impe-

danz von ca. 3.2Ω , wodurch sie direkt mit der Endstufe getrieben werden konnte.

Dieser Aufbau hatte allerdings andere Limitationen: Ohne Wicklungen und Eisenkern blieb das erzeugte Magnetfeld der Saite sehr schwach. Zudem reagiert dieser Aufbau sehr stark auf die Resonanzfrequenz und deren harmonische Schwingungen, während andere Frequenzen kaum hörbar sind. [VIDEO](#)

SWEET Somit liegt ein stark nicht-linearer Frequenzgang vor.

Anregung mittels Exciter Ein weiterer Versuch bestand darin, einen Exciter, also sozusagen einen Lautsprecher ohne Membrane, auf den Prototypen zu platzieren. Somit wäre natürlich die Saite obsolet und der Begriff eines Saiteninstrument wohl nicht mehr zutreffend. Nichtsdestotrotz zeigte sich, dass dieser Aufbau um mehrere Zehnerpotenzen effektiver, also bisweilen auch ohrenbetäubend laut war. Auf der Innenseite montiert wäre das ganze Instrument schlichtweg eine unscheinbare Box welche auf Knopfdruck Klang abstrahlt².



Abbildung 3: DAEX25QLP-4 Exciter von Dayton Audio

1.3.3 Erkenntnisse

1.3.4 Konstruktion Korpus mit sechs Elementen

2 System Engineering

2.1 Situationsanalyse

Als erster Schritt wurden einige Fakten und Rahmenbedingungen zum Projekt ausgelegt und so das Umsystem definiert.

- Die Grundmotivation Projekts ist hauptsächlich ästhetischer Natur.
- Es bietet (voraussichtlich) weder marktwirtschaftlicher noch funktionellen Nutzen.
- Es besteht auch kein Auftraggeber- oder Kundenverhältnis in dem Sinne, und somit auch keine damit verknüpften Interessen.
- Markteinführung nicht zwingend, daher auch keine Zielgruppen bzw. Benutzer per se.
- Es liegt in dem Sinne auch kein systematisches Problem vor, welches gelöst werden soll.
- Das Projekt soll innerhalb von 14 Wochen realisiert werden.

²Das Prinzip existiert bereits als dekorative *Flat Panel* oder *Invisible Loudspeakers*

- Es wurden bereits einige Vorarbeiten als Vorleistung getätigt (siehe 1.3).
- Zum Zeitpunkt der Arbeit sind aufwändige physikalische Simulationsprogramme wie COMSOL o.ä. nicht oder nur beschränkt verfügbar.
- Zudem war kein Zugang zu einer anechoischen Kammer verfügbar, worin z.B. die Abstrahlcharakteristik sehr genau hätte gemessen werden können.
- Als Produktionsstandort stand das FabLab Winterthur zur Verfügung.
- Die Firma JOYNED GmbH erklärte sich bereit, ihr Fachwissen und Beratung zur Implementierung ihrer MILAN-Software zur Verfügung zu stellen.

2.1.1 SWOT Analyse

Anhand der gegebenen Aufgabenstellung wurde nun eine SWOT-Analyse durchgeführt, in der die Ausgangslage nach Stärken (*strengths*), Schwächen (*weaknesses*), Chancen (*opportunities*) und Gefahren (*threats*) kategorisiert wurde. Diese sind in Abbildung 4 abgebildet und zeigten deutlich, dass die Ausgangslage geprägt ist von Schwächen, jedoch für die Zukunft überwiegen Chancen bereitstellt. Die der Ist-Zustand konnte somit als *High Risk - High Reward* Situation bezeichnet werden.

