

Kapitel 11

Ein „update“ der Bauelemente und Frequenzweichenschaltung 2006-2010

11. Bauelemente mehr aus wissenschaftlicher Sicht

Aus Anlass der Marktinovation von Vishay, die ähnliche Widerstände wie Caddock MP2600 im Juli 2005 in den Magazinen vorgestellt haben, ergab sich natürlich sofort die Frage, sind diese vielleicht noch besser?

Durch die Auseinandersetzung mit der bei [1] neu angebotenen besonders gut leitfähigen Metalllegierung AgAu(1%) in Form von MKP Belägen, Flachbandspulen und 2x1,5mm Lausprecherkabeln wurde eine überraschende Entdeckung gemacht, in dessen Konsequenz die Idee zu einem neuen praktisch auch realisierbaren Lautsprecherkabeldesign entstand.

11.1. Drahtwiderstände nach dem Aryton-Perry Verfahren

Wie sollten sich hier die „nichtmagnetischen“ Widerstände von MILLS einordnen? Der doch relativ hohe Preis resultiert wahrscheinlich aus der Handfertigung nach dem Aryton-Perry Verfahren: Zwei übereinanderliegende voneinander isolierte Windungen mit entgegengesetzten Windungssinn, die Kreuzungspunkte lagen aller 180°. Genauer wird dies nicht beschrieben, es ist aber eigentlich ein altes Verfahren, was zum Ziel hatte, Frequenzbereiche bis 50kHz zu erlauben. Diese Verfahren sollten die normale Windungsinduktivität verhindern. Es gab noch eine Reihe ähnlicher Prinzipien, die sich nur in der exakten Windungsführung unterschieden. Die Realität der Induktivitätsarmut sah nicht ganz so gut aus. Die Induktivität eines 2,2ohm 12W (Impuls; 10W Dauerlast) betrug zwar nur ¼ von den normal gewickelten Widerständen aber war immer noch doppelt so groß wie die der MOX. War ja auch verständlich, die Windungen mit dem größeren Durchmesser hatten eine größere Induktivität, die mussten dann in der Zahl geringer gehalten werden, das dürfte schwierig exakt hinzukriegen gewesen sein. Aber klanglich hat die reine Induktivität keine Nachteile, wenn die Entfernung zum nächsten Metall oder Leiter weit genug ist. MILLS verwendete zwei verschiedene Drahtmaterialien, meist Ni-Cr, aber für die niederohmigen Widerstände, wie z.B. der vorhandene 2,2Ω, eine Ni-Cu-Legierung. Die letztere ähnelt dem Manganin der Isabellenhütte, die erstere wird am meisten genutzt. Hier besteht die ernsthafte Gefahr, dass beim Abstimmen der Klangcharakteristik, wenn von einem Material zum anderem gewechselt wird, das Abstimmen schwieriger wird, weil ein Charaktersprung auftaucht und mehr Bauteile geändert werden müssen als nur der Widerstand, abgesehen davon dass sich auch die Einspielzeit ändert. Wenn man beide Drahttypen verwenden muss, sind genaue Überlegungen und Erfahrungen Voraussetzung.

Der Klang nach der Installation solcher MILLS Widerstände wurde mit „ausgesprochen warm“ umschrieben. Das waren die PBH am Anfang auch. Es konnte vermutet werden, dass das Aryton-Perry Windungssystem, wo jede Teilspele in die andere hineininduziert, charakteristische Verzerrungen entstehen lässt, ähnlich dem „Simba-Chip“. Die häufigste Anwendung erfolgte auch im Bereich der Röhrenaudioteknik.

11.2. Der neue Widerstand Vishay LTO30 im Vergleich

Der neue Vishay LTO 30 war im Vergleich zum Caddock MP2060 etwas kleiner, in allen seinen Abmaßen, vor allem in den Anschlussbeinen. So ist auch seine Belastbarkeit nur halb so groß.

Es gab aber natürlich LTO Typen, die für höhere Belastungen ausgelegt waren, die aber allerhöchstwahrscheinlich auch mehr ferromagnetisches Material beinhalteten, so wie es bei der Caddock-Serie MP900 veranschaulicht wurde, denn größere Leistung erforderte mehr Abstrahlfläche, die wiederum mehr Masse und damit mehr Nickel. Der LTO30 könnte aber trotzdem auf alle Fälle für Lautsprecheranwendungen genügen, wenn wieder ein Keramikblättchen als Heatsink angeklebt wird, nein, hier wurde geschraubt. Im Gegensatz zum MP2060, der zum Clip vorgesehen war, hatte der LTO eine Öffnung. Wegen der asymmetrischen Anordnung der Öffnung zum Schwerpunkt ist aber eine Klebung mit Silicon günstiger. In Tabelle 1 sind der Caddock und ein vorzeitig erhaltenes Vishay LTO 30 Sample mit 5% verglichen worden.

Tab. 1: Vergleich Caddock mit Vishay

Hersteller	Caddock	Vishay
Typ	MP2060	LTO30
Sample	2,5Ω	2,2Ω
Genauigkeit	1%	5%
Gehäuse	TO220	TO220
Befestigung	Clip	Schraube
Belastbarkeit mit heat-sink case 25°C	60W	30W
maximale Temperatur	150°C	155°C
minimale Temperatur		-55°C
Induktivität	10nH	< 0,1µH
Isolation	10Gohm	
Substrat		Alumina
Preis	X	0,4X

Die verfügbaren Widerstandswerte unterscheiden sich bei den beiden Anbietern. Caddock hat eine eigene Reihe und Vishay lieferte in den bekannten E-Reihen, den LTO 30 vorläufig nur in E12. So dass ein einfacher Austausch der Widerstände zum Klangvergleich vorerst nicht möglich war.

Tabelle 2: Widerstandswerte Caddock und Vishay

	Hersteller-Werte in Ω
MP2060	0,5 0,75 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,3 4,0 5,0 7,5 8,0 10,0
	12 15 20 22 25 27 30 33 40 47 50 56 75 100
LTO	E6 E12 E24 E48 E96

11.2.1. Messtechnischer Vergleich

Der Vishay hatte eine genau so geringe Induktivität wie der Caddock. Die angegebenen < 0,1µH sind sehr sichere Grenzen, vermutlich wurden die Enden der Anschlüsse mit berücksichtigt, da Caddock 5mm Abstand zum Gehäuse vorschrieb. Die Anschlusslängen waren aber 12,7mm wie bei Vishay.

Als einfachste nicht zerstörende Prüfung wurde wieder die magnetische Anziehungskraft der Widerstände bestimmt. An die beiden Anschlussbeinen wurden wieder feine Bindfäden gebunden und der Widerstand aufgehängt, Weglänge 10cm. Danach wurde diesmal ein kleiner aber starker Neodym-Magnet dem Widerstand angenähert, bis der Widerstand Berührungskontakt bekam, dann wurde der Magnet wieder horizontal entfernt, so dass der Widerstand ausgelenkt wurde. Der maximale Auslenkungswinkel α wurde gemessen, als der Widerstand auf Grund seiner Gewichtskraft wieder zurückpendelte. Um die magnetische Kraft zu ermitteln, musste die Gewichtskraft, hier die Masse des Widerstandes bestimmt werden. Danach konnte über $\tan(\alpha)$ die magnetische Kraft berechnet werden. Diese Kraft sollte eine analoge und relative Größe zu der verwendeten Menge an ferromagnetischen Material sein und damit eine grobe Aussage für den Klingeeinfluss liefern. Der angegebene Messwert stellt den Mittelwert von 10 Messungen dar. Der Winkel und der Unterschied sieht sehr klein aus, betrachtet man aber geläufige Winkelmesser für die Schule, dann sind die Abstände der Skalenstriche für 2° schon erstaunlich groß. Der Fadendurchmesser betrug gerade Skalenstrichstärke. Alle Messdaten sind in der Tab. 3 verzeichnet. Die Berechnung erfolgte wie im Kapitel 7. In Abb.1 ist das Ergebnis der Berechnungen graphisch dargestellt.

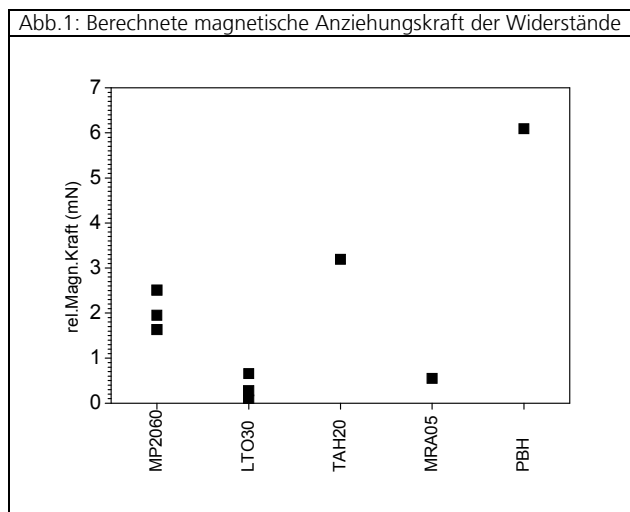
Tabelle 3: Masse der Widerstände

Typ	Hersteller	Masse
		g
MP2060	Caddock	2,44
LTO	Vishay	1,41
TAH20	Ohmite	1,46
MRA05	Mills	0,95
PBH	Isabellenhütte	3,20
supreme	Mundorf	14

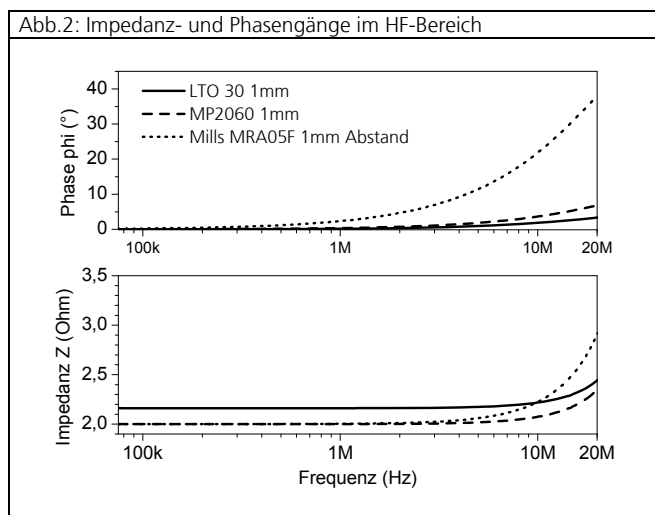
Die jüngere Herstellungstechnologie von Vishay zeigte eine weitere Annäherung an das Ideal „nichtmagnetische, induktionsfreie und wirbelstromfreie Widerstände“.

Die magnetische Anziehungskraft des Caddock MP2060 ist mehr als doppelt so groß, wie die des Vishay LTO 30. Auch beim Vishay geht es nicht ohne Vernickelung. Die zu erwartenden elektromagnetischen Verzerrungen könnten also beim Vishay ohne Vernickelung noch niedriger liegen.

Durch die lange Wartezeit auf die restlichen Widerstandsgrößen der LTO-Reihe, um die Weiche umzubestücken, waren schließlich doch noch die gesuchten MILLS MRA erreichbar. Später wurde auf der Suche nach weiteren ähnlichen Widerständen wie die Caddock und Vishay der Ohmite TAH20 entdeckt. Seine Materialwerte waren aber deutlich schlechter.



