ARTA, STEPS, LIMP

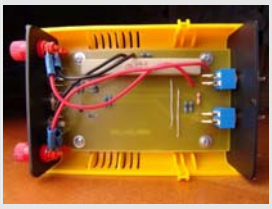
Hardware & Tools

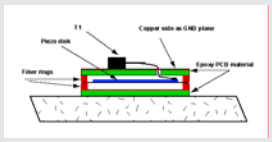
zum Kompendium
für die Programme der ARTA-Familie

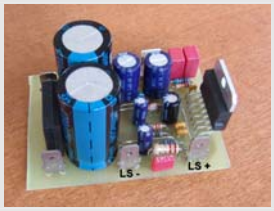
Version 1.01D, Januar 2011

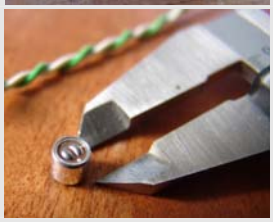
Änderungen Version 1.01D

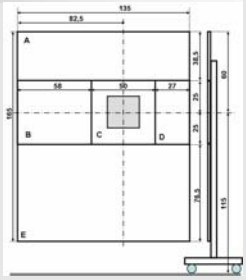
Kapitel	Hinweis zu Änderungen / Ergänzungen
4.1	Erratum zum Poweramp mit TDA 7294
4.2	Neu, Poweramp mit LM3886

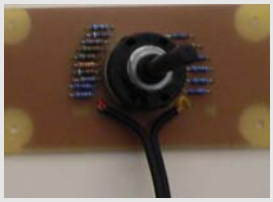












INHALT

0. VORWORT 4
0.1 Allgemeine Hinweise zum Nachbau der Platinenlösungen 5
1. Die ARTA-MessBox 6
1.1 ARTA MessBox, das Original 6
1.2 ARTA MessBox, die Platinenlösung 7
1.3 Messkabel und Pinbelegung gängiger Steckverbindungen 10
2 Messmikrofone und andere Sensoren 12
2.1 Elektret-Mikrofonkapseln 12
2.2 Ein einfaches Elektret-Messmikrofon 15
2.3 Ein phantomgespeistes Messmikrofon 17
2.4 Beschleunigungsaufnehmer 21
2.4.1 ACH-01 21
2.4.2 Vorverstärker für den Beschleunigungsaufnehmer ACH 01 22
3 Mikrofonvorverstärker 23
3.1 Einleitung 23
3.2 High Quality & Low Cost Mikrofonvorverstärker 24
3.3 Der Wallin Mikrofonvorverstärker 29
4 Leistungsverstärker 31
4.1 High Quality Amplifier mit TDA 7294 31
4.2 High Quality Amplifier mit LM 3886 36
5 Hilfsmittel zur Entwicklung von Frequenzweichen 38
5.1 Entwicklungsbrett für Frequenzweichen 38
5.2 Weichenentwicklungsbrett, Modifikationen 41
5.3 Variable Induktivitäten 43
6 Hilfsmittel für akustische Messungen 48
6.1 Eine Drehscheibe für die Messung des Abstrahlverhaltens von Lautsprechern 48
6.2 Eine motorgetriebene Drehscheibe mit Fernbedienung 51
6.3 Bau eines Dodekaeders für raumakustische Messungen 54
6.4 IEC Schallwand 64
6.5 Laserpointer als Mikrofonpositioniervorrichtung 67
7 Sonstige Hilfsmittel 68
7.1 Lautsprecherklemmvorrichtung für die TSP-Messung 68
8 Interessante Projekte im Netz 73
9 Literatur und Links 75

0. VORWORT

Die vorliegende Sammlung an Hardware und Tools soll das Messen erleichtern oder in speziellen Fällen gar erst ermöglichen. Wie im ARTA-Kompendium, so steht auch hier der DIY-Bereich im Mittelpunkt, wenn auch einige der vorgestellten Lösungen durchaus professionellen Maßstäben standhalten. Sie finden sowohl fertig ausgearbeitete Projekte inklusive Platinenlayout als auch Ideen oder Anregungen, die nur in Form von Skizzen oder Fotos dokumentiert sind.

Es ist vorgesehen, das **H&T-Manual** im Laufe der Zeit ständig zu ergänzen. Anregungen und auch fertige Beiträge zu Erweiterungen dieses Manuals sind jederzeit willkommen.

Zu guter Letzt noch ein Hinweis zu den Bauvorschlägen: Der Nachbau erfolgt auf eigenes Risiko. Die Autoren übernehmen keine Verantwortung für Funktionsmängel oder evtl. entstehende Schäden. Unterstützung in der Nachbauphase ist nicht möglich und auch nicht vorgesehen. Die Platinenlayouts können unter den jeweils angegebenen Quellen bezogen werden, fertige Platinen werden nur angeboten, wenn vermerkt.

An dieser Stelle möchte ich es nicht versäumen, meinen Dank an alle Mitwirkenden zu richten. Alle haben etliche Stunden ihrer Freizeit geopfert, um die Projekte soweit zu bringen, dass sie hier in den Sammeltopf eingebracht werden konnten. Mein ganz besonderer Dank gilt jedoch Ralf Grafe und Matthias Leger, ohne diese beiden „Wahnsinnigen“ wären fast nur Drittprojekte eingeflossen.

In der Entwicklungs- und Bauphase war der Spaßfaktor hoch, aber leider gehört auch das lästige Dokumentieren dazu.

Viel Spaß beim Nachbau und Weiterentwickeln.

H. Weber und
alle beteiligten Autoren

0.1 Allgemeine Hinweise zum Nachbau der Platinenlösungen

Ausgangspunkt der folgenden Hinweise ist die geätzte Platine.

Es wird empfohlen die Kupferseite mit einer dünnen Schicht Lötlack gegen Anlaufen und Korrosion zu schützen, wenn diese vor dem Bohren länger gelagert wird. Der Lötlack stört aber beim Bohren, denn er klebt, zumindest so lange er nicht getrocknet ist.

Bohren der Löcher

Alle Löcher haben einen Durchmesser von 0,8mm. Das ist das Standardmaß.
Ausnahmen sind:

- 10 polige Steckverbinder und Spannungsregler: 1,0mm
- Diode 1N400x: 1,0mm
- Lötstifte: 1,3mm

Bestückung

Grundsätzlich bestückt man "von unten nach oben". D.h. die kleinsten Bauelemente zuerst, und dann die größeren. Die typische Reihenfolge ist wie folgt:

1. Drahtbrücken
2. Widerstände und Dioden
3. ICs
4. Transistoren und Kondensatoren
5. Elektrolytkondensatoren
6. Spannungsregler und Rest

Jede Platine sollte vor der Inbetriebnahme sorgfältig auf ungewollte Lötbrücken und korrekte Bestückung überprüft werden!

Nachbehandlung

Ist die Platine fertig und erfolgreich getestet, empfiehlt es sich, die Flussmittelrückstände des Lötzinns und den Lötlack zu entfernen, da ansonsten die Säuren im Flussmittel die Lötstellen und die Platine langfristig angreifen. Dazu die Platine kurz in so genanntem Elektro-Wash abwaschen, anschließend trocknen lassen und dann mit einer dünnen Schicht Plastikspray schützen und konservieren.

Da wahrscheinlich die wenigsten sich extra das teure Elektro-Wash beschaffen wollen, geht es auch ganz gut mit Brennspiritus. Ein kleiner Pinsel hilft dabei in kleine und unzugängliche Ecken zu kommen.

Hinweis: Die gekennzeichneten Platinenlayouts - und mittlerweile sogar einige mehr - können auf der Homepage von Ralf Grafe [10] bezogen werden:

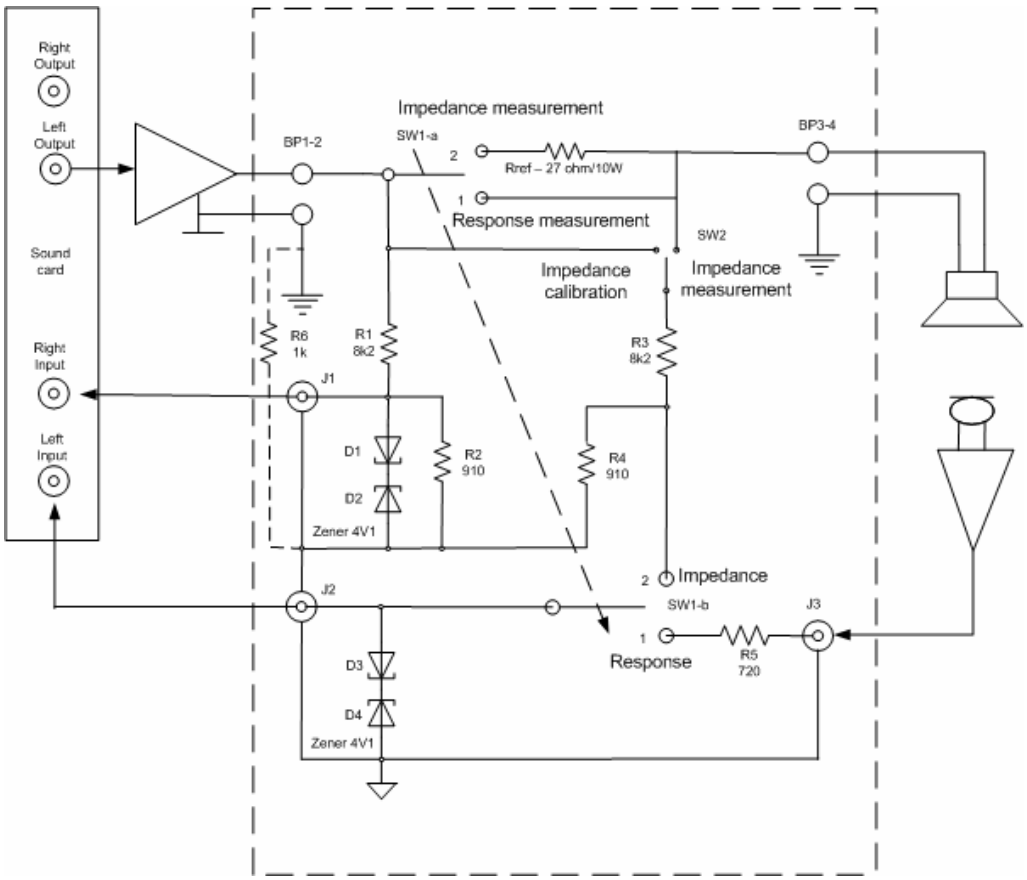
http://www.m1n1.de/html/hifi.html

Im Falle hinreichenden Bedarfs werden auch fertige Platinen angeboten. Informieren Sie sich bitte im Einzelfall.

1. Die ARTA-MessBox

1.1 ARTA MessBox, das Original

Die erste ARTA-MessBox ist in der Application Note AN 1 aus dem Jahre 2006 beschrieben. Dort findet man alle erforderlichen Hinweise zum Aufbau der frei verdrahteten Version. Aus diesem Grunde wird hier zur Orientierung lediglich der Schaltplan gezeigt.



Anm. 1 *Die Masse des Leistungsverstärkers und der Soundkarte sind durch einen 1k Widerstand getrennt.*

Sicherheit *Bitte verwenden Sie keinen Brückenverstärker mit virtueller Masse!*

Sicherheit *Die Eingänge der Soundkarte sind durch die Zenerdioden geschützt. Der Leistungsverstärker ist geschützt, wie vom Hersteller angegeben. Achten Sie darauf, dass die vom Hersteller angegebene nominelle Impedanz nicht unterschritten wird.*

Bild 1.1.1: Schaltplan der ARTA-Messbox

1.2 ARTA MessBox, die Platinenlösung

Ralf Grafe

Wer in der Lage ist, selbst Platinen herstellen zu können, für den kommt auch die folgende Lösung in Frage. Verdrahtungsfehler sollten damit ausgeschlossen sein.

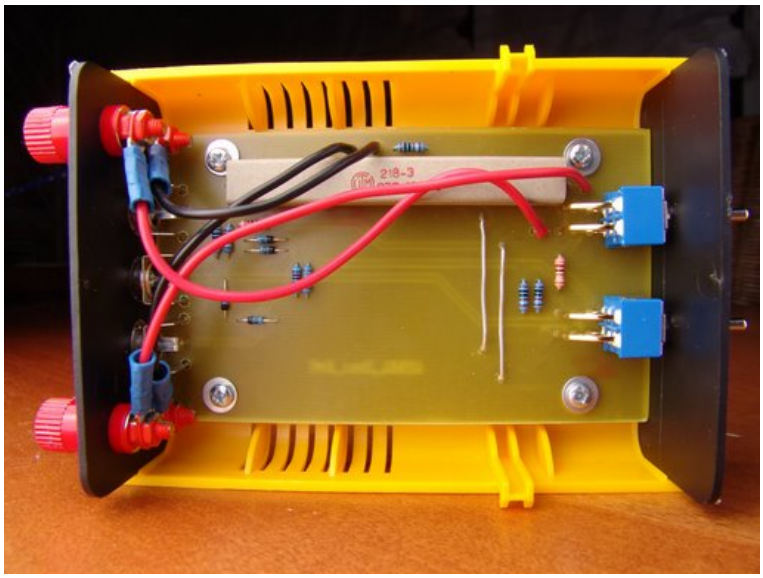


Bild 1.2.1: Die Platinenlösung der ARTA-Messbox

Die Platine ist einseitig, was die Herstellung relativ einfach macht. Bild 1.2.1 zeigt den Blick auf die Bestückungsseite. Bis auf die Lautsprecherklemmen befinden sich alle Bauteile direkt auf der Platine. Die Schalter sind beide als 2 x UM ausgeführt, das bringt mechanische Stabilität. Die Widerstände 715 Ohm und 910 Ohm entsprechen nicht der verbreiteten E24 Reihe und sind dadurch mitunter schwierig zu beschaffen. In der Regel lassen sich aber beliebige Widerstandswerte durch Parallelschaltung von zwei Widerständen der E24 Reihe realisieren. Die Platine ist dafür vorgesehen, wahlweise einen oder zwei Widerstände aufzunehmen. Im ersten Fall bleibt einfach ein Bestückungsplatz frei.

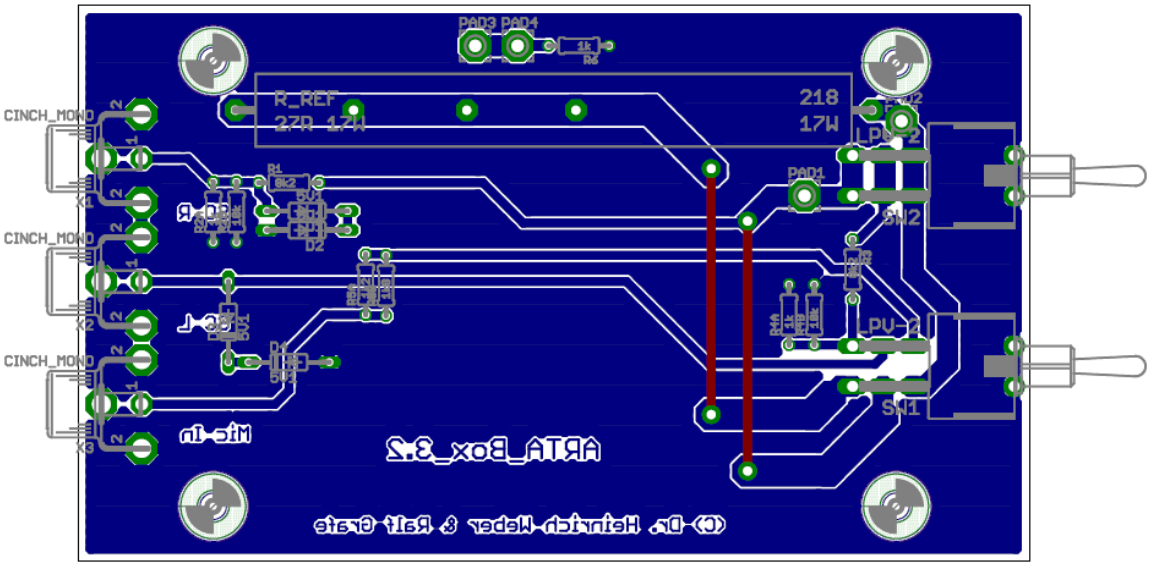


Bild 1.2.2: Bestückungsseite der Platine für die ARTA-Messbox

Zu guter Letzt noch ein Blick auf den Bestückungsplan (Bild 1.1.2) und den Schaltplan (Bild 1.1.3) aus dem die Zuordnung der Anschlüsse und der Bauteile zu entnehmen ist.

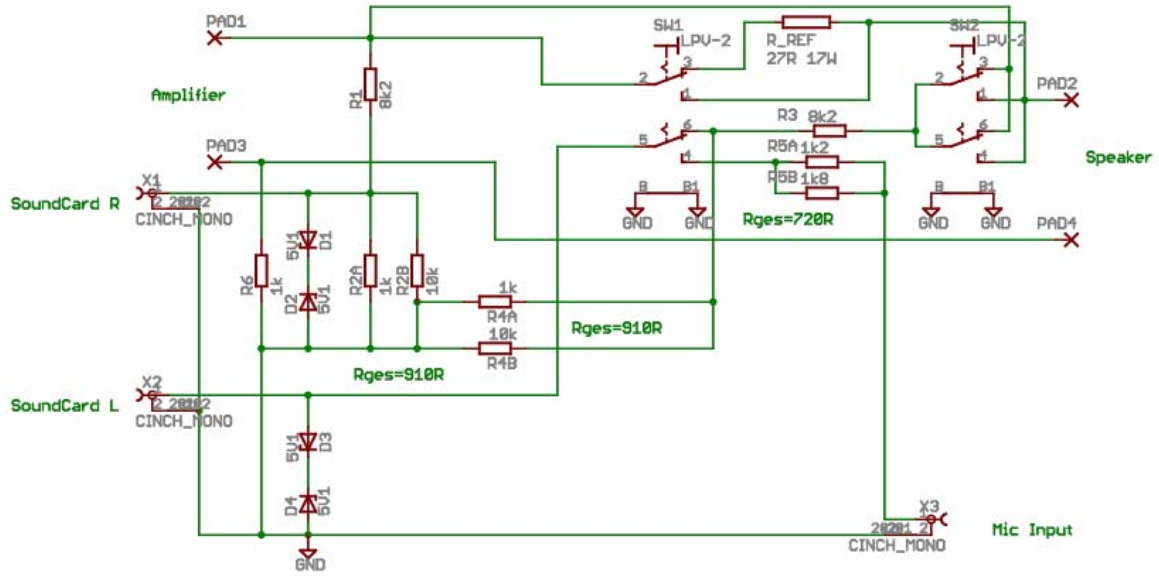


Bild 1.2.3: Schaltplan für die Platinenlösung der ARTA-Messbox

Anmerkung 1: *Die Zenerdioden können sowohl > < als auch so < > eingebaut werden.*
Anmerkung 2*: Je nach Besorgnis um die Soundkarte sollten die Werte der Zenerdioden zwischen 3,3 bis 5,1V (0,5W) liegen.*

Bild 1.2.4: Die fertig aufgebaute ARTA-Messbox

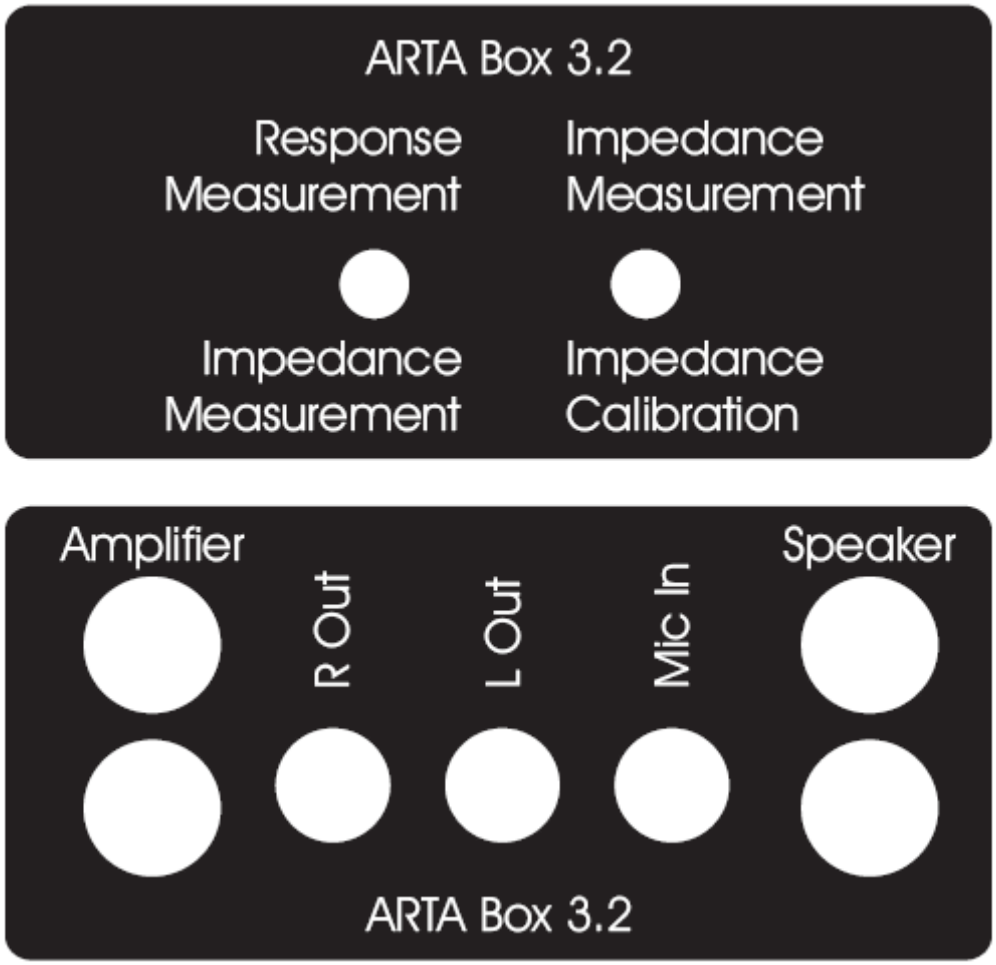


Bild 1.2.5: Beschriftungsvorlage für die ARTA-Messbox

Anzahl	Bezeichnung	Artikel	Bestellnummer
1		Platine	ARTA Box 3
1		Kunststoffgehäuse	Eurobox BL
2	SW1, SW2	Kippschalter	MS 500 FVT
2	PAD3, PAD4	Polklemme Schwarz	PK 4 SW
2	PAD1, PAD2	Polklemme Rot	PK 4 RT
3	X1, X2, X3	Cinchbuchse, Print Metall	CBP 5
1	R Ref	Hochlast Drahtwiderstand 17W	17W axial27
2	R1, R3	Widerstand 8k2	
3	R2a, R6, R4a	Widerstand 1k	
2	R2b, R4b	Widerstand 10k	
1	R5b	Widerstand 1k8	
4	D1-D4	Zenerdiode 4,3V / 0.5W	ZD51

Tabelle 1.2.1 Stückliste

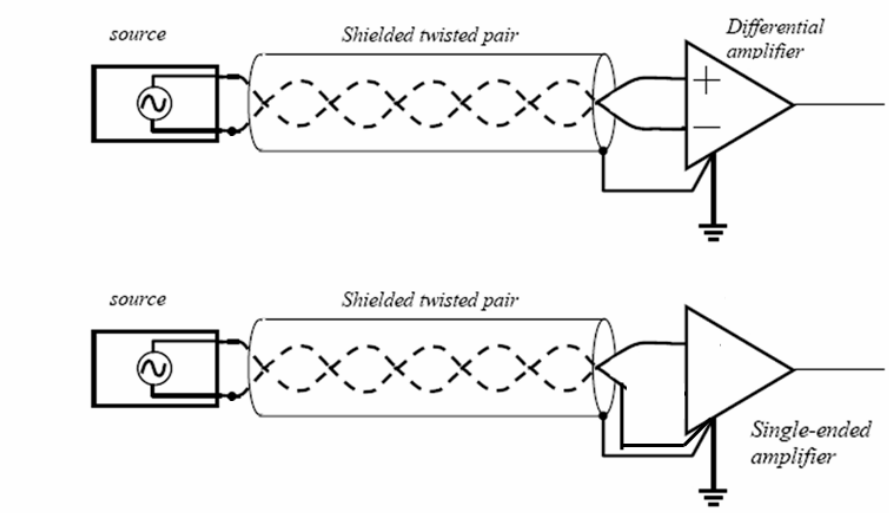
http://www.m1n1.de/html/hifi.html

1.3 Messkabel und Pinbelegung gängiger Steckverbindungen

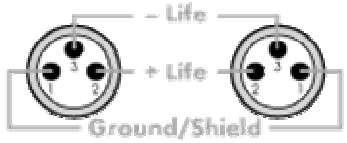
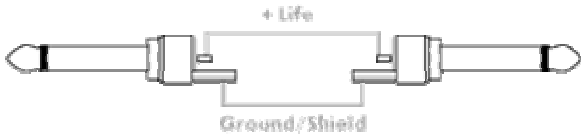
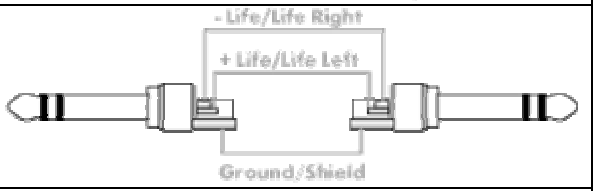
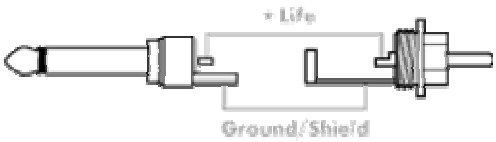
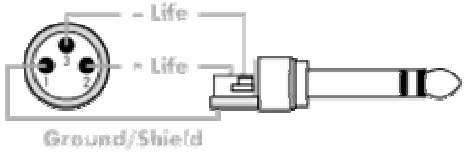
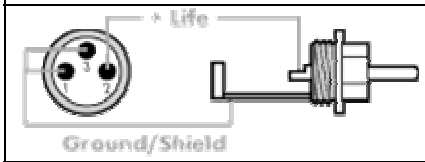
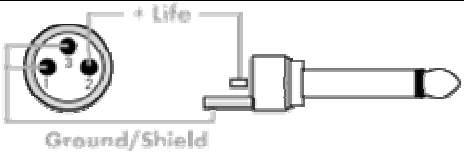
Wer kleine analoge Spannungen messen will, sollte auch auf seine Messkabel achten. Naturgemäß leidet die Übertragungsqualität des Signals, wenn kleine Messsignale mit einfachen Kabeln über größere Entfernungen übertragen werden, da Störsignale jeglicher Art auf die Leitungen einwirken.

Um den Masse- und Störproblemen entgegenzuwirken, sollten folgende Hinweise [09] beachtet werden:

- Verwenden Sie möglichst kurze Kabel zwischen Quelle (Sensor) und Messverstärker. Besonders im Falle hochohmiger Quellen ist hierauf zu achten.
- Verwenden Sie möglichst zweifach abgeschirmte Leitungen.
- Wenn erforderlich, ziehen Sie eine zusätzliche Masseleitung und legen die Abschirmung nur einseitig auf.



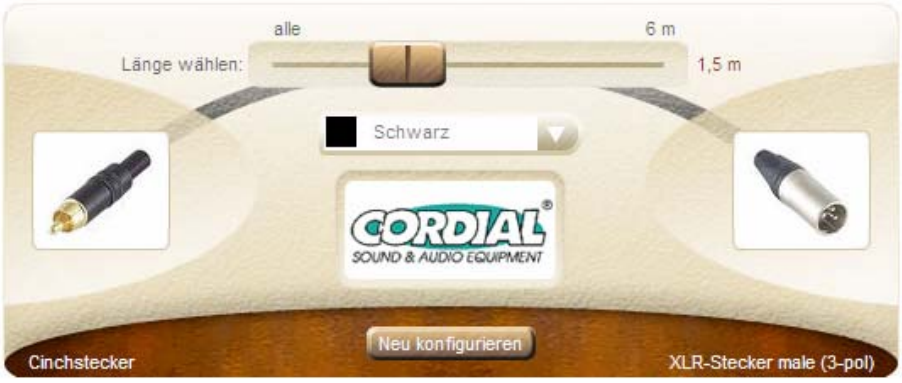
- Vermeiden Sie Masseschleifen. Achten Sie auf gleiches Erdpotential zwischen Messquelle und Messgerät (Soundkarte). Messen Sie vorher mit einem DVM zwischen beiden Massepotentialen in AC und DC.
- Legen Sie das Signalkabel nicht an Störquellen vorbei (Trafos, Netzteile, Netzspannung führende Kabel etc.).
- Falls möglich, trennen Sie den Computer galvanisch vom Netz (Laptop im Batteriebetrieb)
- Nutzen Sie zusätzlich die Mittelwertbildung (Averaging)

Unsymmetrisch	Symmetrisch
	
	
	
	
	

KLINKE STEREO Gehäuse: Masse (GROUND/ SHIELD) Spitze: Plus (LIFE) Ring: Minus (LIFE)	**XLR** Pin 1: Masse (GROUND/ SHIELD) Pin 2: Plus (LIFE) Pin 3: Minus (LIFE)

Bild: 1.3.1: Steckerbelegung von Verbindungskabeln

Wenn Sie sich einen Überblick zum Angebot an fertig konfigurierten Kabeln verschaffen wollen, dann ist der „Cableguy“ auf der Homepage von Thomann zu empfehlen (www.thomann.de)



2 Messmikrofone und andere Sensoren

2.1 Elektret-Mikrofonkapseln

Heinrich Weber

Der Aufbau eines Mikrofons, das für Messzwecke geeignet ist, ist auch für ungeübte Heimwerker überschaubar. Wichtigstes Bauteil des Mikrofons ist eine geeignete Elektret-Mikrofonkapsel mit Kugelcharakteristik. Ein typischer Vertreter dieser Kategorie ist die **WM 61A** von Panasonic [11]. Dazu im Folgenden die wichtigsten Daten aus der Spezifikation:

Sensitivity	−35±4dB (0db = 1V/pa, 1kHz)
Impedance	Less than 2.2 kΩ
Directivity	Omnidirectional
Frequency	20–20,000 Hz
Max. operation voltage	10V
Standard operation voltage	2V
Current consumption	Max. 0.5 mA
Sensitivity reduction	Within −3 dB at 1.5V
S/N ratio	More than 62 dB

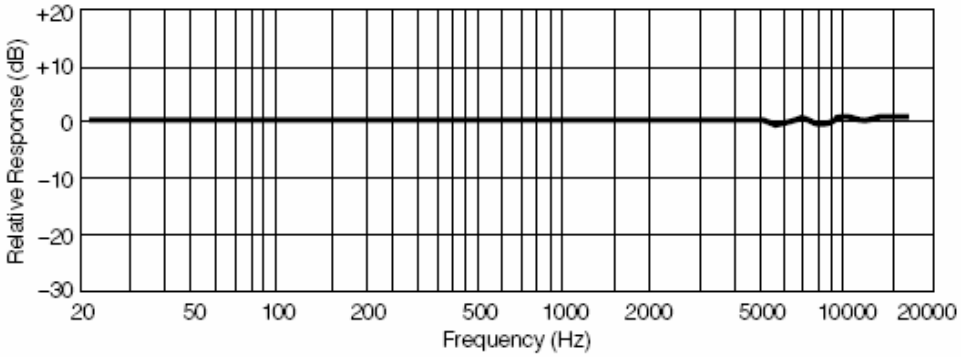


Bild 2.1.1: Panasonic WM 61A, technische Daten

Ingesamt ist das Angebot an brauchbaren Mikrofonkapseln auf dem Markt überschaubar. Ein wesentlicher Teil davon ist in Tabelle 2.1.1 gelistet. Die mit *) gekennzeichneten Typen sind leider nicht mehr lieferbar bzw. nur noch mit viel Glück als Einzelstücke erhältlich.

