

Design und Herstellung eines Beam Steering-fähigen Saiteninstruments

Nathanael Gubler

TS TSE 2302 A



Juventus Technikschule HF

Betreuer: Martin Burger

21. September 2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
1 Einleitung	4
1.1 Abstract	4
1.2 Theorie	4
1.2.1 Das Prinzip des Linienstrahlers	4
1.2.2 Das Prinzip des Monochord	4
1.2.3 Signaltransport	4
1.2.4 Elektronische Klangerzeugung	4
1.3 Vorarbeiten	4
1.3.1 Konstruktion und Herstellung Prototyp	5
1.3.2 Schwingspulen	5
1.3.3 Erkenntnisse	7
1.3.4 Konstruktion Korpus mit sechs Elementen	7
2 System Engineering	7
2.1 Situationsanalyse	7
2.1.1 SWOT Analyse	8
2.1.2 Ishikawa Diagramm	8
2.2 Zieldefinition	9
2.3 Zielbeziehungen	10
2.4 Zielgewichtung	11
2.5 Variantendefinition	12
2.5.1 Morphologischer Kasten	12
2.5.2 Variante A: Alles Analog	13
2.5.3 Variante B: Drahtlos & Portabel	15
2.5.4 Variante C: High-End Audiophil	17
2.5.5 Variante D: Einfache Anwendung, Plug'n'Play	19
2.5.6 Variante E: Neu ist besser	21
2.6 Variantenauswertung	23
2.6.1 Nutzwertanalyse	23
2.6.2 Kosten-Nutzen Analyse	23
2.7 Variantenauswahl	25
2.8 Terminplanung	25
3 Umsetzung	26
3.1 Systemaufbau	26
4 Tests	26
5 Fazit	26
13 Tabellenverzeichnis	27

Quellenverzeichnis	28
------------------------------	----

Abbildungsverzeichnis

1	Rendering des Prototyps	5
2	verschiedene Schwingspulentypen	6
3	DAEX25QLP-4 Exciter von Dayton Audio	7
4	SWOT-Analyse	8
5	Ishikawa-Analyse	9
6	Der morphologische Kasten	12
7	Variante A	13
8	Risikoanalyse der Variante A	14
9	Variante B	15
10	Risikoanalyse der Variante B	16
11	Variante C	17
12	Risikoanalyse der Variante C	18
13	Variante D	19
14	Risikoanalyse der Variante D	20
15	Variante E	21
16	Risikoanalyse der Variante E	22
17	Kosten-Nutzen Analyse	23
18	Nutzwertanalyse	24
19	Weitere Massnahmen	25

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. **AB-BILDUNG 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

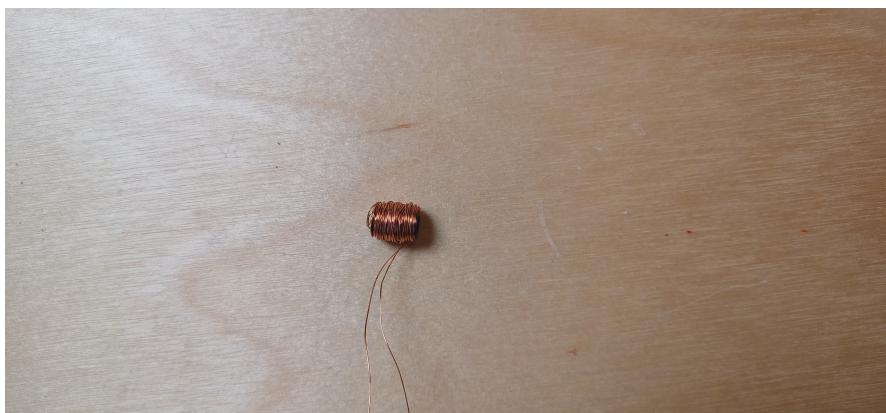
1.3.2 Schwingspulen

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

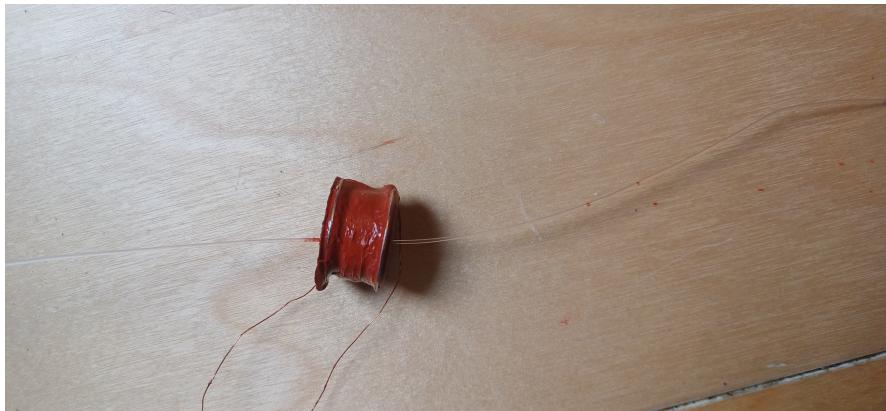
Anregung mittels Schwingspule Hierfür wurde Kupferdraht verschiedener Dicke um verschiedene Bobinen gewickelt und dann auf die Saite geleimt. Durch die Anwesenheit eines Magnetfeldes bewegt sich die Spule in Abhängigkeit des durchflossenen Stromes (Lorentzkraft). In Abbildung 2 sind einige Varianten 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 Schwingspulentyphen

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. Weitauß 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 Impedanz 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 SWEEP** 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.

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

- Es liegt in dem Sinne auch kein systematisches Problem vor, welches gelöst werden soll.
- Das Projekt soll innerhalb von 14 Wochen realisiert werden.
- 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 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.

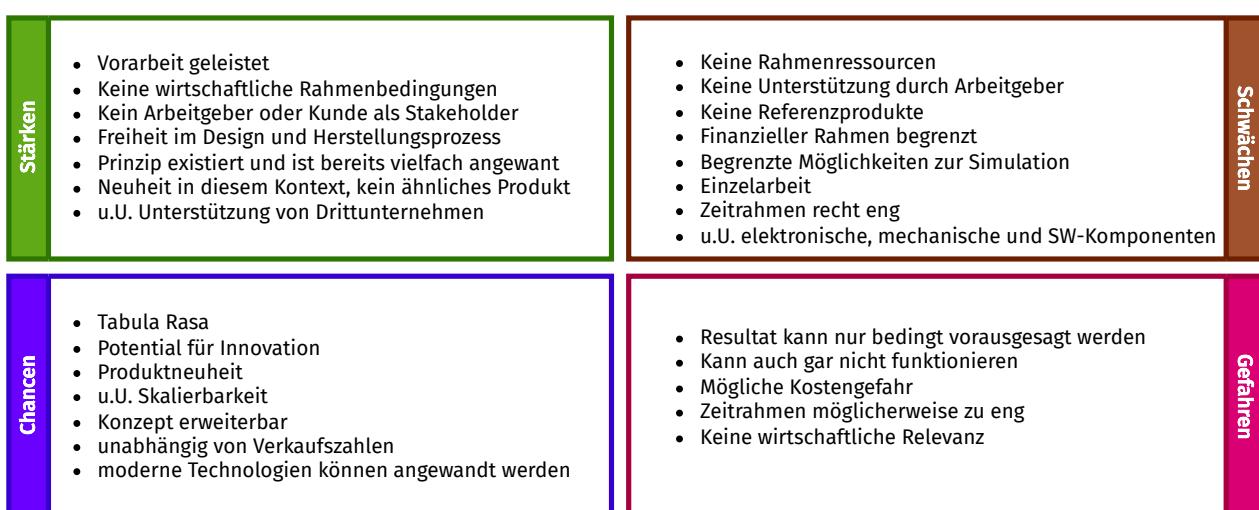


Abbildung 4: SWOT-Analyse

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.