Zur Vergleichbarkeit der Impedanz-Phasen-Kennlinien wurden entgegen Caddocks Vorschriften die Widerstände mit 1mm Abstand zu den Kontaktklemmen des DUT der kalibrierten HP4285A gesteckt. Das Ergebnis in Abb.2 überrascht eigentlich nicht mehr. Der Phasenwinkel ist beim Caddock MP2060 etwa doppelt so groß wie der vom Vishay LTO 30.



Der Intertechnik Präzisionsdrahtwiderstand ME waren nicht geprüft worden, da die Anschlussdrähte stark ferromagnetisch waren. Der später erschienene Mundorf M-Resist supreme ließ sich schlecht vermessen, da seine Größe nur eine partielle Anziehung zuließ. Die Anziehung der Lötunkte war am größten und betrug jeweils 0,5°. Rechnerisch ergab sich bereits für diesen einen Anschluss 1,2mN. Aber auch die Widerstandswicklungsenden waren magnetisierbar. Summa summarum vielleicht zwischen PBH und MP2060 einordenbar.

11.3. Lautsprecherkabel

Im Betrieb waren noch immer die Unterputz-Feuchtraumkabel von OBI mit der ungewöhnlichen Zahl von 4x1,5mm Cu Drähten, die einmal einzeln mit PVC isoliert waren und dann alle zusammen nochmals mit einem besonders weichen grauen Schutzpolymer ummantelt waren. Die Wahl der Adernzahl war einmal der Symmetrie geschuldet, 2 Adern für Masse und 2 für die Signalführung in Kreuzverschaltung. Die anderen käuflichen Lautsprecherkabel kamen wegen der Litzen nicht in Frage und die Volldrahtversionen waren einfach zu teuer, um ein erfolgreiches Langzeit-Experiment zu starten. Die Kabel auszuleihen hatte keinen richtigen Sinn angesichts der sicher notwendigen Stromkonditionierung. Jeder Elektroingenieur war der Meinung, dass jeder Volldraht mit ausreichendem Querschnitt für den NF-Bereich genügen würde, das Kupfer wäre sowieso überall gleich, nämlich Elektrolytkupfer. Mehr dem Glauben gehorchend wurde damals das OBI Kabel besorgt und solange konditioniert bis es besser als das mal kurz ausgeliehene, aber schon lange betriebene und konditionierte „second hand“ Kabel mit grober Litzenführung und Teflonisololation.

11.3.1. Das Material

Aber wie ist das nun wirklich mit der Leitfähigkeit bei den Metallen Silber, Gold, Kupfer und Aluminium, die doch die besten elektrischen Leiter sind. Gibt es überhaupt Angaben zu Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Reinheit, z.B. von der Zahl der Neunen, wie 2N, oder 3N oder z.B. auch 4N5 (99,995%)? Doch bei der Beantwortung der ersten Frage tauchen schon verschiedene Zahlen für die Leitfähigkeit oder dem spezifischen Widerstand der Materialien wie Kupfer an sich auf. Im [2] sind einige Daten im Tabellenteil gelistet.

Tabelle 4: Daten aus [2]

	spez. Widerst. 20°C $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$	Reinheit	Leitfähigkeit
Al	0,028 (2N6)		
	0,028...0,04		
	0,025	Reinmetall	60%
Ag	0,0163 (3N8)		
	0,0165...0,10		
	0,015	Reinmetall	100%
Au	0,024		
	0,020	Reinmetall	75%
	0,063	AuAg(10%)	
Cu	0,0172	für Wicklungen	
	0,0178	für Leitungen	
	0,01786	kaltgereckt >1mm	
	0,018183	kaltgereckt < 1mm	
	0,016	Reinmetall	93%
	0,0178	CuAg(0,1%)	
	0,0204	CuAg(2%)	

Beim Vergleich der Zahlen fällt auf, dass der spezifische Widerstand
a) der reinen Metalle immer niedriger ist als der aller seiner Legierungen,
b) sogar niedriger ist als die Legierung mit einem Metall höherer Leitfähigkeit,
c) von Kupfer im Vergleich zum Silber 93% beträgt und was besonders wichtig ist, dass
d) die Leitfähigkeit von Kupfer für Spulenwicklungen ausgewiesenermaßen höher ist als das für elektrische Leitungen und Kabel.

Folgende Schlüsse kann man ziehen:

1. Das mit Gold legierte Silber kommt mindestens in die gleiche Größenordnung der Leitfähigkeit wie das Kupfer für Spulenwicklungen. Die Aussage von [1] „Gold verändert die kristalline Struktur von Silber und maximiert seine sehr gute elektrische Leitfähigkeit.“ ist mit Sicherheit für den zweiten Teil der Aussage eine nicht ergründbare komplexe Aussage, es gibt auch keine wissenschaftliche Veröffentlichung, die das bezeugen könnte.
2. Es gibt ein Leitfähigkeitsunterschied zwischen dem Kupfer der OBI Leitung und dem Kupferlackdraht für Spulen. Die Leitfähigkeit der dicken Drähte wird höher ausgewiesen als der der dünnen Drähte

(<1mm), dickere Drähte haben einer relativ kleinere Oberfläche bezogen auf das Volumen, was die Konzentration durch das Eindringen von Verunreinigungen z.B. beim Ziehprozess verringert. Außerdem ist der Diffusionsweg länger.

3. Versilberung von Kupferlitzten führt zu Legierungsbildung, was die Leitfähigkeit in der Mischzone herabsetzt. Ag kann sich mit Cu lückenlos vermischen

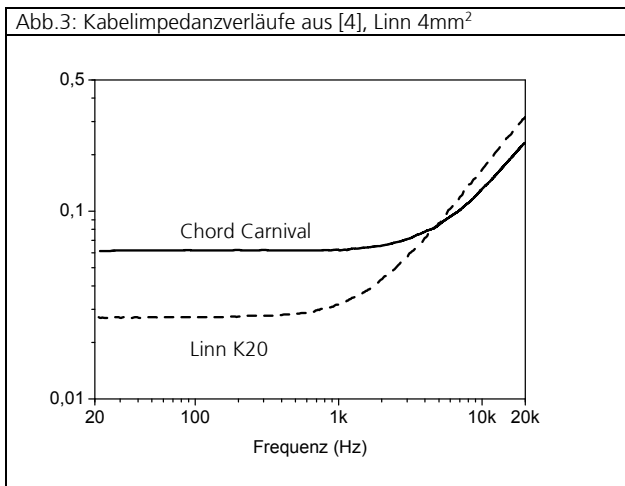
4. Art und Weise der mechanischen Herstellung spielt für die Leitfähigkeit eine nicht untergeordnete Rolle, zum einen wegen der Chemie und zum anderen wegen der Kristallographie.

Obwohl Metalle durch Gleichstrom gereinigt werden können, ist dies bei langen Kabeln wie für den Lautsprecher ein wohl hoffnungsloses Unterfangen. Die Stromkonditionierung sollte bei weniger sauberen Kupfer durch die größeren Störstellenzahl schneller begrenzt werden. Die beste Voraussetzung ist wohl möglichst sauberes Kupfer (s. Kap.1.10) von vornherein zu verwenden und auch eine gut passivierte Oberfläche, die vor Verunreinigung schützt genauso wie vor Eindiffusion von reaktiven Gasmolekülen.

11.3.2. Einflüsse im Kabel

Aber ob der Widerstand z.B. nun 0,0782ohm oder 0,0809ohm beträgt (3mΩ), ist für ein 3m langes Kabel wohl weniger von Belang, da die Kontakte in den Verstärker-Relais, Verstärkerschraubanschlüssen und an der Box selbst einer größeren Streuung unterliegen. Jeder, der selbst einmal den Widerstand an einem guten Digitalmultimeter bestimmen wollte, war überrascht wie groß die Streuung der gemessenen Werte sein kann und wie diese bereits vom Kontaktdruck abhängen kann.

Einen Haupteinfluss sieht [3] im Höhendämpfungsverhalten, d.h. in der seriellen Induktivität und im seriellen Widerstand sowie in der Kabelkapazität. Dargestellt wurden die Impedanzdiagramme. Die Impedanz beginnt zwischen 1kHz und 10kHz anzusteigen und liegt zwischen 14mohm und maximal 450mΩ. Im Spannungsteiler gegen einen Abschlusswiderstand von 4Ω bewirkt das eine Absenkung dieser Frequenzen von maximal 1dB bis 20kHz. [3] meint: „Die weit verbreitete These, feine Leiter führen auch zu feinerem Klang, widerlegte der Hörtest. Kabel ähnlichen Aufbaus mit dickeren Einzellitzen zeigten immer die besseren Ergebnisse. ... Stegleitungen weisen dagegen stets eine mit der Stegbreite steigende Induktivität auf. Dies fällt beim Linn K20 auf.“ Das Linn K20 hatte 4mm². Das Kabel Carnival von Chord Company von [4] war ein 2-drahtiger Leiter in "twisted pair" mit Polyethylen als Innenisolator und PVC als Außenisolator.



Zum Einfluss von Silber oder Kupferreinheit scheint es widersprüchliche Ergebnisse bei Kabeln zu geben, was auch jetzt nicht mehr verwundert, da je nachdem wie die Silberauflage mit dem Kupfersubstrat legiert ist, die Leitfähigkeit sinkt. Das könnte soweit gehen, dass eine frequenzabhängige nichtlineare Leitfähigkeit entsteht, da die Eindringtiefe von der Frequenz abhängig ist. Wenn nämlich etwas tiefer in der Leitung durch die Legierung abrupt die Leitfähigkeit sinkt, wegen der Legierungsbildung, und dann weiter

tiefer die Leitfähigkeit wieder ansteigt, weil reines Kupfer vorliegt, kann es nicht nur theoretisch zu schlechteren Impulsen kommen. Laut den Spulenberechnungen von [2] wird der Induktivitätsbelag kleiner, wenn die benachbarten Leiter näher zusammenkommen und wenn die Drähte möglichst dünn werden.

Aus den Erfahrungen der Spulen in den Frequenzweichen kommt noch eine physikalische Größe hinzu, das ist die elektromotorische Kraft, die auch zur Definition des Ampers gedient hat, die Bewegung der elektrischen Leiter unter Einfluss ihres eigenen Magnetfeldes. Wird durch Konstruktion diese Bewegung verringert, wird auch die übertragene Signalpräzision verbessert. Die Leiter müssen also möglichst starr miteinander verkoppelt werden.

Bei einer notwendigen Isolation der Drähte muss das isolierende Material die starre Konsistenz mitbringen, wie z.B. eben ausgehärteter Lack beim Cu-Lackdraht. Teflon oder Polyethylen PE sind schon etwas nachgiebiger, noch schlechter wäre PVC.

Die anziehende Kraft zwischen 2 parallel-stromdurchflossenen Leitern ist:

$$F = \mu_0 I^2 / 2\pi a L^2$$

wobei μ_0 die magnetische Feldkonstante von $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$, L die Länge der Drähte, a der Abstand und I der Strom ist.