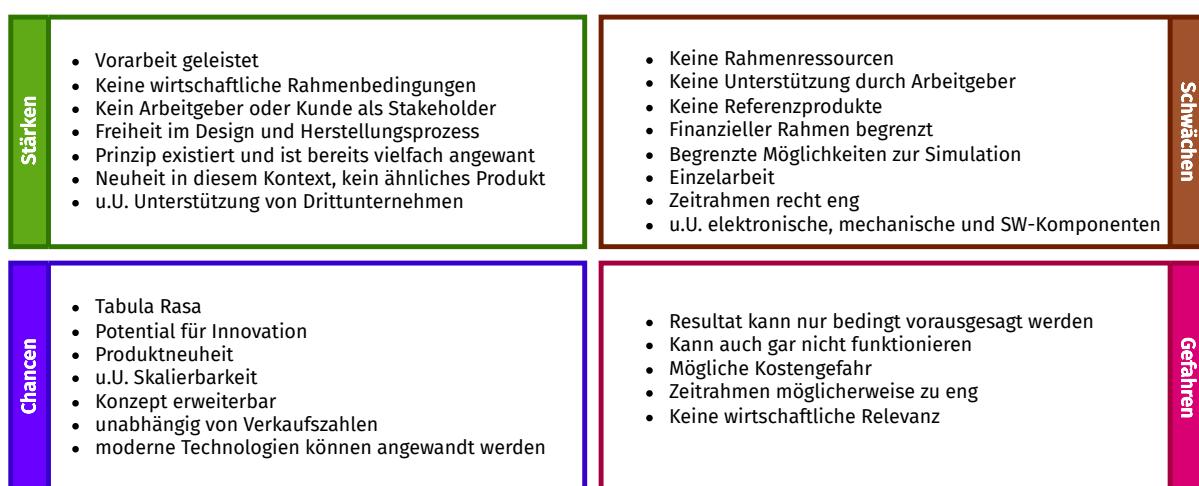


Abbildung 4: SWOT-Analyse

2.1.2 Ishikawa Diagramm

Die möglichen Problemursachen für das Projekt wurden nun kategorisiert und danach in Abbildung 5 aufgezeichnet. Es zeigte sich, dass sich die (möglichen) Problemursachen in folgende Oberkategorien aufteilen liessen:

Physik Hier ist zum einen das grundlegende Phänomen, welches genutzt werden soll recht komplex und von vielen Faktoren abhängig. Zum anderen muss eine Saite in Schwingung versetzt werden, was physikalisch gesehen nicht unbedingt eine Effiziente Methode zur Klangerzeugung ist.

Material Nebst den Faktoren wie Materialdichte, Gewicht und Nachgiebigkeit³, spielte vor allem auch die Herstellungsmöglichkeiten eine Rolle: Wie kann ein Material in welchen Dimensionen produziert werden?

Engineering Hier ist vor allem die Hardware- und Software zu nennen. Je nach Variante können dabei keines, eines oder beide obsolet werden. Zudem können aus der Signalübertragung her auch Fehlerquellen entstehen.

Zeit Der Zeitfaktor gilt wohl als grösster Problemverursacher, da der Abgabetermin fix vorgegeben ist und nicht verschoben werden kann.

Budget Da kein Auftraggeber oder Firma als finanzielle Unterstützung vorhanden ist, muss das ganze Projekt aus privaten Reserven finanziert werden.

Produktesicherheit Obwohl das Produkt nicht direkt als Verkaufsprodukt vorgesehen ist, muss die Sicherheit doch als Faktor miteinbezogen werden.