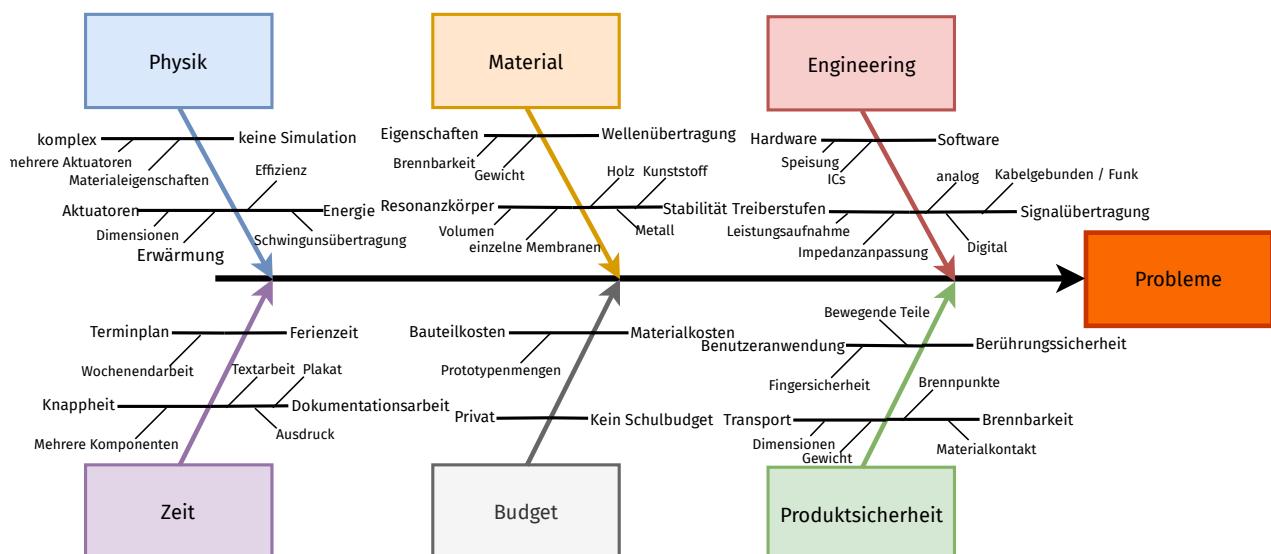


Abbildung 5: Ishikawa-Analyse

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

³siehe: Compliance (Physiologie)

Halterung zur Verfügung stand, um die Direktonalität des Schallpegels zu messen, war die grundsätzliche Messbarkeit dieses Ziels fraglich.

Nichtsdestotrotz sollen sowohl das oben genannte Hauptziel (**Muss**) als auch Nebenziele (**Soll, Kann**) 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 ?? ersichtliche Präferenzmatrix. Aus den Anzahl gewonnenen Vergleichen kann nun pro Ziel ein Rang und eine Gewichtung ermittelt werden. Somit konnten die drei Hauptziele

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

Tabelle 2: Zielgewichtung

eruiert werden:

G Reduziertes Brandrisiko 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 Ziel ist insbesondere relevant, da u.U. Brennbare Materialien wie MDF in Kombination von Leistungsstufen vorkommen.

D.2 Mobilität

A Direktionale Abstrahlung

2.5 Variantendefinition

2.5.1 Morphologischer Kasten

Da das Projekt mehrere Ebenen (Elektronisch, mechanisch und Signalechnisch) umfasst, wurde versucht, alle Möglichkeiten zu jedem Sub-Element in einem morphologischen Kasten aufzuzeichnen. Dieser ist in Abbildung 6 zu sehen. Aus diesen konnten nun verschiedene Varianten generiert und bewertet werden.