Bei 200W rüttelt die Musik bis zu 10kHz mit einer Kraft von 5,5mN an dem 1m langen Draht. Dies entspricht der Erdanziehungskraft von einer Masse von 0,56g. Das sieht nach wenig aus, betrachtet man dies jedoch als Schwingung mit der entsprechenden Frequenz, kann man sich das als ein „Gribbeln“ zwischen den Fingern vorstellen. Bei der Plattenspielerabstimmung wird das als Scnelle bezeichnet. Mit Drahtlängen von Drahtspulen im mH Bereich summiert sich dieses „Gribbeln“ hörbar.

Weitere Verluste zwischen den Drähten werden dann durch die nicht idealen Isolatoreigenschaften des Lackes entstehen.

11.3.3. Das erste neue Lautsprecherkabel-Design

Fasst man die Bedingungen zusammen, kommt man wieder unterdrungen auf verdrehten Kupferlackdraht. Doch hat 1mm Lackdraht bereits bei den notwendigen 7m Kabellänge einen Widerstand von 0,31Ω hin und zurück. Die nächste Größe 1,4mm Draht würde dann nur noch 0,156Ω haben. Der Draht ist aber dann schon deutlich steifer. Noch steifer ist dann die nächste Größe 2,0mm, der würde dann schon auf nur 0,077Ω kommen. Das schaffen die kleinen vorhandenen 550W Bohrmaschinen nicht mehr, die Doppelleiterbahn wird bei 2mm auch schon ganz schön breit. Die Kabelverlegung in einem Schlauch wäre aber die praktischste Lösung, dann aber könnten gleich 2 mal 2 Leiter als Vierergruppe verlegt werden, die dann auch nicht mehr im Schlauch mit geeignetem Durchmesser verrutschen.

Nun steht aber die Frage, hält die Lackisolation die Beanspruchungen aus, wie hoch ist die Durchschlagsfestigkeit bei elektrischer Spannungsbelastung?

Diese Fragen konnten zunächst nicht geklärt werden, schneller ließe sich ein Vortest bewerkstelligen, ob die Überlegung reineres Kupfer und bessere Drahtoberfläche eine Verbesserung allein bringen.

Das 7m lange Kabel konnte nicht mit Schlauch von 1,5mm Innendurchmesser überzogen werden, die lokalen Krümmungen des Drahtes stellten nach 3m einen unüberwindlichen mechanischen Widerstand dar. Also musste der Durchmesser des Schlauches erweitert werden, auf 2mm. Aber selbst hier war der letzte Meter sehr schwergängig. Bei der Verdrehung der ummantelten Drähte verkürzte sich das Kabel nur wenige Zentimeter auf Grund der vom Platz her intensiven Anordnung der ummantelten Drähte. Die beidseitige Befestigung von 4 eingeschlauchten Kupferdrähten mit je einer Bohrmaschine hat sich zum Vorteil etabliert, da die 2. Bohrmaschine bei zu großer mechanischer Spannung nachgab, so dass sich das Kabel über die 7m gleichmäßiger verdrehte, 1 Windung auf 20cm, mehr ging nicht, war auch nicht notwendig, da sich das System selbst stabilisierte. Bei dieser Anordnung war freilich noch viel Spielraum für die Drähte, wenn sie mit Strom belastet wurden, die innere Dämpfung war aber relativ groß. Das Kabel war sogar gestalterisch gut gelungen, weil 2 Drähte mit rotem Lack genommen worden sind und 2 mit gelbem Lack. Nur waren im Moment die roten Drähte sehr selten geworden, weil die ganze Spulenindustrie

sich jetzt auf eine gelbe Phase geeinigt hatte. Laut Lieferanten wurden mal die und dann wieder mal die andere Sorte angeboten.

11.3.4. Der Klangvergleich

Der manuelle Aufwand für das Kabel war recht hoch und die Kosten für den Schlauch sind auch nicht vernachlässigbar, so dass eine klangliche Überprüfung zunächst nur in Mono erfolgte. Durch Entkontaktieren der rechten Box und der Möglichkeit, ein zweites Lautsprecherpaar am Verstärker anzuschließen, die durch 2 Relais getrennt angesteuert werden konnten, war man in der Lage durch einfaches Wechseln des Kabels an der Box und durch entsprechendes Ansteuern der Relais mit etwas Übung ein Vergleich zu ermöglichen. Natürlich war der Originalitätszuwachs über Mono immer viel weniger beeindruckend, aber die manuelle Konzentrationsfähigkeit auf die Signalpräzision war gesteigert. Nach einer Weile entspannten Hörens konnte man sich aber schon auf die alte Wiederqualität einhören, was der Adaption des Hörsinns geschuldet war. Bevor die Kabel ausgetauscht worden sind, wurde nochmals schnell das andere herausgezogen und wieder reingesteckt, die Relais gezogen und wieder geschaltet, so dass ein exakter Vergleich möglich war, da ja frisch kontaktierte Relais und Kabeleinsteckungen sich klanglich schon bemerkbar machen.

Der erste Vergleich überraschte etwas mehr als erhofft. Das neue Kabel legte eine viel bessere Durchhörbarkeit an den Tag. Die Präzision von Anschlägen hat sich deutlich erhöht. Stimmen jedoch kamen weniger interessant, fast einfarbig, die Kehlenfeuchte fehlte. So dass zunächst ungewohnt der Gesamteindruck von einer Grundton übersteigerten Darstellung kam.

Nun gut, das Kabel musste sowieso noch konditioniert werden.

Die Konditionierung erfolgte 8h lang mit der DVD-Audio FleetwoodMac „Say You Will“ über Lastwiderstände. Hiernach wurde der Klang nach einer Ruhepause von 2 Tagen heller, so dass der Unterschied zwischen dem alten und dem neuen Kabel geringer wurde. Man konnte aber nur von einer Verschlimmbesserung reden. Ja, was hatte man erwartet?

Die Durchhörbarkeit blieb aber deutlich besser, ebenso die Präzision der Anschläge der verschiedensten klassischen Musikinstrumente.

Aber irgendwie war das ja bekannt. Zuerst dunkel, dann unheimlich hell, dann langsam stimmig werdend.

Die Kristallstruktur des Drahtziehens musste erst durch die Elektromigration neu „stromlinienförmig“ geschaffen werden, so die analoge bildhafte Vorstellung, ob sie wahr ist, steht auf einem andern Blatt. Dazu wären metallographische Untersuchungen notwendig..

Im weiteren Betrieb bestätigte sich die Erfahrung. Schlagzeugbesen wandelten sich von einem kratzig moduliertem Rauschen in einen richtigen Besenanschlag um. Faszinierend.

Insgesamt, für alle Formen der Musik, war der Unterschied aber nicht so weltbewegend. Erfahrungsgemäß war es jedoch so, dass, wenn man im Mono bereits eindeutig Verbesserungen hörte, war der Unterschied im Stereo noch viel größer. Apropos Mono. Der Gesamteindruck mit dem alten Kabel war eben wie bekannt nur Mono, langweilig und erschläft. Nicht so das andere Kabel. Es vermochte auch Mono fast so erquickend darzustellen wie Stereo, weniger Box bezogen, eine größere Unabhängigkeit der Klangquelle von den Membranen stellte sich ein. Der Eindruck über das Gefühl erkannte den Vorteil eher als der Verstand.

Nun war es Zeit alle Kompromisse hinweg zu fegen und ein richtiges Kabel zu bauen. Nur Lack als direkte Isolation. Nur Lack? Da war es wieder, das unheimliche Gefühl.

Was sagt denn die Literatur?

11.3.4. Kleine Literaturrecherche

Dank des Internets ist heute alles leichter zu erhalten, Datenblätter, Veröffentlichungen, Beschreibungen etc. .

Die Durchbruchsspannung beträgt bei CuL mindestens 2,4kV und meistens sogar mehr als 8kV. Und das für eine Lackdicke von 0,03...0,04mm. Erstaunlich. Erst ab 175°C ist mit einer Zerstörung zu rechnen, ab 200°C mit einer Erweichung, ab 370°C kann dann verzinnt werden. Die Bruchdehnung beträgt 25%. Die Fehlerzahl ist weniger als 25 auf 30m und 100V. Spezifischer Widerstand 0,0171Ωmm²/m. Bleistifhärte 4H. Lösemittelbeständigkeit bis 3-5H. Polyurethan oder Polyesterimid. Wahrscheinlich ist der helle Draht Polyurethan, das rote Polyesterimid.

Theoretisch musste also ein Kabel mit vier 1,466mm CuL machbar sein.

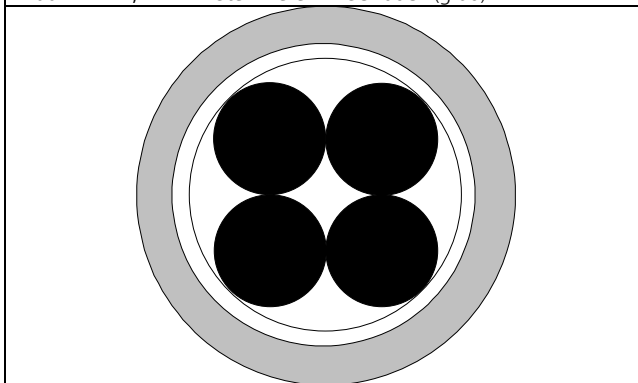
Welche Nachteile erkaufte man sich bei der 4er Anordnung für den geringeren Widerstand gegenüber dem „solid core“ „twisted pair“? In [5] stand ein Artikel aus dem Telecom-Labor im Internet zum Thema „Leitungswellen vom Lecher-Typ“. Dort hieß es zur Energieübertragung: „Bei niedrigen Frequenzen hat die Paralleldrahtleitung sogar Vorteile gegenüber der Koaxialleitung, nämlich geringere Dämpfung und niedrigere Kosten.“ Und weiter: „Durch ein Verdrillen von zwei isolierten Leitungen lässt sich ein Schutz gegen magnetische Störfelder herstellen; außerdem verringert man damit das Außenfeld der Zweidrahtleitung. Im Fernmeldebereich ist die in Bild 4-1c dargestellte symmetrische Vierdrahtleitung (Sternvierer) im Einsatz, die eine höhere Übersprechdämpfung und damit kleinere Nebensprechkopplung bewirkt. Mehrere dieser Sternvierer können zu einem Fernmeldekabel gehören. Diese versilbten Sternvierer, die aus zwei gekreuzten Paralleldrahtleitungen aufgebaut sind, werden bis zu Frequenzen von ca. 550 kHz verwendet.“

Aha, der sogenannte Sternvierer war also ein alter Hut und gut bewährt bis 500kHz. Na mehr war auch nicht nötig. Woanders hieß der Sternvierer „Twisted Quad“. Der Sternvierer sollte also eine noch niedrigere Induktivität haben. Der Draht hat mit Strom ein ringförmiges Magnetfeld um sich gewickelt, wenn jetzt der Draht auch noch spiralförmig gewickelt ist, dann steht dieser Magnetfeldvektor senkrecht auf dem des anderen. Da der Magnetfeldvektor senkrecht auf dem Stromvektor steht, müssten sich die Felder abschwächen, was dann auch mit niedrigerem Außenfeld bezeichnet wurde. Zwei relativ nahe beieinander liegende Leitungen, wie es sich leider nicht in der vorhandenen Situation vermeiden ließ, stören sich dann weniger.