Typ	**MCE4000**	**MCE 2000**	**WM 61a**	**WM 60a**
Frequenzbereich in Hz	20–20000	20-20000	20-20000	20-2000
Empfindlichkeit in mV/Pa/1kHz	5	6	18	6,3
Ausgangsimpedanz in kOhm	2,2	2	2,2	2,2
S/N in dB	58	58	62	58
Versorgung in Volt	1,5 – 10	1,5 - 10	1,5 – 10	1,5 – 10
Durchmesser in mm	6	6	6	6
Länge in mm	5,8	5,8	3,4	5
Hersteller			Panasonic	Panasonic
Vertrieb	Monacor	Monacor	DigiKey	DigiKey
Bestell Nr.	23.3680	*)		*)

Typ	**KE 4-211-2**	**Pollin**		
Frequenzbereich in Hz	20-20000	50-20000		
Empfindlichkeit in mV/Pa/1kHz	10			
Ausgangsimpedanz in kOhm	1	1,2		
S/N in dB				
Versorgung in Volt	0,9-15	1,5 – 10		
Durchmesser in mm	4,75	6		
Länge in mm	4,2	5,5		
Hersteller	Sennheiser	-		
Vertrieb		Pollin		
Bestell Nr.		660367		

Tabelle 2.1.1: Elektret-Mikrofonkapseln für Messmikrofone

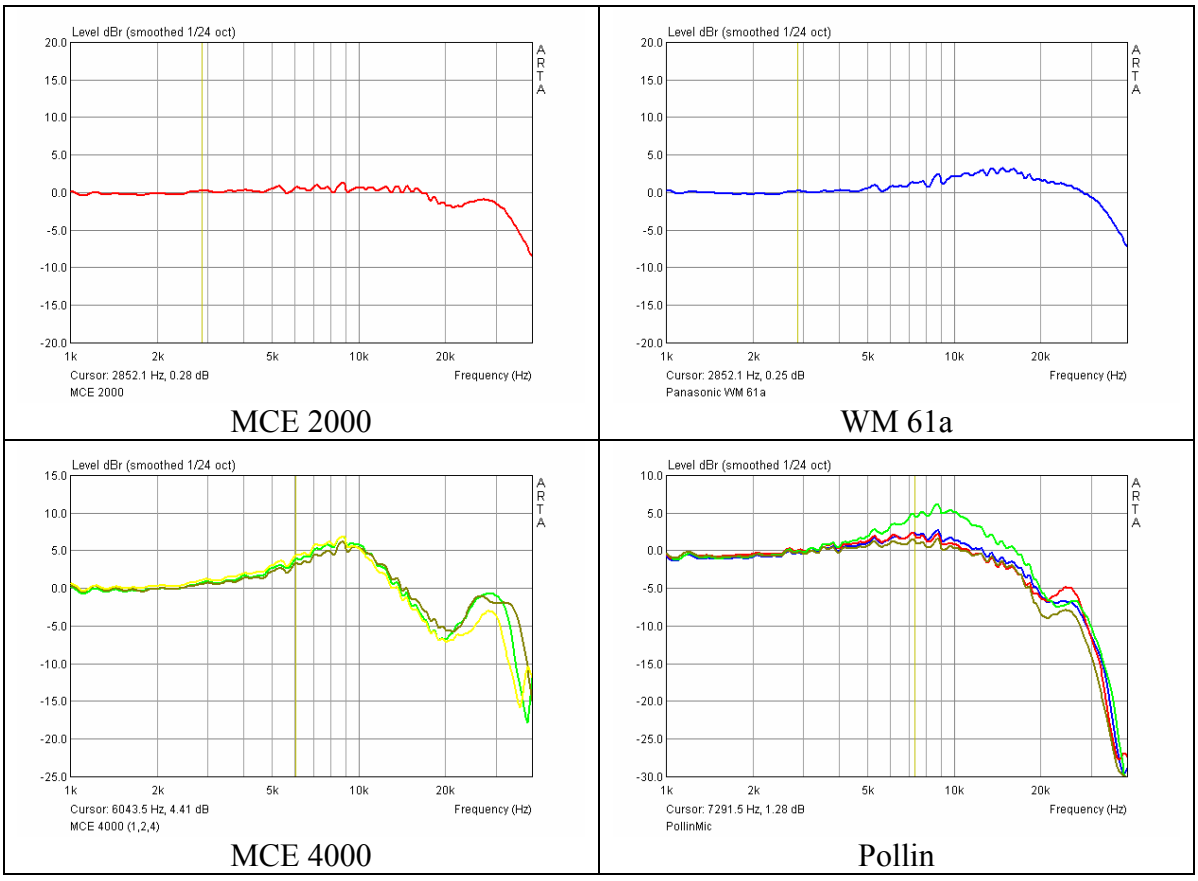


Bild 2.1.2: Abweichung vom Referenzmikrofon (MK 301)

In Bild 2.1.2 ist die Andeutung des Streuverhaltens von Elektret-Mikrofonkapseln am Beispiel der Pollin Kapseln zu sehen. Zwecks Vermittlung eines besseren Eindrucks zur Streuung der Kennwerte wurden jeweils 10 Mikrofonkapseln aus zwei Chargen gemessen (Bild 2.1.3). Im den linken Teilbildern ist der jeweils gemessene Frequenzgang eines Hochtöners zu sehen, in den rechten Teilbildern die relative Abweichung von einer Mikrofonkapsel aus der Charge.

Zum einen wird deutlich, dass immer mit Ausreißern zu rechnen ist, zum anderen, dass Empfindlichkeitsstreuungen von +/- 4 dB – wie auch in seriösen Spezifikationen angegeben - keine Seltenheit sind. Wer also nicht mit Unsicherheit beim Messen leben will, der sollte sein Selbstbaumikrofon immer hinsichtlich Empfindlichkeit und Frequenzgang kalibrieren (lassen). Näheres hierzu findet man im Kompendium [02].

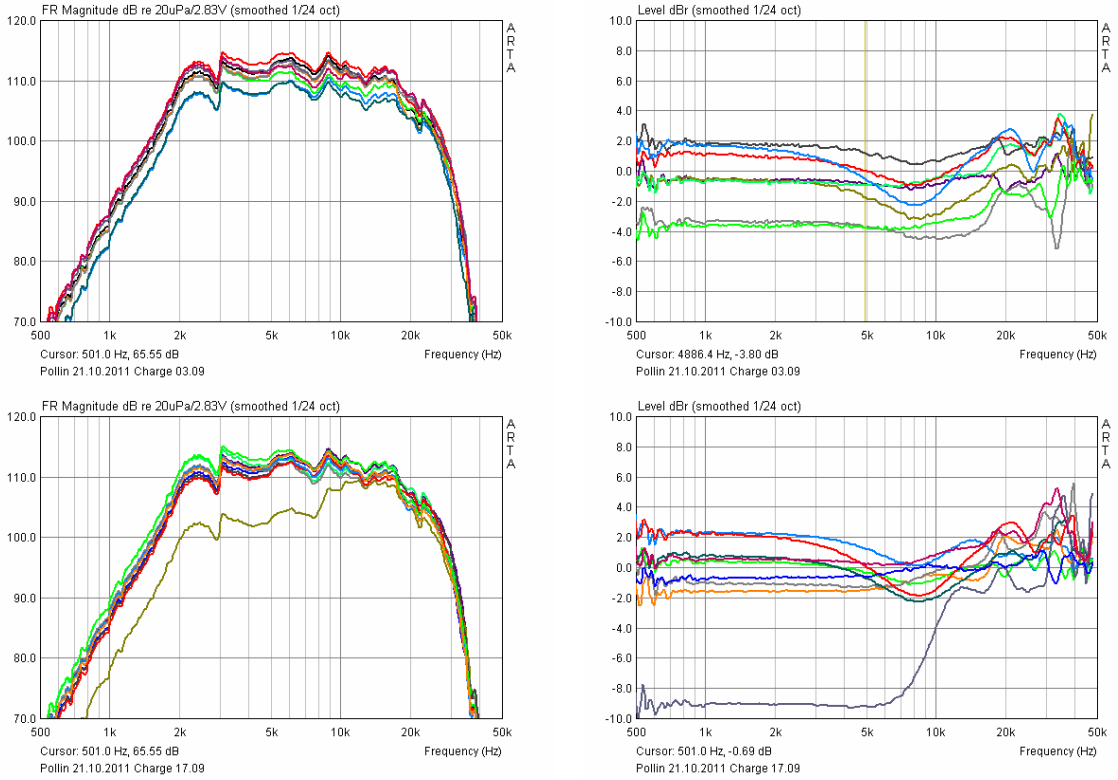


Bild 2.1.3: Streuverhalten von Mikrofonkapseln aus 2 Chargen

Typ	**Sensitivity in mV/Pa@1kHz**						**X**	**S**	**Sensitivity dB re 1V/pa**	**Hersteller dB re 1V/Pa**
WM61a	22,09	20,06					21,07		-33,53	-35,00
MCE2000	6,30						6,30		-44,01	-44,40
Pollin	6,56	10,76	7,14	10,74	10,86	8,33	9,07	1,97	-40,85	
MCE4000	4,90	6,98	5,57	4,10			5,39	1,22	-45,37	-46,00

Tabelle 2.1.2: Elektret-Mikrofonkapseln, einige Messwerte

2.2 Ein einfaches Elektret-Messmikrofon

Heinrich Weber

Wenn Sie aus dem oben genannten Angebot eine geeignete Mikrofonkapsel gefunden haben, benötigen Sie für den Bau eines Messmikrofons lediglich noch ca. 20 - 25 cm Aluminiumrohr mit 8mm Außendurchmesser (in jedem Baumarkt erhältlich), einen 3,5 mm Stereo-Klinkenstecker - oder besser eine Cinch Buchse - sowie ein Stück flexibles Kabel.

Der Aufbau des Messmikrofons ist in Bild 2.2.1 dargestellt. Dem oberen linken Teil des Bildes sind die Abmessungen und die Anschlussbelegung der Mikrofonkapsel zu entnehmen. Der mittlere Teil beschreibt die Verdrahtung und rechts ist die Eingangsschaltung der Soundkarte zu sehen. Der gepunktet umrandete Bereich im mittleren Teil stellt die Mikrofonkapsel dar.

Hier sollte erwähnt werden, dass die Soundkarte die Versorgungsspannung für das Mikrofon liefern muss. Also vor dem Einkauf der Teile bitte die Spezifikation Ihrer Soundkarte prüfen.

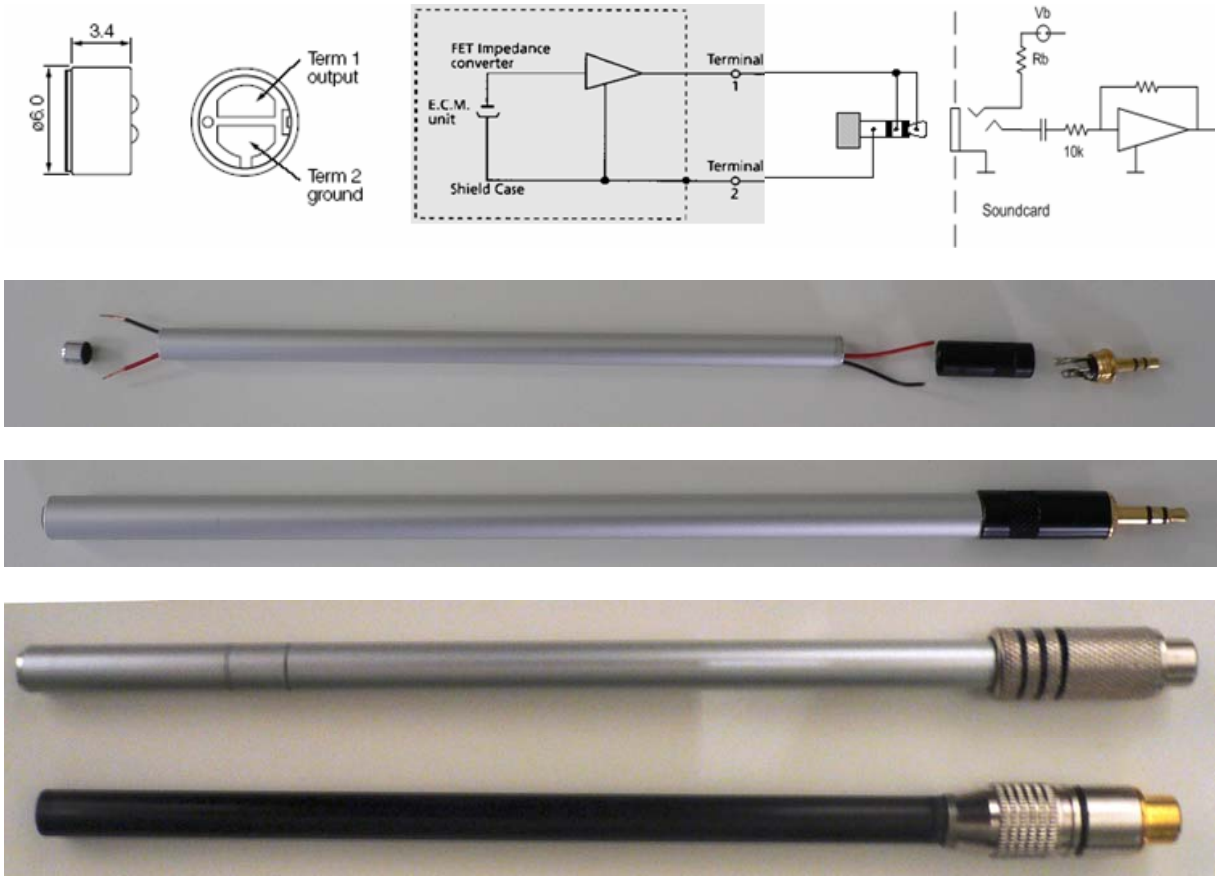


Bild 2.2.1: Aufbau eines Messmikrofons mit 3,5mm Klinke (oben) oder Cinch-Buchse (unten)

Die Mikrofonkapsel sollte (körperschall-)isoliert in das Aluminiumrohr eingesetzt werden (Schrumpfschlauch hilft ein wenig). Damit es passt, muss das Rohr ca. 5-8 mm tief mit einem 7 mm Bohrer aufgebohrt werden. Bei Verwendung einer Handbohrmaschine bitte aufpassen, der Bohrer verkantet schnell und dann gibt es Bruch oder Verletzungen.

Bild 2.2.2: Messmikrofon mit DIY-Mikrofonhalterung

Die „Kalibrierung“ des Mikrofons kann entweder mittels der Hochtöner-Methode (s. Kompendium, Kapitel 5.4.3) vorgenommen werden oder durch Abschätzung aus den oben gezeigten Messergebnissen. Durch Ablesen der Messwerte aus der Grafik kann eine Kompensationsdatei ermittelt werden, die die mittlere Abweichung der gemessenen Charge korrigiert. Es sollte einem jedoch bewusst sein, dass bei Elektret-Mikrofonkapseln deutliche Chargenunterschiede auftreten können (siehe Kap. 2.1).

Nichtsdestotrotz, unter Berücksichtigung des geringen Mitteleinsatzes (*und der Kompensations-datei*) erhält man ein „Messmikrofon“, das zumindest für erste Messversuche sehr brauchbar ist.

2.3 Ein phantomgespeistes Messmikrofon

Ralf Grafe, Goran Repanic, Heinrich Weber

Im Werkzeugkoffer eines Lautsprecherentwicklers gehört ein gutes Messmikrofon natürlich zur Grundausstattung. Professionelle Messmikrofone haben allerdings einen gravierenden Nachteil, sie sind teuer.

Im Folgenden wird der Bau eines Messmikrofons vorgestellt, das den Ansprüchen des DIY-Bereiches genügen sollte und – wie wir später sehen werden – sich durchaus mit Fertigprodukten messen kann. Es ist an jedem Mikrofonvorverstärker mit Phantomspeisung - wie z.B. dem Monacor MPA 102 - verwendbar.

Bild 2.3.1: Fertiges Messmikrofon (Ausführung Goran Repanic, Split)

Bei der hier verwendeten Schaltung handelt es sich um ein Standardkonzept, das im Hinblick auf Rauscharmut optimiert wurde. Bild 2.3.2 zeigt den Schaltplan und die zugehörige Stückliste.

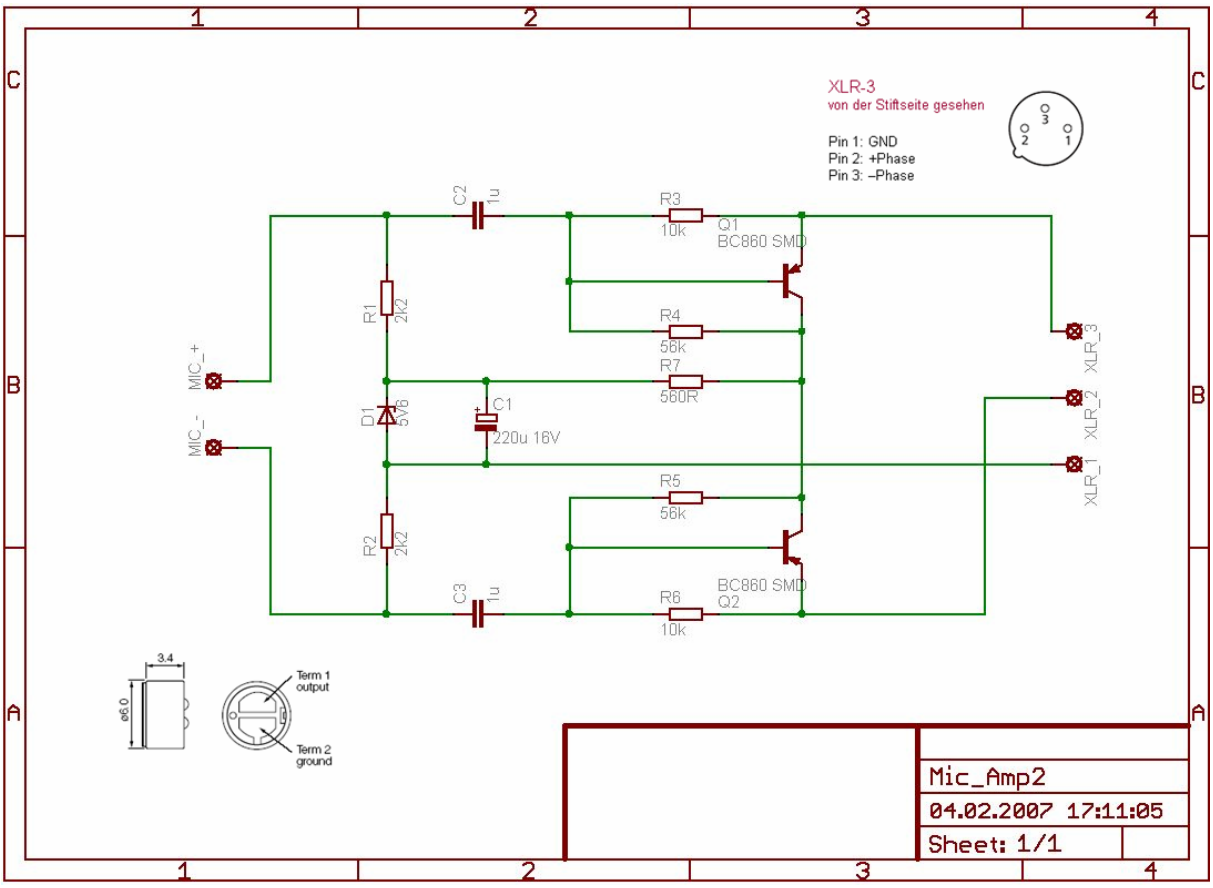
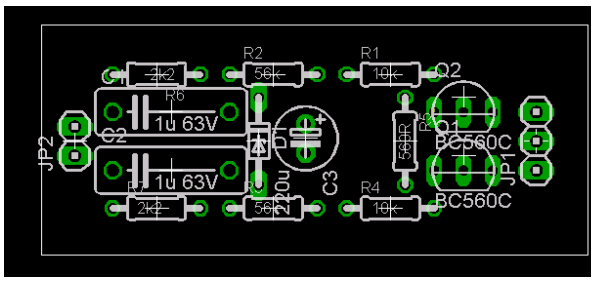


Bild 2.3.2: Schaltplan

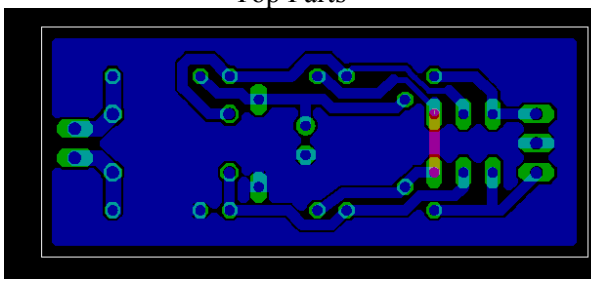
Anzahl	Pos.	Bezeichnung
1	M1	Panasonic WM 61A, Elektret-Mikrofonkapsel
1	C1	220 uF 16V
2	C2, C3	1 uF, siehe Text
1	D1	5,6 V
2	Q1, Q2	BC 860 C bzw. BD 560 C, siehe Text
2	R1, R2	2k2
2	R3, R6	10k
2	R4, R5	56k
1	R7	560R

Tabelle 2.3.1: Stückliste

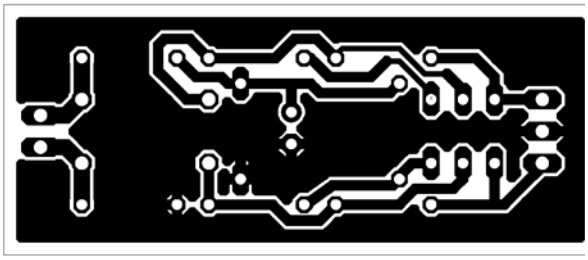
Der Bestückungsplan, das Layout und die Belichtungsvorlagen werden in Bild 2.3.3 gezeigt. Es wurden Layouts für zwei Varianten entwickelt, für den geübten Löter eine SMD-Variante (hier nicht dargestellt) und eine leichter handzuhabende konventionelle Variante (http://www.m1n1.de/html/hifi.html).



Top Parts



Layout



Belichtungsvorlage

Bild 2.3.3: Bestückungsplan, Layouts, Belichtungsvorlagen

Der optimale Platz für die Verstärkerschaltung ist nahe der Mikrofonkapsel im abgeschirmten Gehäuse. Beim Aufbau der konventionellen Version bitte darauf achten, dass auf der Platinenoberseite die beiden Kollektoren der Transistoren mit einer Drahtbrücke verbunden werden müssen. Anders war das Layout nicht zu bewerkstelligen. Im Layout in Bild 2.3.3 ist das durch die rote Linie dargestellt.

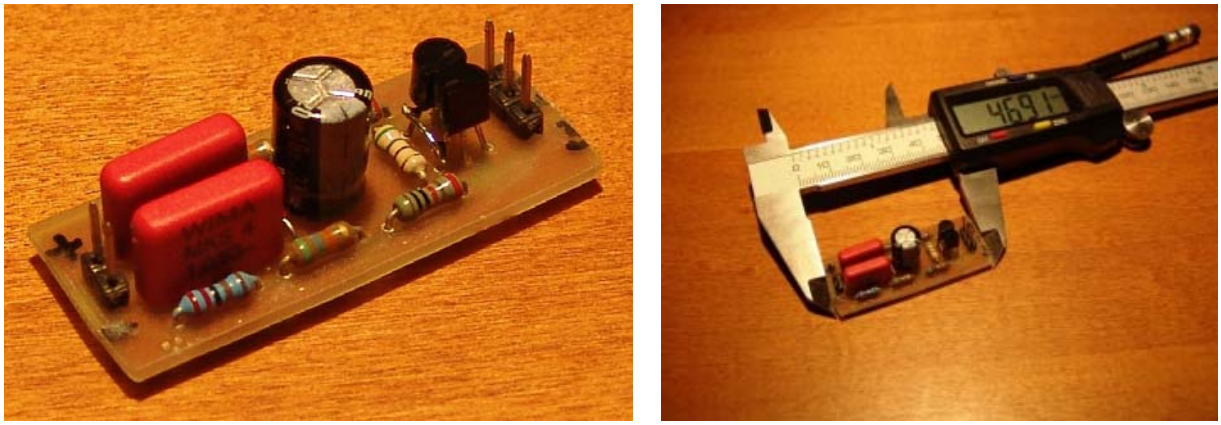


Bild 2.3.4: Aufbau der konventionellen Variante

Ein Gehäuse, das für beide Varianten geeignet ist, wird in Bild 2.3.5 gezeigt. Es besteht aus einem Aluminiumrohr mit 20 mm Außendurchmesser und 2 mm Wandstärke. In die verbleibenden 16 mm Innendurchmesser passt exakt der Pinträger des XLR-Steckers. Zu dessen Befestigung wird ein Loch mit ca. 2 mm Durchmesser ins Rohr gebohrt. Die genaue Position und der Lochdurchmesser sind am Bauteil abzunehmen.

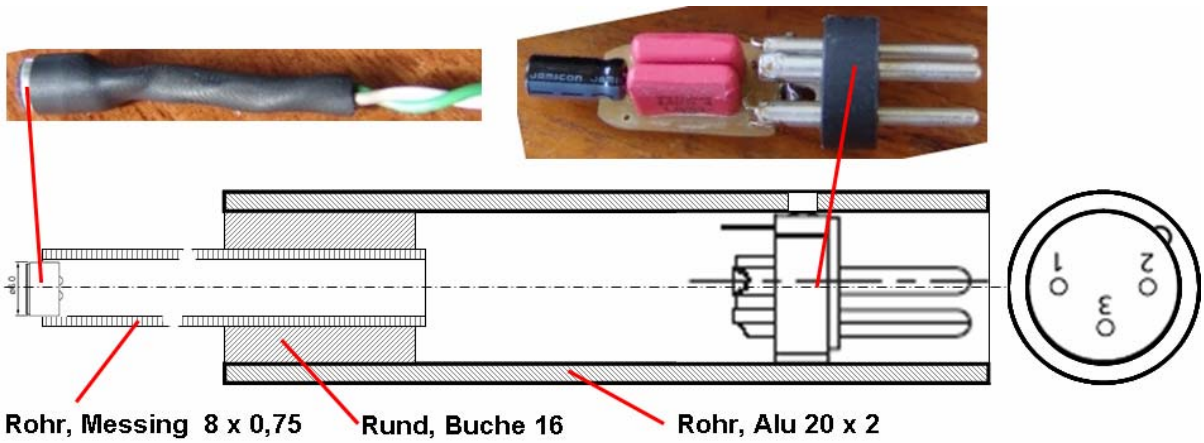


Bild 2.3.5: Aufbau des Gehäuses

Für die Montage der Mikrofonkapsel wird ein ca. 200 mm langes Messing- oder Aluminiumrohr mit 8 mm Außendurchmesser verwendet, das steckerseitig z.B. in ein Stück Rundholz aus Buche gepresst wird. Die Mikrofonkapsel wird nach Anlöten der Kabel wie in Bild 2.3.6 gezeigt mit Schrumpfschlauch isoliert. Bei Verwendung des Messingrohres passt die Kapsel mit Schrumpfschlauch exakt ins Rohr, das Aluminiumrohr muss vorher ca. 10 mm tief auf 6,5-7,0 mm Innendurchmesser aufgebohrt werden.

Bild 2.3.6: Montage der Kapsel

Es ist darauf zu achten, dass die Mikrofonkapsel möglichst exakt mit dem Rohr abschließt. Bereits geringe Unter- oder Überstände führen zu Veränderungen des Frequenzganges [3].

Abschließend wurde das hier gezeigte Labormuster mit einem professionellen Messmikrofon MK 221 von Microtech Gefell verglichen [5]. Die Vorgehensweise ist in der ARTA Application Note No. 5 [2] und im ARTA-Kompendium [1] beschrieben.

Bild 2.3.7 zeigt die Abweichungen des Labormusters vom Frequenzgang des MK 221 und gibt Auskunft über das Klirrverhalten bei 300 Hz. Bei einem Pegel von 113 dB werden ca. 1% THD gemessen, die 2% Grenze wird bei ca. 120 dB erreicht.

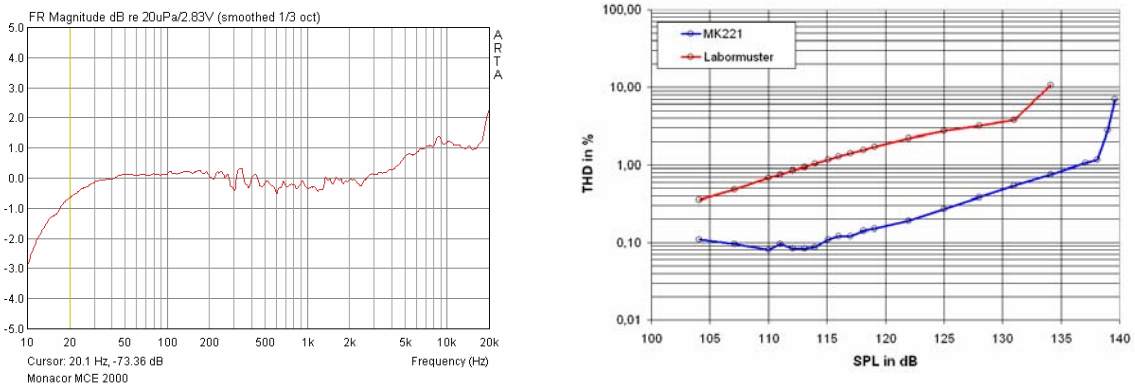


Bild 2.3.7: Kalibrierkurve des Labormusters und THD @ 300 Hz

Anhand Bild 2.3.7 wird deutlich, warum professionelle Messmikrofone so teuer sind. Die Verzerrungen liegen eine Zehnerpotenz unter den Werten des hier gezeigten Labormusters. Auch die zweite wichtige Kenngröße eines Messmikrofons, der Grenzschalldruck, ist beim MK 221 ca. 25-30 dB höher und hat somit bei Nahfeldmessungen deutlich mehr verzerrungsfreie Reserven. Unter Berücksichtigung der eingesetzten Mittel sind die gemessenen Werte dennoch beachtlich und sind mit Mikrofonen gleicher Bauart problemlos vergleichbar.

Tabelle 2.3.2 zeigt die Messwerte für das in Bild 2.3.1 gezeigte Labormuster aus Split. Die Werte

Sensitivity	12mV/Pa
Noise level	31dBA
THD (at 94dB SPL and 1kHz)	0,25%
THD (at 114dB SPL and 1 kHz)	2,09%

Tabelle 2.3.2: Technische Daten des Labormusters

wurden mit geeichten Kalibratoren bei 1kHz und 94dB SPL bzw. 114 dB SPL mit ARTA und einer professionellen Soundkarte ermittelt.

2.4 Beschleunigungsaufnehmer

2.4.1 ACH-01

Der ACH-01 ist ein preiswerter, universell einsetzbarer Beschleunigungssensor von Measurement Specialties mit brauchbaren Leistungsmerkmalen (siehe Spezifikation). Durch die Verwendung von piezoelektrischer Polymerfolie im ACH-01 bleibt der Aufnehmer erschwinglich und auch das Gewicht hält sich mit 8 Gramm - einschließlich Kabel und Stecker - in vernünftigen Grenzen.

Bild 2.4.1: Beschleunigungssensor ACH01

Performance (T=25°C)	Symbol	Min	Typ	Max	Units
Sensitivity	M_o	7	9	11	mV/g
Lower Frequency Limit (1)	f_l	--	2	5	Hz
Upper Frequency Limit (1)	f_u	10	20	--	kHz
Equivalent Noise Floor 10Hz 100Hz 1kHz		 -- -- --	 130 20 6	 -- -- --	$\mu g/\sqrt{Hz}$
Dynamic Range	--	±150	--	--	g
Linearity	--	--	0.1	1.0	%
Transverse Sensitivity	M_t	--	2.0	5	%
Resonant Frequency	f_o	--	35	--	kHz
Phase Deviation (±5° Limit) (6)	θ	10	--	10,000	Hz
Supply Voltage	V+	3	--	40	Volts

Bild 2.4.2: Auszug aus der Spezifikation des ACH01

Der Sensor hat allerdings ein kleines Problem, er reagiert sehr empfindlich auf Störungen. Eine wirkungsvolle Abhilfe ist die Abschirmung mit sehr dünner Kupferfolie, allerdings zu Lasten erhöhter Masse und veränderter Daten (Bild 2.4.3).

Bild 2.4.3: Schirmung des ACH01 mit Kupferfolie

2.4.2 Vorverstärker für den Beschleunigungsaufnehmer ACH 01

Ohne Vorverstärker ist der ACH01 nicht zu verwenden. Es gibt eine Amplifier Box (IB-ACH-01) von Measurement Specialties, welche speziell auf den ACH01 abgestimmt ist, aber auch im DIY-Bereich wird man fündig. Bill Waslo's Homepage (http://www.libinst.com/accel.htm) ist folgende Schaltung zu entnehmen.