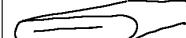
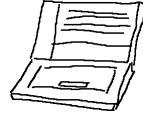
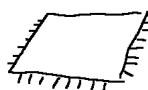
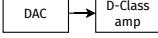
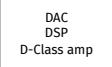
Morphologischer Kasten						
	PoE	PoE+	USB	internes Netzteil	externes Netzteil	Batterie
Speisung	<ul style="list-style-type: none"> - RJ45-Stecker - 802.3af - max. 12.95 W verfügbar am Gerät 	<ul style="list-style-type: none"> - RJ45-Stecker - 802.3at - max. 25.5 W verfügbar am Gerät 	<ul style="list-style-type: none"> - USB-B oder -C Stecker - Je nach Spezifikation max. 0.5 - 15W 	 <ul style="list-style-type: none"> - Aufwändige Leistungselektronik - sehr grosse Leistung (mehrere kW) verfügbar 	 <ul style="list-style-type: none"> - Einkaufsteil + Rundstecker - Auch Phoenixstecker möglich - grosse Leistung (mehrere 100W verfügbar) 	 <ul style="list-style-type: none"> - Unabhängigkeit vom Netz - evtl. Schaltung für Aufladung - Je nach Typ besteht erhöhte Brandgefahr
Signalübertragung	Analog  <ul style="list-style-type: none"> - Phoenix Klemmen - Pro Kanal ein Signal oder ein Signal für alle - Differential/single ended - "dummie" Treiberstufe 	USB  <ul style="list-style-type: none"> - USB-C Anschluss - USB-Endpoint IC benötigt - Kanalanzahl? - Programmieraufwand 	Dante  <ul style="list-style-type: none"> - RJ-45 Stecker - etabliertes Netzwerkprotokoll - Modular oder Softwaremäßig erhältlich - u.U. teuer 	Milan  <ul style="list-style-type: none"> - RJ-45 Stecker - etabliertes Netzwerkprotokoll - Modulare erhältlich - Unterstützung durch JOYNED - Braucht spezifische Switches 	serielle Protokolle (MADI, AES/EBU)	Bluetooth/WLAN  <ul style="list-style-type: none"> - Bluetooth oder WiFi - Latenzen - Verbindungsauflauf / Discovery
Signalverarbeitung	PC/DAW  <ul style="list-style-type: none"> - Bereits verfügbar - Einfache Konfiguration - Erzeugt 6-Kanäle als Ausgang - Benötigt externe Übertragung 	interner DSP  <ul style="list-style-type: none"> - Layout Zeitintensiv - Programmierung Zeitintensiv - Flexibilität - Benötigt nur ein CH als Input 	externer USB-DSP/DAC  <ul style="list-style-type: none"> - grossflächig erhältlich - Ausgangsformate Seriell oder Analog - Braucht Empfängerseitig entsprechende Decoder 	analoge Filterschaltung  <ul style="list-style-type: none"> - rein analog - Delays werden mit passiven Bauteilen eingestellt. - aufwendig, komplex 		
Treiberstufe	DAC mit D-Klasse  <ul style="list-style-type: none"> - 2 ICs - beide müssen korrekt konfiguriert werden - TDM oder I2S Input - Limiter muss vorher gehandelt werden 	integrierter DAC + Limiter + D-Klasse  <ul style="list-style-type: none"> - all-in-one Lösung - evtl. aufwendiger zu löten - Konfiguration u.U. erheblich 	analoger Amp (AB)  <ul style="list-style-type: none"> - tried and tested - robust - Signalqualität - Hohe Ruhelastung 	analoger Amp (Röhren)  <ul style="list-style-type: none"> - fast ausgestorben - Bauteile schwer zu finden - braucht Hochspannung (mehrere 100V) - komplexes Design 		
Klangzeugung	Saite mit Schwingspule  <ul style="list-style-type: none"> - komplexe Herstellung - braucht zusätzliche Permanentmagnete - Befestigung an Saite fraglich - Wärmeentwicklung 	Saite ohne Schwingspule  <ul style="list-style-type: none"> - einfacher Aufbau - braucht zusätzliche Permanentmagnete - sehr schlechter Wirkungsgrad, kaum hörbar - nur genau eine Frequenz und deren Obertöne - Wärmeentwicklung 	Exciter  <ul style="list-style-type: none"> - einfache Montage - relativ günstig erhältlich - effektiver Aufbau - einfach austauschbar - kann auch unseitig montiert werden 	trad. Lautsprecher  <ul style="list-style-type: none"> - bekanntes System - sehr verbreitet und grossflächig erhältlich - günstig bis sehr teuer - verschiedene Größen - Keine Neuheit 		
Material	MDF  <ul style="list-style-type: none"> - nahezu perfekt eben, darum sehr leicht bearbeitbar - Laserschneidbar oder CNC - günstig erhältlich in allen Dicken, Farben und Zuschneiden - nicht unbedingt hochwertig 	PLA  <ul style="list-style-type: none"> - im 3D-Druck weit verbreitet - Einfach erhältlich, relativ günstig - verschiedene Geometrien möglich - sehr langsame Geschwindigkeit - Volumen sehr stark begrenzt 	Birke-Multiplex  <ul style="list-style-type: none"> - hochwertiger Baustoff aus geschichteten Holz - relativ teuer - nur in bestimmten Dicken erhältlich - hochwertig 	PMMA (Plexiglas)  <ul style="list-style-type: none"> - schlagfest, feuerfest - verschiedene Farben/Durchsichtigkeiten erhältlich - relativ günstig 		

Abbildung 6: Der morphologische Kasten

2.5.2 Variante A: Alles Analog

In dieser Variante wird möglichst alles via analoge Signalpfade geführt. So kann zum Beispiel die Signalverzögerung durch Allpass-Filter realisiert werden. Fokus ist auf Robustheit und Signalreinheit.

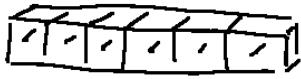
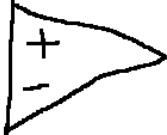
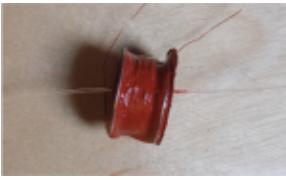
Speisung:	Signalübertragung:	Signalverarbeitung:
externes Netzteil	Analog	analoge Filterschaltung
		
<ul style="list-style-type: none"> - Einkaufsteil + Rundstecker - Auch Phoenixstecker möglich - grosse Leistung (mehrere 100W verfügbar) 	<ul style="list-style-type: none"> - Phoenix Klemmen - Pro Kanal ein Signal oder ein Signal für alle - Differentiell/single ended - "dumme" Treiberstufe 	<ul style="list-style-type: none"> - rein analog - delays werden mit passiven Bauteilen eingestellt. - aufwendig, komplex
Treiberstufe:	Material:	Klangerzeugung:
analoger Amp (AB)	MDF	Saite mit Schwingspule
		
<ul style="list-style-type: none"> - tried and tested - robust - Signalqualität - Hohe Ruheleistung 	<ul style="list-style-type: none"> - nahezu perfekt eben, darum sehr leicht bearbeitbar - Laserschneidbar oder CNC - günstig erhältlich in allen Dicken, Farben und Zuschnitten. - nicht unbedingt hochwertig 	<ul style="list-style-type: none"> - komplexe Herstellung - braucht zusätzliche Permanentmagnete - Befestigung an Saite fraglich - Wärmeentwicklung

Abbildung 7: Variante A

Vorteile Resultate sind relativ schnell messbar. Programmierarbeit erübriggt sich komplett. Zudem sind rein analoge Designs tendenziell robuster und langlebiger. Durch die fehlende Abtastung bleiben Höhenanteile erhalten und die Signalqualität eher hochwertiger.

Nachteile Fehlersuche ist rein messtechnisch möglich. Nachträgliche Änderungen sehr teuer und Zeitaufwändig. Der Überwachung sind starke Grenzen gesetzt: So muss bei einem Unterbruch der gesamte Signalpfad durchgemessen werden. Ein weiterer Nachteil ist die Schwingspule, deren Befestigung an der Saite noch genauer ausgearbeitet werden muss.

Risikoanalyse Durch sich bewegende Teile, welche unter Umständen durch den Benutzer berührt werden können entsteht zum einen ein Risiko einer leichten Verletzung. Zum anderen könnte die physikalische Montage von analoger Leistungselektronik auf MDF zu einer Brandgefahr führen. Zudem können sehr leicht durch fehlende, unsaubere oder falsche Steckverbindungen Funktionsfehler auftreten. Mit der noch offenen Montagetechnik der Schwingspule besteht zudem die Gefahr, dass die Klangzeugung nicht überzeugend funktioniert, insbesondere im Dauereinsatz.