11.3.5. Messtechnische Überprüfung eines Sternvierers

Es wurden von einem INTERTECHNIK 1,4mm CuL Draht von einer 1,2mH Spule abgewickelt und dabei bereits gerade gebogen. Die Drähte mussten nun so angeordnet werden, dass sie parallel verliefen. Dazu wurden von einem Teflonschlauch mit Innendurchmesser 3,0mm (Außen 5mm) einige 2...3mm breite Ringe geschnitten und über die Drähte geschoben, so dass alle 5cm bis 10cm ein Ring saß und die Drähte parallelisierte. Die Enden wurden an 2 Messingplatten gelötet und das andere Ende mit einem 4,00ohm Caddock MP2060 Lastwiderstand abgeschlossen. Es gab immer kleine Probleme bei der Messwertbildung, wenn der Messwiderstand sehr klein war. In der Realität liegen ja auch Lautsprecherimpedanzen an. Der Caddock war z.Z. der linearste 4Ω Widerstand, der zur Verfügung stand. Dann wurde eine Impedanz-Phasen-Kennlinie von 20Hz bis 200kHz an dem Hewlett Packard LCR METER HP4284A nach der manuellen Kalibrierung aufgenommen. Hiernach wurden die Ringe abgestreift und 2 weitere Drähte abgewickelt. Nun musste ein passender Durchmesser gefunden werden, um alle 4 Drähte stabil anzuordnen. Es gelang mit einem Schlauch Innendurchmesser 4,0mm. Bei 5mm würden die Drähte nicht mehr in ihrer Zuordnung fixiert werden können.

Abb.4: 4 x 1,466mm Sternvierer im Schlauch (grau) 4mm



Über die 4 Drähte wurden wieder Ringe geschoben. Diese wurden durch die lokalen Überkrümmungen der Drähte in ihrer Lage fixiert. Der Abstand der Drähte war somit nicht immer 0. Über Kreuzverschaltung wurden wieder die Messingplatten für den

Messbrückenkontakt und der Lastwiderstand angelötet. Die Messingplatten wurden vor jeder Messung und Kalibrierung täglich einmal mit Glasfaserstift gereinigt. Diesmal waren 2 CuL-Anschlussdrähte von jeweils 1,5cm Länge erforderlich, vorher waren es nur 1cm.

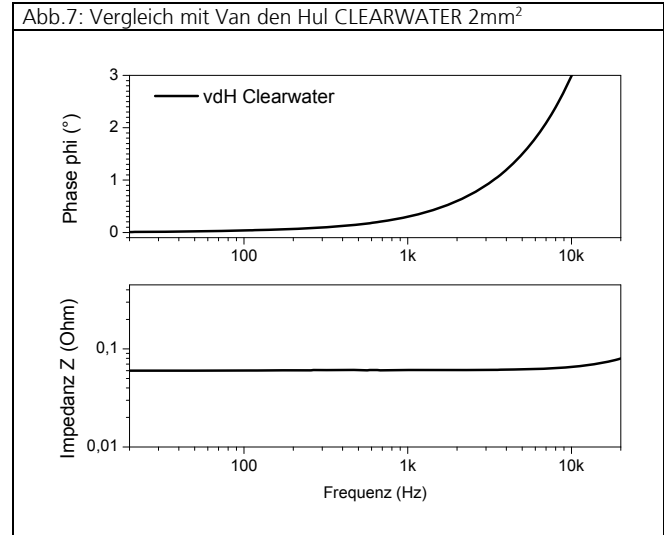
Nach der erneuten Vermessung musste der Widerstand abgelötet werden und beide Seiten wurden mit Textiklebeband 1cm breit umwickelt, damit die Backen der Bohrmaschinen die Drähte nicht beschädigen. Dann wurden die Drähte verdreht, 1 Windung auf 2cm Länge. Die Klebebänder wurden entfernt. Der Rest musste mit Alkohol entfernt werden. Die Messung wurde später an der Hochfrequenz-Messbrücke HP4285A 75kHz bis 30MHz nach erneuter Kalibrierung wiederholt, um so die HF-Tauglichkeit kennenzulernen.

Die Zusammenstellung der Messkurven zeigte ähnliche Unterschiede wie zwischen den Widerständen Caddock und Vishay. Dabei wurden die verkürzten Zentimeter proportional auf die Kurve aufgeschlagen. Die Literatur hatte recht. Der Vierpol hatte noch weniger Induktivitätsbelag als der Zweipol (Abb.5). Eine weitere Absenkung der Induktivität geschieht durch die Verseilung bzw. Verdrehung, wenn auch nicht mehr so stark, sicherlich mehr bei weiterer Verdrehung. Die Impedanz und Phase des vorher im DUT genau vermessenen Caddock MP2060 4Ω wurde von der Messung subtrahiert, da das Impedanzmodell ein seriell war. Durch ein längeres Kabel vergrößert sich natürlich Impedanz und Phase entsprechend.

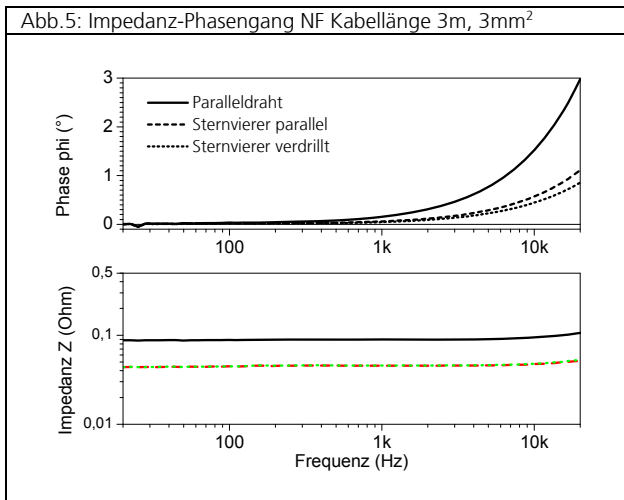
In [3] wurde von Impedanzdiagrammen gesprochen, die hier dargestellt wurden. Aber die Impedanz änderte sich nur wenig, nur die Phase ähnelt den Diagrammen in [3]. Dort wurde noch der serielle Widerstand und die serielle Induktivität genannt, das ist R_s und L_s . L_s ist nur der komplexe Teil der Impedanz, R_s , woanders als Wirkwiderstand bezeichnet, ist der Realteil. Dieser Zusammenhang wurde in Abb.6 dargestellt. Hier wurde aber die Phasenänderung nicht sichtbar.

Die serielle Induktivität wird mit wachsender Verdrehung kleiner. Ob es eine Zahl gibt, wo die L_s aufgehoben wird? Dazu wären weitere Untersuchungen notwendig.

Vor Jahren wurde ein van den Hul Kabel weggelegt, weil es einen extrem lästigen grellen und diffusen Klang ergab. Es handelte sich um Kabel aus feiner silberplattierter Litze einem Querschnitt von 2mm² mit Steg. In Abb.7 wurden die analog durchgeführten Messungen dargestellt.

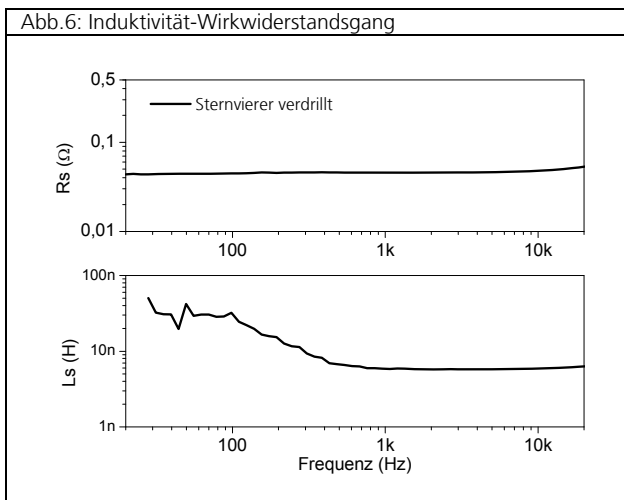


Impedanzmessungen sind die eine Seite, doch darf man die elektromotorischen Kleineffekte nicht vernachlässigen. In [3] z.B. wurde noch notiert: „Je dünner die Litzen, desto stärker werden sie, mikroskopisch betrachtet, durch die sich bei wechselnden Stromfluss ändernden magnetischen Kräfte gegeneinander bewegt. Rigide Konstruktionen unterbinden diesen klangschädlichen Effekt.“ Die Bewegungen führen nicht nur zu Leitungsverlusten sondern die Impulse werden auch diffuser, da Litzenoberflächen meist verunreinigt sind damit verlustbehaftete Kapazitäten darstellen.



11.3.6. Aufbau eines Lautsprecherkabel mit optimalem Design
Auf einer 1,2mH Spule mit 1,4mm CuL befinden sich der Erfahrung nach 28m Draht. Also genug Draht für ein Testkabel, sowohl in Rot als auch in Gelb. Die 28m haben laut Intertechnik 0,30ohm DC Widerstand, was 0,0165Ωmm²/m für den spezifischen Widerstand ergeben würde, eigentlich sehr gut.

Der Kabelaufbau erfolgte analog dem Messkabel. Allerdings ergaben sich mehr gestörte Kabelenden, da auf Grund der größeren Länge, die einwirkenden Kräfte stärker waren. So wurden die gestörten Enden mit einer Metallsäge abgetrennt. Die Verdrehung verdichtete den Sternviererdurchmesser soweit, das die Ringe von allein wieder herunterrutschten. Dann konnte der Schutzschlauch 4mm x 0,5m übergeschoben werden.



Wenn die Windungszahl zu gering war, wurde die Reibung des Schlauches zu groß. Zum Schluss wurden die Enden auseinander gebogen, parallelisiert und der Lack mit einer frischen Teppichmesser Klinge entfernt. Als Kontakte wurden in Kreuzverschaltung mit 4mm MC-Banana verlötet, nachdem die Plastehüllen aufgesteckt worden waren. Die anderen Kontakte waren wieder die 2mm Golddraht-L-Glieder, die im Klemmkontaktbereich flachgehämmert worden waren.

Dann wurde es spannend. Ist der Lack irgendwo verletzt worden? Es wurde der Widerstand gemessen, zwischen den Polen und von Pol zu Pol. Die 7m hatten einen Widerstand von $< 0,1\Omega$. Zwischen den Polen betrug er $> 10\text{Mohm}$. Die Abb.8 veranschaulicht ein Kabelabschnitt. Bei dieser Krümmung der Drähte kam es noch nicht zu einer unter dem Mikroskop sichtbaren Rauigkeit, die Lackrisse anzeigt. Das geschieht erst bei einer 3-fachen Wicklungsdichte. Selbst dies wäre nicht kritisch geworden, denn der Lack riss nur außen, innen wurde er gestaut, so dass kein primärer Kurzschluss zu befürchten war. Eine größere Wicklungsdichte wäre geschützt, wenn das Drahtgefüge in ein elastisches Schaumpolymer mit Schlauch eingespritzt wäre.