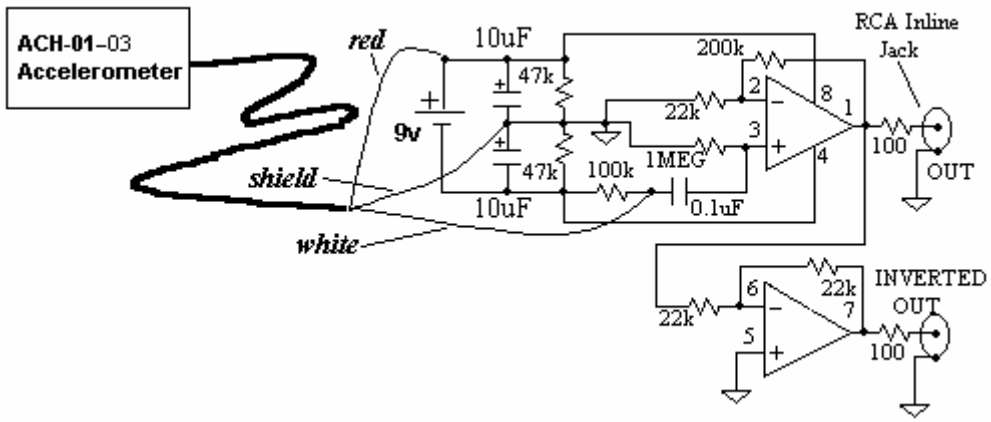


Bild 2.4.4: Vorverstärker für den ACH01

Als Op-Amp (CMOS) sind TLC2272, TLC272, LMC6482 oder LMC662 geeignet. Für die Spannungsversorgung reicht eine 9V Batterie. Die Anschlussbelegung des Sensors ist wie folgt: Masse/Schirm = schwarz, Signal = weiß, Versorgung + 9V = rot.

Bild 2.4.5: Vorverstärker für den ACH01, Ausführung „Brösel"

3 Mikrofonvorverstärker

3.1 Einleitung

Die Empfindlichkeit am Markt erhältlicher Elektret-Mikrofonkapseln bewegt sich zwischen 4mV/Pa@1kHz und ca. 15 mV/Pa@1kHz. Bild 3.1.1 zeigt die Ausgangsspannung einer gängigen Mikrofonkapsel in Abhängigkeit vom Pegel.

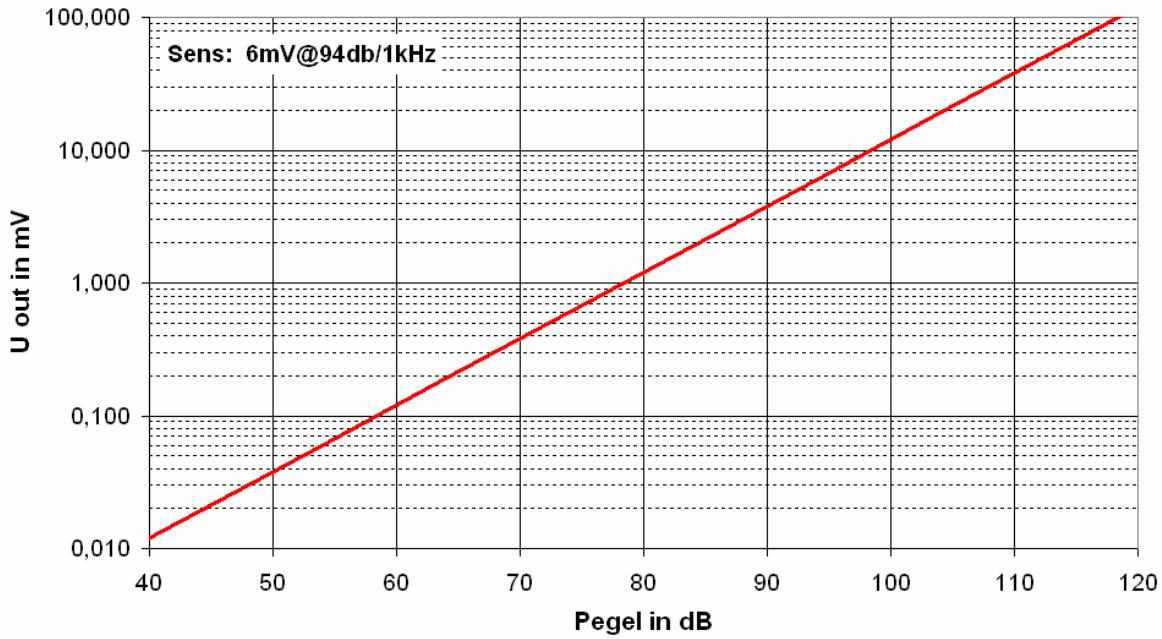


Bild 3.1.1: Pegelabhängige Spannungsausbeute einer gängigen Mikrofonkapsel

Bei einer Nahfeldmessung bei 120 dB können wir also mit einer Ausgangsspannung von ca. 100 mV rechnen, im Pegelbereich üblicher Freifeldmessungen von 80 dB bis 90 dB sind es lediglich 1 mV – 3 mV. Beide Pegel sind nicht hinreichend zur Aussteuerung einer Soundkarte, die in etwa im Bereich von 1V RMS liegt. Es muss also ein Vorverstärker her, der die Ausgangsspannung der Mikrofonkapsel auf einen für die Soundkarte geeigneten Pegel anhebt. Für Freifeldmessungen wird in etwa eine Verstärkung von 45 bis 55 dB (Faktor 178 - 562) benötigt, für die Nahfeldmessung sollte eine Verstärkung von 20 dB (Faktor 10) genügen. Die genauen Werte hängen natürlich von der verwendeten Mikrofonkapsel und der Eingangsempfindlichkeit der Soundkarte ab.

3.2 High Quality & Low Cost Mikrofonvorverstärker

Ralf Grafe

Nach einigen Experimenten (http://www.m1n1.de/html/hifi.html) mit Schaltungen für Mikrofonvorverstärker, kam es letztendlich zu dem unten abgebildeten Mikrofonvorverstärker, den sicherlich kein Mikrofon zu fürchten braucht.

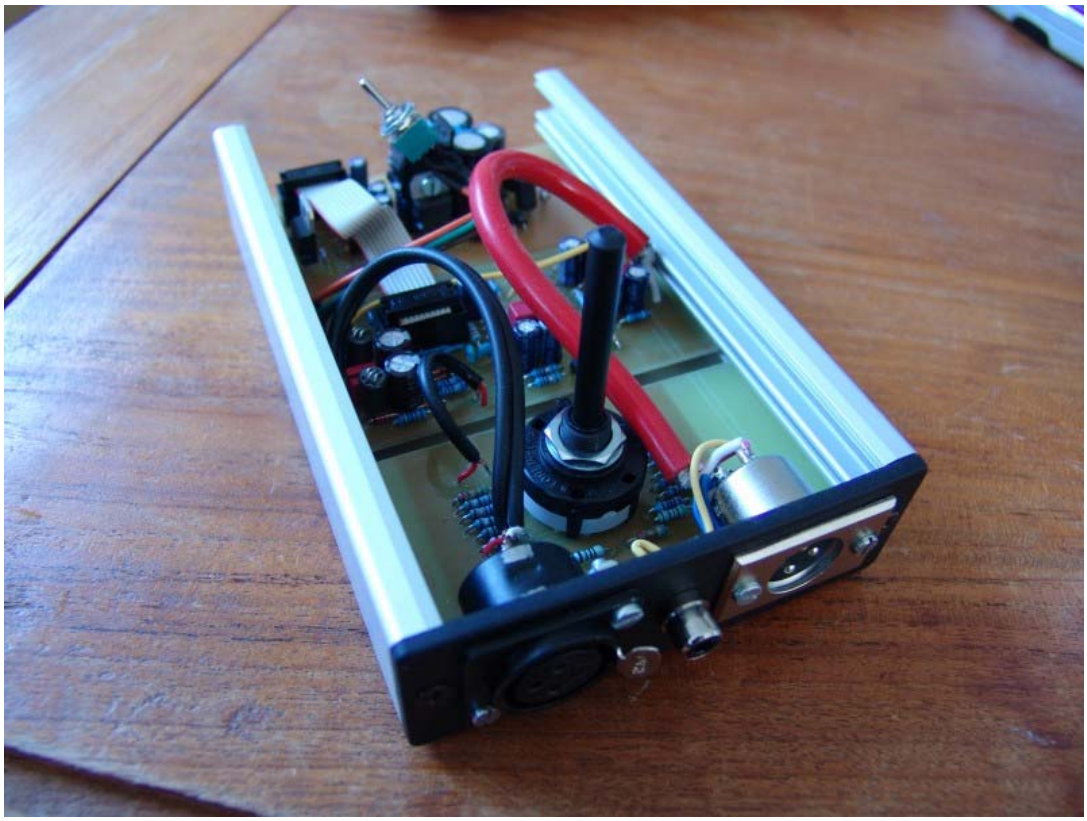


Bild 3.2.1: Rane Plus

Als Basis wird ein INA163 Instrumentation-Amplifier von Burr Brown eingesetzt. Bezüglich Eigenrauschen, Verzerrungen und DC Offset verhält sich dieser Baustein vorbildlich. Die verwendete SMD-Version ist für ca. 5 Euro bei Reichelt erhältlich. Das Datenblatt kann dort ebenfalls bezogen werden.

Die Mindestanforderung bei der Entwicklung war ein einstellbarer Verstärkungsbereich von 20dB bis 65dB in 5dB Stufen und eine Phantomspeisung. Realisiert wurden darüber hinaus noch eine einfache Übersteuerungsanzeige sowie einige Kleinigkeiten, die weiter unten erläutert werden.

In Bild 3.2.1 und Bild 3.3.2 sehen wir bereits alle drei Einzelkomponenten in einem Gehäuse. Dabei handelt es sich um die Spannungsversorgungsplatine (links), die eigentliche Verstärkerplatine (mitte) und die Stufenschalterplatine (rechts). Dass bei einer Gesamtverstärkung von maximal 65dB auf eine gute Abschirmung gegen Brummeinstreuung geachtet werden muss, erklärt sich von selbst. Daher sitzt die Verstärkerplatine in der Mitte des Aluminium-Gehäuses.

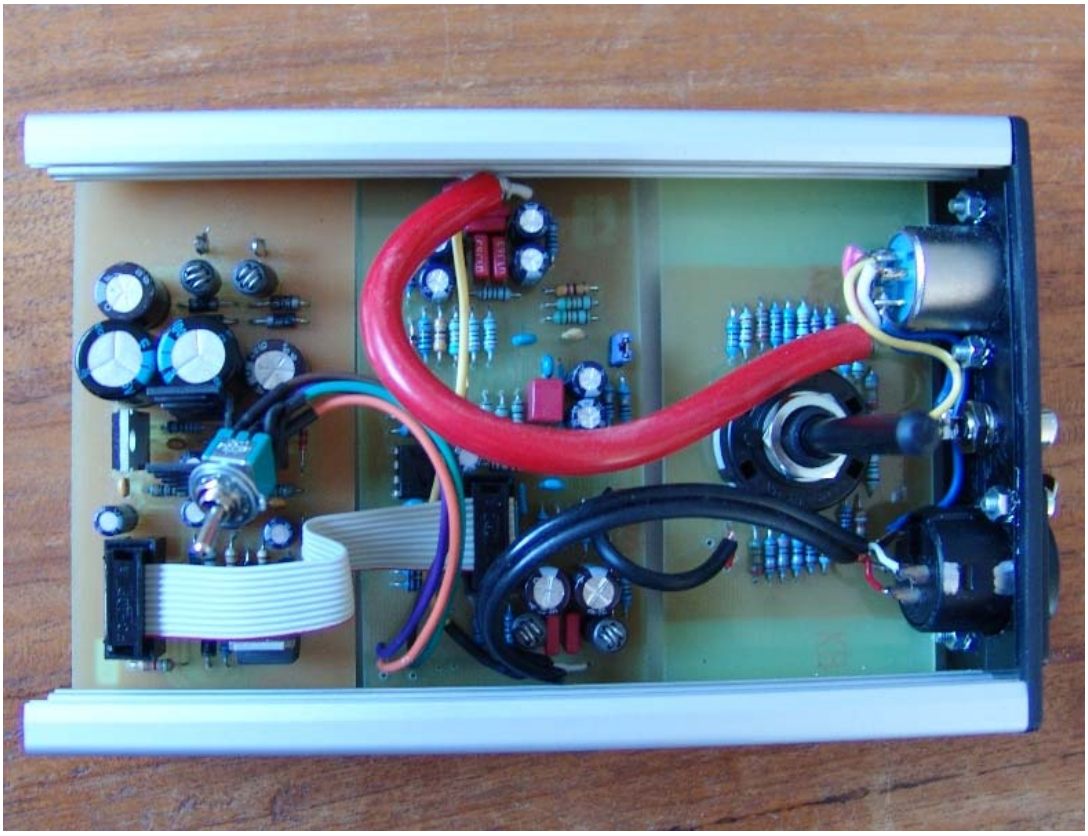


Bild 3.3.2: Aufbau Rane Plus

Der in Bild 3.3.2 sichtbare Kippschalter schaltet die Phantomspannung aus und ein. Es erfolgt eine Zustandsanzeige über eine gelbe LED im Gehäusedeckel. Ein weiterer Kippschalter erlaubt das Abschalten der DC-Protection, falls exakte Messungen im Frequenzbereich unterhalb von 10Hz notwendig werden sollten.

In Bild 3.3.3 wird der Schaltplan vorgestellt. Direkt nach der Eingangsfilterung, die HF-Störungen herausfiltert und die Eingänge des INA163 schützt, folgt die erste Verstärkerstufe. Die Verstärkungseinstellung erfolgt mit dem Stufenschalter, der zwischen Pin 3 und 12 des INA angeschlossen wird. Am Ausgang des INA findet sich das Kondensatornetzwerk aus C9, C10 und C14. Während C10 und C14 wie ein bipolarer Elektrolytkondensator wirken, gleicht C9 deren störende Induktivität bei höheren Frequenzen aus. Die Aufgabe der Kondensatoren an sich ist die Auskopplung eines eventuellen DC Offsets des INA, damit dieser nicht von der nachfolgenden Stufe verstärkt wird. Wie eingangs erwähnt ist der DC Offset so gering, dass bei Messungen von Frequenzen unterhalb von 20Hz dieses Kondensatornetzwerk überbrückt werden kann. Die Default-Einstellung ist jedoch mit aktivem Netzwerk, also nicht überbrückt.

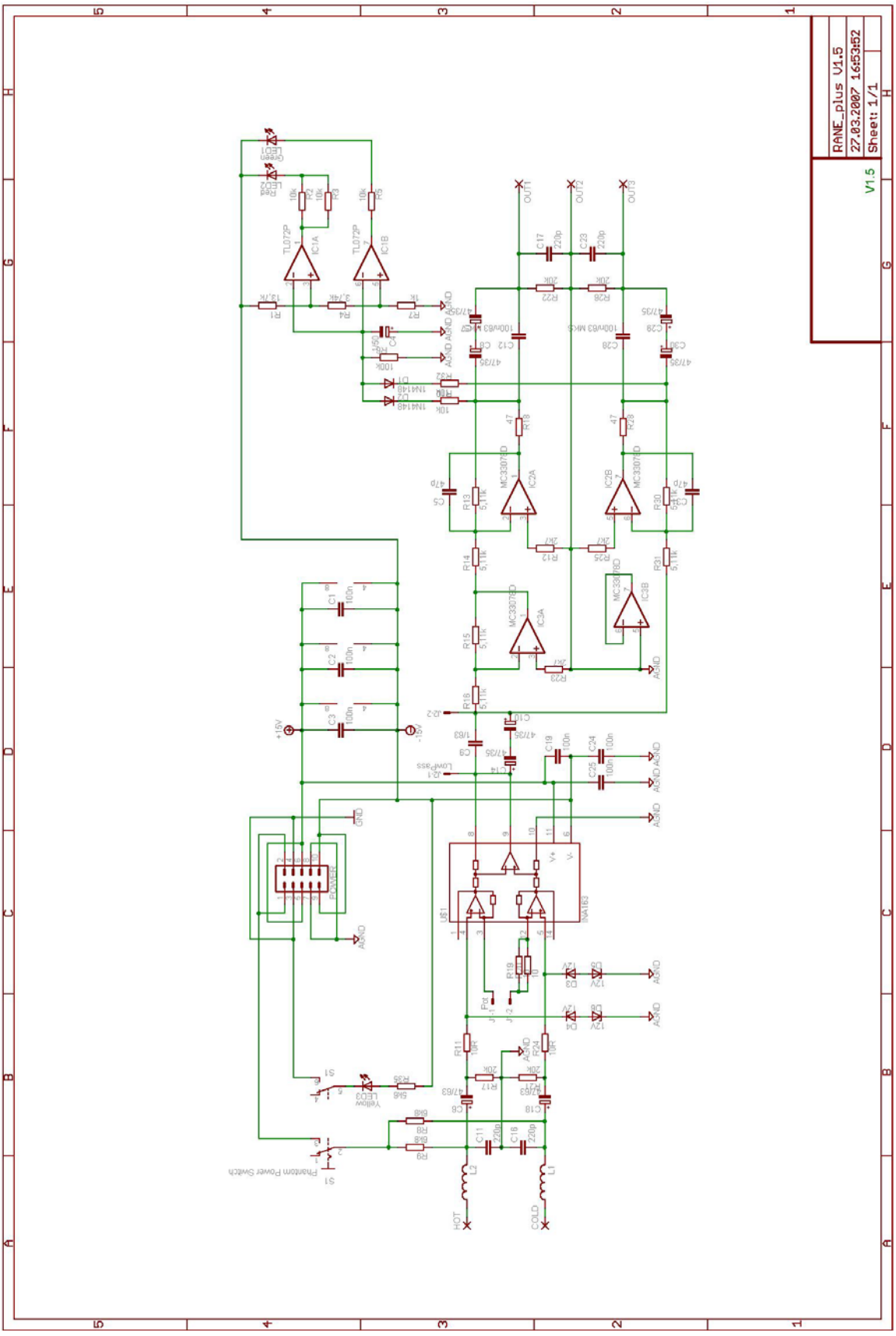


Bild 3.3.3: Schaltplan

Nachfolgend findet sich die zweite Stufe mit einer festen Verstärkung von 6dB bestehend aus rauscharmen OPs vom Typ MC33078.

Der Schaltplan des Stufenschalters und die notwendigen Widerstandswerte ergeben sich aus Bild 3.3.1.
Der verwendete Drehschalter muss mittels des Einstellrings auf 10 Stellungen begrenzt werden. Bei der Auswahl der Widerstandswerte wurde auf Parallelschaltungen von Standardwerten zurückgegriffen, um exaktere Werte zu erzielen.

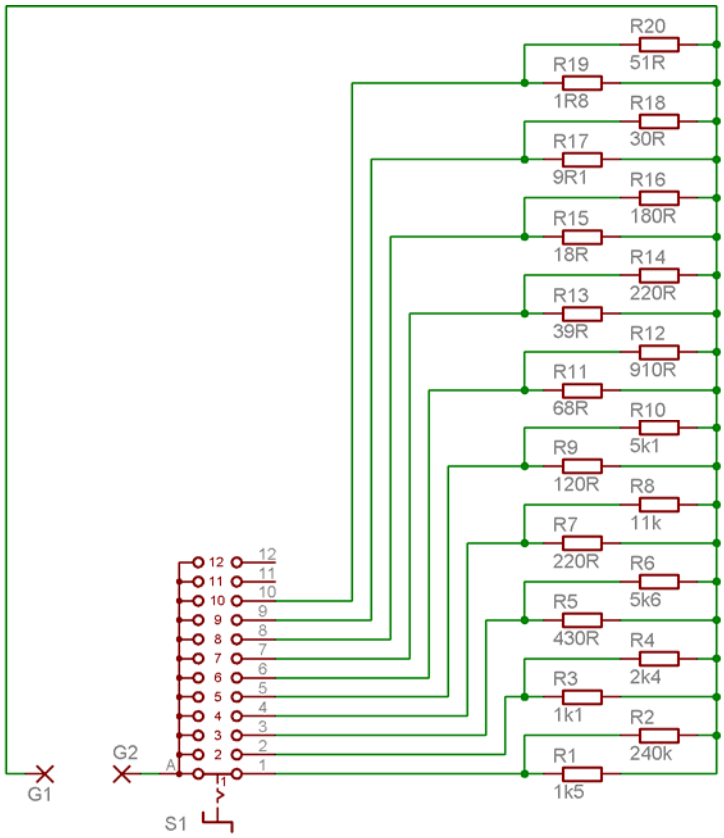


Bild 3.3.1: Stufenschalter

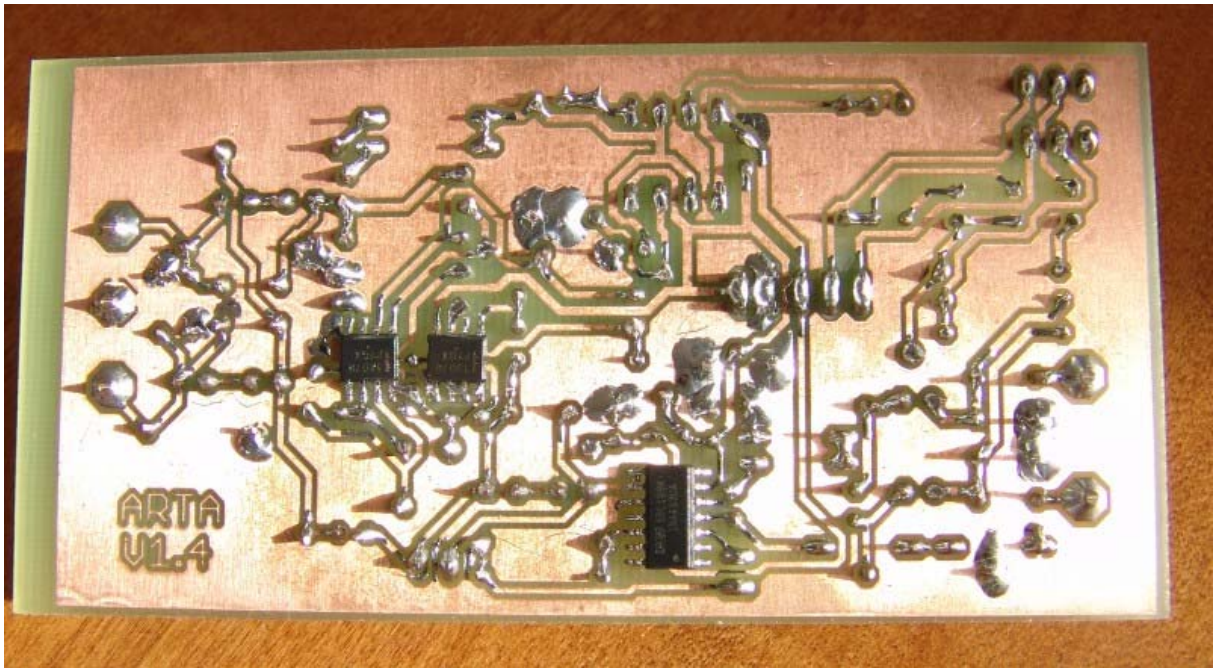


Bild 3.3.2: Platine Rane Plus, Lötseite

Bild 3.3.2 zeigt die Lötseite der fertig bestückten Platine (in der älteren Version 1.4). Gut zu erkennen ist der INA163 (mittig) und die beiden MC33078 (links). Alle Leiterbahnen wurden so breit wie möglich gewählt, um eine relativ gute Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Wichtig ist in jedem Fall die Verwendung von so viel Massefläche wie irgend möglich.

3.3 *Der Wallin Mikrofonvorverstärker*

Heinrich Weber

Im Internet gibt es unzählige Angebote zu Mikrofonvorverstärkern. Ein Klassiker ist der Vorverstärker von Wallin, der mittlerweile auch von „Mad about Sound“ als Bausatz angeboten wird (www.madaboutsound.com).

Es handelt sich um eine einfache OP-Amp Schaltung (siehe Bild 3.3.1), die für den normalen Messbetrieb mit Elektret-Kondensatormikrofonen optimiert ist. Sowohl die Verstärkung für die Nahfeldmessung mit 6dB als auch die Verstärkung für die Fernfeldmessung mit 26 dB sind in Verbindung mit der mitgelieferten Mikrofonkapsel (WM61a) praxisgerecht ausgelegt.

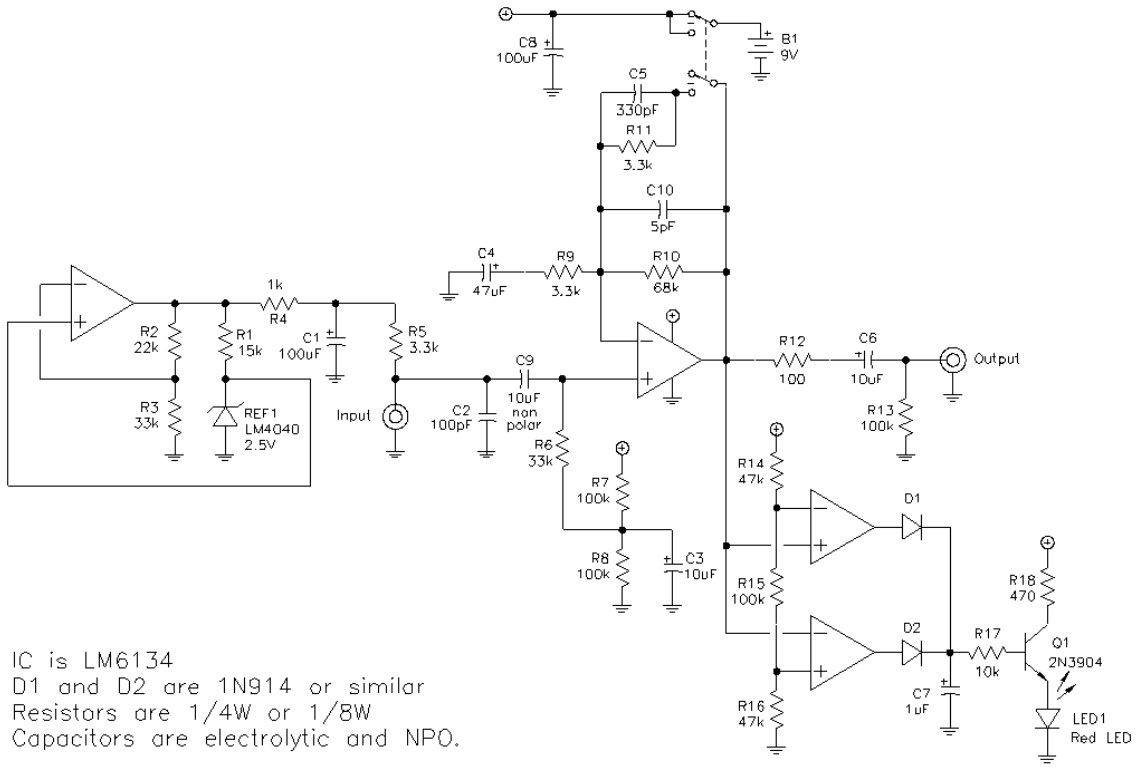


Bild 3.3.1 Wallin-Mikrofonvorverstärker

Der Bausatz von Mad About Sound ist sehr komplett, er enthält alle Bauteile sowie ein passendes Gehäuse, lediglich die Mikrofonkapsel (WM 61A) muss separat bestellt werden. Die Bauanleitung in englischer Sprache ist gut aufgemacht und erhält alle erforderlichen Details, bis auf den Schaltplan, der musste aus dem Internet besorgt werden. Der Nachbau des Bausatzes dürfte auch für Gelegenheitslöter machbar sein. Bild 3.3.3 zeigt den fertig aufgebauten Bausatz.

Bild 3.3.2: Wallin MVV

Entgegen dem Bauvorschlag, wurden die Cinch-Buchsen frontseitig eingebaut, der Platz dafür ist gerade vorhanden (siehe Bild 3.3.2).

.

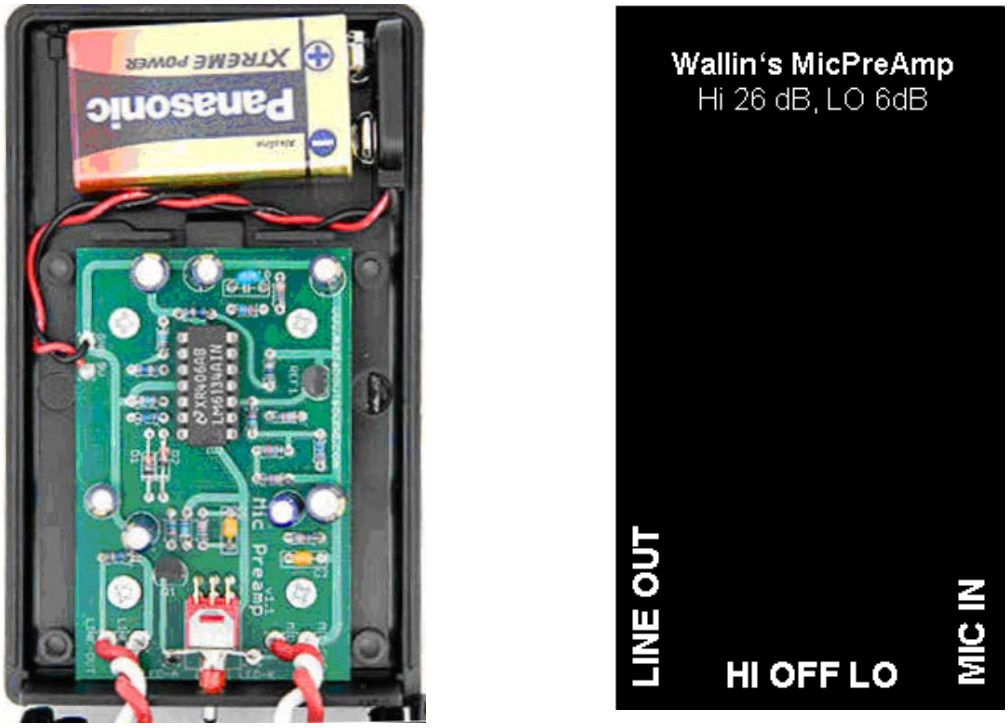


Bild 3.3.3: Fertig aufgebauter Bausatz (links), modifizierte Druckvorlage (rechts)

Bild 3.3.4 zeigt die gemessenen Frequenzgänge des Wallin Mikrofonvorverstärkers. Es besteht eine leichte Abhängigkeit der Bandbreite von der Verstärkung, die für die meisten Messaufgaben eines Lautsprecherbauers jedoch ohne Bedeutung sein dürfte.

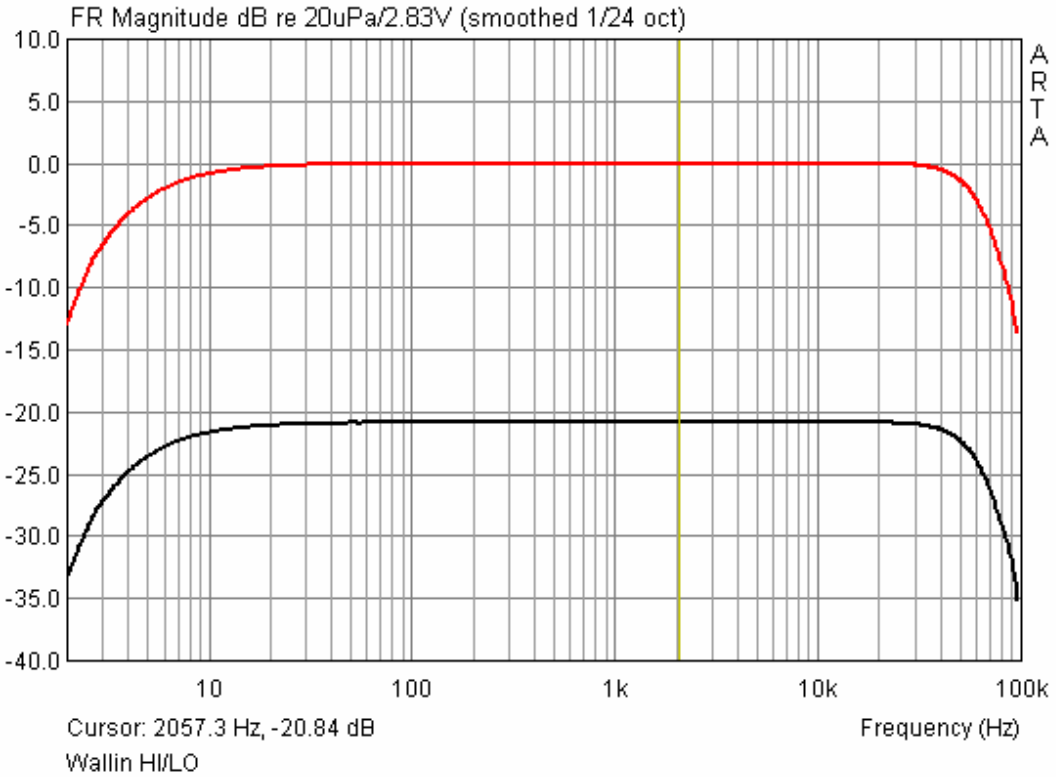


Bild 3.3.4: Wallin Mikrofonvorverstärker, Frequenzgang

4 Leistungsverstärker

4.1 High Quality Amplifier mit TDA 7294

Ralf Grafe

Bauvorschläge für Verstärker oder Endstufen gibt es wie Sand am Meer. Meist sind die Projekte aber etwas extrem, was das erklärte Ziel angeht. Dieser Vorschlag ist im Vergleich dazu super langweilig, keine besonderen Teile, nicht besonders groß und sehr skalierbar, was die gewünschte Leistung angeht. Ohne Trafo und ohne Kühlkörper kostet der in Bild 4.1.1 gezeigte Aufbau ca. 10 Euro und setzt lediglich voraus, dass man die einseitige Platine selber ätzen kann.