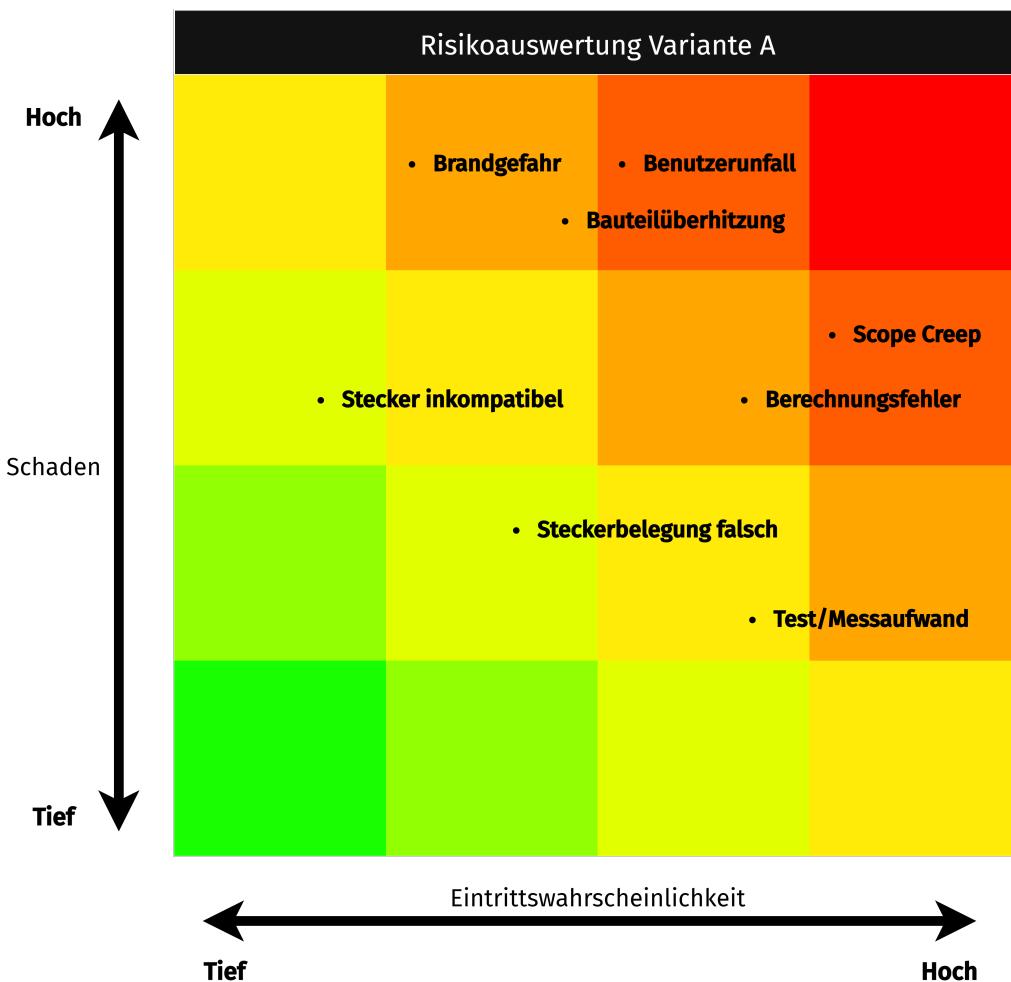


Abbildung 8: Risikoanalyse der Variante A

2.5.3 Variante B: Drahtlos & Portabel

Der Hauptfokus dieser Variante ist maximale Mobilität und minimale Steckverbindungen. Dies wird zum einen durch eine Batterie erreicht, und zum anderen durch eine drahtlose Signalübertragung.

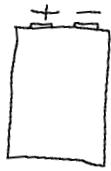
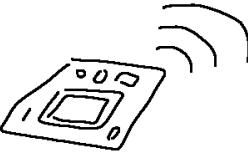
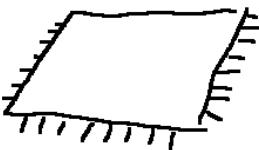
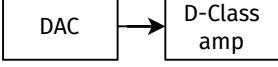
Speisung:	Signalübertragung:	Signalverarbeitung:
Batterie	Bluetooth/WLAN	interner DSP
		
<ul style="list-style-type: none"> - Unabhängigkeit vom Netz - evtl. Schaltung für Aufladung - Je nach Typ besteht erhöhte Brandgefahr 	<ul style="list-style-type: none"> - Bluetooth oder WiFi - Latenzzzeiten - Verbindungsaufbau / Discovery 	<ul style="list-style-type: none"> - Layout Zeitintensiv - Programmierung Zeitintensiv - Flexibilität - Benötigt nur ein CH als Input
Treiberstufe:	Material:	Klangerzeugung:
DAC mit D-Klasse	PMMA (Plexiglas)	Exciter
		
<ul style="list-style-type: none"> - 2 ICs - beide müssen korrekt konfiguriert werden - TDM oder I2S Input - Limiter muss vorher gehandelt werden 	<ul style="list-style-type: none"> - schlagfest, feuerfest - verschiedene Farben/Durchsichtigkeiten erhältlich - relativ günstig 	<ul style="list-style-type: none"> - einfache Montage - relativ günstig erhältlich - effektiver Aufbau - einfach austauschbar - kann auch unterseitig montiert werden

Abbildung 9: Variante B

Vorteile Da hier die Datenübertragung ohne Stecker auskommt, kann hier im Einsatz komplett auf Kabel verzichtet werden. Somit vereinfachen sich insbesondere weiträumigere Setups, in dem das Gerät weiter weg aufgestellt ist. Als einziger Stecker bleibt ein Ladestecker für die Batterie übrig. Für die Einbindung von Batterien bzw. deren Ladezyklus gibt es zudem bereits sehr viele fertige Komponenten.

Nachteile Die korrekte Implementierung des Signalpfades von Bluetooth oder WiFi über DSP, den DAC und die D-Klasse Endstufe wird wohl einiges an Aufwand brauchen, insbesondere bei zeitkritischen Anwendungen wie dieser. Zudem entsteht je nach Batterietyp eine Brandgefahr, die zwar durch das Plexiglas verhindert ist aber dennoch z.B. andere Materialien im Raum in Brand setzen kann.

Risikoanalyse Zwar entfällt hier das Risiko einer falschen Steckverbindung komplett, jedoch erhöht sich durch die Anwesenheit einer Batterie die Brandgefahr deutlich. Dies auch wenn PMMA als Material verwendet wird, da sich die Batterie selbst schon entzünden kann. Zudem entsteht durch den komplexen Aufbau ein unter Umständen zeitintensive Designphase, welche auch mit HF-Layoutfehlern verbunden sein können.