11.3.7. Klangquercheck

Am Verstärker wurde zunächst das OBI Vierpolkabel vom Ausgang A entfernt und dafür das alte Sternviererdesign SV1 mit der lockeren Wicklung, wo jede einzelne Ader mit einem 2mm Schlauch überzogen wurde, angeklemt. Am Ausgang B wurde das neue hochdichte Sternviererdesign SV2 befestigt. Es folgte ein erstes Probehören des Titels 5 von Cara Dillon. Es war das gleiche Verhalten wie zuvor (11.2.3.). Wie konnte das sein, sollte das Kabel nochmals soviel besser sein? Das SV1 war eine Woche vorher besser gewesen als das OBI, seitdem war nichts passiert. Waren die Relais des Verstärkers schuld? Beim Zuschalten der Relais der Ausgänge war über die Lautsprecher beim A ein „Fatsch“ zu hören, beim B nur ein trockenes dumpfes „Tock“. Die Kontakte gaben beim Aufeinandertreffen unterschiedliche Geräusche ab, es könnte sein, dass die Oberfläche der Kontakte unterschiedlich ist.

Die Kabel wurden jetzt in den Anschlüssen vertauscht, also war SV2 dann an A. Nun zeigte sich, dass der Unterschied nur noch sehr klein war und nur noch beim aufmerksamen Hören konnten die Differenzen formuliert werden, aber in summa summarum war das neue Design ein systematischen Hauch besser. Wenn man die Vorteile zensiert, kommen bei Mittelung der Ausgangsposition eine „1“ für das SV2 heraus, das SV1 erhielt eine „2“, das OBI Vierpol eine „4“.

Die Stimme der Cara kam mit SV2 an A noch realistischer aber kühler und führte zu weniger Gänsehaut, es war so ein Effekt wie mit und ohne den leicht magnetischen Krokodilklemmen, wobei SV1 mit Krokodilklemmen symbolisiert werden könnte. Lokalisiert werden konnte die Stimme bei SV2 direkt mit der Membran, bei SV1 war ein gewisser Hof zu orten, das OBI hatte eine ganz große Aura ohne Natürlichkeit.

Bei der Scheibe FleetwoodMac „The Dance“ Titel 1 wurde der Bass von OBI über SV1 nach SV2 immer härter, mit dem OBI klang dieser gegen SV2 richtig weich und unkonturiert. Die Stimmen traten zwar beim SV1 mehr heraus, das SV2 vermied die Herausstellung brachte sie aber natürlicher.

Der Titel 13 von Eric Claptons „Unplugged“ wurde mit dem SV2 einfach klarer dargestellt.

In der Klassik-CD 3 HiFi Visionen wurden im Track 13 alte Violinen einzeln vorgestellt. Die Violinen erhielten mit SV2 weniger Obertöne und klangen mehr nach Holz.

Ein sehr wichtiges Kriterium ist immer der Anschlag der Klanghölzer, wie in der Stereo Hörtest CD II Titel 12. Vom OBI zum SV1 wurden die Klanghölzer kleiner und klangen farblos, das SV2 vergrößerte sie wieder mehr in Richtung Klanghölzer. Ebenso die Mundharmonika von Neil Young „Unplugged“ Titel 1, wobei das OBI die Harmonika aber völlig diffus zeigte. Die SACD von Norah Jones „come away...“ Titel 5 ließ wiederum keinen Unterschied vernehmen. Das SV2 begrenzte die Bassvoluminität bei der FleetwoodMc „Say You Will“ Titel 3, ließ den Bass aber härter erscheinen und darüber hinaus waren viel mehr ganz hohe klare Spitzen zu hören.

Dieser Effekt wurde als Anlass genommen, die Ausgänge A und B des Verstärkers zu vergleichen. Es zeigte sich, dass der obere Ausgang A mehr typisch „ferromagnetische“ Verzerrungen produzierte. Ein Blick in den Verstärker bestätigte den Verdacht. Die Ausgangsbuchsen waren über Blechlamellen auf die Platine gelötet.

Die Lamellen für die oberen waren doppelt so lang wie die der unteren. Natürlich waren die Lamellen mit vor Korrosion schützenden Nickel versehen. Verstärker ohne solchen Nickelzuführungen mit direkten Cu-Drahtzuführungen sollten schon deshalb besser sein. Fortan musste der Vergleich nur an B gemacht werden, was umständliches Kabelschrauben nach sich zog.

11.3.8. Konditionierung und erneute Hörprobe
Konditionierung 6h über 50ohm Hochlastwiderstand auf Al-Blech bei -31dB (10W), 1 Tag später bei -27dB, ebenfalls 6h.

Die Wiederholung des Klangvergleichs erbrachte einige kleine und eine große Änderung für das SV2 mit sich. Die Stimme der Cara Dillon klang jetzt nicht nur natürlicher sondern lebendiger, das Piano kam druckvoller. Gleiches ließ sich bei Celine Dion vernehmen. Der Gesang bei FleetwoodMac „The Dance“ Titel 1 schien nun deutlich differenzierter zu sein. Die Mundharmonika von Neil Young „Unplugged“ zeigte nicht mehr so viele Obertonvibrationen, war nicht so gleißend. Der Gitarrenanriss verriet mehr vom Klangkörper. Nur die SACD der Norah Jones machte es außerordentlich schwer Fortschritte in den Instrumenten sowie Stimme deutlich nachzuvollziehen, was eigentlich nicht wunderte.

11.3.9. Anfertigung des 2.Kabels, Konditionierung und Hörprüfung

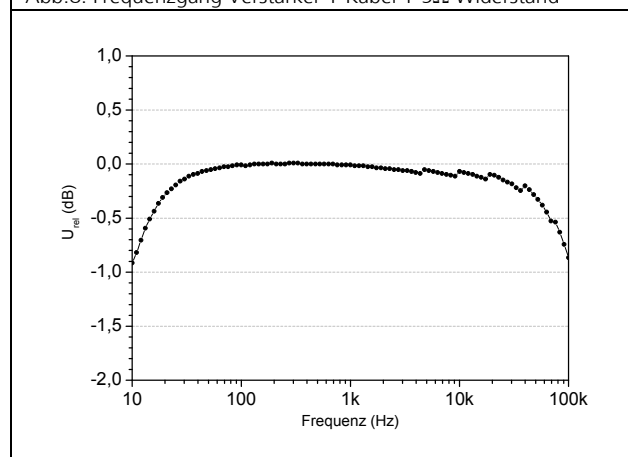
Da das zweite Kabel noch länger werden musste, sollte die Wicklungsdichte erhöht werden, damit gemäß der praktischen Messergebnisse der Induktivitätsbelag etwa gleich hoch wurde.

Die Verwendung der Ringe war einfach genial. Durch Geduld und ruhiges Arbeiten konnte die angepeilte Wicklungsdichte wirklich realisiert werden. Es zeigte sich, dass ab einer Wicklungsdichte von 1 auf 2,5cm der Sternvierer so dicht wurde, dass der Schlauch im Ganzen bequem über das Kabel geschoben werden konnte. Das war wirklich erstaunlich, theoretisch aber nicht, siehe Abb.4.

11.3.10. Überprüfung Frequenzgang am Kabelausgang

Das beste Kabel taugt wenig, wenn nicht der Frequenzgang am Kabelende mit dem Lautsprecher typischen Lastwiderstand ausreichend linear bis 40kHz ist, wenn der NoFerro 12 bis 30kHz spielt. Als Lastwiderstand wurde ein Eigenbauwiderstand mit 4.88Ω gewählt, was dem durchschnittlichen realen Widerstand der Box entspricht. Überraschend und erfreulich ist, dass der Frequenzgang besser kaum sein kann.

Abb.8: Frequenzgang Verstärker + Kabel + 5Ω Widerstand



11.4. Widerstände im Eigenbau

Inzwischen wurden dem LTO 30 entsprechende Widerstände bei OHMITE entdeckt: TAH20 und TA series. Leider waren weder von OHMITE noch von VISHAY die Widerstände in allen Werten und zu jeder Zeit von den autorisierten Distributoren in Deutschland und Europa verfügbar. Darüber hinaus waren sie in Stückzahlen < 5 nicht erwerbbar.

Außerdem dürfte es sowieso ziemlich aussichtslos sein, Widerstände handelsüblich zu erhalten, die absolut frei von ferromagnetischen Ni-Schichten waren. Welche Lösung wäre machbar? Man müsste die Vernickelung der Anschlusszuführungen und Kontakte an den

Widerstandsbahnen umgehen können. Außerdem wäre ein homogener Phasenübergang ohne Verschweißungen oder Bondungen wünschenswert. Gibt es wechlötbare Widerstandsdrähte, die nichtmagnetisierbar sind?

Die Antwort lautete Konstantandraht, mit 28, 68 oder 100Ω/m oder MML Widerstandsdraht mit 1600Ω/m. Letzterer Draht wurde als ISAOHM ausgewiesen und kam von der ISABELLENHÜTTE, die ja bereits bekannt war. Bei [2] stand, dass die ISAOHM Legierung unmagnetisch war und aus NiCr20Al3.5Si1 bestand. Dieser konnte weichgelötet werden. Zum letzteren wurde empfohlen, den Draht aufzurauchen und mit Blei-freien Lot zu verzinnen. Im Nachhinein hat sich aber die Verzinnung des ISAOHM als nicht praktikierbar erwiesen. Das Konstantan trägt den Markenname ISOTAN und besteht aus CuNi44, was wirklich gut wechlötbar war, auch mit bleihaltigen Loten. Die Konstantan-Drähte waren verlackt, und sollten mit Lack verlötbar sein. Das nun im unmagnetische ISOTAN 44% Ni enthalten war, ist eine Überraschung gewesen und es entstand die Frage, ob durch Elektromigration eine Phasentrennung bis zu Ni-Clustern erfolgen konnte. Aber es gab dazu keine wissenschaftlichen Arbeiten.

11.4.1. Aufbau

Nach einigen Versuchen mit verschiedenen Verbindungspolymeren und Drahtführungen wurde eine Methode entwickelt, die es erlaubte die Widerstände in reproduzierbarer Qualität und einem vorausschaubareren Widerstandswert aufzubauen und langzeitstabil zu gestalten. Der Aufbau sollte bezogen auf eine Widergabe bis 100kHz möglichst ideal sein.

Eine dünne Aluminiumoxid-Keramikplatte wurde mit dem Diamantschleifer so bearbeitet, dass Nasen und Einkerbungen entstanden. Der Draht wurde um die Nasen gewickelt und über die Kerben geführt, dabei wurde der Draht verdreht. Die Nasenwicklungen wurden mit dem Skalpell angeschabt, so dass das Lot einen homogenen Netzstart hatte, s. Abb.9. Als Lot wurde, nicht nur hier, immer Sn60Pb40 verwendet, da die Anlösung von Cu an der Oberfläche immer zu einem innigeren Phasenübergang führte als wenn bereits das Lot mit Cu gesättigt war. Diese Methode der Phasenkontaktierung hat sich bereits früher in anderen Bereichen bewährt. Hier lagen auch die Schwächen mancher industriell hergestellter Widerstandskontaktierungen.



Abb.9: Widerstand vor Verkappung

Nach Anlöten der vorverzinneten Cu-Lackdrahtstücken wurde das Teil in Keramikkleber eingebettet. Dazu wurde auf eine größere Keramikplatte der Kleber aufgebracht, dann die Platte mit dem Draht, darüber wieder Kleber und abschließend wieder eine größere Platte. Die Dosierung des thixotropen Klebers erforderte einige Übung. Alle 3 Teile wurden zusammen gedrückt, so dass der überschüssige Kleber herausquoll, der dann entfernt wurde. Eine abschließende Temperung nach der Aushärtung verfestigte das System soweit, dass es selbst mit dem Diamantschleifer schwer war, das Bauteil aufzutrennen, nicht ohne mindestens 2 Schleifscheiben abzuschreiben.