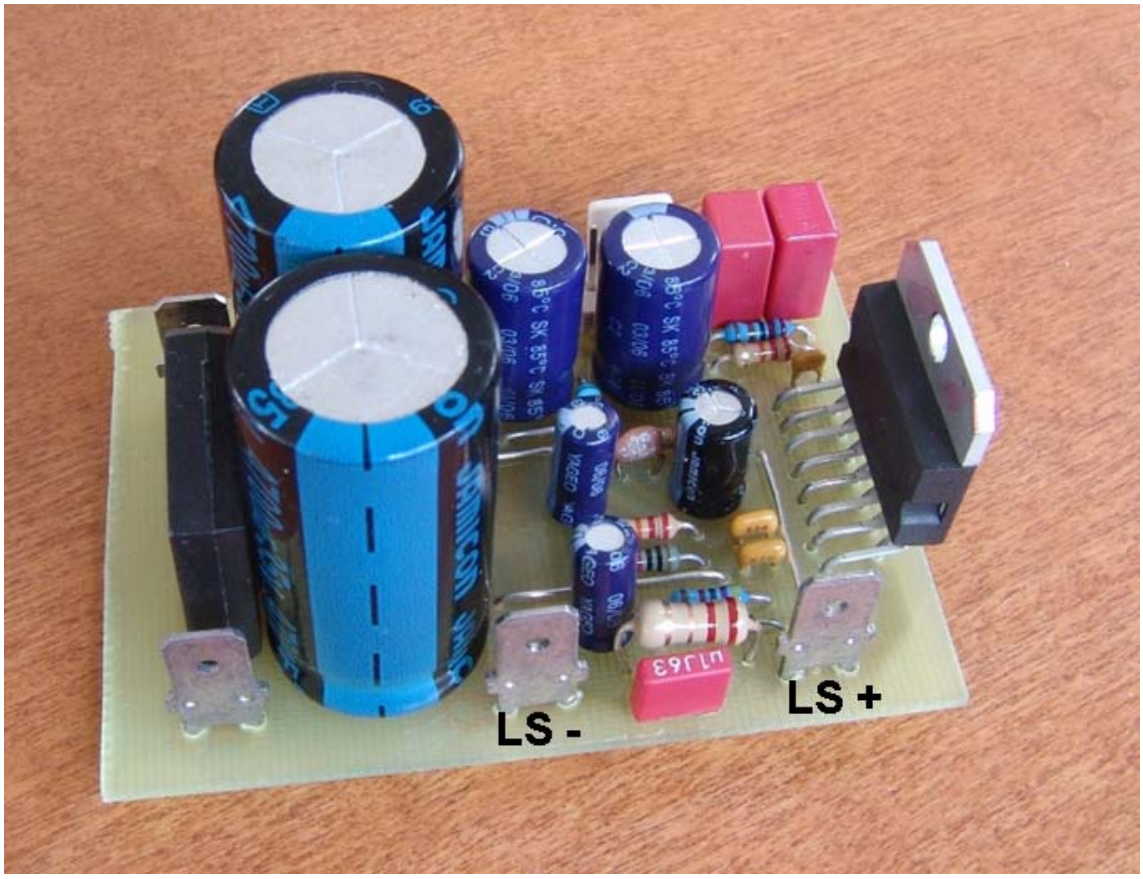


Bild 4.1.1: Fertiger Leistungsverstärker mit TDA 7294

Die Grundlage bildet der TDA7294 von SGS Thomson, eine vollständige Endstufe, die nur noch wenige externe Bauteile benötigt. Je nach verwendetem Transformator und Kühlkörper sind Ausgangsleistungen bis zu 100W an 4 Ohm möglich. Näheres dazu findet man im Datenblatt des Herstellers [08}.

Das IC wurde gewählt, weil es eine DMOS Ausgangstreiberstufe hat und auch sonst durch sehr geringe Verzerrungen und sehr geringes Rauschen glänzt. Manch ältere Endstufe wäre froh, wenn sie so gute Werte liefern würde. Das ganze hat aber auch eine Kehrseite, wann immer man kleine Signale verstärken möchte, ist darauf zu achten, dass selbst die kleinsten Störungen am Eingang zu merklichen Störungen am Ausgang führen. Ein unglückliches Platinenlayout führt bei diesem IC unweigerlich zum Schwingen, Brummen oder zu beidem. Um das in den Griff zu bekommen, verfügt die Platine über eine sternförmige Masseführung sowie verschiedene Maßnahmen, um die Schwingneigung zu unterdrücken. Bild 4.1.2 zeigt den Schaltplan und die Stückliste.

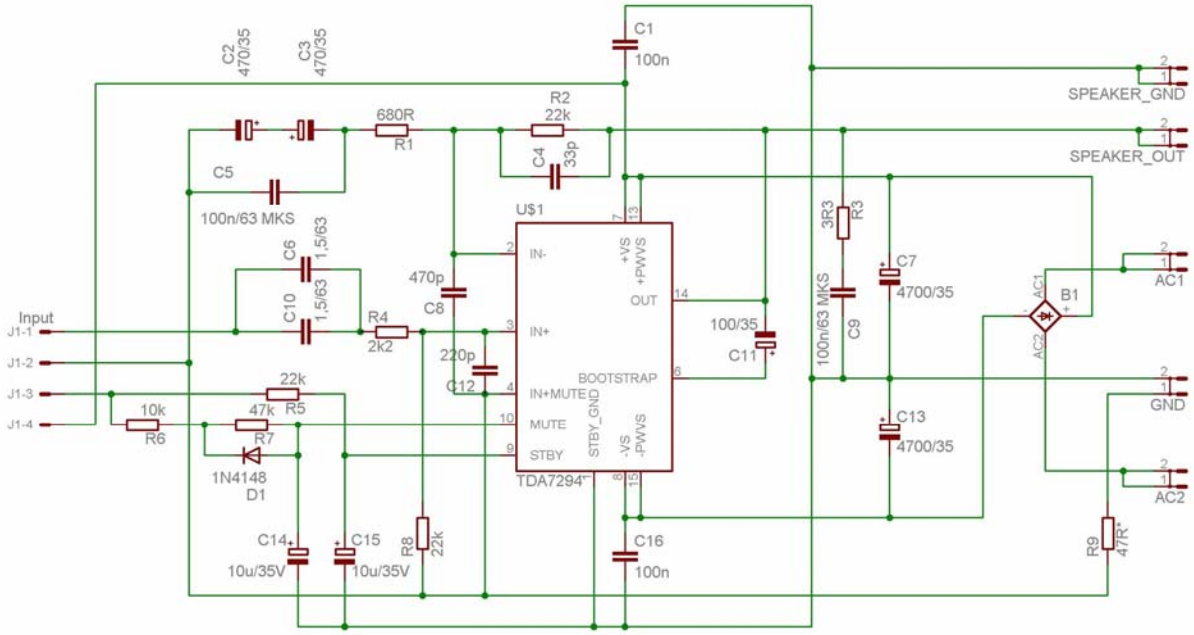


Bild 4.1.2: Schaltplan

Wie man im Schaltplan und auf der Platine sehen kann (Bild 4.1.3), gibt es einige Steckverbinder in der Mitte der Platine. Zwischen den beiden Siebelkos befindet sich der Massepunkt (GND), an den die Mittelanzapfung des Trafos angeschlossen wird. Die beiden anderen Wechselspannungsstecker befinden sich rechts und links vom Gleichrichter mit der Bezeichnung AC1 und AC2. Seitlich sind die Stecker für den Lautsprecheranschluss. Der positive Anschluss ist neben dem IC, der Lautsprecher-Masseanschluss seitlich auf der Platine.

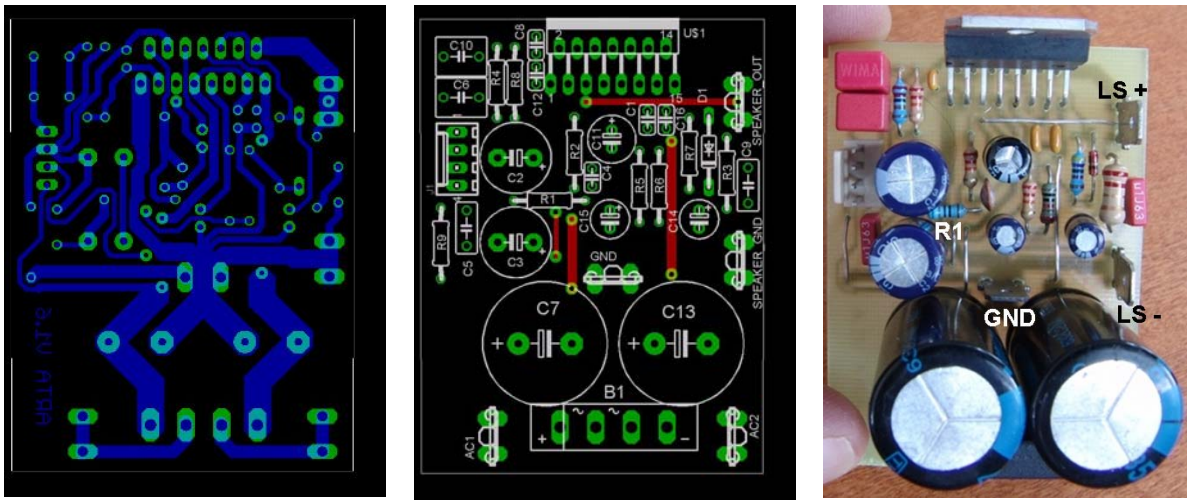
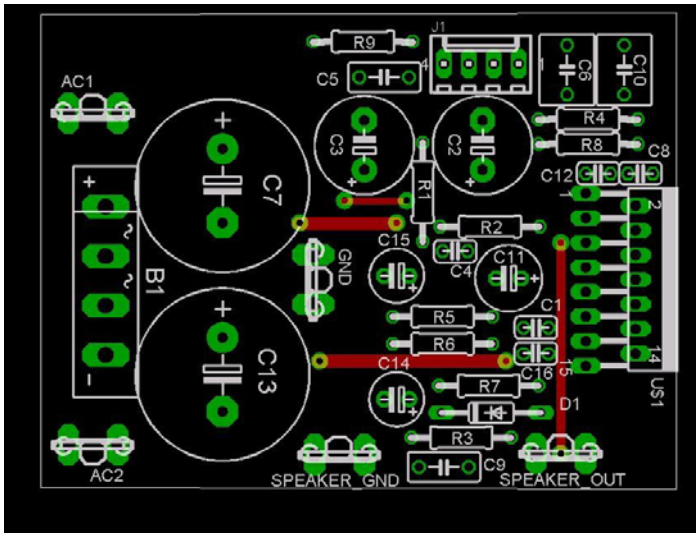


Bild 4.1.3: Layout, Bestückungsplan und fertige Platine

Auf der anderen Seite befindet sich ein 4 poliger Molex Steckverbinder. Die Reihenfolge der Kontakte von oben nach unten ist NF-Eingang, Masse, Standby / Mute und +Ub. Schaltet man auf die Standby / Mute Leitung +Ub, schaltet man den Verstärker ein, legt man Standby/Mute auf Masse, schaltet man ihn ab. Der Stecker ist so belegt, dass alle erforderlichen Signale dort vorhanden sind. Im Bestückungsplan (Bild 4.1.3, Mitte) kann man die Lage der Bauteile gut erkennen. Die Roten Linien stellen die Drahtbrücken dar.

Die Bauteildimensionierung ist im vorliegenden Fall auf maximal +/- 30V Betriebsspannung ausgelegt. Bei Verwendung eines Trafos mit 2 x 18V Wechselspannung ergeben sich +/- 25V Betriebsspannung, was eine Ausgangsleistung von maximal 36W an 8 Ohm oder 72W an 4 Ohm zulässt.

Unter der Annahme, dass die verwendete Soundkarte eine Ausgangsspannung von 1 Volt RMS liefert, wird zur Vollaussteuerung eine Verstärkung von G = 17 benötigt. Dafür müsste R1 = 22000 / (G-1) = 1375 Ohm betragen. Der nächtsliegende Widerstandswert der E96-Reihe beträgt 1370 Ohm.



Part	Value	Package
B1	Brückengleichrichter 8A KBU8M	KBU
D1	1N4148	DO35-10
IC1	TDA7294	MULTIWATT-15
J1	4 Pin Molex Steckverb.	6410-04
C1, C16	100n	C025-024X044
C2, C3	470/35V	E5-10,5
C4	33p	C025-024X044
C5, C9	100n/63V MKS	C050-030X075
C6, C10	1,5/63V	C050-055X075
C7, C13	4700/35V	E7,5-18
C8	470p	C025-024X044
C11	100/35V	E2,5-7
C12	220p	C025-024X044
C14, C15	10u/35V	E2,5-6
R1	680R / G=33 oder 1k33 / G=24.88	0207/10
R2, R5, R8	22k	0207/10
R3	3R3	0207/10
R4	2k2	0207/10
R6	10k	0207/10
R7	47k	0207/10
R9	47R (siehe Text)	0207/10

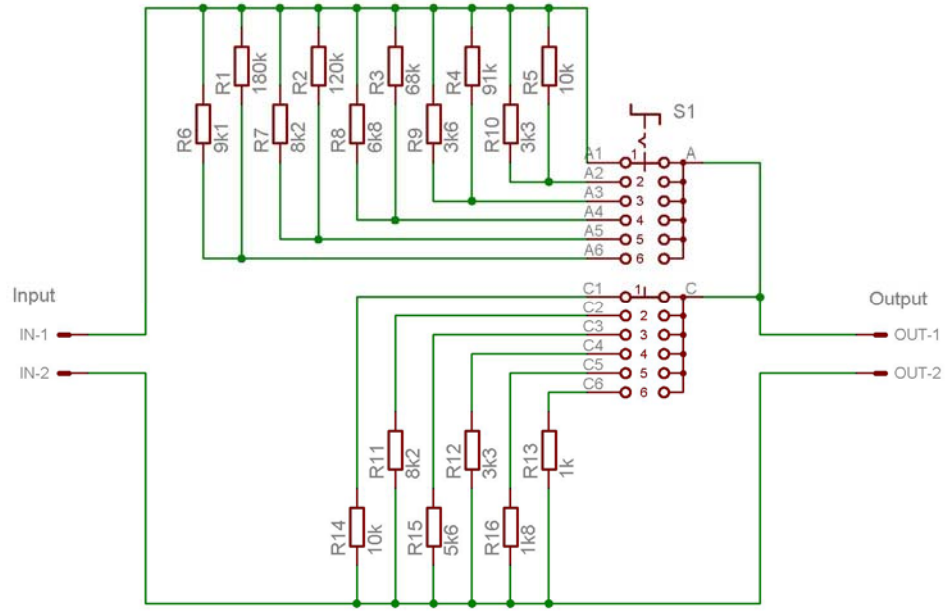
Bild 4.1.4: Bestückungsplan und Stückliste

Erratum 06/2010: Achtung: bitte den Kondensator C4, 33pF NICHT BESTÜCKEN. Dieser soll eigentlich einer hochfrequenten Schwingneigung entgegenwirken, aber genau das Gegenteil ist der Fall. C4 führt zu Schwingen im MHz Bereich, weil bei hohen Frequenzen keine phasenrichtige Gegenkopplung mehr gegeben ist.

Anmerkung 1: *Der Widerstand R9 / 47R ist für einen Sonderfall vorgesehen, wenn es darum geht, die Eingangssignalmasse von der Verstärkermasse zu trennen (Brummschleifen). Abweichend vom Schaltplan wird R9 hier einfach durch eine Drahtbrücke ersetzt!*

Anmerkung 2: *Zur Ausnutzung der maximalen Ausgangsleistung des TDA 7294 wird ein Trafo mit 2 x 28V benötigt. Die Spannungsfestigkeit der Siebkondensatoren und der anderen Elkos wäre dann entsprechend auf 63V zu erhöhen. Bitte prüfen Sie, ob dafür genug Platz auf der Platine ist.*

Bei Leitungsverstärkern wird die Lautstärke mit einem Potentiometer geregelt. Das ist für diesen Verwendungszweck auch hinreichend, für den Einsatz als Messverstärker jedoch nicht optimal, da die Ausgangsspannung nur mit Hilfe eines Spannungsmessgerätes reproduzierbar einstellbar ist. Speziell für einkanalige Messungen ist es wichtig, die jeweilige Verstärkung genau zu kennen bzw. reproduzierbar einstellen zu können.



Stufe	R Serie					R Parallel				G[abs]	G[dB]
1						**R14**	10000	22000	**6875**	1,00	0,00
2	**R5**	10000	**R10**	3300	**2481**	**R11**	8200	22000	**5974**	0,71	-3,02
3	**R4**	91000	**R9**	3600	**3463**	**R15**	5600	22000	**4464**	0,56	-4,99
4	**R3**	68000	**R8**	6800	**6182**	**R12**	3300	22000	**2870**	0,32	-9,98
5	**R2**	120000	**R7**	8200	**7676**	**R16**	1800	22000	**1664**	0,18	-14,98
6	**R1**	180000	**R6**	9100	**8662**	**R13**	1000	22000	**957**	0,10	-20,05

Bild 4.1.5: Eingangsabschwächer

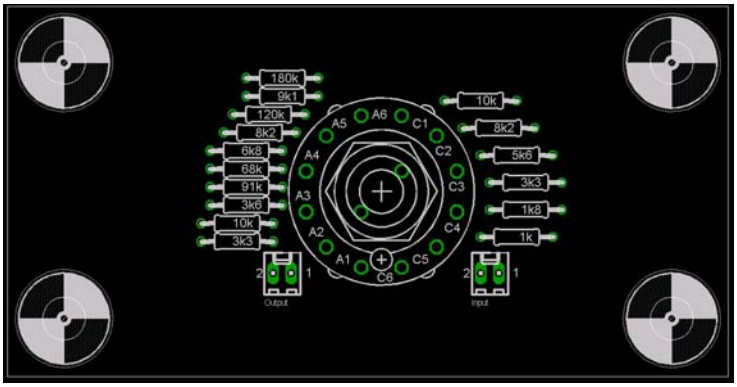


Bild 4.1.6: Eingangsabschwächer Bestückungsplan

Aus diesem Grunde wurde der Leistungsverstärker um einen gestuften Eingangsabschwächer ergänzt. Die Widerstandswerte für die Bestückung sowie die jeweilige Abschwächung sind Bild 4.1.5 und 4.1.7 zu entnehmen.

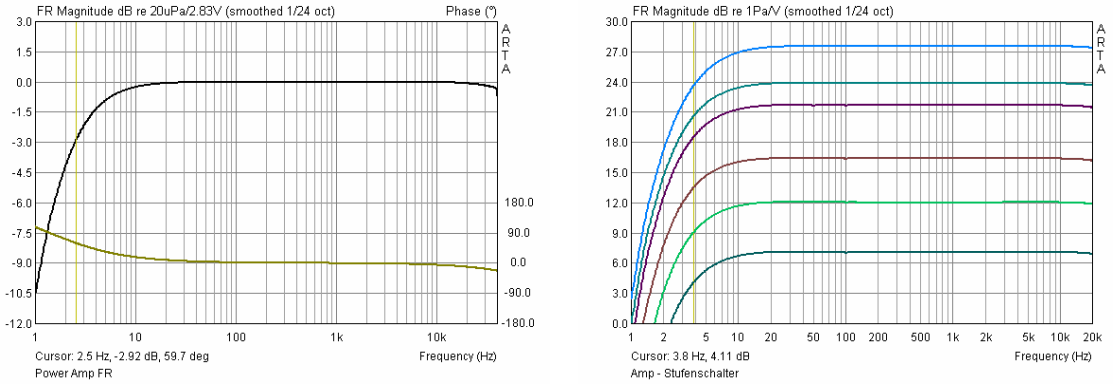


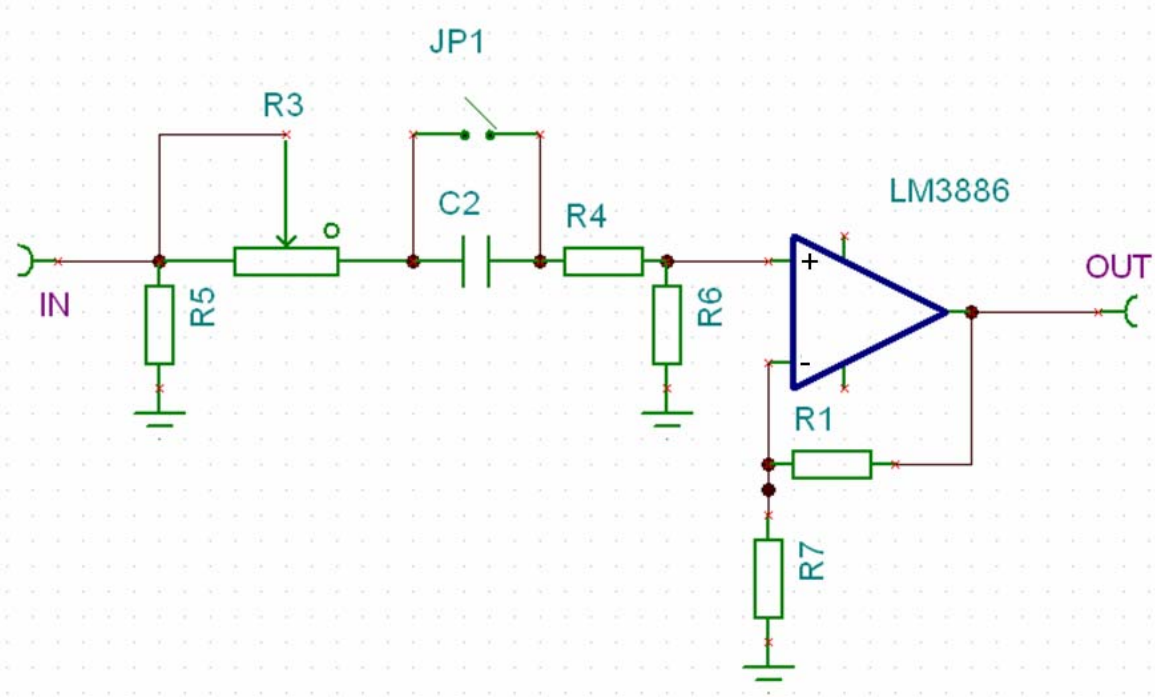
Bild 4.1.7: Frequenzgang des Leistungsverstärkers und Wirkung des Eingangsabschwächers

Ausgangsleistung	> 36 W RMS, 4-8 Ω
	~ 72 W an 4 Ω max.
	~ 36 W an 8 Ω max.
Verstärkung	17 oder 24,6 dB (R1 = 1k33)
Eingangsempfindlichkeit	1.0 V RMS für 36 W an 8 Ω
Eingangsimpedanz	22 kΩ
Signal-to-Noise ratio	
Frequenzgang	~ 3 Hz – 200 kHz, -3 dB
THD	< 0.02%, 1W - 30W,1kHz
IMD	< 0.02%, 1W

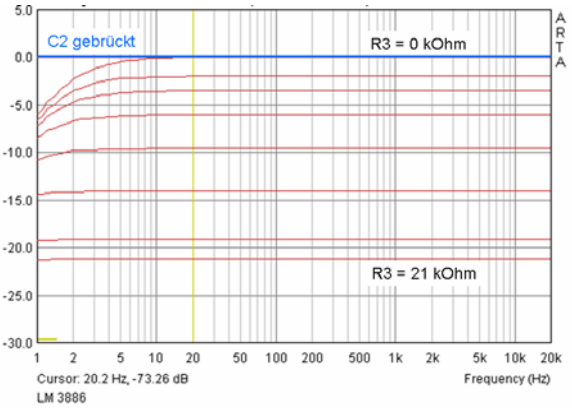
Bild 4.1.8: Spezifikation (± 25V D.C.)

4.2 High Quality Amplifier mit LM 3886

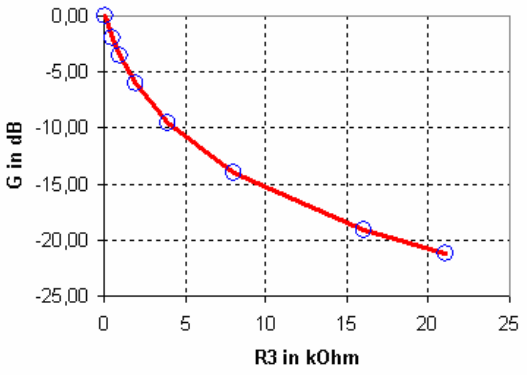
Neben dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Verstärkerbaustein TDA 7294 von ST Microelectronics erfreut sich die sogenannte Overture Serie von National Semiconductor großer Beliebtheit. Insbesondere der LM3886 (http://www.national.com/ds/LM/LM3886.pdf) ist weit verbreitet und glänzt mit hervorragenden Daten. Aus diesem Grunde wird hier ein zweiter - speziell auf Messaufgaben abgestimmter – Bauvorschlag vorgestellt.



a)



b)



c)

Bild 4.2.1: a) Basisschaltung LM3886, b) FR als f(G), c) Wirkung Potentiometer

Da der Line Eingang der meisten Soundkarten bereits einen Kondensator enthält, kann C2 gebrückt werden (bitte vorher prüfen). Die negative Feedbackschleife enthält keinen Kondensator, wie in der Standardapplikation von National vergesehen ist. Beide Eingänge sehen so dieselbe Impedanz (R6=R7=1k), was gute DC-Stabilität und einen guten HF-Frequenzgang garantieren. Die Verstärkung ist zwischen 1 und ca. 12 variabel.

Bild 4.2.2 zeigt den kompletten Schaltplan des Bauvorschlages einschließlich der Versorgung. Es fehlt lediglich noch ein Ringkerntrafo mit 2x18V und ca. 120VA Leistung.

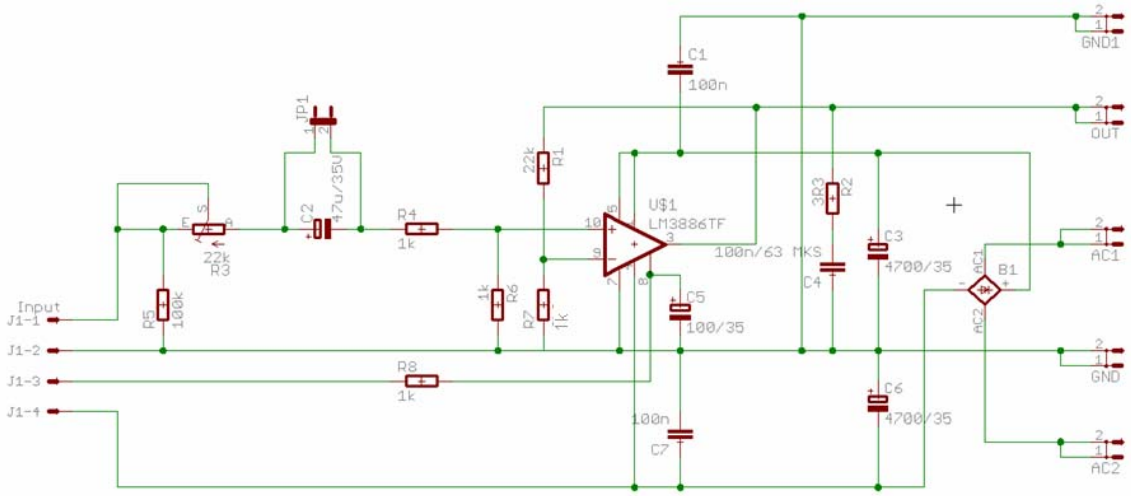


Bild 4.2.2: Schaltplan

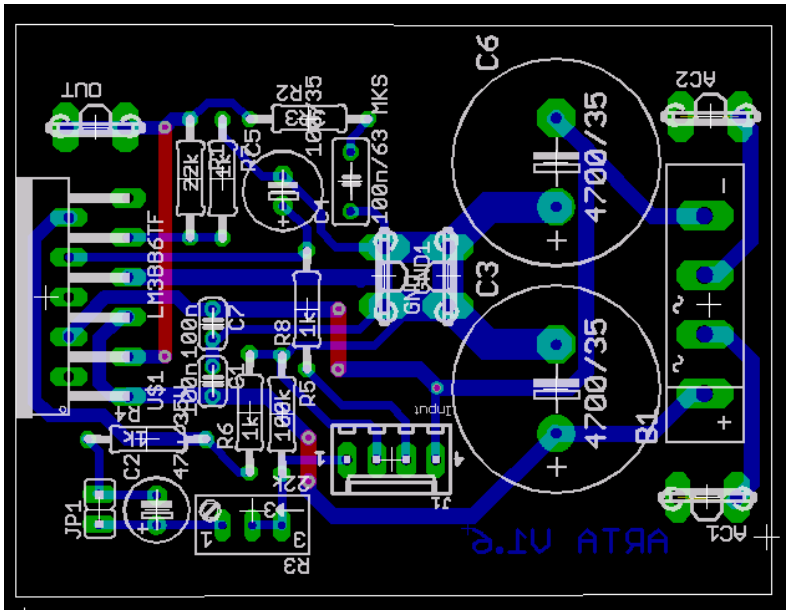


Bild 4.2.3: Platine, Bestückungsseite

Bei hinreichend großem Bedarf können Platinen unter folgender Adresse bezogen werden http://www.m1n1.de/html/hifi.html .

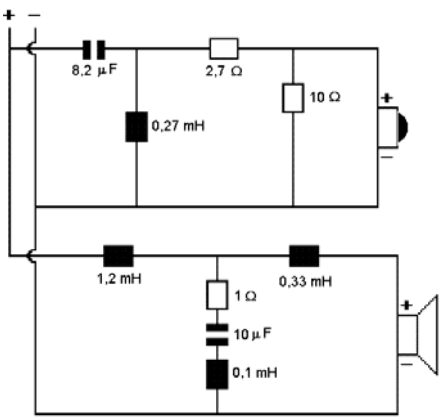
5 Hilfsmittel zur Entwicklung von Frequenzweichen

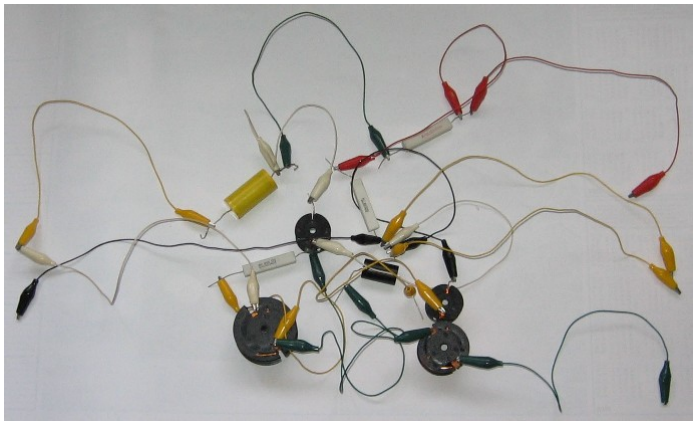
Die Entwicklung bzw. die messtechnische Verifikation von Frequenzweichen ist trotz wirkungsvoller Simulations- und Messprogramme immer noch eine zeitintensive Angelegenheit. Kleine Helferlein, die einem das Leben erleichtern, sind da natürlich stets willkommen. Derartige Hilfsmittel werden im Folgenden vorgestellt.

5.1 Entwicklungsbrett für Frequenzweichen

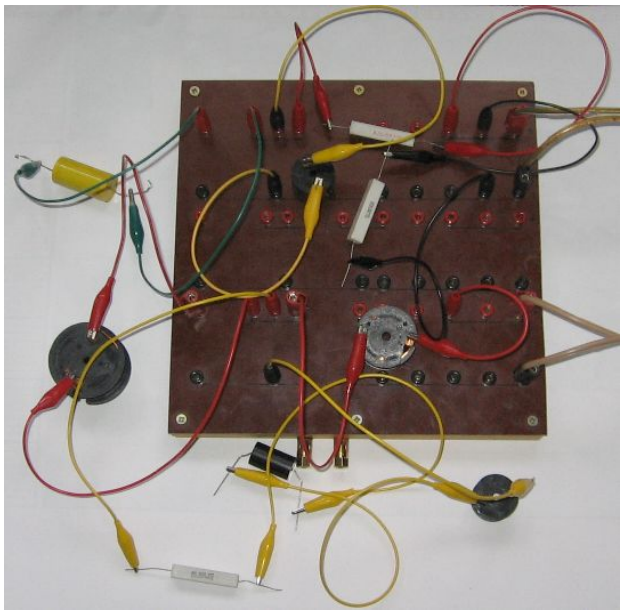
Michael Uibel

Der Aufbau von Testweichen erfolgt normalerweise mittels Krokodilklemmenverbindungsleitern. Das geht ganz gut und auch schnell. Die folgende Weiche könnte in der Krokodilklemmenversion z.B. so aussehen:





Die Weiche funktioniert, aber während der Entwicklung bleibt es nicht aus, dass man ständig Bauelemente austauschen und ggf. auch die Topologie ändern muss. Mit der Übersicht ist es dann schnell vorbei. Man baut alles auseinander und fängt von vorne an.