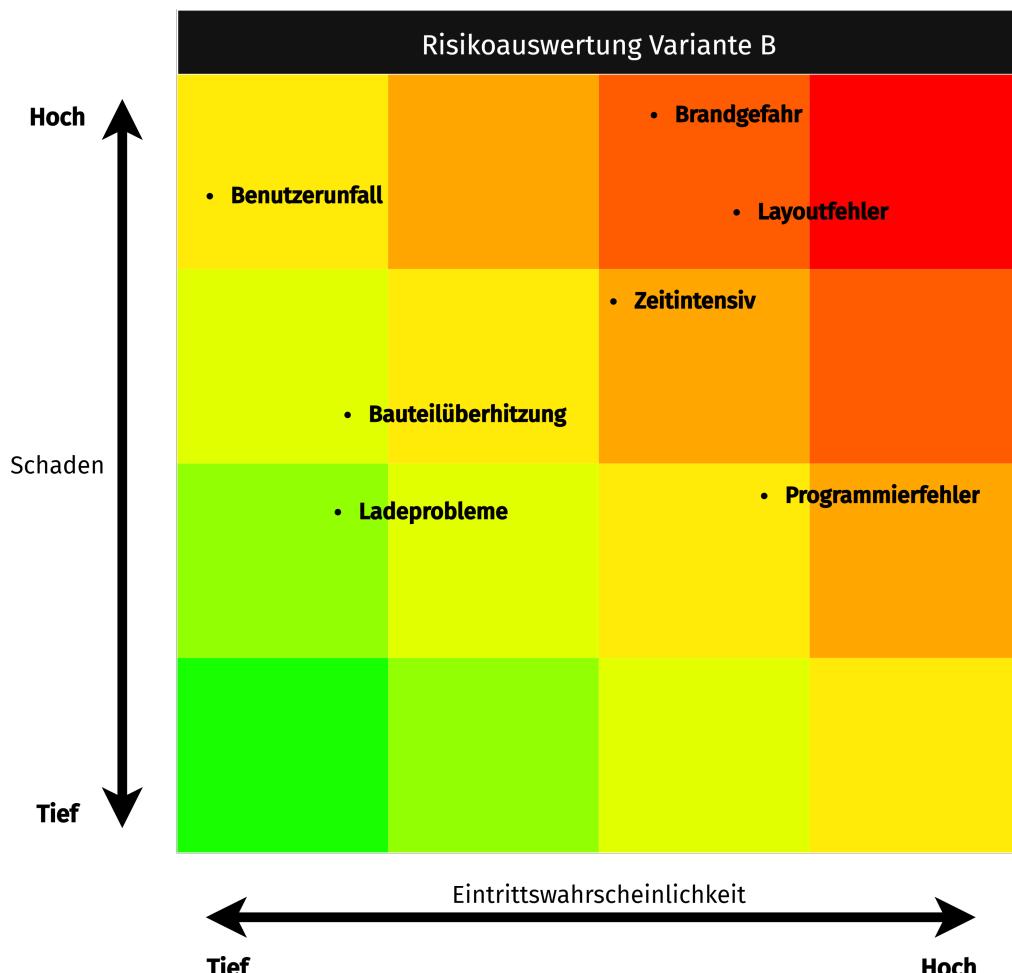


Abbildung 10: Risikoanalyse der Variante B

2.5.4 Variante C: High-End Audiophil

Maximale Kontrolle steht bei dieser Variante im Zentrum. Nur bewährte und zuverlässige Komponenten sollen verwendet werden. Einkaufsteile sind nach Verzerrungsfreiheit und rauscharmen Signalpfaden auszuwählen. Preispunkt ist sekundär.

Speisung:	Signalübertragung:	Signalverarbeitung:
internes Netzteil	serielle Protokolle (MADI, AES/EBU)	interner DSP
		
<ul style="list-style-type: none"> - Aufwändige Leistungselektronik - sehr grosse Leistung (mehrere kW) verfügbar 	<ul style="list-style-type: none"> - BNC oder Glasfaser - hochwertige Signalübertragung - modulator und demodulator benötigt 	<ul style="list-style-type: none"> - Layout Zeitintensiv - Programmierung Zeitintensiv - Flexibilität - Benötigt nur ein CH als Input
Treiberstufe:	Material:	Klangerzeugung:
analoger Amp (AB)	Birke-Multiplex	trad. Lautsprecher
		
<ul style="list-style-type: none"> - tried and tested - robust - Signalqualität - Hohe Ruheleistung 	<ul style="list-style-type: none"> - hochwertiger Baustoff aus geschichtetem Holz - relativ teuer - nur in bestimmten Dicken erhältlich - hochwertig 	<ul style="list-style-type: none"> - bekanntes System - sehr verbreitet und grossflächig erhältlich - günstig bis sehr teuer - verschiedenste Größen - Keine Neuheit

Abbildung 11: Variante C

Vorteile Die Audioqualität als oberste Priorität begünstigt ein beeindruckendes Hörerlebnis. Zudem ist die Auswahl an bewährten Methoden und robusten Materialien ein Garant für eine lange Lebensdauer.

Nachteile Als erstes ist hier sicher auch die Komplexität zu nennen, da sehr spezifische Bauteile ausgewählt werden müssen, die unter Umständen nicht weit verbreitet sind. Zum anderen wird hier auch das Budget sehr strapaziert, wohl über die Belastungsgrenzen hinaus.

Risikoanalyse Die grosse Anzahl verschiedener eigens entworfenen Komponenten führt nebst der Gefahr eines Scope Creeps auch eventuell zu Ungenauigkeiten oder unvorhergesehenen negativen Effekten. Zudem kommt zur Leistungselektronik der Endstufe auch die Leistungselektronik des Netzteils hinzu. Auch der Lautsprecher an sich kann überhitzen und zu Brandursachen führen.