Dadurch, dass die angelöteten Cu-Lackdrahtstücke kopfseitig eingebettet worden sind und der Kleber aus mikroskopischen harten Teilchen bestand, überstanden diese Verbindungen auch die Lötungen der Widerstände mit den anderen Weichenbauteilen ohne dass sich der Widerstandswert änderte. Die elektrische Belastbarkeit konnte mit der Größe der Keramikplatten eingestellt werden. Wurde

allerdings eine Belastbarkeit von mehr als 5W erforderlich, wurde mit Wärmeleitpaste eine größere Platte bis zu 5cm x 5cm aufgeklebt.

11.4.2. Impedanzmessungen

Natürlich ist es wichtig zu wissen, wie das Impedanzverhalten der einzelnen Designs aussieht und zu vergleichen mit den professionellen Widerständen. Bisher wurden Widerstände so gemessen, dass die Anschlusslängen minimal blieben, um so das Potenzial der Technologie besser beurteilen zu können. Leider ist das häufig unpraktisch, 3 bis 5mm Lotabstand sind praktikabel, aber nur an den professionellen Bauelementen. In der Realität der Frequenzweichen hat man es mit Direktverdrahtung zu tun, wo große Bauelemente verdrahtet werden müssen, da sind Drahtlängen von einigen Zentimetern üblich.

Je länger die Drahtlänge, desto größer ist die Induktivität. Aber die reine Induktivität eines alleinstehendes Drahtes in ausreichender Entfernung zum nächsten metallischen Leiter führte ja noch nicht zu hörbaren Verzerrungen. Deshalb wurde jetzt in den Messungen die Anschlusslänge von 12mm eingeführt. Verglichen wurden wieder Impedanz und Phase mit der Hochfrequenzmessbrücke von HP. Als Referenz diente diesmal der relativ kleine Mills MRA05. Durch die Verlängerung der Anschlusslänge des MRA05 verringert sich die Widerstandskonstanz um 1 Oktave. Ohne Verdrehung ist der Eigenbau nochmals um eine 1 Oktave schlechter als der MRA mit seiner Ayrton-Perry Wicklung. Im Gegensatz zum Kabel wirkt die Verdrehung des Widerstandsdrahtes sehr effektiv als Methode zur Verringerung der Induktivität, wie in Abb.10 dargestellt ist.

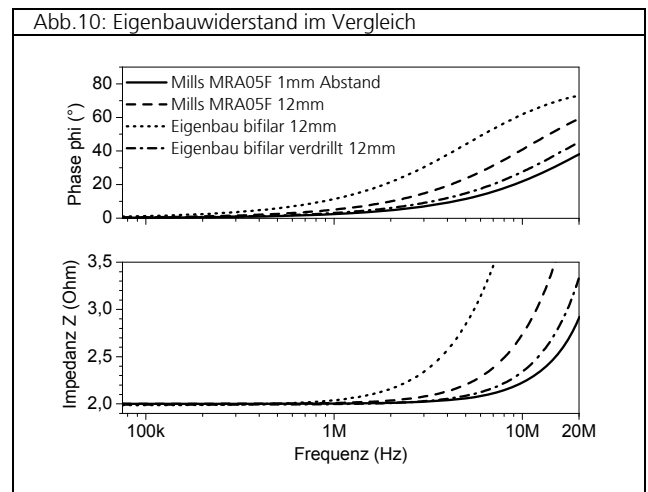


Abb.10: Eigenbauwiderstand im Vergleich

Zusätzlich zur Stabilisierung des Widerstandsdrahtes durch die Verdrehung sollte die Steifheit des Keramikklebers die Unverrückbarkeit der Widerstandsbahnen gewährleisten. Außerdem erfolgte die Umhüllung des verdrehten Drahtes mit dem Kleber viel lückenfreier als die nebeneinander bifilar geführten Drähte auf der Keramik.

11.4.3. Klangvergleich

In der rechten Box befanden sich 2 Widerstände mit je 2.0Ω in einem T-Glied seriell zum Hochtöner. Der erste 2.0Ω Widerstand wurde ausgelötet und dafür 2 verzinnte Kupferlackdrahtstücken eingelötet. Die Drahtstücken wurden entlackt, verzinkt und gebogen, dass eine blank verzinnte Drahtöse entstand, in die ein Widerstandsanschluss hineingeklemmt werden konnte. Alle anderen Befestigungsarten waren bisher nur eine halbe Sachen. Vergoldete Krokodilklemmen hatten die ferromagnetische Zwischenschicht Nickel, die Verzerrungen verursachte, Lüsterklemmen gingen schon gar nicht und Kunststoffklemmen hatten nicht den nötigen stabilen Halt gebracht.

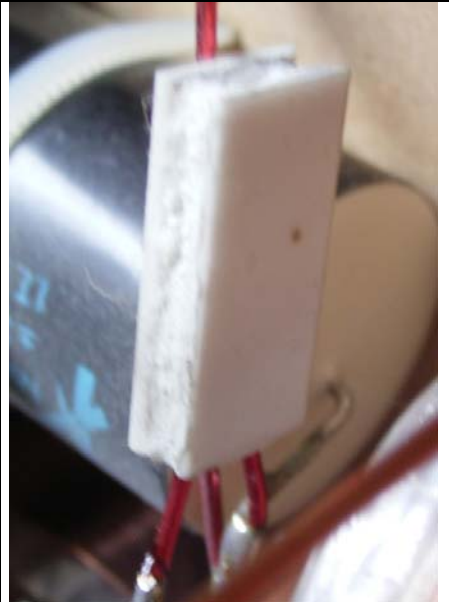
Nun wurden die verschiedenen Widerstände „durchgehört“: Caddock MP2060, LTO30 (2,1Ω -eine -5% Version), MILLS MRA05 und die 2 Eigenbauten, bifilar und bifilar verdreht. Mit einem Widerstand konnte man natürlich nur MONO hören, aber die Übung war ja bereits da und ausgewählte Musikstücke auch. Um den Vergleich mit dem vorherigen Kabeltest zu haben, der ja links

stattgefunden hat, wurden die Cynch-Kabel am Verstärker vertauscht. Außerdem wurde die rechte Box gewählt, da die Rückseite für den Austausch der Teile bequemer zugänglich war.

Die Verringerung der Verzerrungen erfolgte immer in der gleichen Weise: i) Stimmen wurden natürlicher, geschmeidiger und glatter, der Eindruck Lebendigkeit in Form von „Gänsehaut“ bzw. „Erotik“ geringer, die Umgebung der Stimmen trockener und ähnelte mehr einer nüchternen Studioatmosphäre. ii) Celli und vor allem Kontrabässe erhielten immer mehr Kontur und ihre „scheinbare Sichtbreite“ wurde immer schmaler. Dieses Verhalten stimmt mit den Äußerungen von [30] überein, wenn dort Beschreibungen von weniger Verzerrungen notiert wurden. Komplexe Klangereignisse wurden durchhörbarer, Instrumentenquellen wurden stärker lokalisierbar. Die Tiefenstaffelung dehnte sich stärker nach hinten aus. Brillante Instrumente wie Mundharmonika und Trompeten verloren immer mehr ihre Schärfe zeigten besser ihre zeitlich gestaffelten Vibrationen.

Allgemein konnte nun der Caddock MP2060 schnell als der schlechteste erkannt werden. Der VISHAY LTO30 zeigte häufig die natürlicheren Klangnuancen, während der MILLS MRA05 Instrumente klarer herausstellte. Beide waren aber meist schlechter als der einfache bifilare Eigenbautyp, wobei der MRA05 aber bei bestimmten Szenen noch etwas klarer wirkte. Der bifilar verdrihlte Typ jedoch konnte in jedem Klangbeispiel sofort als der erkannt werden, der am wenigsten „das Fenster zur Realität“ bezogen auf das Einschwingen natürlicher Musikinstrumente verfälschte.

Abb.11: Eigenbauwiderstand in der Weiche



Obwohl die Restmagnetisierbarkeit insbesondere des LTO30 gerade noch nachgewiesen werden konnte, war der Unterschied zum bifilar verdrihlten Eigenbau doch so deutlich. Wie konnte das sein?

Eine Zerlegung des LTO30 offenbarte mechanisch-schwingungstechnische Schwächen und relativ unsaubere Phasenübergänge. Unter der Epoxidverklebung befand sich eine graue elastische Abdeckmasse. Die Kontaktierung der Anschlussbeine auf der Keramik war nicht homogen schlüssig. Nun wurden die Widerstände eingelötet (ohne die zusätzlichen Zuführungen). Es zeigte sich, dass sich der Hochstromkonditionierungsvorgang auf 1-2 Tage beschränkte, genau so lange wie das reine Lotwiederaufschmelzen. Damit bestätigte sich der Eindruck, dass je weniger ferromagnetisches Material beteiligt war, desto geringer war die Zeit bis die Wiedergabe konstant wurde. Anschließend wurden alle Widerstände ersetzt. Die Wiedergabe in Stereo „verdreifachte“ den Originalitätsfortschritt.

11.5. Stecker und Buchsen

Neugierig geworden aus den Erfahrungen mit den vergoldeten Krokodilklemmen, die ferromagnetisch waren und die einfach aufgezwickelt auf den Zuführungsdraht, der seriell zum Hochtöner führte, eine hörbare Veränderung hervorgerufen haben, wurden

sämtliche verfügbaren Steckverbindungen auf Ferromagnetismus überprüft. Das Ergebnis war erschütternd. Die bisher verwendeten vergoldeten 4mm MC (MULTI CONTACT) Banana-Steckverbinder haben wie die meisten anderen vergoldeten Verbinder eine Nickelsubstratschicht. Diese ist so stark, dass Magnete die auf dem Tisch liegenden Bananas zum Rollen bewegen. Das entspricht der Wirkung der aufgehängten vernickelten Widerstände. Aber auch die gleichermaßen bisher verwendeten vergoldeten Cynchstecker mit minimaler Metallmenge waren leicht ferromagnetisch. Das waren die Stecker, mit denen die verdrihten 0,5mm Kupferlackdrähte im Teflonschlauch ausgestattet waren und bei Vergleichsvorführungen für Überraschung gesorgt haben.

Nun mussten Steckverbinder gefunden werden, die kein ferromagnetisches Material mehr enthielten. Bei den vorhandenen verdrihten Kupferdrähten sollten sie nur die Leitung möglichst verlustfrei übernehmen, fortführen und in einen neuen Leiter kontaktieren. Idealerweise sollten die stabilen Leiter möglichst drahtförmig bleiben, d.h. ohne Schirmung, die schwer beherrschbare Litzen oder Folien mit sich brachten, und nicht zuletzt ohne überflüssige Massen auskommen, die Wirbelstromverzerrungen und -verluste verursachen. Dazu müssten die Leiter einfach stabil in Kunststoff eingebettet sein. Die Kontaktierung muss über Gold erfolgen, dem leitfähigsten der wahren Edelmetalle, das es gibt. Silber ist eigentlich kein richtiges Edelmetall, denn es reagiert an der Luft mit H_2S zu dem Halbleiter Ag_2S an der Oberfläche, womit die ganze HF Leitfähigkeit drastisch schlechter wird.