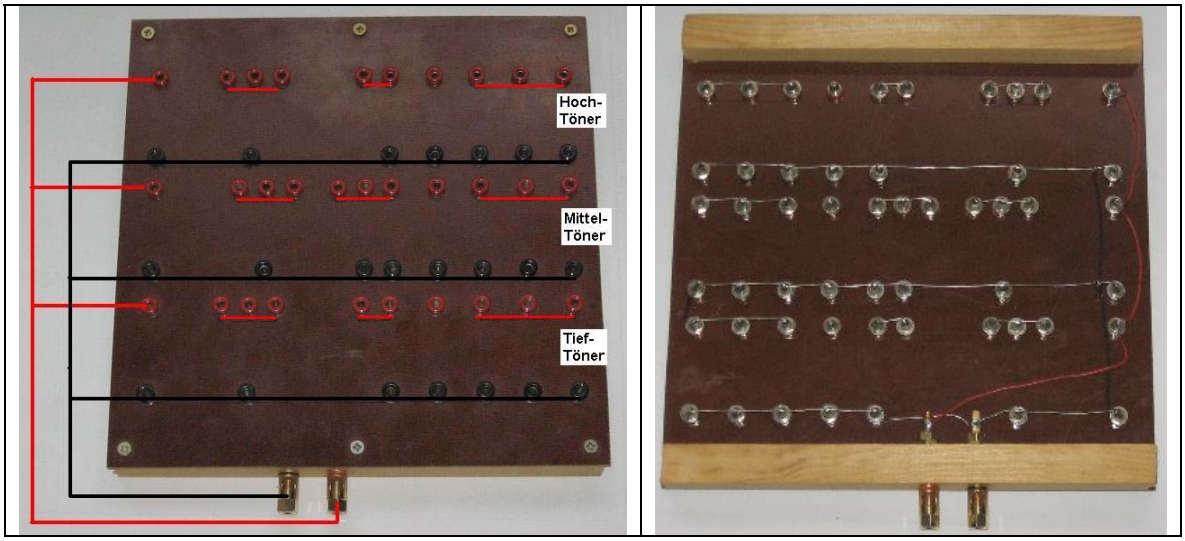


Baut man die Schaltung auf einem Frequenzweichenentwicklungsbrett (FWEB) auf, sieht das auf den ersten Blick genauso chaotisch aus. Sieht man genauer hin, dann erkennt man, dass man nur den Kabeln nachgehen muss und dadurch die Position des jeweiligen Bauelementes in der Schaltung leicht lokalisieren kann. Änderungen, selbst Umstellungen der Topologie, gehen schnell von der Hand, ohne jeweils die ganze Weiche neu bauen zu müssen.

Schauen wir uns das FWEB für Dreiwegeweichen näher an. Es besteht aus einer Pertinax- oder Epoxy-Platte, zwei Holzleisten, einigen 4 mm Einbaubuchsen und etwas Schaltdraht.

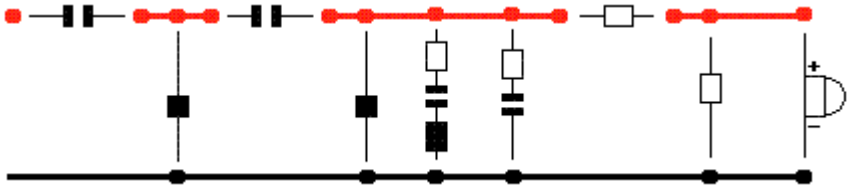
Unten erkennen wir den Verstärkeranschluss. Masse liegt an allen schwarzen Buchsen an. Der Plus-Eingang liegt an der jeweils ersten roten Buchsen links an. Die Ausgänge zu den einzelnen

Treibern findet man ganz rechts auf dem FWEB. Das gezeigte FWEB ist 27 mal 27 Zentimeter groß. Die Rückansicht zeigt die feste Verdrahtung.

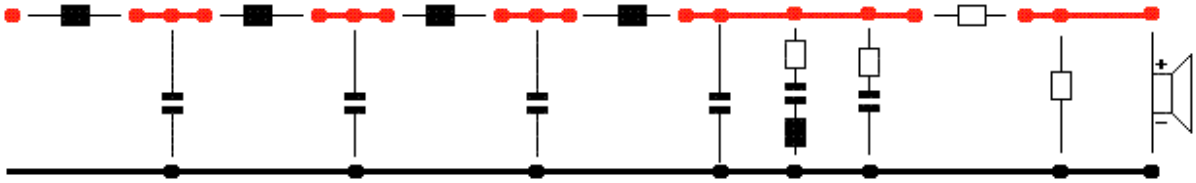


Die Anzahl der benötigten 4 mm Buchsen ist vom gewünschten Maximalausbau der Schaltung abhängig. Eine nahezu alles abdeckende Konfiguration wird im Folgenden gezeigt.

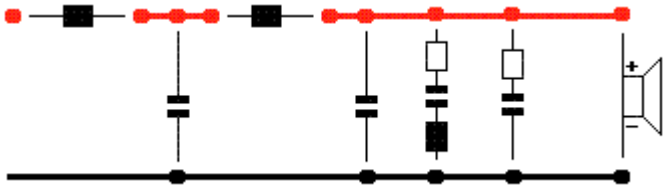
Hochtonzweig
12 * rot + 6 * schwarz



Mitteltonzweig
18 * rot + 8 * schwarz



Tieftonzweig
9 * rot + 5 * schwarz



Hat man mehrere in Reihe liegende Bauelemente (z.B. LCR-Glieder), dann werden nur das erste und letzte Bauelement an das FWEB angeschlossen. Das dazwischenliegende Bauelement verkabelt man mit Krokodilklemmenleitern.

Die Anschlussstrippen stellt man selbst her. Dazu schneidet man das Krokodilklemmenkabel in der Mitte durch und befestigt an den nun offenen Enden jeweils einen Büschelstecker. Die Krokoklemmen sollte man nachlöten, da die Crimpung oftmals nur für mäßigen Kontakt sorgt.

Teile und Bezugsquellen in Deutschland

Bezeichnung	**Bezugsquelle**	**Bestell-#**	**Preis €**
6 Holzschrauben	Baumarkt		
Holzleiste	Baumarkt		
Schaltdraht (z.B. NYM-Unterputzkabel)	Baumarkt		
Pertinax 3 mm (1/3 Platte, ca 0,3 m^2)	http://www.rediboom.de/		12,00
Bananenbuchse 4mm, vollisoliert, rot	http://www.reichelt.de/	BB 4 RT	0,26
Bananenbuchse 4mm, vollisoliert, schwarz	http://www.reichelt.de/	BB 4 SW	0,33
Büschelstecker 4mm, schraubbar, Querloch, rot	http://www.reichelt.de/	BS 40SA RT	0,43
Büschelstecker 4mm, schraubbar, Querloch, sw	http://www.reichelt.de/	BS 40SA SW	0,43
Verbindungsleitungen mit Krokodilklemmen beidseitig – 10 Stück	http://www.reichelt.de/	MK 612S	1,05

5.2 Weichenentwicklungsbrett, Modifikationen

Heinrich Weber

Neben der in Abschnitt 5.1 gezeigten Variante gibt es diverse andere Lösungsmöglichkeiten. Die folgende Lösung geht auf eine Idee/Veröffentlichung in der Klang&Ton zurück (http://www.klangundton.de).

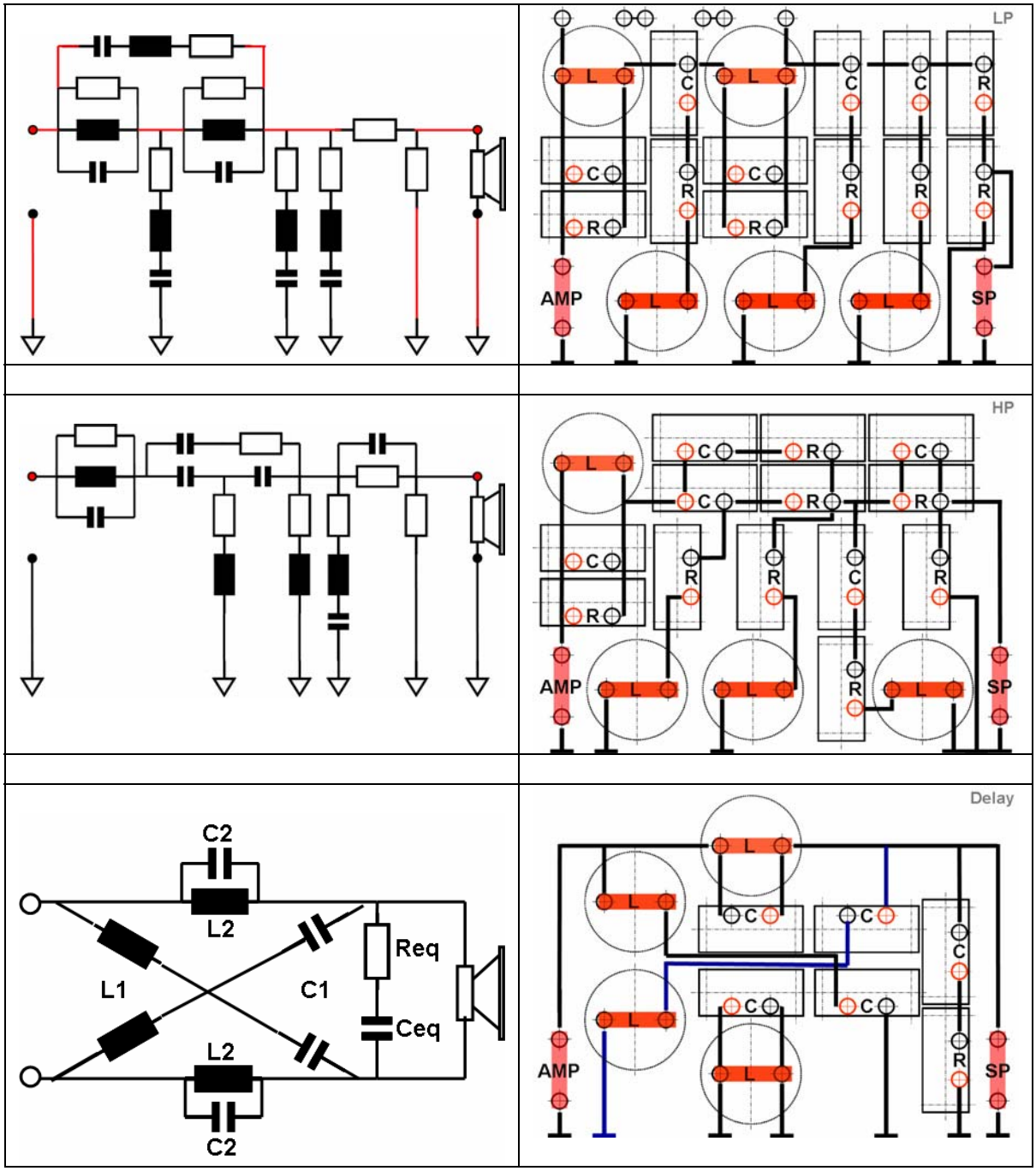


Bild 5.2.1: Weichenentwicklungsbrett

Dem weiteren Ausbau sind keine Grenzen gesetzt, die Grundidee kann - je nach Vorliebe für bestimmte Weichenschaltungen - entsprechend angepasst werden.

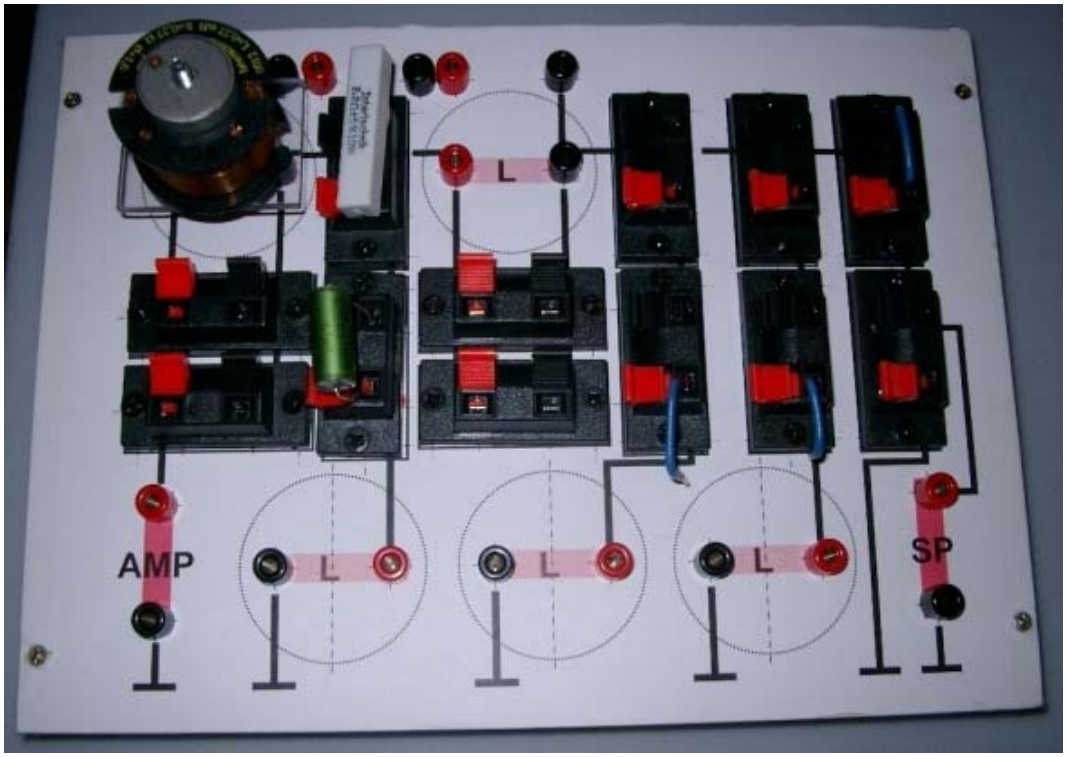


Bild 5.2.2: Weichenentwicklungsbrett, praktische Umsetzung

Die in Bild 5.2.2 gezeigte Lösung ist so konzipiert, dass variable Spulen (s. Bild 5.2.3) an vorgesehene Positionen gesteckt werden können.

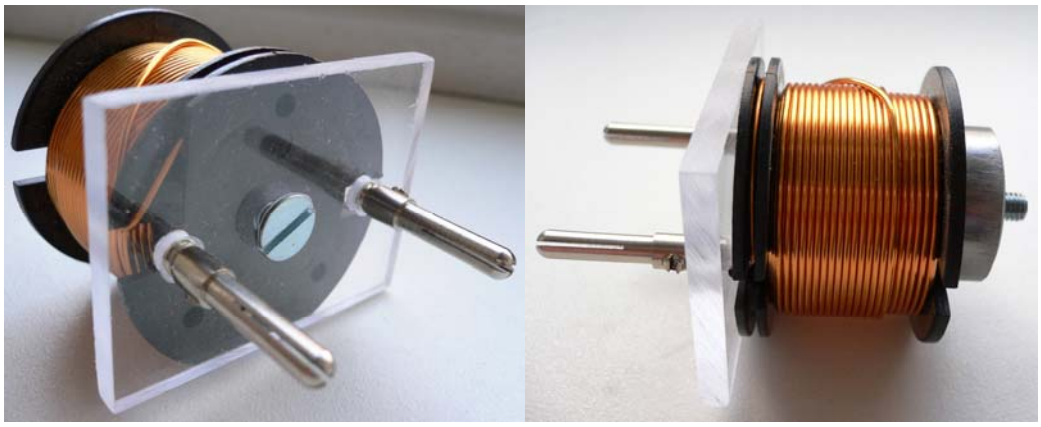


Bild 5.2.3: Steckbare variablen Spule

5.3 Variable Induktivitäten

Heinrich Weber

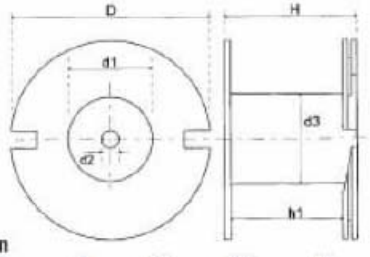
Variable Spulen ermöglichen das Einstellen fast beliebiger Induktivitätswerte, ohne dass Normreihen oder Ladenschlusszeiten berücksichtigt werden müssen. Die messtechnische Optimierung von Frequenzweichen wird deutlich beschleunigt, lästiges Umklemmen oder Löten wird durch Verstellen des Kerns ersetzt. Am Ende des Weichenentwicklungsprozesses sind lediglich die variablen Spulen mit LIMP auszumessen und durch entsprechende Festwerte zu ersetzen.

In den gängigen Katalogen für Lautsprecherzubehör wird man bezüglich der wesentlichen Bauteile für den Bau variabler Spulen fündig. In diesem Beispiel finden die Produkte von Intertechnik Anwendung. Was wird benötigt? Nun ja, natürlich eine Luftspule, ein passender Kern sowie Material für die Verstelleinrichtung.

Bezüglich des Kernmaterials wird man schnell fündig. Die Intertechnik-Spulen für Entzerrnetzwerke haben einen geeigneten Kern aus Weichferrit mit 25 mm Durchmesser und einer Länge von 36 mm. Eine Bohrung zur Befestigung einer Gewindestange für die Verstellvorrichtung ist auch schon vorhanden und erfreulicherweise sind diese Spulen auch recht preiswert.

Der Kern ist mit Heißkleber im Spulenkörper befestigt. Nach vorsichtiger Erhitzung mit einem Lötkolben (aufpassen, damit der Spulenkörper nicht schmilzt) sollte er jedoch recht einfach zu entnehmen sein.

Jetzt benötigen wir Luftspulen, in die unser 25mm Ferritkern hineinpasst. Aus dem Intertechnikprogramm sind Luftspulen mit 0,95 mm und 1,4 mm Draht sowie Air Therm Backlackspulen geeignet.



Abmessungen / mm

	D	d1	d2	d3	H	h1	Rm
LU 44/30	44.0	25.5	5.3	28.0	30.0	23.0	33.0
LU 55/30	55.0	25.5	5.3	28.0	30.0	23.0	38.0
LU 62/41	62.0	25.5	5.3	28.0	41.0	35.0	41.0

Bild 5.3.1: Abmessungen der Luftspule mit 0,95 mm Drahtdurchmesser

Wichtig ist, dass der Innendurchmesser d1 des Spulenkörpers 25,5 mm beträgt. Ferner sollte der Widerstand der verwendeten Luftspule für die vorgesehene Verwendung in Frequenzweichen geeignet sein (Ri < 0,5 bis 0,8 Ohm). Nun zum praktischen Teil. Zunächst führen wir einige Messungen mit LIMP durch, um die Wirksamkeit des eingebrachten Ferritkerns zu ermitteln.

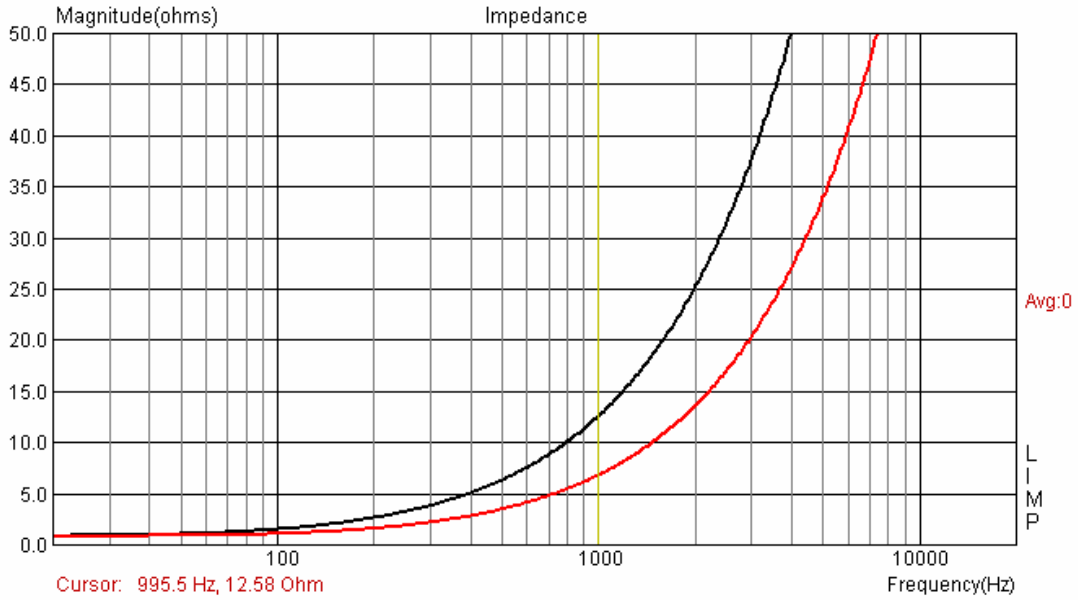


Bild 5.3.2: Maximaler Variationsbereich der Spule (rot = ohne Kern, schwarz = mit Kern)

Bild 5.3.2 zeigt, dass eine deutliche Erhöhung der Induktivität durch Einbringen des Ferritkernes auftritt. Bei der Messung des vorhandenen Spulenbestandes zeigte sich, dass – je nach verwendeter Luftspule – mit einer Verdoppelung bis Verdreifachung der Induktivität gerechnet werden kann. Da für die Messreihe keine Spulen über 1,2 mH zur Verfügung standen, ist die Extrapolation zu höheren Induktivitäten durch eigene Messungen zu stützen. In Bild 5.3.3 sind die Ergebnisse dieser Messungen zusammengefasst. So ist z.B. bei Verwendung einer 2,2 mH Luftspule mit 0,95 bzw. 1,0 mm Draht durch Einbringung eines Ferritkernes (D=25 mm; L=36 mm) eine Erhöhung der Induktivität auf ca. 6,0 mH zu erwarten. Wird die gleiche Spule mit 1,4 mm Draht verwendet, so ist mit einer Erhöhung auf ca. 5 mH zu rechnen.

L	R1,0	R1,4
0,10	**0,14**	0,08
0,12	0,16	0,09
0,15	0,17	0,10
0,18	0,22	0,11
0,22	0,23	0,13
0,27	**0,27**	0,15
0,33	0,30	0,16
0,39	0,33	0,18
0,47	0,36	0,19
0,56	0,42	0,22
0,68	**0,47**	0,24
0,82	0,52	0,26
1,00	0,60	0,28
1,20	0,65	0,30
1,50	**0,73**	0,34
1,80	0,79	0,38

Mit diesen Informationen können wir nun aus dem angebotenen Spulenprogramm diejenigen Werte ermitteln, die wir benötigen, um den gewünschten Induktivitätsbereich abzudecken.

Die links stehende Tabelle zeigt einen Ausschnitt aus dem Intertechnik-Lieferprogramm für Luftspulen mit 1,0 bzw. 1,4 mm Drahtdurchmesser. Die farbigen Pfeile zeigen den jeweiligen Wirkbereich eines eingebrachten Ferritkernes an.

Daraus ist zu sehen, dass z.B. eine 0,1 mH Luftspule aus 1,0 mm Draht einen Bereich bis ca. 0,27 mH abdecken kann. Damit sollte die nächste Stufe bei 0,27 mH beginnen und würde wiederum einen Bereich bis ca. 0,68 mH abdecken. Weitere Informationen können - je nach Erfordernis - aus dem Lieferprogramm des jeweiligen Spulenherstellers ermittelt werden.

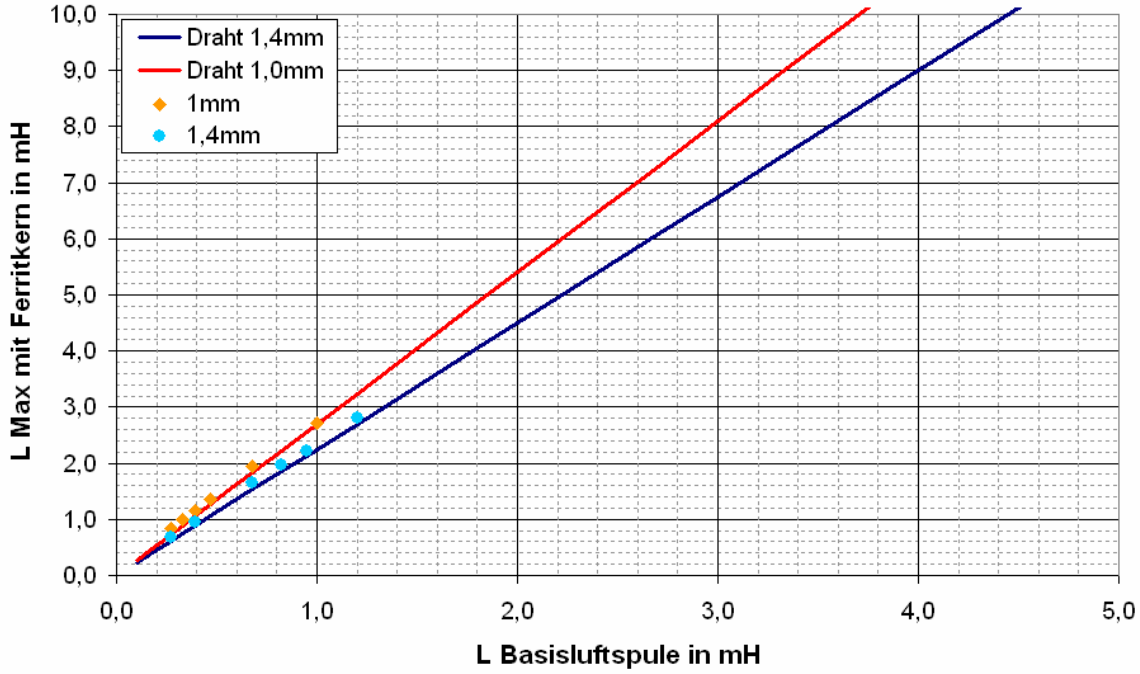


Bild 5.3.3: Maximale Induktivitätserhöhung durch Einbringung eines 36mm langen Ferritkerns

Mit diesen Informationen ist die Konstruktion einer variablen Induktivität denkbar einfach. Für den Nachbau werden nur gut verfügbare Materialien benötigt. Bitte verwenden Sie für die Befestigung der Spule bzw. des Ferritkerns nur Messingschrauben. Weitere Details sind den folgenden Fotos zu entnehmen.

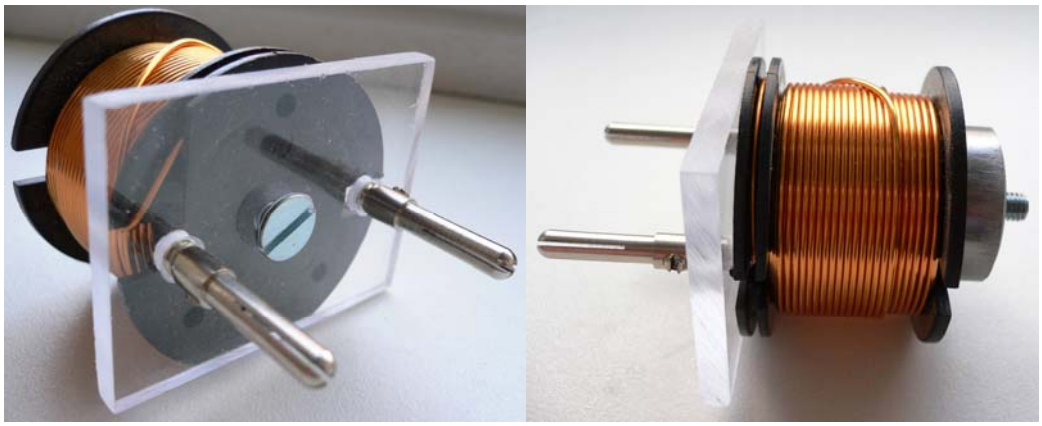


Bild 5.3.4: Steckbare variablen Spule (Variante 1)

Bild 5.3.4 zeigt eine steckbare Variante (siehe auch Kapitel 5.2). Bild 5.3.5 zeigt den Aufbau einer „normalen“ Lösung mit zylindrischem Kern.

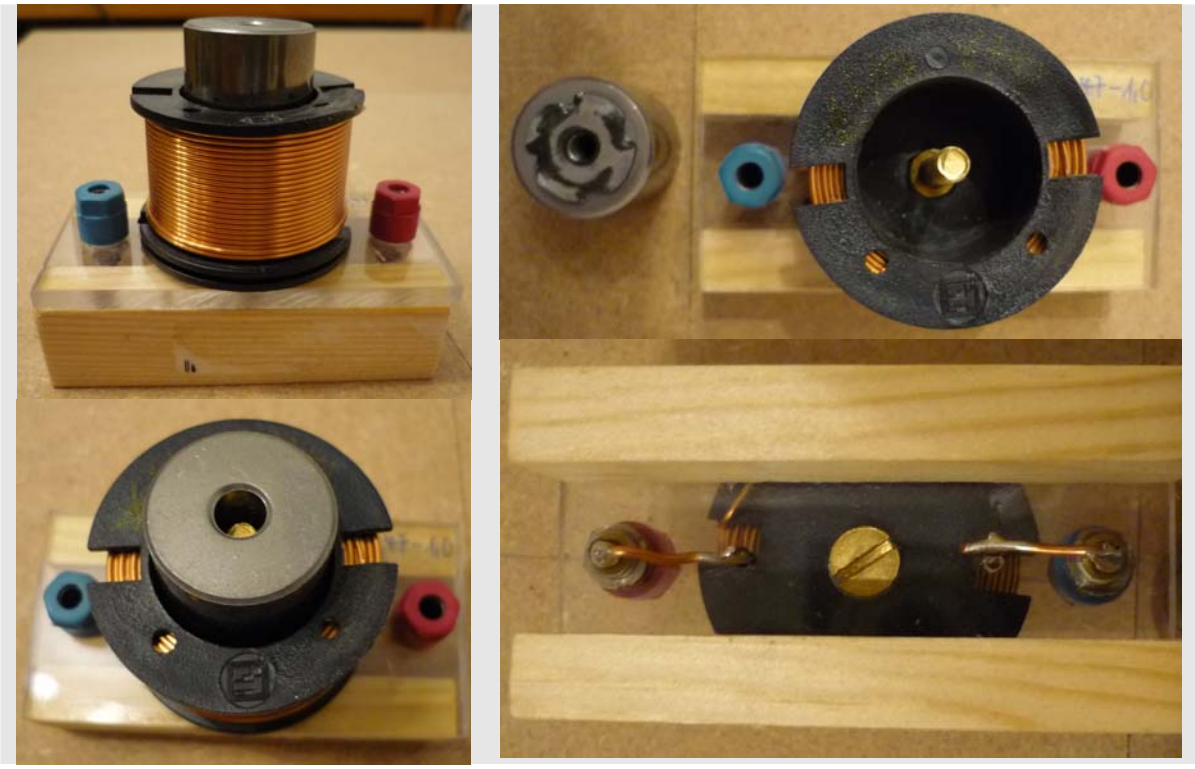


Bild 5.3.5: Variable Spule mit zylindrischem Kern (Variante 2)

Neben zylindrischen Ferritkernen sind auch Glocken- oder Pilzkerne sehr gut für variable Spulen geeignet. Beim hier gezeigten Glockenkern erhöht sich die Induktivität in etwa um den Faktor 8, bei Pilzkernen ist vom Faktor 3-4 auszugehen.

Allerdings ist die oben beschriebene Methode der Herauslösung des Kerns von der Spule hier mit hohen Verlusten verbunden. Aus diesem Grunde ist zu überlegen, ob eine spezialisierte Bezugsquelle für Ferritkerne angezapft werden sollte (z.B. www.Tridelta.de). Von Tridelta sollten der Glockenkerntyp C52 sowie beide verfügbaren Pilzkerne geeignet sein (Achtung, die Pilzkerne haben nur 20 mm Kerndurchmesser, d.h. es sollte eine andere, passende Luftspule gewählt werden (z.B. LU78/30 von Intertechnik).