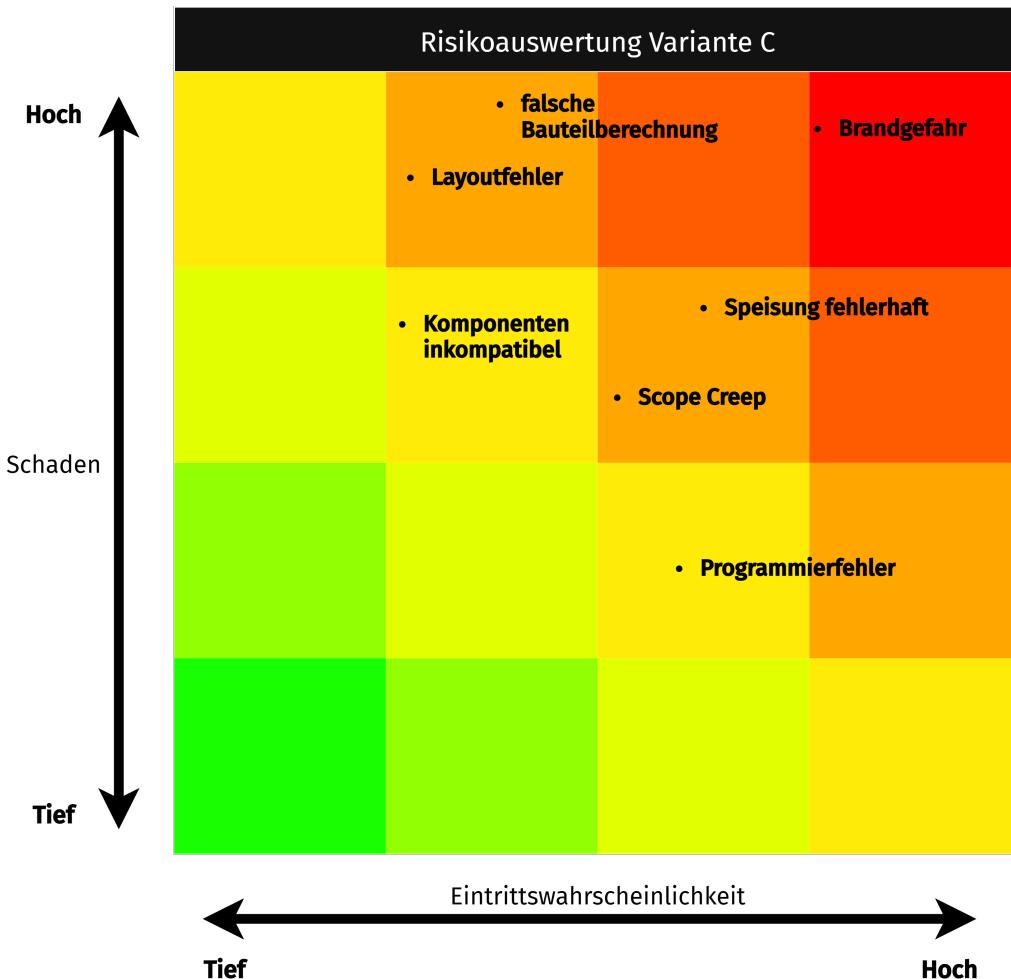


Abbildung 12: Risikoanalyse der Variante C

2.5.5 Variante D: Einfache Anwendung, Plug'n'Play

Möglichst einfache Anwendung ist zentral für ein überzeugendes Benutzererlebnis. Daher wurde diese Variante mit diesem Fokus generiert. Zudem ist ein Nebenfokus hier die günstige Herstellung des Systems.

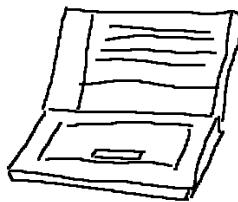
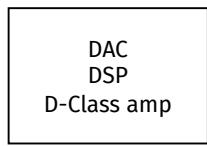
Speisung:	Signalübertragung:	Signalverarbeitung:
PoE+	Milan	PC/DAW
Treiberstufe:	Material:	Klangerzeugung:
Speisung: PoE+	Signalübertragung:   <ul style="list-style-type: none"> - RJ45-Stecker - 802.3at - max. 25.5 W verfügbar am Gerät 	Signalverarbeitung:  <ul style="list-style-type: none"> - Bereits verfügbar - Einfache Konfiguration - Erzeugt 6-Kanäle als Ausgang - Benötigt externe Übertragung
Treiberstufe: integrierter DAC + Limiter + D-Klasse	Material: MDF	Klangerzeugung: Exciter 
 <ul style="list-style-type: none"> - all-in-one Lösung - evlt. aufwändiger zu löten - Konfiguration u.U. erheblich 	<ul style="list-style-type: none"> - nahezu perfekt eben, darum sehr leicht bearbeitbar - Laserschneidbar oder CNC - günstig erhältlich in allen Dicken, Farben und Zuschnitten. - nicht unbedingt hochwertig 	<ul style="list-style-type: none"> - einfache Montage - relativ günstig erhältlich - effektiver Aufbau - einfach austauschbar - kann auch unterseitig montiert werden

Abbildung 13: Variante D

Vorteile Da Datensignale und Speisung auf einem RJ45-Stecker geliefert werden, muss nur diese eine Verbindung hergestellt werden. Zudem ist mit dem MILAN-Protokoll eine automatische Bandbreitenreservation und somit keine Benutzerkonfiguration notwendig. Da DAC und Treiberstufe in einem Chip integriert ist, bleibt die Programmierung begrenzt.

Nachteile Da das Signal direkt vom PC generiert wird, muss dieses zuerst in das MILAN-Protokoll verpackt werden. Zudem muss ein AVB-fähiger Switch verwendet werden.

Risikoanalyse Die Brandgefahr bleibt nach wie vor ein Hauptfaktor in der Risikoauswertung, bedingt durch die Verbindung von Holzfasern und Leistungsendstufen. Der noch nicht weitum verbreitete MILAN-Standard könnte hier auch zu Inkompatibilitäten, oder zumindest zu einem komplexen Setup führen. Auch könnte die Implementierung eines neuen Standards schnell Scope Creep führen, da keine fix fertigen Lösungen bereitstehen.

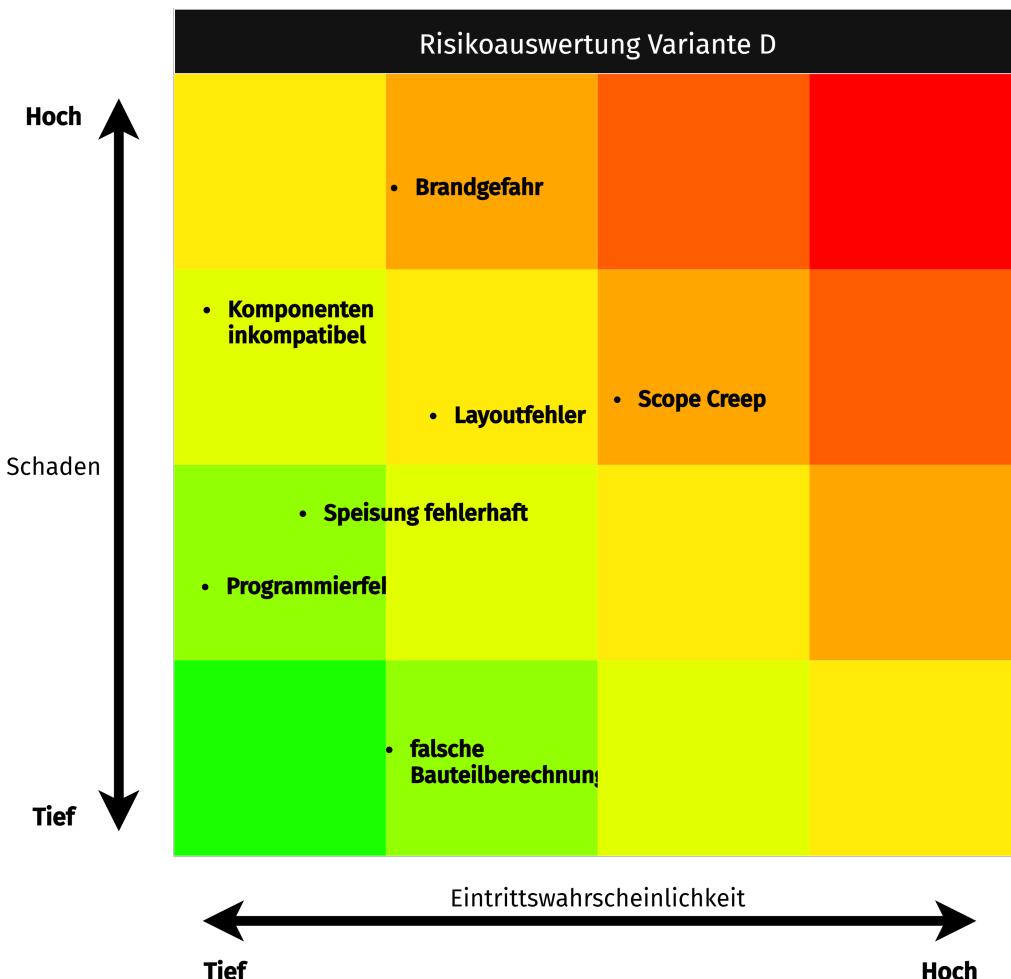


Abbildung 14: Risikoanalyse der Variante D

2.5.6 Variante E: Neu ist besser

Innovation und moderne Technologie ist das Hauptmerkmal dieser Variante. Es sollen möglichst die neusten Methoden und Komponenten verwendet werden. Etablierte Verfahren sind bereits vollumfänglich im Markt vorhanden und daher uninteressant. Daher werden alles entweder neue Technologien oder bislang nicht verwendete Ideen verwendet.