Allgemein bekannt war jedoch bisher, dass eine nickelfreie Vergoldung sehr teuer ist und kaum Lösungen angeboten werden. Allerdings mit 3 Ausnahmen [8,9,10]. Aber nur [8] hatte die puristischen Ausführungen vom Materialstandpunkt aus angeboten. Als Leiter wurde vergoldetes Kupfer-Tellur ausgewiesen und sonst nur Kunststoff genutzt, keine überflüssigen nichtsignalführenden (isolierten) Metallteile.

Später wurden WBT 0735 aus dem Katalog im Internet geprüft. Dort erfolgte die Beschreibung mit „24 Karat Mehrschichtvergoldung (nickelfrei)“ und im Datenblatt „WBT-24-Karat-Vergoldung: nickelfrei, Cu 11 μm Duplex, Pd 4 μm , Au 0,3 μm Duplex, nicht-magnetisch“. Leider wurden diese Polklemmen auch zum Rollen gebracht. So wie die WBT enttäuschten auch die Mundorf Polklemmen, reinstes Kupfer, vergoldet. Alle Bestandteile des Polklemmensatzes waren ferromagnetisch. Nur die Hohlbananas MCONBPG zeigten keinerlei Wirkung unter der Nähe der Neodymmagnete.

Die C14500 der [8] ist bekannteste Standardlegierung der ASTM der tellurium-copper Bronze. Sie enthält außer Kupfer 0.55% Tellur und 0.008% Phosphor als Sauerstoffgettermaterial. Die Legierung wird häufig als Steck- oder Buchsenmaterial für sehr hochwertige elektrische Eich- und Kalibriergeräte benutzt und hat 3 mal höhere Leitfähigkeit als die vergoldeten Standardmessingverbinder wie sie von MC (s.auch [2]) gebaut werden. Von [8] wurden in der Folgezeit auch Cynch-Stecker mit Silber als Kontaktoberfläche angeboten, das Silber wurde durch ein bestimmtes Polymer geschützt und soll durch die Reibung vom Silber entfernt werden. Aus Erfahrung ist dies aber eine rein theoretische Entscheidung. Abgeriebenes Polymer konnte unsichere Kontaktwiderstände hervorrufen, von der seitlichen Eindiffusion der Schwefelverbindungen ganz zu schweigen.

11.5.1. Eichmann Bulletplug und seine Klangwirkung

Die Prüfung der Cynch-Stecker BulletPlug mit starken Neodymmagneten bestätigte, dass keinerlei ferromagnetisches Material im Spiel war. Die Querschnittskizze in [8] dokumentiert die ideale Fortführung des verdrihten Kupferlackdrahtes bei Minimierung des Metallanteiles. Die Hülsen bestehen auch aus Kunststoff mit einer Madenschraube. Wahrscheinlich um das Koaxialkabel zu arretieren. Die Madenschraube wurde als potenzielle Quelle für Wirbelstromverzerrungen entfernt.

Ein Paar alter gleichlanger und gleichverdrihter Cinchkabeldrähte wurden von ihren vergoldeten Cinchsteckern befreit und neu mit den Bulletplugs verlötet.

Danach sollten die alten mit den neuen Kabeln an Hand von inzwischen erprobten Musikstücken verglichen werden. Aber die Eichmann Stecker konnten nur mit großer Kraft auf die Geräte Cynch-Buchsen gesteckt werden. Ein schneller Kabelwechsel war unmöglich. Jetzt mussten erst die Hülseninnenkanten mit einer Halbrundschliffelfeile angeschliffen werden. Kein leichtes Unterfangen.

Danach wurde immer ein Stück von einer Minute angespielt und folgend die beiden Kabel getauscht.

Cara Dillon's Stimme war jetzt diffuser, aber das Piano im Track 5 zeigte nach starken Anschlägen ein konturierteres längeres Ausschwingen mit feinen Schwebungen. Starke Anschläge zeigen „sichtbare“ Schwebungen in den Saiten, wo sich die Wellenbäuche longitudinal bewegen. Ähnliches kann über die Gestaltung der bisher recht konturlosen Bassformationen in Celine Dion's Track 6 berichtet werden, wo erstmalig ein akustischer Bass als solcher erkennbar wurde. Alles in allem hat der Bass und der Grundton an Realität gewonnen. Stimmen waren schon besser gewesen. Aber die Kabel waren ja noch nicht konditioniert.

Um das ganze Prozedere abzukürzen, wurden kurzerhand die 2 blechbasierenden Hochlastwiderstände $1.8\Omega+2.2\Omega$, die eigentlich für Frequenzweichen der Lautsprecher gebaut wurden, aufgetrennt und mit Cynch-Buchsen verlötet. Dann wurden die Kabel angesteckt und wieder mit kurzgeschlossenen Cynch-Buchsen kontaktiert. Es folgte eine 2 stündige Stromkonditionierung mit ca. 50W. Nach der obligatorischen Ruhepause und den üblichen Warmlaufen am nächsten Tag, wurde eine neue Höranalyse durchgeführt.

Cara Dillon's und Celine Dion's Stimmen waren wieder in Ordnung, aber mehr noch, sie waren einfach leibhaftiger. Bei FleadwoodMc's Track 1 schien die große Trommel jetzt im Bassdruck explosiver und mehr von einem Punkt aus zu schlagen und der Beifall am Anfang war realistischer, mit mehr dumpfen Aufprall der Hände und einer besseren Trennung zum helleren Klatscheffekt. Der Bass und der Grundton hatten einfach mehr Volumen. In HiFi Visions Test CD in der Kirche von Hornrat stand der Ansager in der Stille des Raumes noch deutlicher und klarer. Die Streichinstrumente ließen mehr Körper erkennen. Hintergrundgeräusche wie verlegenes Hüstel kamen jetzt richtig real herüber, auch die Ortung klappte gut. Reflexionen an den Wänden hatten ein definiertes Nachhallen. In Track 12 der Stereo TestCD 2 boten die Klanghölzer einen fast originales Einschwing- und Ausschwingverhalten an. In der Stereo CD 1 Track 14 sollten Fingerschnipser erkannt werden. Entsprechend dem Rhythmus wurden jetzt tatsächlich fast alle entdeckt, wobei die Schnipser aber immer noch nicht als Fingerschnipser richtig moduliert wurden. Die Gitarre des Herrn Clapton auf der „Unplugged“ im Track 13 konnte jetzt richtige Saiten vorweisen, mit einen definierten Andruck sowie An- und Ausschwingen. Die Mundharmonika des Neil Young klang nun echt und die Gitarre authentisch. Die Kontrabassschwingung der Norah Jones Track 5 konnte jetzt auf 15cm Breite taxiert werden.

Wegen dieses Erfolges wurden auch die Anschlüsse des Plattenspielers erneuert, mit nicht ganz so durchschlagendem Erfolg, vermutlich wegen der dort vorhanden „natürlichen“ Restverzerrungen.

11.5.2. Zum Abschluss das Eichmann CablePod nebst Bayonet Plug

Als beide Artikel von [8] ankamen, fielen sofort die Klemmbügel in den Bayonetplugs auf.

Eine Prüfung mit dem Magneten ergab, dass diese stark ferromagnetisch waren.

Kann ja sein, dass im Signalweg selbst kein magnetisierbares Material mehr liegt, aber die großen Ströme, die über die Bananas fließen, werden mit Sicherheit und auch erfahrungsgemäß Wirbelstromverzerrungen hervorrufen. Aber wurden die Stecker in Vollmetallhülsen gesteckt, erhielten diese Bügel sogar elektrischen Kontakt und wirkten stärker als die vergoldeten Krokodilklemmen. Erst nachdem diese entfernt waren, wurde nach eingehender Prüfung kein ferromagnetisches Material mehr gefunden.

Diese Bügel mussten ersetzt werden. Teflonschlauchabschnitte konnten passgerecht dort eingesteckt werden und durch ihre Rundung den nötigen Andruck gewährleisten. Bayonet Plug heißt, dass die Hülsen durch Bayonetverschluss gesteckt wurden. Die Madenschrauben wurden wiederum auch nicht gebraucht. Die Metallform auf dem Kunststoffstift konnte vor und zurück geschoben werden, hier wäre auch eine Art Bajonetsicherung angebracht.

Dann wurden die Cappelods auch näher untersucht. Und das leider auch mit Erfolg. Mutter und Reibscheiben bestanden aus einem solchen unerwünschten Material. Abgesehen von den Wirbelstrom und Induktionkurzschlusswindungen dieser ringförmigen sonst nicht kontaktierten Metalle um den Signalpfad herum würde diese einiges an Verzerrungen abliefern.

Nach Demontage von der Plastescheibe wurden die beiden getrennt in die vorhandenen Buchsenlöcher eingebaut. Die Länge der Schraubwindung war ausreichend für die 13mm MDF-Platte des

Frequenzweichenkastens. Schließlich konnten Plugs und Pods angelötet und gesteckt werden. Eine kurze Prüfung ergab ein diffuses Klangbild mit teilweisen Merkmalen ähnlich denen der Bullet Plugs.

Jetzt wurden diese Bauelemente erstmal stromformiert, wieder mit der FleadwoodMac DVD-Audio, 1h bei 10W und 3h bei 40W.

Nach dem üblichen 24h „warm up“ wurden die bekannten CD's und LP's durchgehört. Das geschah nicht ohne Grund, wurden doch in den ersten Phasen der Abhöre im Musikgeschehen Unregelmäßigkeiten erkannt, die mal da waren und mal nicht. Aber wie war nun der Klang im Standard-Abhörbetrieb, nach 20:00Uhr? Cara Dillon sang lebendiger denn je. Das Ausschwingen des Pianos nach starken Anschlägen war stark konturiert und dauerte bis zur nächsten Überdeckung an. Die Herkunft der Stimme wurde lokal sehr scharf abgegrenzt.

Die Wirkung der Stimme von Celine Dion „Lets talk about love“ entsprach dem der Vorgängerin, es gab keine „Erotik“ mehr nur noch eine feuchte Kehle. Der Einsatz des Basses nach 30s im Track 6 enttarnte jetzt die Ursache eindeutig als akustischen konturierten Bass, ob Bassgitarre oder Kontrabass war allerdings nicht zu erkennen. Die angestregteren Stimmstärken, die lauter wirken sollten, waren nicht mehr so in der Dynamik begrenzt.

Im ersten Track der FleadwoodMac „The Dance“ wirkte der Beifall sehr natürlich, hier waren erstmals wirklich der dumpfe Aufprall der Handflächen und der folgende helle Klatsch sauber aufgestaffelt und in einem realistischen Verhältnis, aber insgesamt wirkte die Abbildung noch etwas unruhig, nicht so stark lokal abgegrenzt. Die Effekinstrumentengeräusche wurden zarter abgebildet.

Wegen der leicht abgeschwächten Lautheit musste wieder der Volume-Regler um 1dB hoch gestellt werden. Der folgende Gesang war nun abermals klarer und offener. *Diese Aktion musste schon einmal durchgeführt werden. Als die Boxen mit den LTO30 Widerständen versehen worden sind und nach dem Wechsel zu den Eigenbauwiderständen, musste die Standardabhörlautstärke von -45dB auf -44dB erhöht werden, da sich die Klangbalance zu den Grundtönen hin geneigt hatte. Die Standardabhörlautstärke bei den neueren CD's ab 2002 entsprach dem natürlichem Gefühl, wie laut Gesangsstimmen ohne Verstärkung im Hörraum sein sollten. Spitzenpegel war dann 82dB. Die Abhörlautstärke der Celine Dion wurde auf -38dB gestellt. Diese CD stammte aus dem Jahre 1997.*

Die Gitarre in Eric Claptons „unplugged“ erhielt nach dem Konditionieren und der Ruhepause den eindrucksvollen Resonanzboden wieder. Die Saiten wurden scheinbar straffer, was sich als dunklere Klangbalance mit weniger hellen verzerrten Ausschwingen bemerkbar machte, jeder Griff wurde so hörbar, das wirklich der Andruck auf die Saite der Start des Einschwingens war.