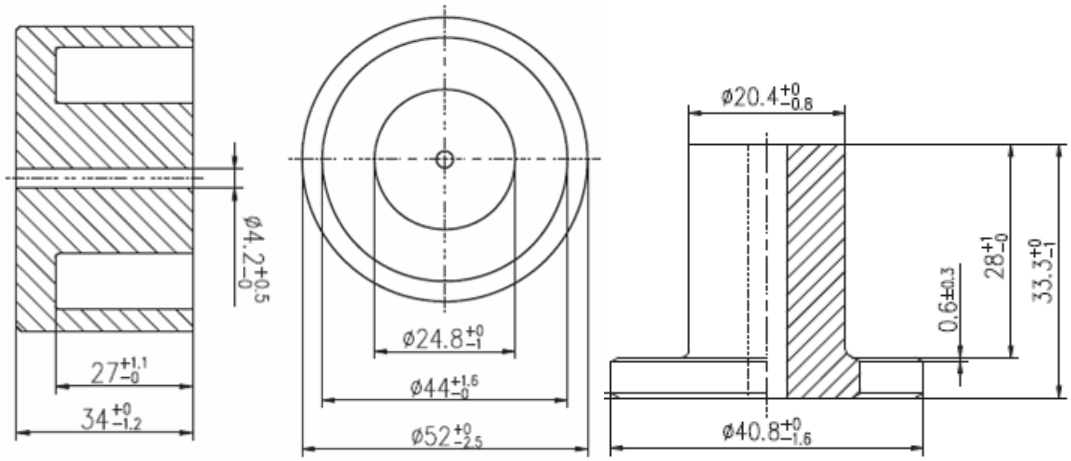


Bild 5.3.6: Geeignete Tridelta Ferritkerne, Abmessungen

Bild 5.3.7: Variable Spule mit Glockenkern

Weitere Hinweise zum Bau variabler Spulen findet man auf der Homepage von Michael Uibel (http://www.audiocad.de/u/index.htm).

6 Hilfsmittel für akustische Messungen

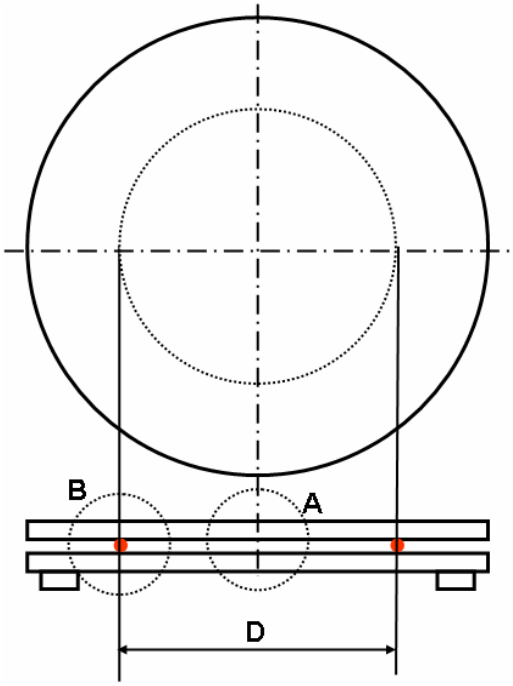
6.1 Eine Drehscheibe für die Messung des Abstrahlverhaltens von Lautsprechern

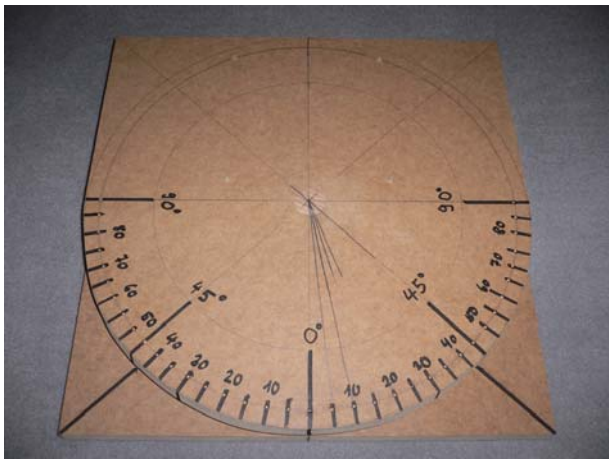
Heinrich Weber

Für den Nachbau der Drehscheibe werden zwei Platten 19mm MDF, Stahlkugeln oder Schubladenrollen, ein Stück 25mm Rundholz aus Buche sowie eine Senkkopfschraube mit einer Blechscheibe benötigt.

Wenn die „Kugellagervariante“ gewählt wird, ist eine Oberfräse erforderlich, ansonsten sind Stichsäge und Bohrmaschine hinreichend.

Für die „Kugellagervariante“ wird zunächst jeweils eine Rille in beide MDF-Platten gefräst. Die erforderliche Tiefe hängt vom Durchmesser der verwendeten Stahlkugel ab. Sie sollte so gewählt werden, dass die Kugel etwa 0,6·Radius versenkt wird.



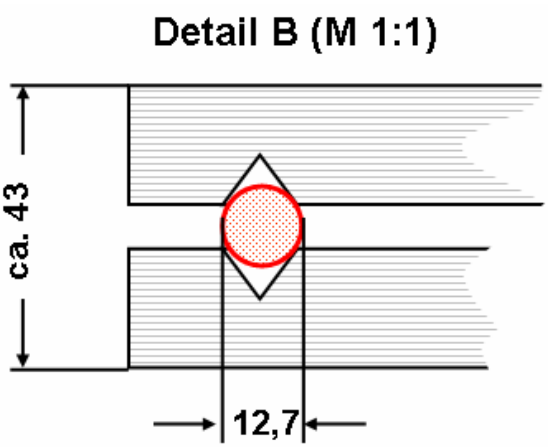


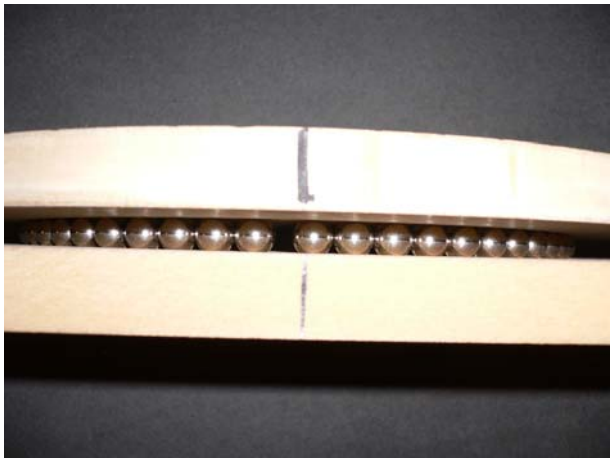
Anzahl Kugeln	D [mm]
40	161,7
50	202,1
60	242,6
70	283,0
80	323,4
90	363,8
100	404,3

Der Durchmesser der Rille sollte in etwa 2/3 des gewählten Scheibendurchmessers betragen. Wird er zu klein gewählt, so ist bei schweren Lasten die Standfestigkeit der Drehscheibe gefährdet.

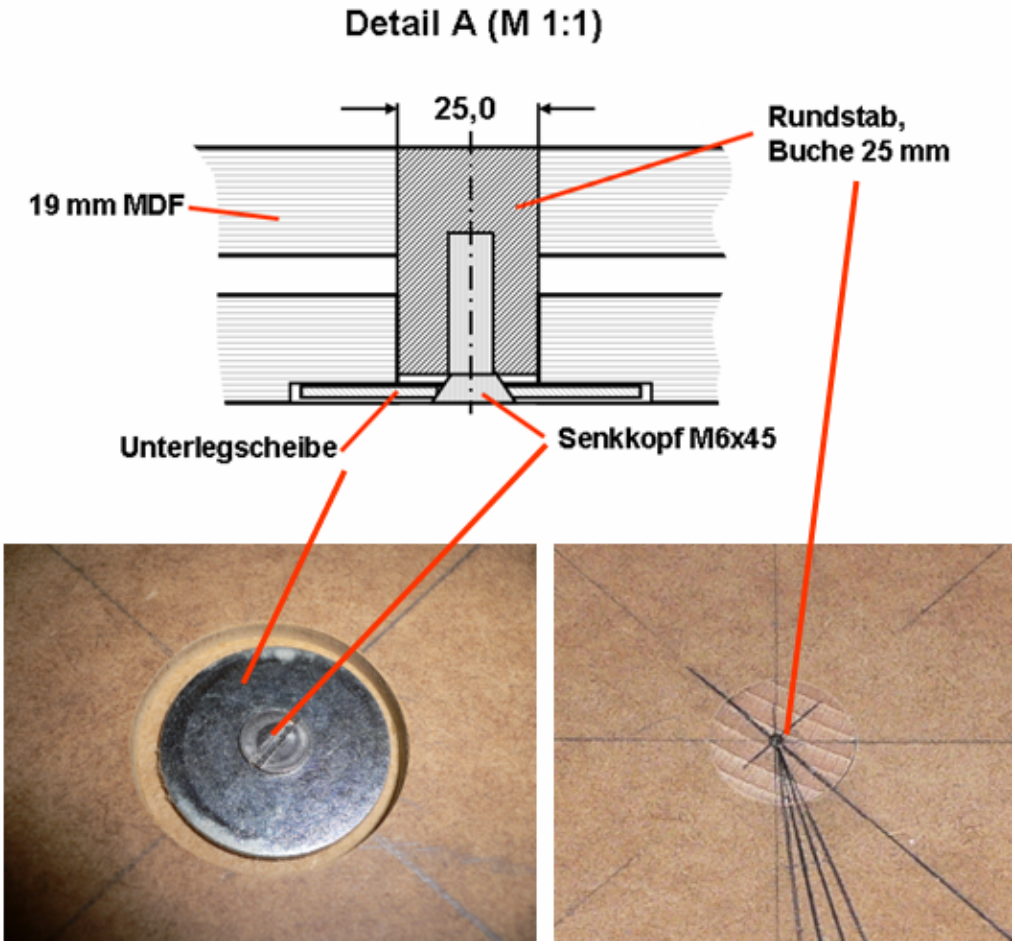
Ferner ist darauf zu achten, dass der Rillendurchmesser so gewählt wird, dass die Kugeln die Rille möglichst ohne Lücke ausfüllen. Oben gezeigte Tabelle gibt für den hier im Beispiel verwendeten

Kugeldurchmesser von 12,7 mm und einer gewählten Anzahl von Kugeln den jeweiligen Rillendurchmesser D an.



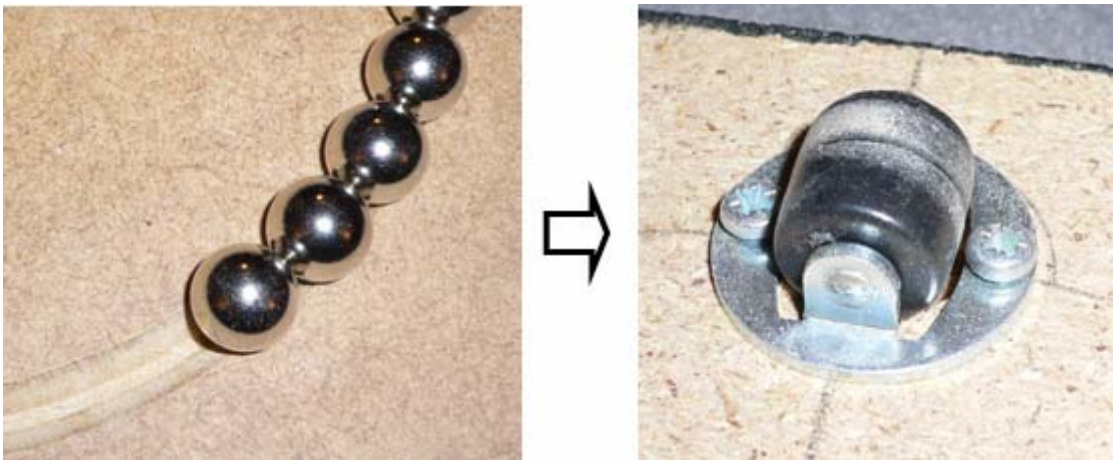


Ganz besonders wichtig ist eine stabile Zentrierung. Dafür wird ein Stück Rundholz aus 25 mm Buche in die obere MDF-Platte eingeleimt. In die untere Platte wird ein 25 mm Loch als Führung gebohrt. Die in der unten stehenden Skizze gezeigte Versenkung der Unterlegscheibe ist nicht unbedingt erforderlich, wenn Sie z.B. durch Gummifüße für genügend Abstand zum Boden sorgen.

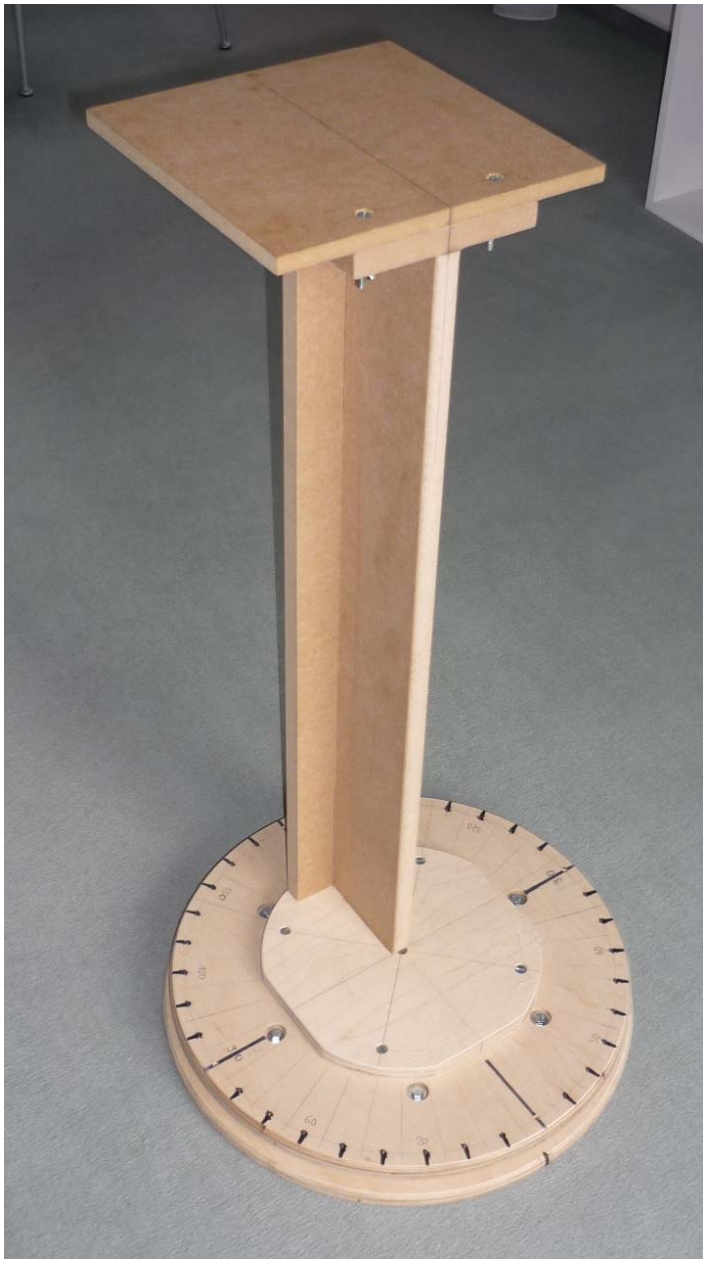


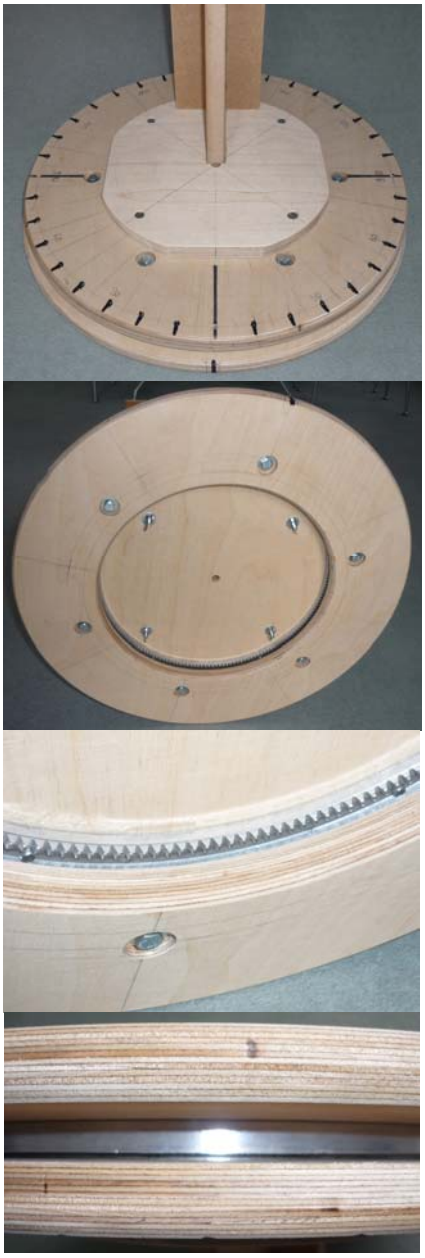
Abschließend ist lediglich noch die Winkelskala aufzubringen (s. Foto). Praxisgerecht ist eine 5° Stufung mit Kennzeichnung einiger wichtiger Winkel, z.B. 0°, 15°, 30°, 45°.

Wie bereits oben erwähnt, können Sie anstatt Stahlkugeln auch einfache Kleinrollen für Schubladen aus dem Baumarkt nehmen (s. Foto). Um genügend Stabilität zu bekommen, setzen Sie mindestens 6-8 Rollen auf den Umfang ein. Damit die Rollen frei laufen können, muss ein Loch gebohrt werden, das gerade so groß ist, dass die Befestigungsschrauben noch Material finden und die Rollen frei laufen. Achten Sie bei der Montage darauf, dass die Rollen exakt in Laufrichtung ausgerichtet werden.



Eine weitere einfache Möglichkeit ergibt sich durch Verwendung eines Drehlagers/Drehkranzes, wie im folgenden Bild gezeigt. Das Lager enthält eine einfache Verzahnung und ist mit einem passenden Ritzel auch für den Ausbau auf Motorantrieb geeignet (Quelle: ebay).





6.2 Eine motorgetriebene Drehscheibe mit Fernbedienung

Ralf Grafe, Heinrich Weber

Die in Abschnitt 6.1 beschriebenen Vorrichtungen erfüllen ihren Zweck, erfordern jedoch während der Messung etwas sportliche Betätigung. Hier werden nun zwei Varianten für Bewegungsfaule in Form von einigen Fotos vorgestellt. Wer Näheres wissen möchte, melde sich bitte per PN über das Visaton-Forum http://www.visaton.de/vb/)

Variante 1

Variante Nr.1: Der Antrieb erfolgt über einen kleinen Schrittmotor und Zahnriemen. Die Fernbedienung ist im Bild rechts oben zu sehen. Die derzeitige Variante ist auf 5°-Schritte programmiert, andere Werte sind natürlich möglich. Die Konstruktion ist so stabil, dass auf der Grundplatte weitere Vorrichtungen/Halterungen befestigt werden können (Bild links oben). Der Prototyp ist im reflexionsarmen Raum von Visaton zu bewundern.

Variante 2

Variante Nr.2: Die Idee zu dieser Variante stammt von Michael Lenz aka AC-SB (http://www.hifi-forum.de/viewthread-137-65.html), die Umsetzung der Idee wurde jedoch ein wenig modifiziert. Der Antrieb erfolgt über einen Antennenrotor (ebay, Web-Bazar, ca. 30,00 €). Die Steuerungseinheit ist im Bild oben rechts zu sehen. Man sollte keine Wunder von der Positioniergenauigkeit erwarten, jedoch ist die Konstruktion für den Hausgebrauch allemal geeignet.

6.3 Bau eines Dodekaeders für raumakustische Messungen

Matthias Leger

Wofür wird ein Dodekaeder benötigt?

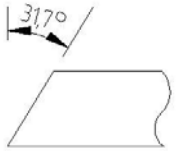
Die Norm ISO 3382 für die „Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter“ fordert zur Anregung des Raums eine, so wörtlich, „Schallquelle mit möglichst kugelförmiger Richtcharakteristik (Kugelstrahler)“. Mit seinen 12 Flächen kommt das Dodekaeder der Erfüllung dieser Forderung schon recht nahe, da jede der 12 Flächen eine eigene Abstrahlachse darstellt. Bei herkömmlichen HiFi- oder PA-Lautsprechern wird die Forderung nach einer Kugelcharakteristik nur bei tiefen Frequenzen erfüllt; die zunehmende Bündelung bei hohen Frequenzen verhindert eine gleichmäßige Abstrahlung in alle Richtungen und somit eine gleichmäßige „Ausleuchtung“ des Raums.

Ein wenig Mathematik rund um den Dodekaeder

Ein Dodekaeder ist ein Körper mit zwölf Flächen. Im vorliegenden Fall handelt es sich bei den Flächen um regelmäßige Fünfecke, weshalb die vollständige Bezeichnung des Körpers auch „regelmäßiges Pentagondodekaeder“ lautet.

Für den Bau eines Dodekaeders sind zwei Winkel von Interesse, nämlich der Innenwinkel α des regelmäßigen Fünfecks, sowie der Winkel β, den die Flächen zueinander haben.

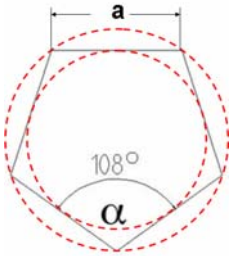
Der Innenwinkel α beträgt 108°, der Winkel β beträgt 31,7°



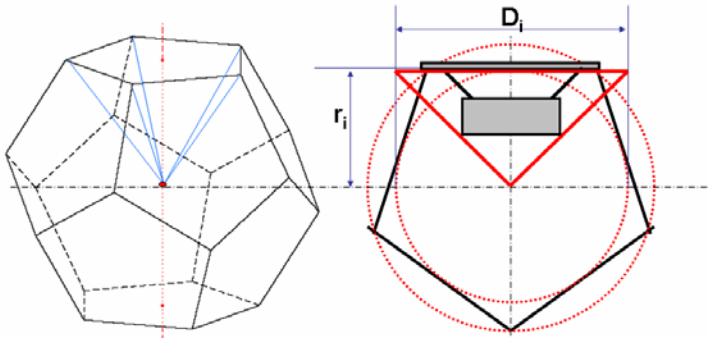
Andere wesentliche Größen eines Dodekaeders berechnen sich wie folgt (mit a = Seitenlänge):

Volumen	**V = 0,25 (15 + 7 5) a³ ≈ 7,66 a³**
Umkugelradius	$r_u = \frac{\sqrt{3}}{4}\left(1+\sqrt{5}\right) a \approx 1{,}40\,a$
Innenkugelradius	$r_i = \frac{\sqrt{5}}{20}\sqrt{50+22\sqrt{5}}\,a \approx 1{,}11\,a$

,



Mit den obigen Formeln sowie nachfolgender Skizze kann ermittelt werden, ob das ausgewählte Lautsprecherchassis auch in das Gehäuse passt.



Welche Lautsprecherchassis sind zum Bau eines Dodekaeders geeignet?

Bei der Auswahl geeigneter Chassis muss man sich zuerst ein paar Gedanken über den späteren Einsatzzweck machen. Um zum Beispiel einen gewöhnlichen Wohn-/Hörraum lautstark mit einem Rauschsignal anzuregen, bedarf es keiner teuren Hochleistungslautsprecher. In professionellen Exemplaren kommen in der Regel Breitbandlautsprecher mit Außendurchmessern von etwa 13-17 cm zum Einsatz, was dann auch für größere Räumlichkeiten ausreichend ist.

Das hier vorgestellte Dodekaeder ist mit recht wirkungsgradstarken 10 cm Breitbandlautsprechern bestückt. In normalgroßen Räumen lassen sich damit ohrenbetäubende Lautstärken realisieren. Selbst ein mit der nächstkleineren Chassisgröße (ca. 7-8 cm Außendurchmesser) bestücktes Dodekaeder wird für die Vermessung des eigenen Hörraums einen ausreichend hohen Schalldruck liefern. Folgende Punkte sollte man bei der Chassiswahl berücksichtigen:

- ein kontinuierlich leicht ansteigender Frequenzgang auf Achse ist anzustreben, um der Bündelung bei hohen Frequenzen entgegenzuwirken. Von einem Dodekaeder wird vor allem ein gleichmäßig verlaufender Energiefrequenzgang gefordert, nicht ein glatter Frequenzgang auf Achse (dies ist nebenbei bemerkt auch gar nicht möglich, wie wir später an den Messungen noch sehen werden)
- eine obere Grenzfrequenz von etwa 10 kHz ist ausreichend. ARTA berechnet die Raumakustikparameter bis zu einer Frequenz von 8 kHz, was zur Beurteilung der Raumakustik hinreichend ist. Aufgrund dieser Tatsache sind nicht nur Breitbandlautsprecher zum Bau geeignet, sondern grundsätzlich auch entsprechend breitbandig agierende Mittel- beziehungsweise Tiefmitteltöner
- über die Thiele-Small-Parameter des Lautsprechers sollte man sich keine allzu großen Gedanken machen, denn eine sinnvolle Abstimmung ist in dem winzig kleinen Volumen sowieso kaum möglich, d.h. eine hohe Einbaugüte und damit verbunden ein ausgeprägter Überschwinger bei der Einbauresonanzfrequenz ist praktisch unvermeidbar. Nichtsdestotrotz sind Lautsprecher mit einem kräftigen Antrieb und leichter Membran im Hinblick auf einen guten Wirkungsgrad zu bevorzugen.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass auch Dodekaeder in Mehrwege-Technik erhältlich sind. Dadurch, dass hier in jedem Frequenzbereich spezialisierte Lautsprecher zum Einsatz kommen, ist eine Abstrahlung erreichbar, die dem kugelförmigen Ideal sehr nahe kommt. Man denke hier nur an den Vergleich eines im Hochtonbereich stark bündelnden Breitbandlautsprechers mit der deutlich breiteren Abstrahlung einer 19 oder 25mm Hochtonkalotte.

Aufbau des Gehäuses

Während man sich bei der Planung von normalen Boxen mindestens über drei Abmessungen Gedanken machen muss (Länge, Breite und Höhe), reicht beim Dodekaeder das Festlegen einer Seitenlänge aus - der Rest ist dann nur noch ein wenig Mathematik. Soviel zu den Vorteilen. In der Praxis ist dagegen größtmögliche Präzision beim Zuschnitt der 12 Plättchen erforderlich, sonst wird man beim späteren Zusammenfügen und Verleimen keine Freude haben.
Bei aller Präzision und Hingabe sollte man allerdings die Sicherheit nicht außer acht lassen, denn es wird sich nicht vermeiden lassen, dass man dem Sägeblatt teilweise sehr nahe kommt – hier ist also Vorsicht geboten!

Wie weiter oben bereits erwähnt, ist das hier vorgestellte Dodekaeder mit 10 cm großen Breitbandlautsprechern klassischer Bauart bestückt (leichte Papiermembran, Schaumstoffsicke, Schwirrkonus).

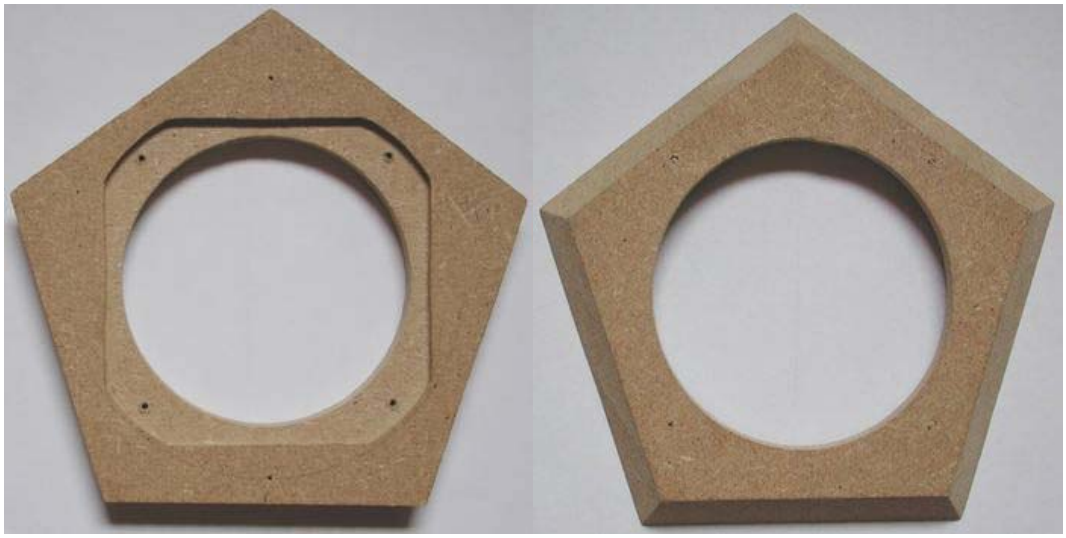
Die Seitenlänge der Fünfecke habe ich auf 10,6 cm festgelegt. Die sich ergebende Fläche ist dann so groß, dass man die Lautsprecher ohne Bedrängnis auf den Brettchen unterbringen kann. Andererseits wird auch nicht viel Platz verschenkt, was die Größe und das Gewicht des Dodekaeders nur unnötig in die Höhe treiben würde. Hier nach dem Motto „so groß wie nötig, so

klein wie möglich“ zu verfahren ist sicher nicht ganz falsch, denn wie weiter oben bereits erwähnt, ist eine Gehäuseabstimmung im klassischen Sinne nicht möglich.

Im ersten Schritt zeichnet man die Umrisse der Fünfecke exakt auf den 12 MDF Platten an (mit Geodreieck oder Schablone). Ich habe mir hierfür ausreichend große Platten aus 16mm starkem MDF zuschneiden lassen (quadratisch), damit die nachfolgenden Arbeitsschritte alle möglichst gleich sind und man einen sauberen Anschlag für die Tischkreissäge hat.

Bei der Einstellung der Säge empfiehlt es sich, den Winkel von 31,7° zwei bis drei zehntel Grad größer zu wählen, so dass die Plättchen beim Verleimen an ihren „langen“ Seiten zusammenstoßen und hässliche Schlitze somit vermieden werden. Nachdem man beide Winkel anhand einiger Probeschnitte exakt eingestellt und überprüft hat, kann es mit der Kleinserienfertigung losgehen.

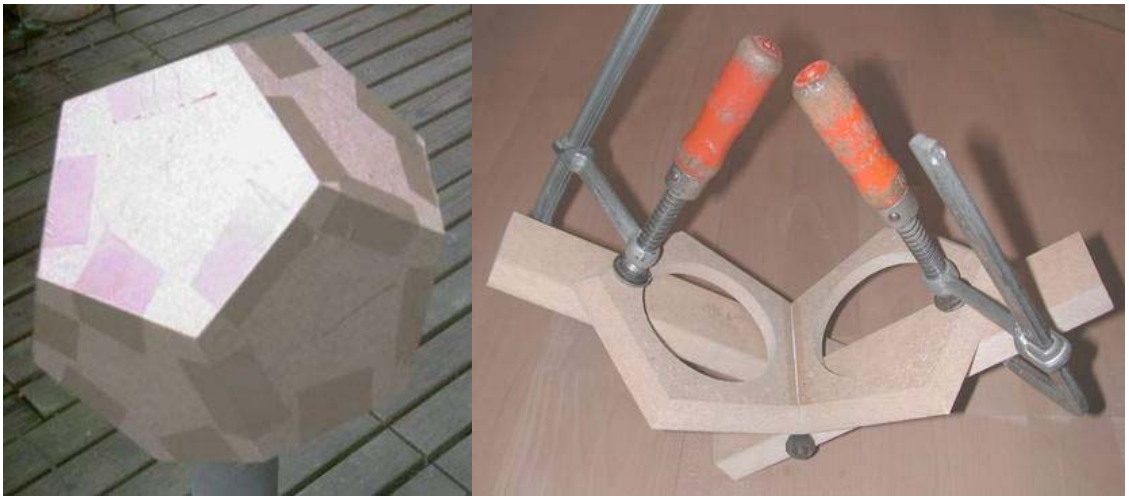
Auf die Seitenlänge ist dabei penibelst zu achten, notfalls lieber das ein oder andere Brettchen mehr zuschneiden. Die fertig zugeschnittenen Elemente sollten dann so aussehen, hier Vorder- und Rückseite:



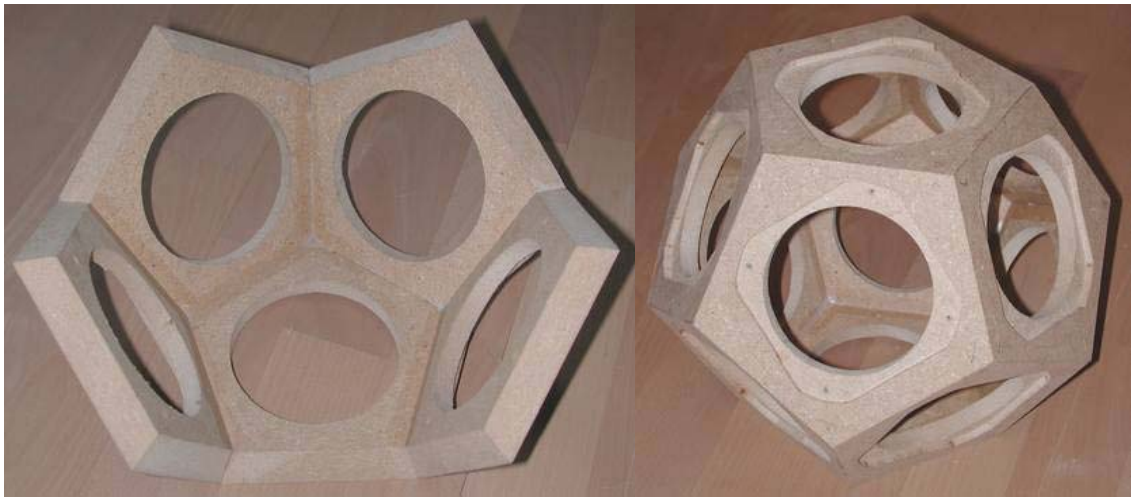
Wie man sieht, wurden hier auch schon die Ausschnitte und Einfräsungen für die Chassis vorgenommen. Auf das bündige Versenken der Lautsprecher wollte ich aus optischen Gründen nicht verzichten, weil die Druckgusskörbe sonst 4 mm übergestanden hätten. Auf diesen arbeitsintensiven Schritt kann man bei Verwendung von Stahlblechkörben aber in aller Regel verzichten. Das Sägen beziehungsweise Fräsen der Ausschnitte kann grundsätzlich auch erst am fertig verleimten Dodekaeder vorgenommen werden, jedoch wäre ein „Ausrutscher“ dann natürlich besonders ärgerlich.