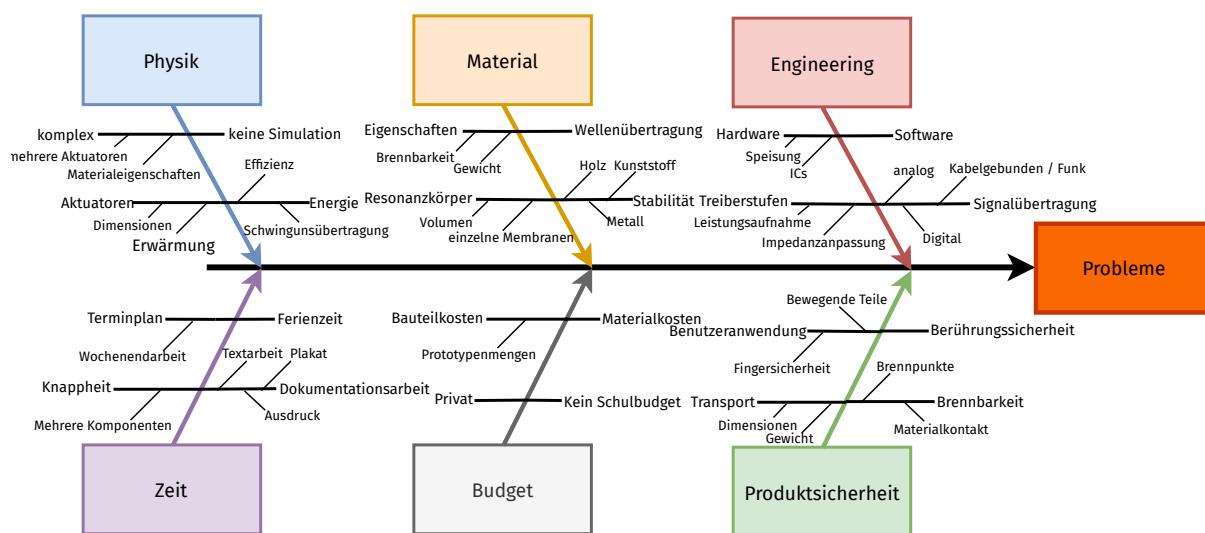


Abbildung 5: Ishikawa-Analyse

2.2 Zieldefinition

Das Grundlegende Projektziel ist eigentlich sehr einfach beschrieben: Es soll ein Gerät entwickelt werden, welches den Klang in eine bestimmte Richtung abstrahlen kann (Beam Forming). Da jedoch in Rahmen dieser Ausbildung bzw. dieses Projekts keine anechoische Kammer und/oder eine genau winkelverstellbare Halterung zur Verfügung stand, um die Direktionalität des Schallpegels zu messen, war die grundsätzliche Messbarkeit dieses Ziels fraglich.

Nichtsdestotrotz sollen sowohl das oben genannte Hauptziel (**Muss**) als auch Nebenziele (**Soll, Kann**)

³siehe: [Compliance \(Physiologie\)](#)

an dieser Stelle definiert und quantifiziert werden. Dabei ist der Ziel-Zeitpunkt jeweils der Abgabetermin der Arbeit. Tabelle ?? zeigt die verschiedenen Ziele und deren Messgrößen.

Zielbezeichnung	MUSS	SOLL	KANN	Messgrösse	Kenn/Grenzzahl	Bedingung
A Direktionale Abstrahlung	x			Direktivität	-3dB SPL	> 10° von Bezugsachse
B Möglichst wenige Stecker		x		Anzahl Stecker	max. 3	-
C Untere Grenzfrequenz tief genug		x		-3dB Punkt	min. 100 Hz	-
D.1 Mobilität		x		Gewicht	max. 6 kg	-
D.2 Mobilität			x	Dimensionen	max. 1.8x0.8x0.3m	-
E Speisung + Daten auf einem Stecker			x	Anzahl Stecker	1	-
F Abstrahlung softwaremäßig steuerbar			x	Möglich	Ja	-
G Reduziertes Brandrisiko	x			MTBF (durch Brand)	min. 200 Jahre	Sachgemäße Benutzung
H Benutzersicherheit		x		MTBF (durch Benutzerunfall)	min. 80 Jahre	Sachgemäße Benutzung
I Batteriebetrieb			x	Akkulaufzeit	12h	-
J Drahtlose Signalübertragung			x	Funkstrecke	Ja	-

Tabelle 1: Projektziele

2.3 Zielbeziehungen

Aus den beschriebenen Zielen können einige Widersprüche festgestellt werden:

C vs. D.2 Eine tiefe untere (akustische) Grenzfrequenz bedingt immer ein grösseres Volumen des Resonanzkörpers. Eine Mobilität bedingt eine gewisse *Handlichkeit* bzw. Transportfähigkeit. Somit setzen sich diese Ziele direkt im Widerspruch.

I vs. G Je nach Batterietyp können diese sehr wohl ein Risiko der Brennbarkeit bergen. Somit ist mit einer Batterie automatisch die Brennbarkeit erhöht. Allerdings ergab sich auch ein sich ergänzendes

Zielpaar:

B vs. E Beide Ziele haben im Endeffekt den selben Fokus. Eine ideale Erfüllung wäre hier ein einziger Stecker mit Speisung und Datensignalen.

2.4 Zielgewichtung

Anschliessend wurden die Ziele jeweils gegeneinander verglichen und eines davon als Präferenz ausgewählt. Somit entstand eine in Tabelle 2 ersichtliche Präferenzmatrix. Aus den Anzahl gewonnenen Vergleichen kann nun pro Ziel ein Rang und eine Gewichtung ermittelt werden. Somit konnten die drei

Rang	Gewicht	Anzahl	Zielbezeichnung	Präferenzen				
2	18	4	A Direktionale Abstrahlung	A				
7	5	1	B Möglichst wenige Stecker	B	A			
9	0	0	C Untere Grenzfrequenz tief genug	D.1	D.1	A		
4	9	2	D.1 Mobilität (Gewicht)	D.2			A	
2	18	4	D.2 Mobilität (Dimensionen)	D.2	D.2	D.2	G	
9	0	0	E Speisung+Daten auf einem Stecker	F				
4	9	2	F Abstrahlung softwaremässig steuerbar	G			G	
1	27	6	G Brennbarkeit	G	G	G		
4	9	2	H Benutzersicherheit	H				
9	0	0	I Batteriebetrieben	J	H			
7	5	1	J Drahtlose Signalübertragung					