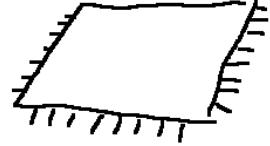
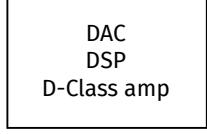
Speisung:	Signalübertragung:	Signalverarbeitung:
PoE+	Milan	interner DSP
Speisung: PoE+	Signalübertragung:   <ul style="list-style-type: none"> - RJ45-Stecker - 802.3at - max. 25.5 W verfügbar am Gerät 	Signalverarbeitung:  <ul style="list-style-type: none"> - Layout Zeitintensiv - Programmierung Zeitintensiv - Flexibilität - Benötigt nur ein CH als Input
Treiberstufe:  integrierter DAC + Limiter + D-Klasse	Material: PMMA (Plexiglas)	Klangerzeugung: Saite ohne Schwingspule
<ul style="list-style-type: none"> DAC DSP D-Class amp 	 <ul style="list-style-type: none"> - schlagfest, feuerfest - verschiedene Farben/Durchsichtigkeiten erhältlich - relativ günstig 	 <ul style="list-style-type: none"> - einfacher Aufbau - braucht zusätzliche Permanentmagnete - sehr schlechter Wirkungsgrad, kaum hörbar - nur genau eine Frequenz und deren Obertöne - Wärmeentwicklung

Abbildung 15: Variante E

Vorteile Durch die Neuheit und Innovation entsteht Freiheit: Es gibt in dem Sinne keine etablierten Verfahren oder Protokolle. Daher eröffnet sich ein Spielraum für Eigeninitiative.

Nachteile Durch die undefinierten Variablen muss sehr viel Arbeit in deren Ausarbeitung investiert werden. So muss die gesamte Signalverarbeitung und die Kommunikation mit dem DAC definiert werden. Zudem entstehen unter Umständen weitere Kosten durch wenig verfügbare Bauteile.

Risikoanalyse Nebst hohen Herstellungskosten kann hier eine stromdurchflossene Saite erhitzten und zu Verbrennungen führen. Des weiteren kann die Impedanz der Saite schlicht zu tief sein für die Endstufe, wodurch die Schwingung wenn überhaupt nur kaum wahrnehmbar also extrem leise erzeugt werden kann. Zudem entsteht durch den internen DSP auch hier die Gefahr des *Scope Creep*, da die Signalverarbeitung potentiell recht umfangreich werden kann.

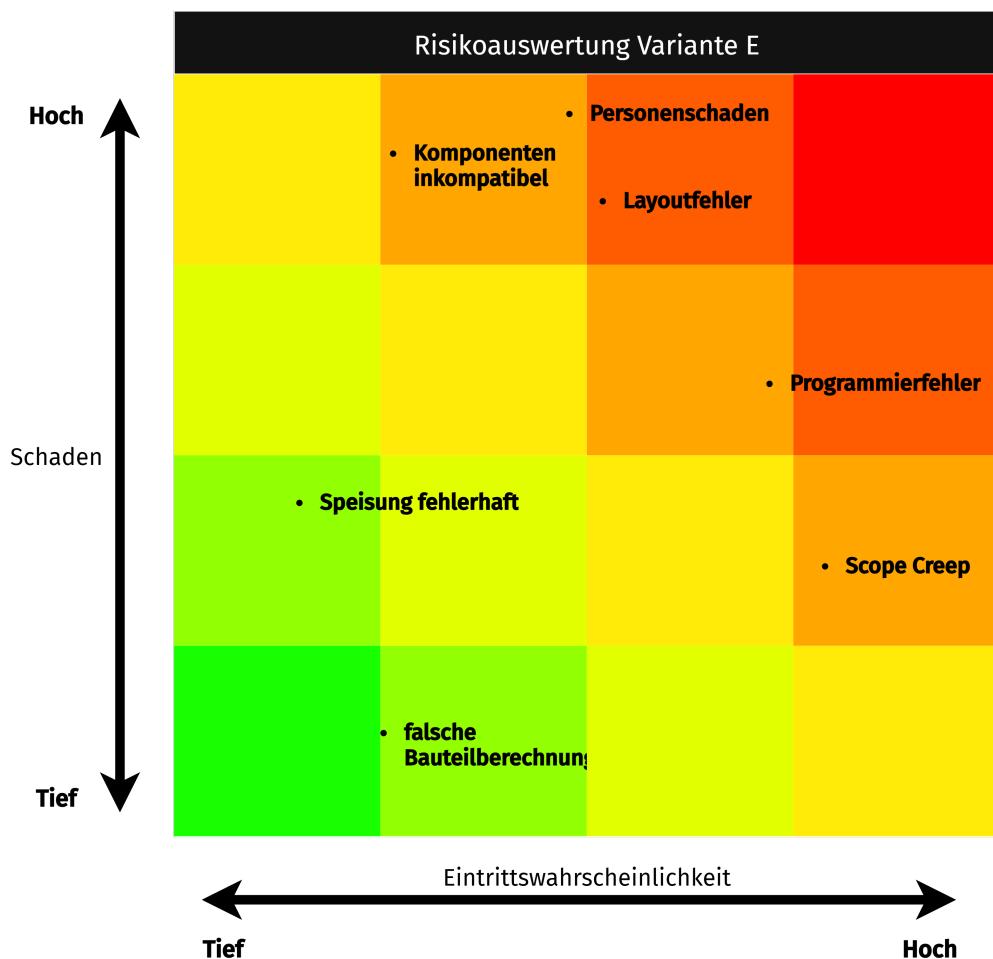


Abbildung 16: Risikoanalyse der Variante E

2.6 Variantenauswertung

2.6.1 Nutzwertanalyse

Zur Auswertung wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt, bei der die Primärkriterien auf Erfüllung oder Nichterfüllung hin geprüft wurden. Idealerweise sollten dabei alle Primärziele erfüllt werden. Alle anderen Ziele wurden gemäss Tabelle 2 neu gewichtet und deren Erfüllung mit einer Note von 1 bis 10 und bei Nichterfüllung 0 bewertet. Die Multiplikation der Gewichtung mit der Note ergibt ein Zwischenresultat für ein Ziel. Die Summe der Zwischenresultate ergibt die Gesamtpunktzahl nach Sekundärzielen. Diese Analyse ist in Abbildung 18 dargestellt. Mit diesen Kriterien erfüllt nur **Variante D** die Muss-Ziele.