Das Zusammenleimen der Elemente kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Links im Bild die sogenannte Klebebandmethode, bei der die Brettchen von Klebeband zusammengehalten werden. Nach einem ersten „trockenen“ Zusammensetzen (ohne Leim) werden die Teile schließlich nach und nach wieder herausgenommen, mit Leim bestrichen und wieder eingesetzt. Mit dieser Technik sollte ein zügiges Arbeiten möglich sein.

Rechts im Bild die andere Methode, bei der eine einfache Hilfskonstruktion zum exakten Einstellen des Winkels (116,6°) zum Einsatz kommt. Dies ist gerade beim Verleimen der ersten Elemente sehr hilfreich.

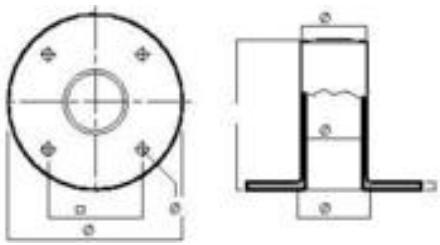


Nachfolgend zwei weitere Bilder aus der Bauphase; links ein $^{5}/_{12}$tel Dodekaeder, rechts der fertige Rohbau:



Im nächsten Schritt werden eventuell vorhandene Überstände plangeschliffen und die Kanten leicht verrundet. Es folgt der erste Schliff mit einem Schleifpapier mittlerer Körnung (etwa 120). Um den Dodekaeder später auf einem Stativ o.ä. befestigen zu können, wird in eine „Ecke“ ein Loch zum Durchstecken eines 10 mm dicken Alurohrs gebohrt, welches gleichzeitig als Durchführung für das Anschlusskabel dient.

Als alternative Befestigungsmöglichkeit bieten sich sogenannte Hochständerhülsen an (siehe Abbildungen), wie man sie im PA-Bereich häufig verwendet. Insbesondere bei schweren Gehäusen sind solche Hülsen in Kombination mit einem stabilen Stativ der gezeigten Lösung eindeutig vorzuziehen.



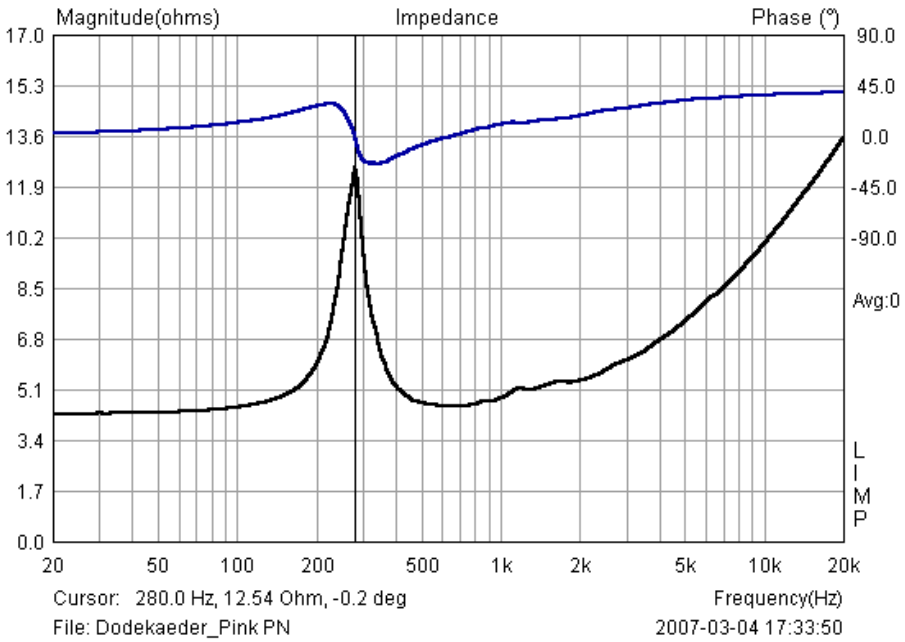
Links im Bild das fertig lackierte, jedoch noch unbestückte Dodekaeder. Im rechten Bild ein Blick auf die etwas chaotisch wirkende Verkabelung. Hier fehlt nur noch die Bedämpfung mit Baumwolle, davon abgesehen ist das Dodekaeder aber fertig und kann bald laute Geräusche von sich geben.

Es ist vollbracht: Das Bedämpfungsmaterial wurde eingebracht und alle Lautsprecher angeschlossen. Die korrekte Polung testet man am besten mit einer kräftigen Batterie, denn bei 12 Chassis auf so engem Raum verliert man leicht mal den Überblick!

Noch ein paar Worte zur Verschaltung der Chassis. Um eine verstärkerfreundliche Impedanz zu erhalten (etwa 4 bis 8 Ohm), habe ich eine Kombination aus Reihen- und Parallelschaltung gewählt. Hierfür wurden jeweils drei der nominell achtohmigen Chassis in Serie geschaltet (3x 8 Ohm = 24 Ohm). Diese vier Pakete zu je 24 Ohm wurden anschließend parallel verschaltet, so dass die resultierende Gesamtimpedanz 6 Ohm beträgt (24 Ohm / 4 = 6 Ohm).

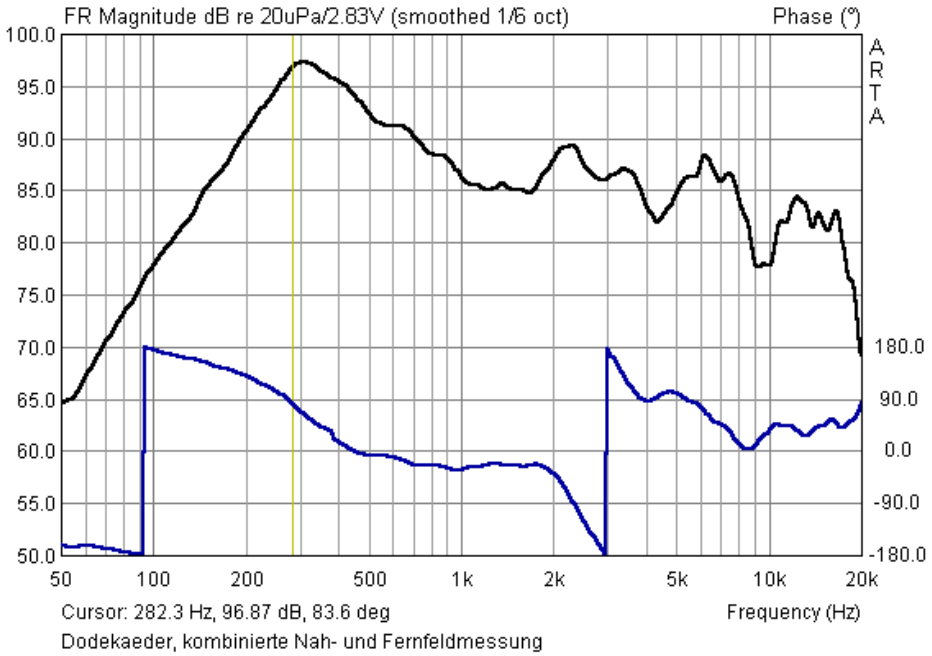
Messungen am fertigen Dodekaeder

Im letzten Kapitel werde ich einige interessante Messungen präsentieren. Sie sollen das in mancherlei Hinsicht ungewohnte Verhalten eines Dodekaeders näher beschreiben. Zuerst wurde mittels LIMP eine Impedanzmessung durchgeführt, um die Gehäuseabstimmung zu überprüfen.



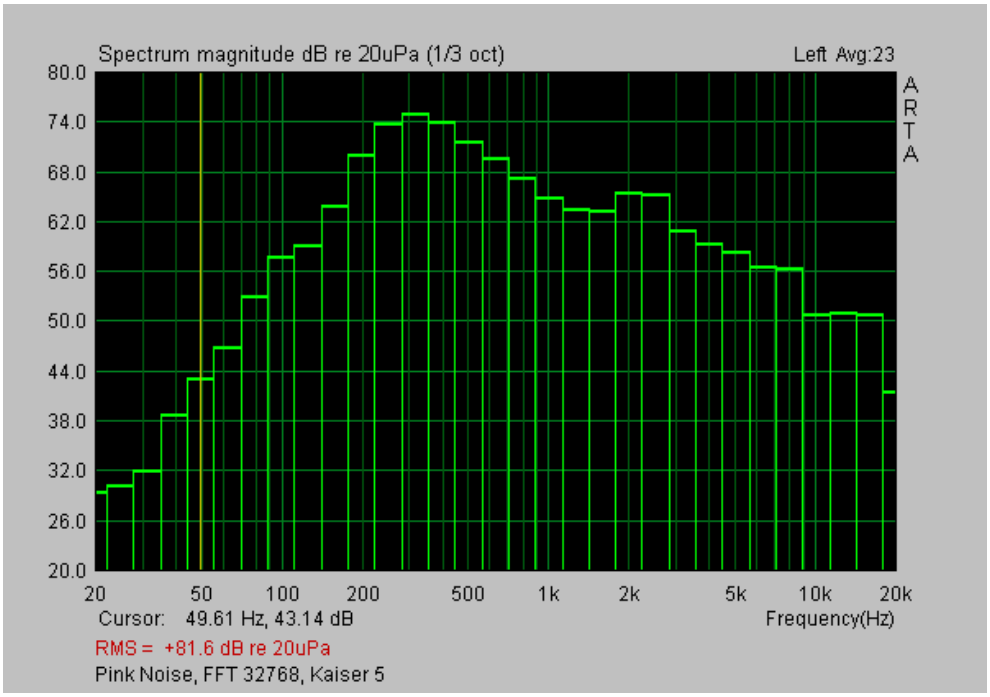
Der Impedanzverlauf gibt in erster Linie Aufschluss über die Resonanzfrequenz im eingebauten Zustand (fc), aber es lassen sich auch noch andere wichtige Eigenschaften aus ihm herauslesen. So sind beispielsweise leichte Membranresonanzen im Frequenzbereich zwischen 1 kHz und 2 kHz zu erkennen, die für die geplante Anwendung jedoch unkritisch sind. Weiterhin deutet der glatte Verlauf unterhalb der Resonanzfrequenz auf einen luftdichten Einbau aller Chassis hin.

Nachfolgende Messung zeigt den Frequenzgang des Dodekaeders. Es handelt sich hierbei um eine kombinierte Nah- und Fernfeldmessung, welche knapp unterhalb von 400 Hz zusammengefügt wurde (erkennbar am leichten Versatz im Phasengang). Durch die unterschiedlichen Laufzeiten des Schalls von den Lautsprechern zum Messmikrofon kommt es zu frequenz- und positionsabhängigen Einbrüchen im Frequenzgang (Interferenzen). Die noch folgenden Messungen werden jedoch zeigen, dass sich das Verhalten eines Dodekaeders mit einer einzelnen Messung „auf Achse“ nur sehr unzureichend beschreiben lässt.

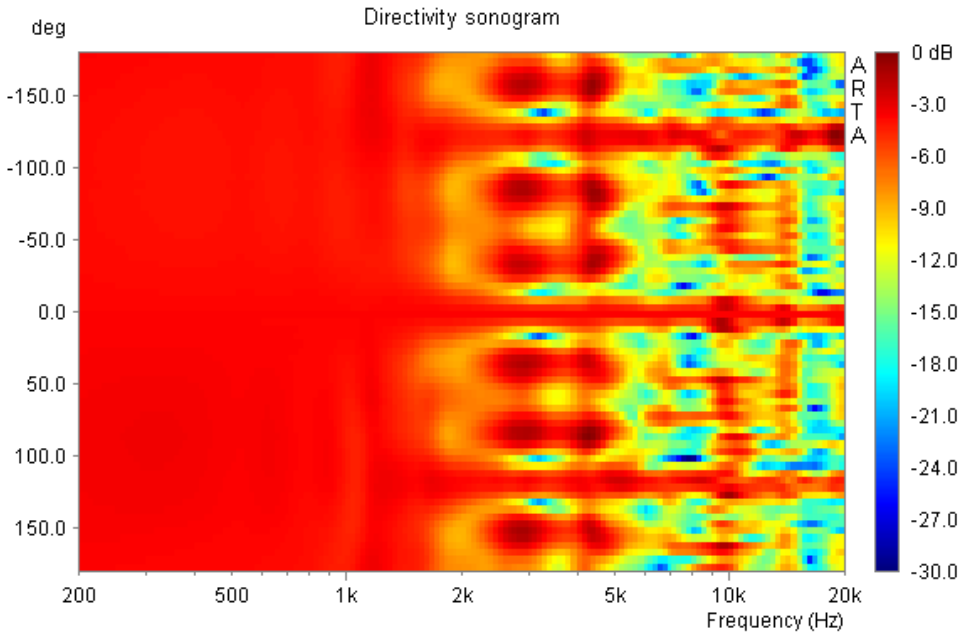


Unterhalb der Resonanzfrequenz (fc = 280 Hz) fällt der Schalldruckpegel wie mit einem Lineal gezogen mit etwas mehr als 12 dB/8ve ab. Die hohe Einbaugüte (Qtc = 1,4) hat einen Überschwinger von etwa 4 dB im Bereich der Resonanzfrequenz zur Folge, was bei der geplanten Anwendung jedoch unproblematisch ist.

Wie oben bereits erwähnt eignet sich eine einzelne Messung „auf Achse“ nur sehr eingeschränkt zur Beurteilung der Wiedergabeeigenschaften des Dodekaeders, weil der Frequenzgang bereits wenige Grad außerhalb der „Achse“ deutlich anders aussehen kann. Um diese Problematik etwas abzumildern, wurde eine Echtzeitanalyse mit großer Glättung (1/3 Oktave) in einer relativ reflexionsarmen Messumgebung durchgeführt.



Das Rundstrahlverhalten eines Lautsprechers lässt sich sehr anschaulich in einem sogenannten Directivity Sonogramm darstellen. Für das unten abgebildete Sonogramm wurde das Dodekaeder mit einer Winkelauflösung von 5° vermessen (-180° bis +180°). Es handelt sich hier um eine normierte Darstellung, das heißt, dass alle Messungen relativ zur 0°-Messung zu verstehen sind.



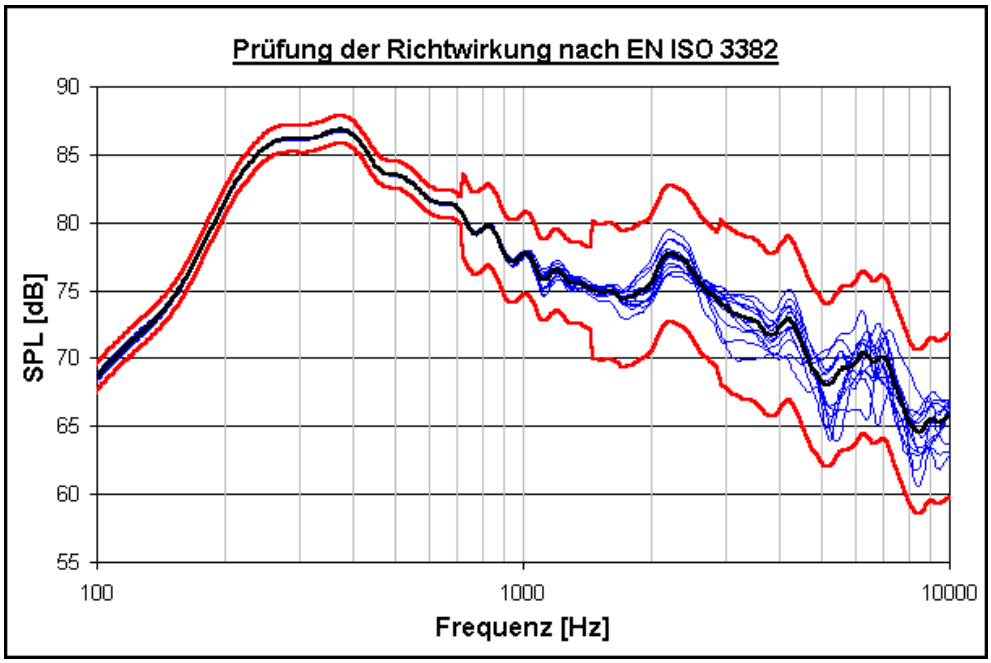
Bis etwa 2 kHz verhält sich das Dodekaeder wie ein fast perfekter Rundstrahler. Bei höheren Frequenzen wird der Einfluss der Interferenzen jedoch immer stärker und sorgt für Einbrüche im Frequenzgang. Ein weiterer Punkt ist die Bündelung der Chassis. Auch wenn das Dodekaeder in 12 verschiedene Richtungen abstrahlt, eine gewisse Richtwirkung bleibt dennoch bestehen. Bei einer Drehung um 360° kommt es im vorliegenden Fall drei mal zu der Situation, dass ein Chassis direkt auf Achse erfasst wird. Wie man an der Grafik unschwer erkennen kann, ist dies bei 0°, -120° und +120° der Fall.

Im ersten Kapitel dieser Abhandlung wurde die Norm EN ISO 3382 erwähnt. In dieser Norm wird auch das Abstrahlverhalten der Schallquelle exakt definiert. Hierzu zitiere ich den entsprechenden Abschnitt der Norm:
Die Schallquelle muss möglichst kugelförmig abstrahlen. In der Tabelle (siehe unten) sind die größten zulässigen Abweichungen von kugelförmiger Abstrahlung angegeben, gemittelt über „gleitende" 30°-Bogenbereiche in einem Freifeld. Falls kein Drehteller benutzt werden kann, ist in 5°-Schritten zu messen mit anschließender „gleitender" Mittelung über jeweils sechs benachbarte Punkte. Der Bezugswert ist aus einem 360°-Energie-Mittel in der Messebene zu bestimmen. Der Minimal-Abstand zwischen Quelle und Mikrofon ist 1,5 m.

Frequenz in Hz (Oktavband)	125	250	500	1000	2000	4000
größte Abweichung in dB	+/- 1	+/- 1	+/- 1	+/-3	+/- 5	+/- 6

Die Messungen zur Prüfung der Richtwirkung wurden in einer Höhe von 2,5 m durchgeführt, der Abstand zwischen Dodekaeder und Mikrofon betrug 2 m. Diese Messbedingungen erlauben quasi reflexionsfreie Messungen bis knapp unter 100 Hz. Wie in der Norm gefordert, wurde das Dodekaeder in 5°-Schritten vermessen und anschließend aus jeweils 6 benachbarten Punkten der Mittelwert gebildet (30°-Bogenbereiche). Ebenso wurde als Bezugswert ein Mittelwert aus allen Messungen gebildet (360°-Energie-Mittel).

In der folgenden Grafik sind die Ergebnisse dargestellt. Schwarz ist dabei der Bezugswert (360°-Energie-Mittel); die beiden roten Linien markieren die größten zulässigen Abweichungen vom Bezugswert (siehe Tabelle oben) und die dünnen blauen Linien zeigen die einzelnen 30°-Bögen.



Wie man sieht, erfüllt das Dodekaeder die Forderungen der EN ISO 3382 auch bei höchsten Frequenzen ohne Mühe. Erschwerend kommt bei dieser Darstellung hinzu, dass die Kurven nicht wie in der Norm gefordert über Oktavbänder geglättet wurden, sondern dass die Glättung lediglich 1/12 Oktave beträgt.

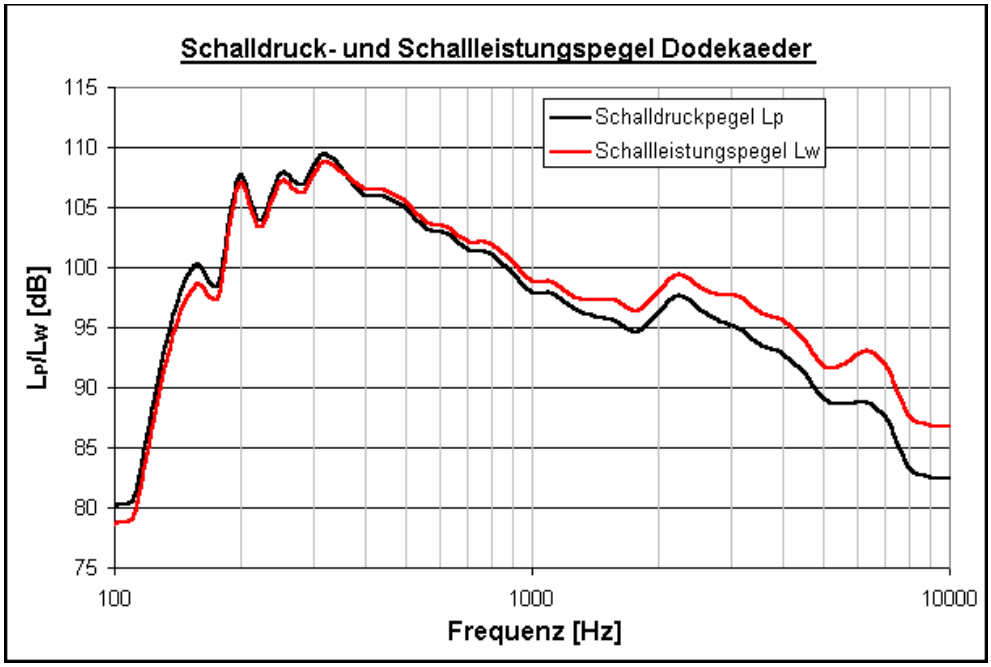
Neben der Anwendung als Schallquelle für Raumakustikmessungen bietet sich das Dodekaeder auch als Schallquelle für Hallraummessungen an (EN ISO 354 „Messung der Schallabsorption in Hallräumen“). In der Norm wird gefordert, dass das in den Lautsprecher eingespeiste breitbandige oder bandbreitenbegrenzte Rauschsignal ein kontinuierliches Frequenzspektrum aufweisen muss. Die Echtzeitanalyse des Rauschsignals muss derart sein, dass die Differenzen der sich ergebenden Schalldruckpegel im Raum in benachbarten Terzbändern geringer als 6dB sind. Die nachfolgende Messung soll prüfen, ob das Dodekaeder diese Forderung erfüllt. Gleichzeitig soll dabei auch der Schallleistungspegel L_W erfasst werden.

Der Schallleistungspegel L_W berechnet sich nach folgender Formel:

$$Lw\ [dB] = Lp\ [dB] - 10 \cdot Log10\ (T60[s]) + 10 \cdot Log10\ (V[m^3]) - 14$$

Dabei ist:
L_P[dB] = Schalldruckpegel in Dezibel
T60[s] = Nachhallzeit T60 in Sekunden
V[m³] = Raumvolumen in Kubikmeter

Die hierfür notwendige Messung unterscheidet sich in einem wichtigen Punkt von allen vorherigen: sie wurde ganz bewusst in einer stark reflektierenden Umgebung mit Einbeziehung aller Raumeinflüsse durchgeführt. Mit einer solchen Messung ist es ohne großen Aufwand möglich, die gesamte abgestrahlte Schallleistung eines Lautsprechers zu erfassen. Professionelle Messungen dieser Art werden in sogenannten Hallräumen durchgeführt, im vorliegenden Fall musste jedoch ein leergeräumter Kellerraum mit schallharten Betonwänden zur Abschätzung des Schallleistungspegels L_W ausreichen.



Im Bereich bis etwa 300 Hz machen sich stehende Wellen des Messraums störend bemerkbar, darüber funktioniert der „Hallraum“ im heimischen Keller aber ganz ordentlich. In diesem Bereich erfüllt das Dodekaeder die Forderung der EN ISO 354 ohne zusätzliche Entzerrung des Frequenzgangs. Möchte man auch den Bereich unterhalb der Einbauresonanz (fc = 280 Hz) für Messungen nutzen, sollte der Frequenzgang mit einem Equalizer oder Controller unter Berücksichtigung der elektrischen und mechanischen Grenzen der Lautsprecher entzerrt werden.

6.4 *IEC Schallwand*

Heinrich Weber, Matthias Leger

Die Beurteilung von Lautsprecherchassis unter reproduzierbaren Bedingungen, bedingt einen reproduzierbaren, sprich genormten Versuchsaufbau. Die IEC 60268-5 beschreibt Bedingungen, die Überlegungen zur Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit von akustischen Messungen auf einer Schallwand einschließen. Bild 6.4.1 zeigt die Abmessungen und den prinzipiellen Aufbau der Normschallwand.

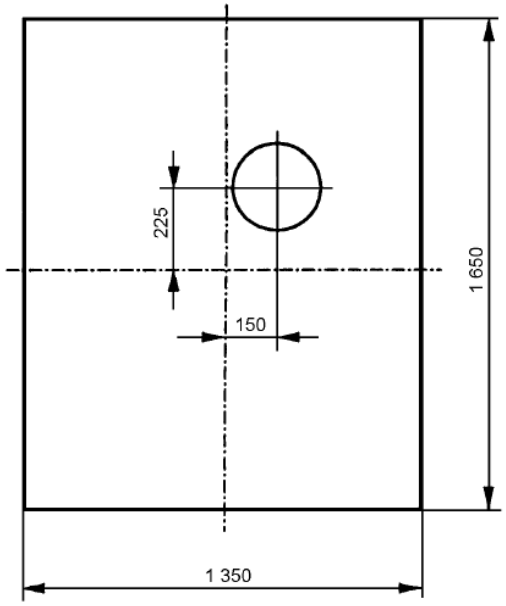


Bild 6.4.1: Normschallwand gem. IEC 60268-5

Messungen, die unter den in der Norm beschriebenen Bedingungen durchgeführt wurden, sind zwar nicht frei von Fremdeinflüssen, mit ein wenig Übung jedoch gut zu interpretieren. Ferner sind die Messbedingungen schnell und eindeutig zu beschreiben.

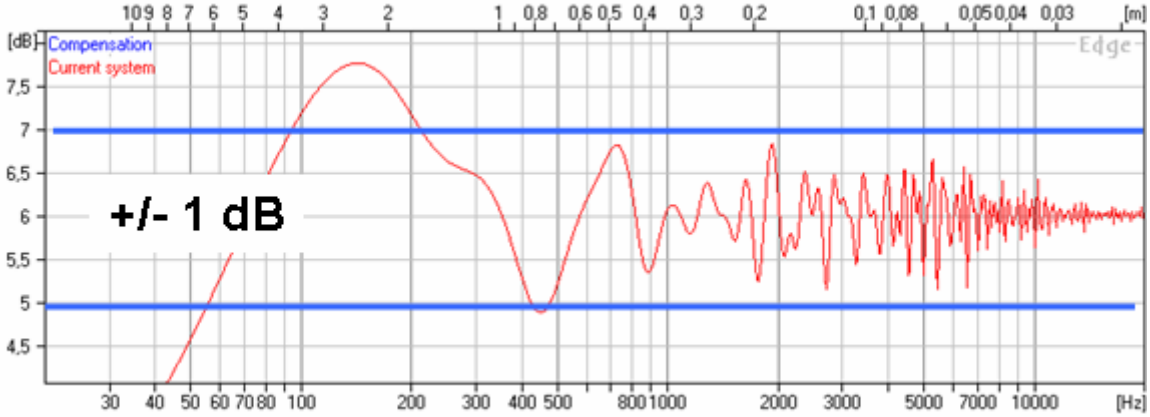


Bild 6.4.2: Hochtonkalotte bei 1 m Simulationsabstand

Bild 6.4.2 zeigt die Simulation eines Kalottenhochtöners in einer Normschallwand bei 1 Meter Messabstand. Bis ca. 300 Hz bleibt der Einfluss der Schallwand in einem Toleranzband von +/- 1 dB.

Ferner ist zu beachten, dass sowohl die Größe der Quelle als auch der Messabstand Einfluss nehmen (s. Bild 6.4.3).

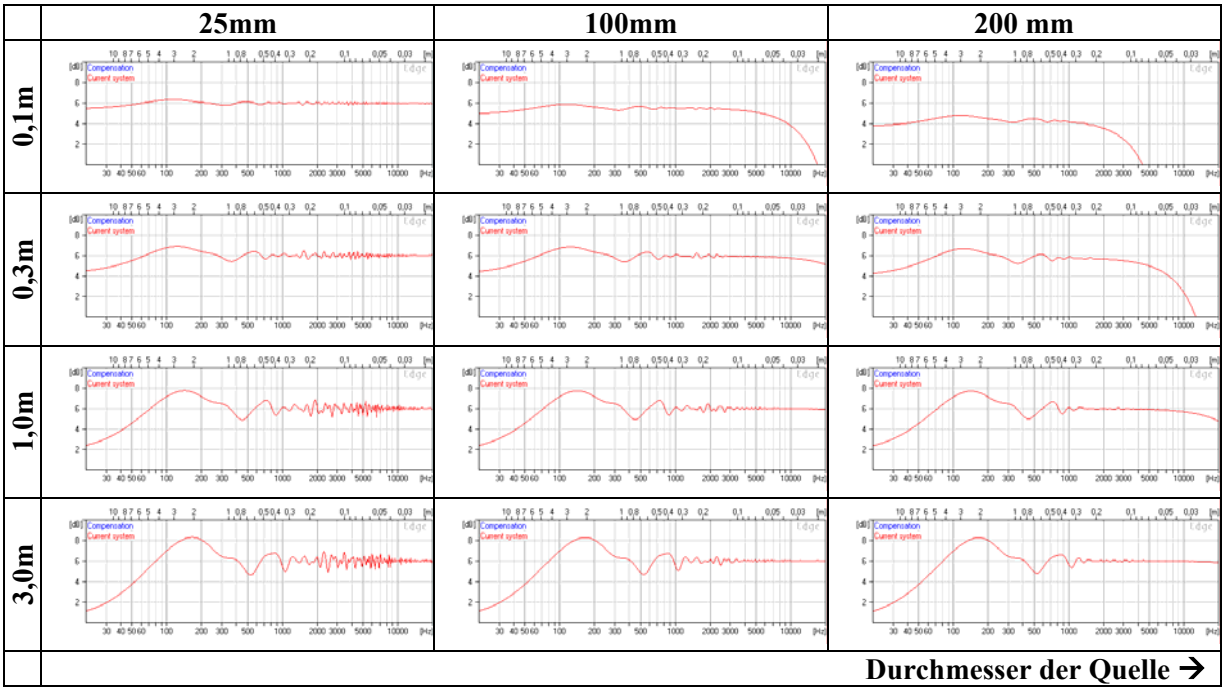


Bild 6.4.3: Auswirkung von Quellendurchmesser und Simulationsabstand

Für den Selbstbaubereich sind die in Bild 6.4.1 ausgewiesenen Abmessungen nicht gerade handhabungsfreundlich. Um die Transportierbarkeit und - falls erforderlich – eine Platz sparende Staubarkeit zu ermöglichen, kommt nur eine zerlegbare Lösung in Frage.