Tabelle 2: Zielgewichtung

Hauptziele eruiert werden:

G Brennbarkeit Das Endprodukt muss ein möglichst minimiertes Brennbarkeitsrisiko aufweisen. Zwar gibt es mit der EN 13501-1 eine Klassifikation zum Brandverhalten, jedoch behandelt dieses rein Baustoffe und nicht ein Produkt als ganzes. Dieses Zi

D.2 Mobilität

A Direktionale Abstrahlung

2.5 Variantendefinition

2.6 Variantenauswertung

2.7 Variantenauswahl

2.8 Terminplanung

Für das Projekt wurden nun abgegrenzte Arbeitspakete definiert und diese in einen Zeitplan überführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass wichtigere bzw. kritische Pakete (z.B. die Variantenauswahl) mehr Zeit bekamen. Als Hilfsmittel wurde zudem die Projektfunktion von github.com verwendet. Dieses Tool bietet nicht nur den Vorteil einer grafischen Darstellung (Roadmap, Burn-up etc.), sondern auch dass jedes Paket mit einer Historie, Kommentaren (auch von dritten), Files, Links sowie Referenzen untereinander ergänzt werden. So kann der Projektverlauf dynamisch auf jedes einzelne Paket hin verfolgt werden.

In Tabelle 3 sind alle Arbeitspakete, deren Zeitrahmen sowie den jeweiligen Github-Links nochmals tabellarisch dargestellt.

Tabelle 3: Terminplanung in tabellarischer Form

Arbeitspaket	URL	Startdatum	Enddatum
Terminplanung	Link	Sep 4, 2025	Sep 5, 2025
IST-Zustandsanalyse	Link	Sep 6, 2025	Sep 7, 2025
Zieldefinition	Link	Sep 8, 2025	Sep 9, 2025
Zielgewichtung	Link	Sep 10, 2025	Sep 11, 2025
Varianten- & Risikoanalyse	Link	Sep 12, 2025	Sep 16, 2025
Variantenauswahl	Link	Sep 17, 2025	Sep 17, 2025
Kennzahlberechnung / Limits	Link	Sep 18, 2025	Sep 21, 2025
Bauteilevaluation	Link	Sep 22, 2025	Sep 30, 2025
Bauteilauswahl	Link	Oct 1, 2025	Oct 4, 2025
Print Schema draft	Link	Oct 5, 2025	Oct 11, 2025
Print Schema v1	Link	Oct 12, 2025	Oct 18, 2025
Print Layout v1	Link	Oct 19, 2025	Oct 26, 2025
Peer-review Schema und Layout	Link	Oct 27, 2025	Oct 31, 2025
Print Schema Final	Link	Nov 1, 2025	Nov 3, 2025
Print Layout final	Link	Nov 3, 2025	Nov 6, 2025
Gerber-Daten generieren und Printbestellung	Link	Nov 7, 2025	Nov 7, 2025
Konstruktion des Korpus fertigstellen	Link	Nov 8, 2025	Nov 10, 2025
Herstellung Korpus-Teile	Link	Nov 11, 2025	Nov 15, 2025
Zusammenbau Korpus	Link	Nov 16, 2025	Nov 22, 2025
Bestückung + Lötarbeit Print	Link	Nov 23, 2025	Nov 30, 2025
Funktionstest Print	Link	Dec 1, 2025	Dec 4, 2025
Zusammenbau Komplettsystem & Programmierung	Link	Dec 4, 2025	Dec 18, 2025
Funktionstests Komplettsystem	Link	Dec 18, 2025	Dec 25, 2025
Schlussmessung & Auswertungen	Link	Dec 25, 2025	Dec 31, 2025
Audruck (Plakat und Arbeit)	Link	Jan 1, 2026	Jan 6, 2026
Abgabe Diplomarbeit	Link	Jan 7, 2026	Jan 7, 2026

3 Umsetzung

3.1 Systemaufbau

4 Tests

5 Fazit

Tabellenverzeichnis

1	Projektziele	9
2	Zielgewichtung	10
3	Terminplanung in tabellarischer Form	12

Quellenverzeichnis

Noy, Wolfgang Ahnert; Dirk. *Sound Reinforcement for Audio Engineers*. 4 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN: Routledge, 2023. ISBN: 978-1-032-11518-4. DOI: [10.4324/9781003220268](https://doi.org/10.4324/9781003220268).