2.6.2 Kosten-Nutzen Analyse

In Bezug zu den verwendeten Komponenten und Materialien kann eine Schätzung für die Kosten jeder Variante abgegeben werden:

- **Variante A: Alles Analog:** Hoch, vor allem durch den Zeitaufwand
- **Variante B: Drahtlos & Portabel:** Mittel, jedoch PMMA als Preistreiber
- **Variante C: High-End Audiophil:** Sehr hoch, durch Spezial- und High-End Komponenten
- **Variante D: Einfache Anwendung, Plug'n'Play:** Tief-Mittel
- **Variante E: Neu ist besser:** Mittel, jedoch PMMA und Zeitaufwand

Diese Erkenntnis kann auf die in der Nutzwertanalyse erreichte Punktzahl abgebildet werden. Abbildung 17 zeigt dieses Verhältnis grafisch auf. Dabei sind Lösungen mit Tendenz in Richtung untere rechte Ecke (*hoher Nutzen, tiefe Kosten*) zu bevorzugen. Dagegen sind Lösungen mit Tendenz Richtung oberen linken Ecke mit hohen Kosten, aber wenig Nutzen verbunden.

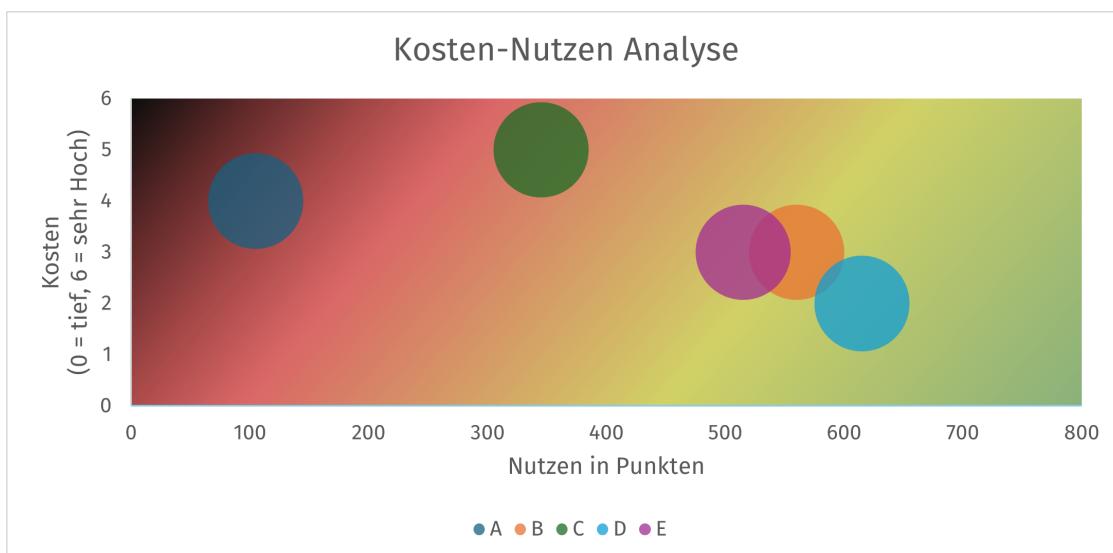


Abbildung 17: Kosten-Nutzen Analyse

Primärkriterien	Varianten					E
	A	B	C	D	Einfache Anwendung, Plug'n'Play	
G: Reduziertes Brandrisiko	Alles Analog	Drahtlos & Portabel	High-End Audiophil			
	Lösung - externes Netzteil - selbst gebaute Schwingsspule mögliche Brandursache	- Batterie - PMMA für Gehäuse	- internes Netzteil - Leistungselektronik auf MDF - ansonsten keine Massnahmen	- Gewicht durch Netzteil - Gewicht durch Endstufe - Gewicht durch Lautsprecher	- Speisung extern (PoE) - Nur die Endstufe als Leistungsbauteil	- Speisung extern (PoE) - Stromdurchflossene Saite von aussen zugänglich Neu ist besser
D: Mobilität	Erfüllt?	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
	Lösung - externes Netzteil unklar	- Befestigung der Schwingsspule	- Batteriegewicht - PMMA Schlagfest			- Keine schweren Komponenten - Fix montierte Elemente - Keine schweren Bauteile
A: Direktionale Abstrahlung	Erfüllt?	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	erfüllt
	Lösung - Effizienz der Schwingsspule evtl. ungenügend		- 6x Exciter, individuell getrieben	- 6x Exciter, individuell getrieben	- 6x Exciter, individuell getrieben	- Klang evtl. unhörbar nicht erfüllt
Anzahl nicht erfüllter Primärkriterien		3	1	2	✓	✗
Sekundärkriterien						
Ziel	Gewichtung (1 = min, 10 = max)	Note (1 = min, 10 = max)	Resultat	Note (1 = min, 10 = max)	Resultat	Note (1 = min, 10 = max)
B: Möglichst wenige Stecker	10	1	10	9	90	9
C: Untere Grenzfrequenz tief genug	5	3	15	7	35	7
E: Speisung+Daten auf einem Stecker	15	0	0	5	75	0
F: Abstrahlung softwaremäßig steuerbar	20	1	20	9	180	7
G: Benutzersicherheit	30	2	60	6	180	4
I: Batteriebetrieben	10	0	0	10	100	0
J: Drahtlose Signalübertragung	5	0	0	10	50	0
Punkte	105		560	345	615	515
Rang	5	2	4	1	3	3

Abbildung 18: Nutzwertanalyse

2.7 Variantenauswahl

Die Variantenanalysen zeigt klar, dass **Variante D: Einfache Anwendung** aus Risikogründen, Nutzwertanalyse und der Kosten-Nutzen die vielversprechendste Variante ist. Die Kombination aus fixfertigen Modulen, wenigen Neuentwicklungen und wenigen Komponenten führt in vielen Belangen zu vorteilhaften Eigenschaften. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch den Einsatz von Excitern sich die Konstruktion erheblich vereinfacht, da keine Saite gespannt oder fixiert werden muss und keine sich bewegende Teile von aussen zugänglich sind.

Anpassungen Nichtsdestotrotz kann diese Variante noch weiter optimiert und kombiniert werden. So können zum Beispiel mehrere Materialien für das Gehäuse verwendet werden. Daher wurde diese Variante auf die Primärziele hin noch weiter angepasst. Nachfolgend sind daher die Primärziele mit den entsprechenden Massnahmen aufgelistet:

Ziel	Massnahme
G: Reduziertes Brandrisiko	Montage der stromführenden Bauteile auf PMMA
D.2: Mobilität	Einsatz eines externen USB-MILAN Dongles für die Verbindung zwischen PC und Gerät. Somit ist kein Switch vonnöten.
A: Direktionale Abstrahlung	Externes Netzteil für grösseres Leistungsbudget

Abbildung 19: Weitere Massnahmen

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	10
2	Zielgewichtung	11
3	Terminplanung in tabellarischer Form	26

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).