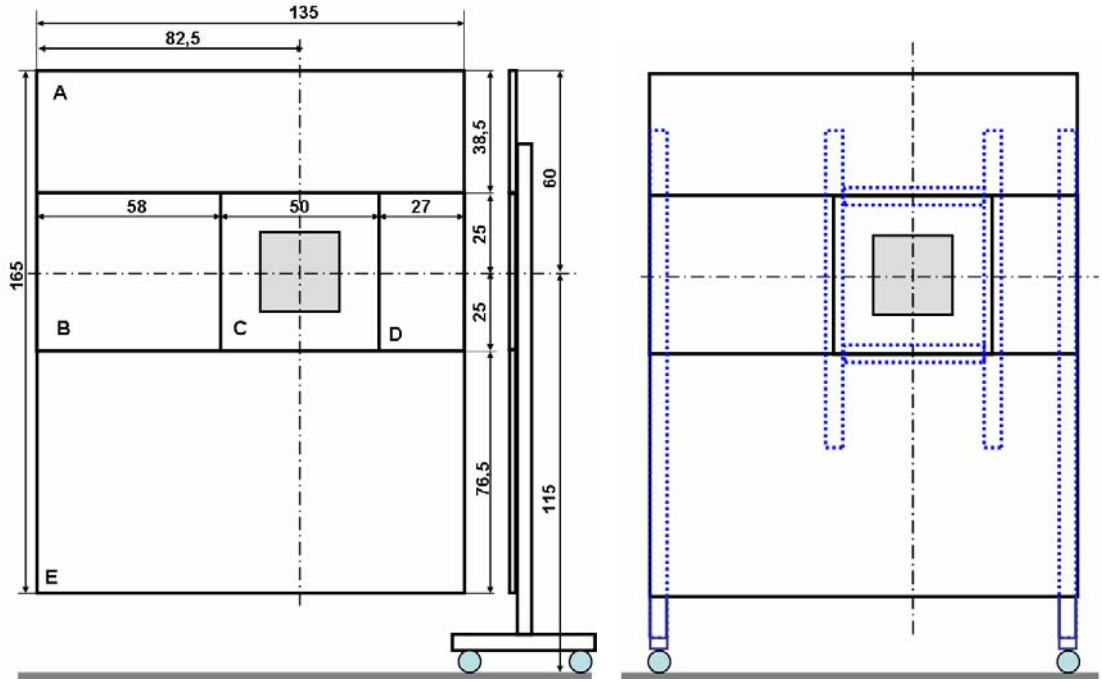


Bild 6.4.4: Bauskizze einer zerlegbaren Normschallwand

Bild 6.4.4 zeigt die Konstruktion einer mobilen und zerlegbaren Schallwand. Für den Bau werden die in Tabelle 6.4.1 gelisteten Materialien benötigt:

Anzahl	Bezeichnung	Material	Abmessung in mm
1	A	MDF 19	19 x 1350 x 385
1	B	MDF 19	19 x 580 x 500
1	C	MDF 19	19 x 500 x 500
1	D	MDF 19	19 x 500 x 270
1	E	MDF 19	19 x 1350 x 765
2	Dachlatte		35 x 45 x 2000
4	Rolle		
n	Messeinsatz	MDF 19	19 x 250 x 250

Tabelle 6.4.1: Stückliste

Die in Bild 6.4.5 von Matthias Leger realisierte Variante weicht in den Konstruktionsdetails ein wenig von der oben gezeigten Bauskizze ab. Erwähnenswert ist das „Rucksackgehäuse“, welches den rückwärtigen Schall einfängt.

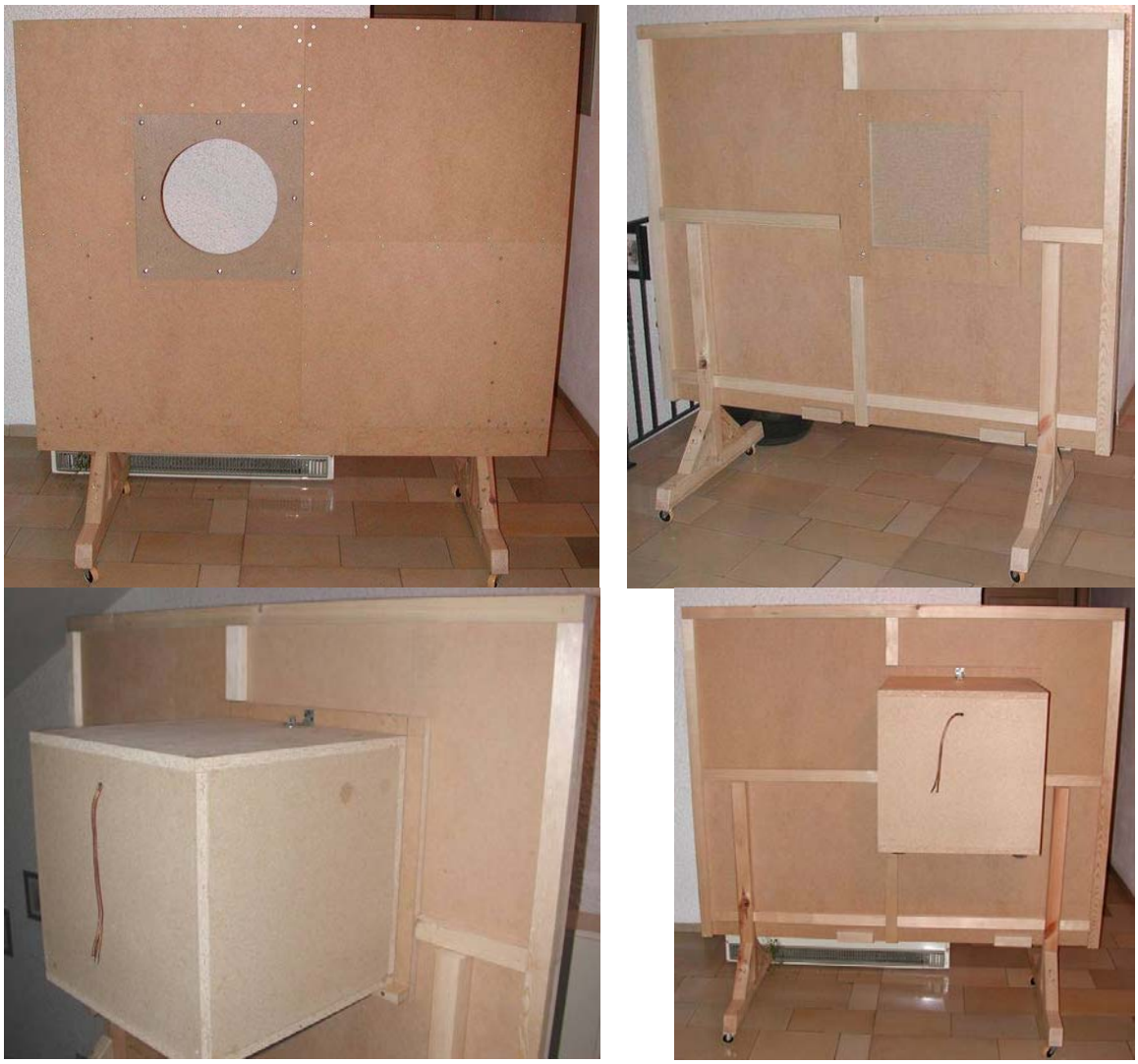


Bild 6.4.5: Die zerlegbare Normschallwand (Matthias Leger)

6.5 Laserpointer als Mikrofonpositioniervorrichtung

Heinrich Weber

Die exakte (Höhen)-Ausrichtung des Mikrofones zum Messobjekt mit Zollstock ist – je nach Gelände – nicht immer ganz einfach. Warum also nicht ein optisches Hilfsmittel einsetzen, das auf fast jedem Schreibtisch liegt: Ein Laserpointer!

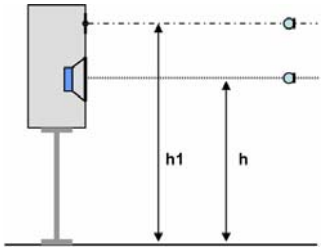


Bild 6.5.1 zeigt das Prinzip: Ein Laserpointer wird in Messachse auf dem Mikrofon befestigt. Nach Einschalten des Laserpointers wird die Ausrichtung des Mikrofones direkt auf der Membran angezeigt.

Die Konstruktion des Verbindungselementes zwischen Messmikrofon und Laserpointer ist in Bild 6.5.2 ausgeführt. Im oberen Teil der Konstruktionsskizze wird der Laserpointer eingeführt. Der Durchmesser 12,6mm ist so bemessen, dass durch Einschieben in Pfeilrichtung der Druckschalter betätigt wird.

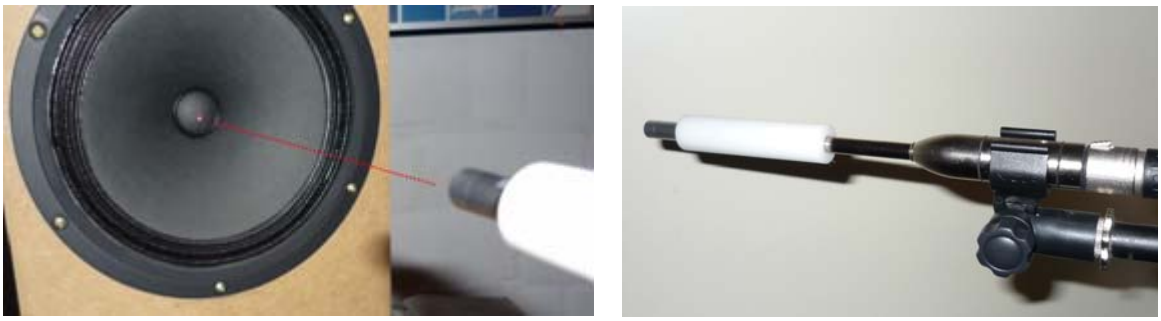


Bild 6.5.1: Ausrichtung des Mikrofones mittels Laserpointer

In den unteren Teil (Φ 7,8mm) wird das Mikrofon eingeschoben. Bitte achten Sie konstruktiv darauf, dass das Mikrofon durch das Einschieben nicht beschädigt werden kann (Anschlag, Entlüftung). Die Abmessungen müssen natürlich an das jeweils verwendete Mikrofon bzw. den verwendeten Laserpointer angepasst werden.

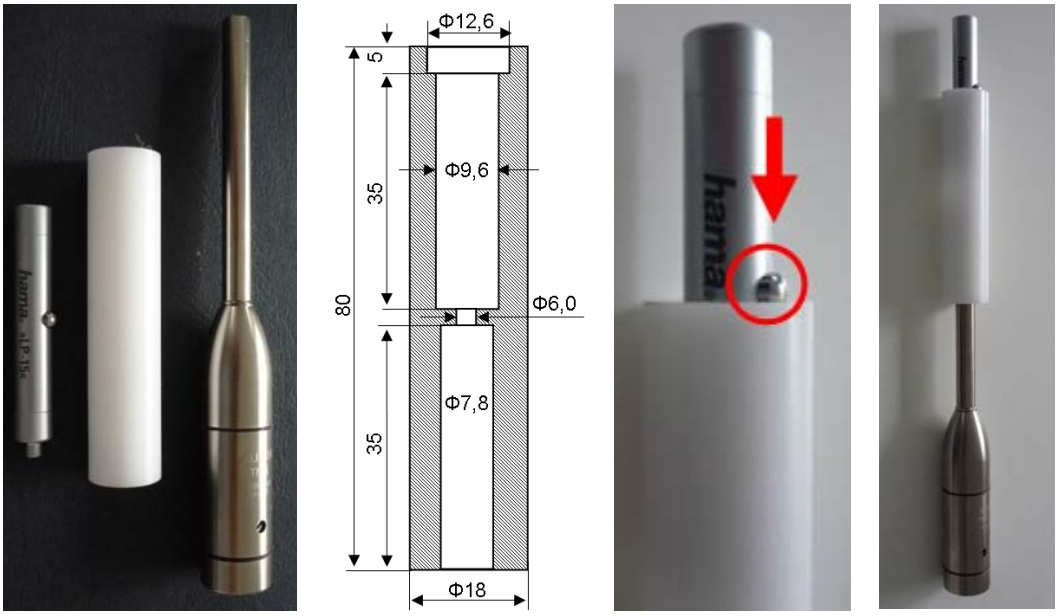


Bild 6.5.2: Konstruktion des Verbindungselementes

7 Sonstige Hilfsmittel

7.1 Lautsprecherklemmvorrichtung für die TSP-Messung

Axel Ridtahler

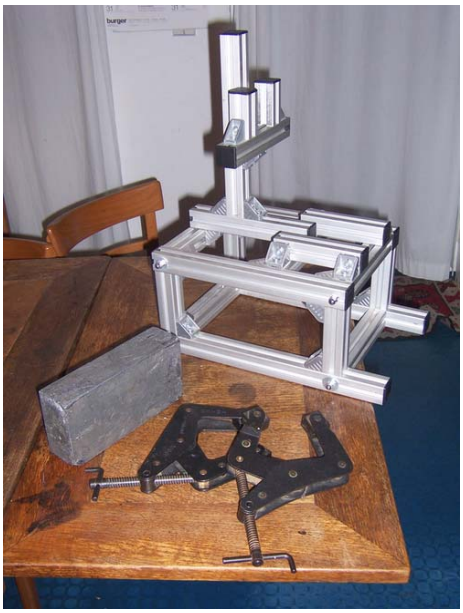
Die Messungen von Lautsprecher-Parametern nach A. N. Thiele & R. H. Small (TSP) beruhen auf Impedanzmessungen im Bereich der Eigenresonanz (fs, Qe, Qm, Qt). Eine gezielte Masseerhöhung der Membran durch Zusatzgewichte oder durch den Einbau in ein genau bekanntes Gehäuse führt zu einer Resonanzverstimmung, aus denen sich weitere mechanische Chassisparameter ableiten lassen (Mms, Cms, Vas, BxL). Diese werden zur Berechnung und Auslegung von Lautsprechergehäusen im Hinblick auf optimierte Basswiedergabe benötigt und sind im Grunde auch nur im Bereich der Resonanz gültig.

Leider ist die Ermittlung der Lautsprecherparameter recht störanfällig und bei mehreren Mess-Durchgängen am gleichen Objekt wird man immer wieder mehr oder weniger große Abweichungen feststellen. Zur präzisen Ermittlung der Parameter ist es wichtig, zumindest die Ausgangsdaten: Gleichstromwiderstand Re, Membran-durchmesser D und die Zusatzmasse (bzw. Testvolumen) sehr genau zu bestimmen. Es macht deshalb auch keinen Sinn, die Messergebnisse auf mehr als zwei Stellen hinter dem Komma anzugeben.

Bei der Messung wird also die Membran in Schwingung versetzt – und deren Verhalten soll untersucht werden. Aber ein Lautsprecher besteht ja nicht nur aus Membran und Schwingspule, sondern auch aus Korb und Magnet. Und wie schon Sir Isaak Newton (ein berühmter englischer Lautsprecherentwickler!) sagte:

Actio=Reactio

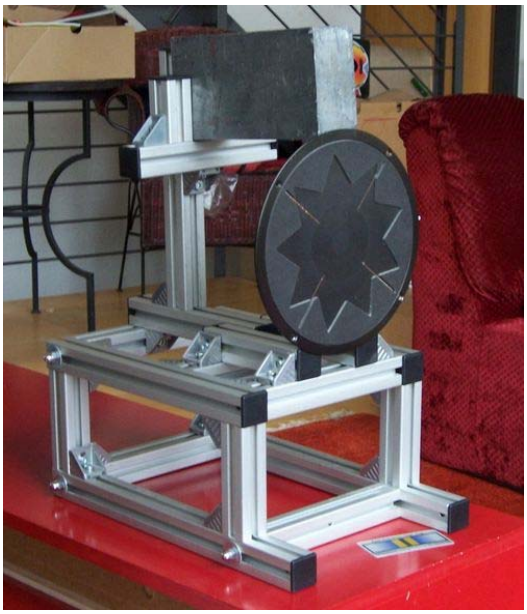
Was hier bedeutet, dass der Magnet (m_1*a_1) die ‚Spule+Membran' nicht weniger bewegt als die ‚Spule+Membran' (m_2*a_2) den Magneten **(m_1*a_1 = m_2*a_2)**. Wollen wir also möglichst nur die Reaktion von ‚Spule+Membran' erfassen, so ist es möglich, durch Erhöhung der Masse m_1 die Beschleunigung a_2 zu erhöhen, da m_2 ja gleich bleibt. Die Kräfte werden mehr in die Membran eingeleitet und deren mechanisches Verhalten vom Korb bzw. mitschwingenden Tisch entkoppelt.



In der Praxis ist diese konsequente, möglichst resonanzfreie und massengekoppelte Befestigung nicht von sehr ausschlaggebender Bedeutung, aber theoretisch absolut richtig. Gerade bei Messun-

gen, die einigen weiteren Störanfälligkeiten unterliegen (s. oben), sollten Fehlerquellen konsequent reduziert werden.

Axels TS/P-Bock ist ein Produkt aus den oben angestellten Überlegungen und deshalb aus Alu-Profilen zusammengebaut, sehr stabil, praktisch resonanzfrei, und dabei relativ klein. Dieser kann mit wenigen Handgriffen an jedem stabilen Tisch mit Schraubzwingen befestigt werden.
Die Chassis werden durch **einen 12kg schweren Bleiblock,** dessen Auflager in der Höhe verstellbar ist, sicher und kraftschlüssig fixiert, das ist gerade bei Messungen großer Chassis und tiefer Resonanz wichtig. Die hohe Masse reduziert besagte Interaktionen der Membran mit dem Korb (ähnlich wie bei einem fest verschraubten Chassis im Gehäuse) und vermeidet Resonanzeinkopplungen in den Tisch.



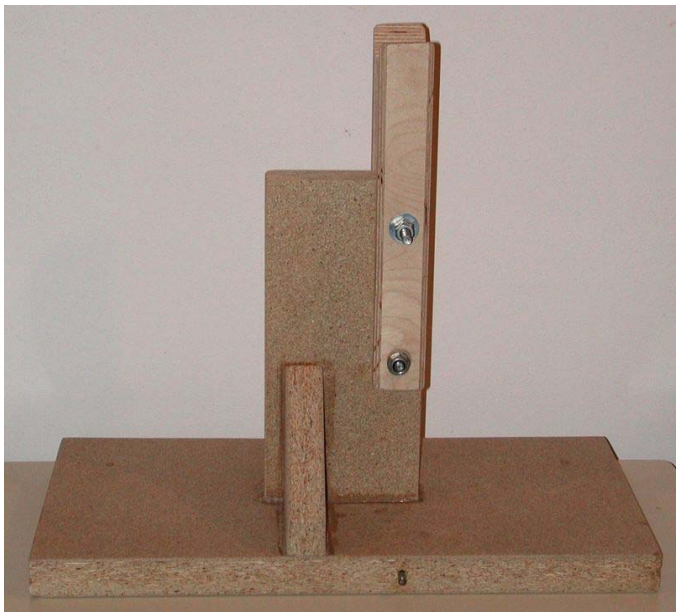
Es passen die kleinsten Hochtöner bis zu den größten Tieftönern und Exoten: Links im Bild ein Manger-Schallwandler, rechts ein riesiger Electrovoice 30W (Durchmesser 30“ = 80 cm)!

Matthias Leger

Für so manche Messaufgabe ist es notwendig (oder zumindest hilfreich), den Lautsprecher in senkrechter Position zu fixieren. Im folgenden Beitrag wird eine einfache Spannvorrichtung vorgestellt, deren Nachbau den engagierten Boxenbauer vor keine Probleme stellen wird.

Der prinzipielle Aufbau ist sehr einfach: der Lautsprecher wird mithilfe eines Spanngurtes auf einen stabilen Unterbau gezurrt. Der Unterbau besteht dabei aus einem standfesten Sockel sowie verstellbarer Arme zur Aufnahme unterschiedlich großer Lautsprechermagnete.

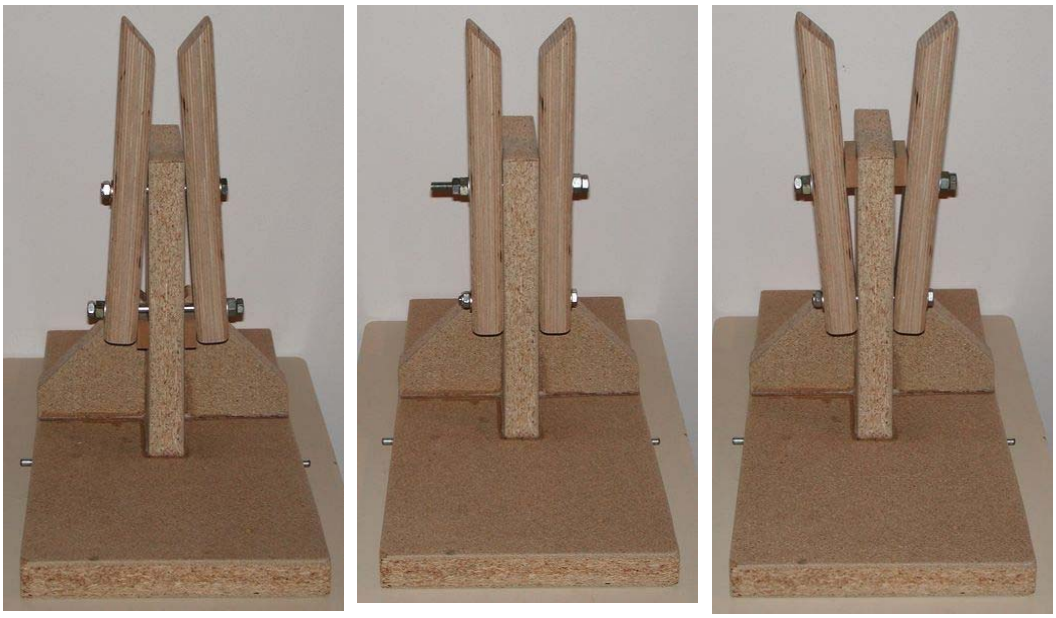
Die folgenden Bilder zeigen den Aufbau der Spannvorrichtung. Die Bodenplatte und die Teile des Sockels bestehen aus 38 mm dicker Spanplatte, die beiden Arme dagegen aus 36 mm Birkenmultiplex (zusammengeleimt aus zwei Platten je 18 mm). Während die Bodenplatte sicher etwas überdimensioniert daherkommt, ist die stabile Auslegung der Arme aufgrund der dort auftretenden Kräfte (Spanngurt!) durchaus angemessen.



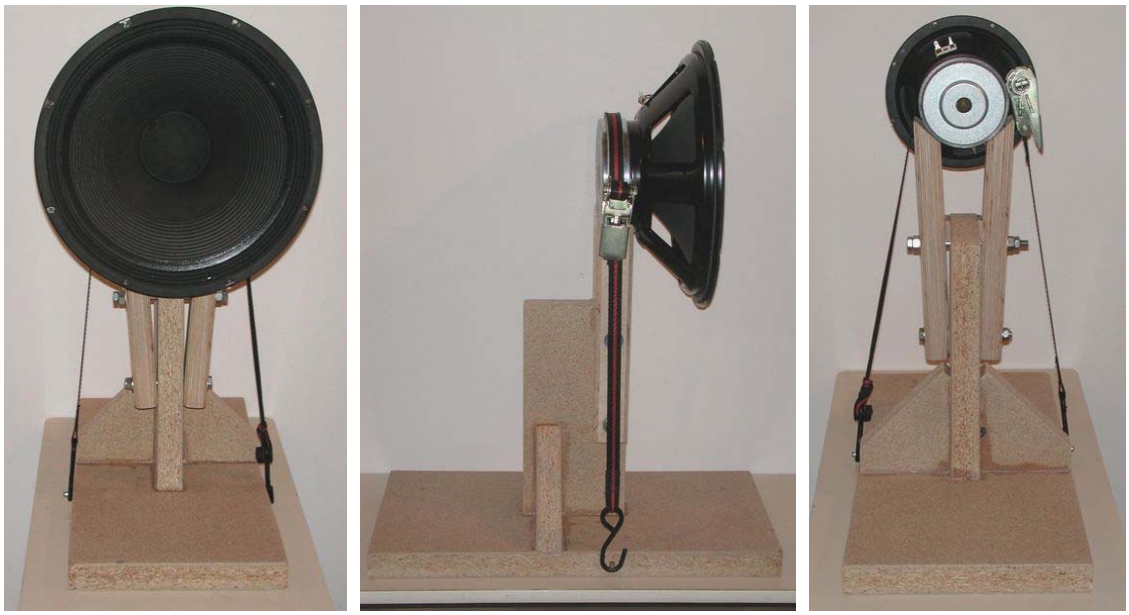
Die Abmessungen der Bodenplatte betragen beim hier vorgestellten Exemplar etwa 30 x 60 cm; die Höhe von Kopf bis Fuß misst gute 50 cm. Damit lassen sich auch gewaltige PA-Bässe mit Magnetdurchmessern von 220 mm noch ausreichend fest spannen. Wer dagegen nur mit normalgroßen Lautsprechern zu tun hat, kann die Vorrichtung natürlich auch eine Nummer kleiner bauen.

Damit die Haken des Spanngurts festen Halt finden, sind in die Bodenplatte stabile Bolzen (o.ä.) einzulassen. Im vorliegenden Fall wurde das Problem mit 10 cm langen und 8 mm durchmessenden Stahlbolzen gelöst. Denkbar ist aber auch, den Spanngurt einmal komplett um die Konstruktion herumzuführen, um sich diesen Arbeitsschritt zu ersparen. Nachfolgende Bilder zeigen beide Varianten.

Der Abstand der Arme zueinander kann durch Einklemmen kleiner Holzklötze in weiten Bereichen variiert werden, so dass nicht nur große, sondern auch kleine Chassis sicheren Halt finden. Die Bohrungen in den Armen müssen hierfür natürlich mit Übermaß ausgeführt werden, damit beim Verstellen nichts klemmt. Die Bilder veranschaulichen den Verstellbereich von klein nach groß.



Die Spannvorrichtung in Aktion. Auf den beiden Bildern links mit einem 15“ PA-Lautsprecher, auf dem Bild rechts mit einem 8“ HiFi-Tieftöner.



Heinrich Weber

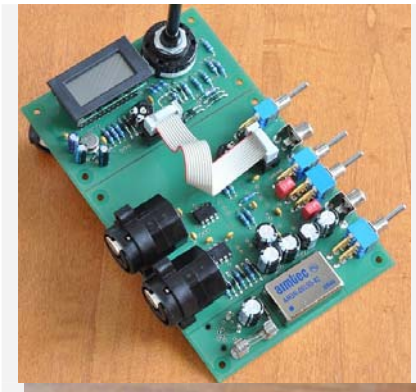
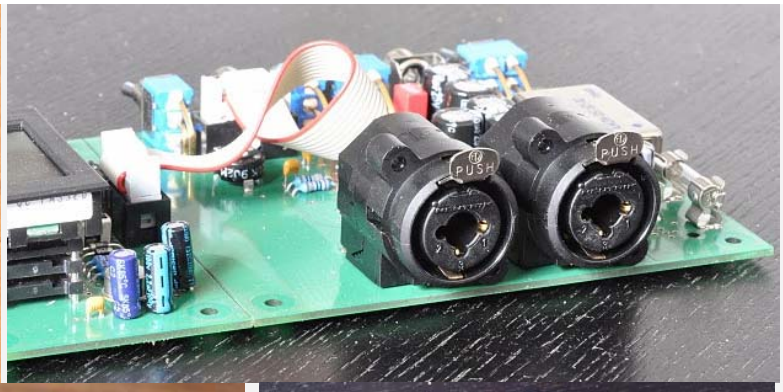
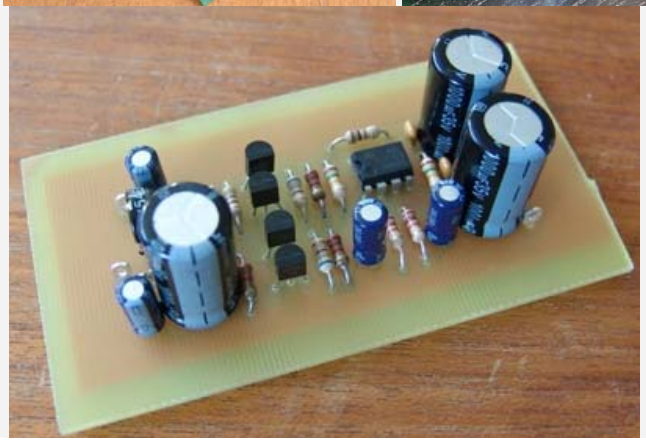
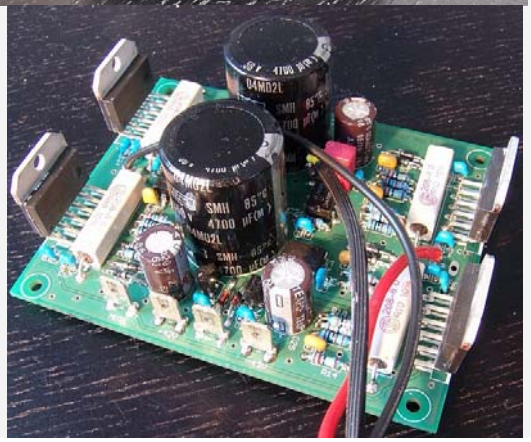
Die folgende Lösung setzt eine bereits vorhandene Klemmvorrichtung ein: Eine Schraubzwinge! Wenn die Schraubzwinge nicht dauerhaft verbaut werden soll, so kann sie – wie unten im Bild gezeigt – zwischen zwei mit Nuten versehenen Brettern festgeklemmt werden.

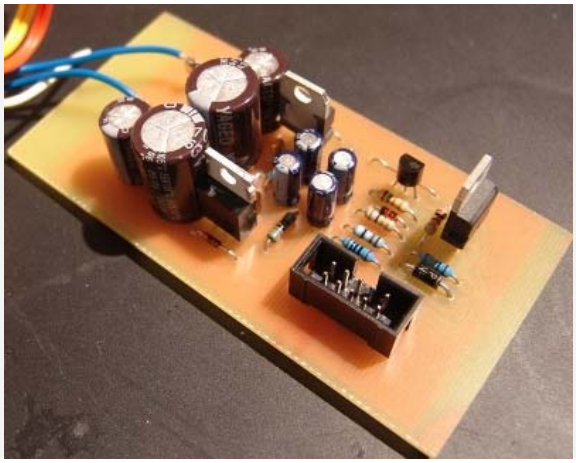
Zu guter Letzt sei noch erwähnt, dass die hier beschriebene Spannvorrichtung nur einige von vielen Möglichkeiten darstellt, wie man Lautsprecher in senkrechter Position fixieren kann. Der eigenen Kreativität sind wie immer keine Grenzen gesetzt.

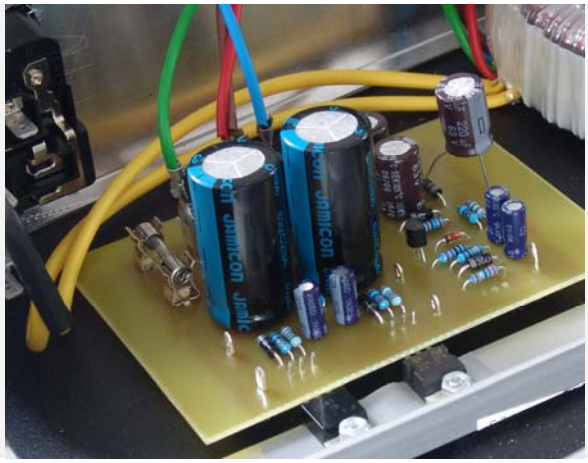
8 Interessante Projekte im Netz

Neben den hier vorgestellten Projekten gibt es noch weitere interessante – veröffentlichte, aber auch noch unveröffentlichte - Entwicklungen in Dougies Labor zu sehen. Weitere Informationen finden Sie unter den jeweils angegebenen Links bzw. in den folgenden Fotos.

Projekt	Beschreibung	Platine
Soundcard Measurement Interface	Messvorsatz für Soundkarten; http://www.m1n1.de/html/soundcard_interface.html	Ja
Monster Amp	Klang und Leistung satt mit 4x LM3886 http://www.m1n1.de/html/monster_amp.html	Ja
MVV Power Supply	Rauscharme Spannungsversorgung mit +/- 15V & +48V; http://www.m1n1.de/html/mvv_powersupply.html	
ESP MVV	Mikrofon Vorverstärker mit Phantomspeisung von ESP; http://www.m1n1.de/html/esp_mvv.html	




Jamicon

9 Literatur und Links

[01] Mateljan, Ivo: "ARTA-Manuals", Split, 2006.

[02] Heinrich Weber: Ein Kompendium für die Programme der ARTA-Familie

[02] AN No 5: Die ARTA-Mikrofonkalibrierkammer fürs untere Ende

[03] K&T 1/05, Mess-Ohren

[04] AN No 4: Ermittlung des Freifeldfrequenzganges

[05] AES2-1984 (r2003): AES Recommended Practice, Specification of Loudspeaker Components Used in Professional Audio and Sound Reinforcement
http://users.skynet.be/william-audio/pdf/aes2-1984-r2003.pdf

[06] IEC 60268-5: Sound System Equipment – Part 5: Loudspeakers

[07] AN 4 - Measurement of Peak Displacement Xmax -
Application Note to the KLIPPEL ANALYZER SYSTEM

[08] http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/1057.pdf

[09] David Davenport: Audio Component Grounding Interconnection;
http://www.diyaudio.com/forums/diyaudio-com-articles/163575-audio-component-grounding-interconnection.html

[10] http://www.m1n1.de/html/hifi.html

[11] John Conover: Using the Panasonic WM61A as a Measurement Microphone;
http://www.johncon.com/john/wm61a/