In der HiFi Vision Klassik CD 3 wurden ja im Track 13 die Instrumente vorgestellt. Nun war jedes Geräusch zu hören, die von den Instrumentalisten ungewollt verursacht wurden, Hüstel, Räusperrn, Füße scharren, an den Notenständer anstoßen, Schaltpult klacken. Bei jedem Instrument wurden andere Mikrofone geöffnet, mal kam Raum dazu, mal nicht, mal waren Straßengeräusche zu hören, mal nicht. Die Geigen klangen gut nach richtigen Geigen, der Kontrabass sehr natürlich. Die Oboen wurden wirklich authentisch abgebildet. Die 17 jährige Tochter kommentierte: „Das ist ja gruselig, wenn man alles hört.“

Der Impuls des Aufeinanderschlagens der Klanghölzer ist sehr kurz und wird von den meisten Bauelementen verfälscht. Hier jedoch kam der Impuls richtig, aber die Klangfarbe war noch zu gleichförmig und zu hell. Die Klangfarbe der Fingerschnipser jedoch, besser die Klangfarbenfolge während des Impulses war noch nicht ganz richtig.

In Neil Youngs „unplugged“ kam gleich zum Anfang Beifall und Mundharmonika zum Einsatz. Die Harmonika war sehr stimmig, der Beifall differenziert und gut als solcher begutachtbar. Die Gitarre hatte noch mehr Körper.

Als letzter Test kam die SACD Norah Jones „Come away with me“ mit Track 5 dran. Die Kontrabass-„Schwingbreite“ kondensierte auf weniger als 15cm, war damit also sehr prägnant und noch mehr konturiert, aber mit genügend Tiefgang. Die Stimme war überaus angenehm. Die häufigen sanften Schlagzeugbesenanschläge, die vor dem Cynchsteckertausch überhaupt nicht zu hören waren, sondern nur als kaum moduliertes „Geraschel“, waren jetzt noch stärker und impulsiver erkennbar. Alles in allem ließ aber noch die Hochtonauflösung zu wünschen übrig. Lag es an der Softdome-Kalotte NoFerro12? Lag es an den Mischpulten oder der anderen Gerätespezies der Toningenieure?

Zur Prüfung der Initialphase der Anrisse und Anschläge wurde der Hörplatz gewechselt, 1m links und rechts, 0,7m höher oder tiefer. In den Seiten änderte sich die Ortung, bei hoch und tief jedoch änderte sich die Impulscharakteristik. Mal kam der Anschlag zeitlich besser und dafür in der Klangfarbe verfälscht, oder umgekehrt, -leider.

Es stellte sich nunmehr die Frage: Wie klingt das nun im ClassA Betrieb? Der hatte früher immer alles verschlimmbessert, wie bereits [11] feststellte, weniger impulsiv aber mehr differenzierte Höhen. Die Tests wurden in der gleiche Reihenfolge durchgeführt, wobei es jetzt möglich war (nach eingehender Prüfung), einfach durch Knopfdruck in die verschiedenen Modi zu springen, ohne dass der Verstärker ausgeschaltet werden musste.

Cara Dillon's Stimme wirkte zwar noch echt und lebendig, aber nüchtern und trocken. Das Prickelnde verschwand völlig. Dafür wurde das Piano lebendiger, echter und körperhafter. Die T- und Zischlaute ordneten sich augenblicklich aus dem Vordergrund in die Boxenfrontebene ein. Bei der Celine Dion war es nicht ganz so ernüchternd, hier war etwas Feuchte in der Kehle geblieben. Die Abbildung des Gitarrensoli in Eric Claptons Track 13 konnte nochmal verbessert werden, man konnte die unmittelbare Assoziation der schnellen Finger, die über die Saiten huschten, plastisch erleben, da die Griffe sauber platziert wurden. FleetwoodMac's Live CD öffnete jetzt den Raum nach hinten, ließ jeden Rufer platisch erscheinen und viel besser orten. Beifall erklang fast authentisch. Der Gesang der McVie und ihres Partners klang deutlich freier und klarer. Bisher verschwand aber noch keine Impulsivität, wie beürchtet worden war. Die Geigen in der HiFi Vision Classic wurden endlich fast richtige Geigen, Körper und Kontur stimmten entsprechend dem Mikrofonabstand. Da die Geigen von oben mikrofoniert wurden gibt eine Unsicherheit, denn von oben wurden Geigen noch nicht angehört. Die Klanghölzer bekamen die richtige Klangfarbenlogistik und die Schnippser auch. Darüber hinaus wurden diese z.T. als Doppelschnippser aufgelöst. Die Harmonika erhielt mehr hohe, aufzieselierte Töne und war recht naturnah bis in allerhöchste Höhen. Aber zuguterletzt wurde Norah's Stimme wieder farbloser.

Von der Sting CD und LP „nothing like the sun“ gelang es die „mutierten Höhen“ zu Beginn des Track 4 in eine Kontur aufzufächern, wobei die Impulsfolge noch diffus war.

11.6. Vergleichshören auf der High-End 2007

An dem Freitag vor dem Hochbetrieb war meistens noch Zeit an Hand einer mitgebrachten CD einen gut bekannten Hörabschnitt auf einer oder mehreren Spitzenanlagen gegenzuprüfen, obwohl Stereoplay bereits eine Check-CD zum Vergleich der Anlagen zur Verfügung stellte. Nach einigem Suchen wurde der Hörraum mit den Lautsprechern Isophon Arabba gefunden, die mit großem Röhrenverstärkern von Octave betrieben wurden. Beim Eintritt verklangen noch gerade die letzten Takte von langauschwingenden Instrumenten, was einen sehr guten Eindruck machte. Um so mehr wurde die Spannung erhöht, als in der Pause der Moderator und Vorsteller der Anlage, der bekannte Thomas Hintze, sich bereit erklärte, die altbekannte CD von Eric Clapton „unplugged“ trotzdem nochmal einzulegen. Gewünscht wurde der Titel 13. In den ersten 3min verschwand immer mehr Publikum, der Klang war wohl nicht mehr so sensationell wie kurz davor. Thomas Hintze wollte schon wieder aufhören, aber das Gitarrensolo sollte ja noch kommen.

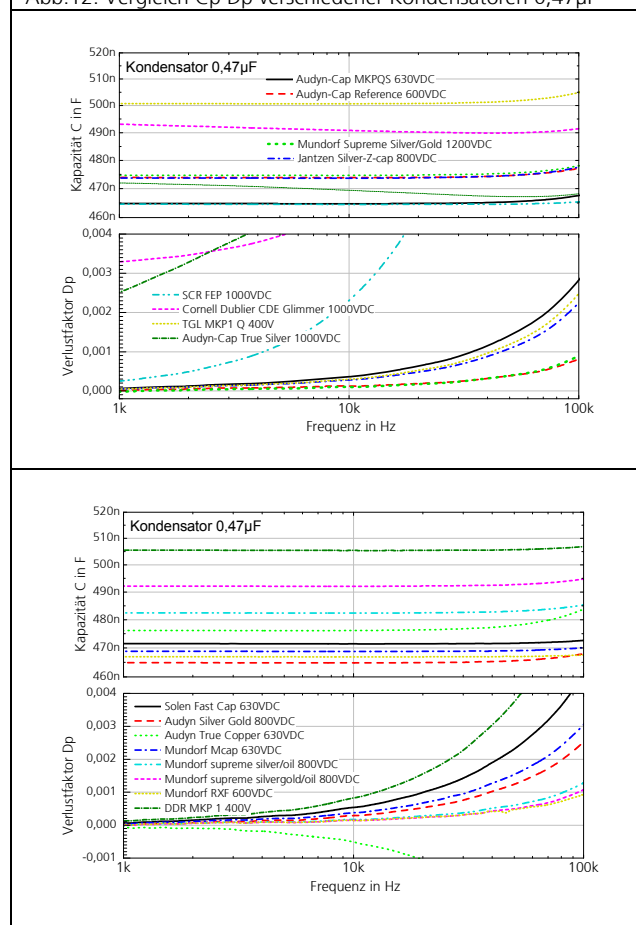
Doch die Vorstellung, die die Anlage da bot, war etwas enttäuschend, es war zwar die gleiche Tonbalance und Ausgewogenheit, doch wurden die klaren und definierten auf den Punkt kommenden Anrisse von daheim vermisst. Ebenso fehlte die Präzision der hochfrequenten Ausschwingvorgänge und Klarheit in der Schallquellenabbildung und die natürlichen Klatschimpulsaufstapelungen. Andererseits machte diese Tatsache stolz, dass die heimische Anlage eine Klasse originalgetreuer spielte. Aber nach dem Soli gab Thomas Hintze zu, diesen alten Klassiker noch nie so gehört zu haben. Ihm war bestimmt nicht aufgefallen, dass die CD geschwärzt war. Zum Schluss wurde noch schnell die Frage gestellt, ob den diese Arabba eigentlich die berühmten Diamanthochtöner enthielten. Thomas Hintze versicherte dies. Damit war klar, welche ungeheuren Potenzen in den einfachsten Dingen steckten, nur eben an ganzen anderen Stellen.

11.7. Aktualisierte Betrachtung auch neuer Kondensatoren
Mittlerweile gab es eine ganze Serie neuer Kondensatoren. Eigentlich wäre es ja sinnvoll gewesen, die Palette der MKP auf die wenigen typischen Kennspannungen VDC wie 160, 250,400, 630 usw. zu begrenzen, aber diese Vielzahl wurde außer von weiteren Zwischenspannungen noch von unterschiedlichen Konstruktionsdetails ergänzt, so dass es fast unmöglich wurde alle Varianten zu vermessen, geschweige denn zu bewerten. Abgesehen davon, dass große Typen bezüglich ihrer klanglichen Übertragungseigenschaften in der neuen BR25 nicht beurteilt werden konnten. Zwecks Übersichtlichkeit der funktionellen Zusammenhänge wurden nur besondere Typen in Abb.12 veranschaulicht.

Die Kapazität Cp und der Verlustfaktor D wurden wie üblich aus der Impedanz Z und der Phase phi über das Modell des parallelen (p) Widerstandes zum Kondensator als Cp und Dp berechnet. Dabei berechnet sich Dp aus $\tan(90+\phi(f))$, da phi negative Werte hat. Für die Verlustwerte bei 1kHz wurden die primär gemessenen Winkel phi angegeben, da sonst Rechnungsungenauigkeiten entstehen, mehr als 4 digit nach dem Komma konnte die Messbrücke nicht anzeigen (low-Modus, 1s Delay) Die Gesamtheit der Messungen konnte nur in einer Tab.6 bis 8 skizziert werden.

So ist z.B. der Glimmer Kondensator im normalen Hörbereich viel schlechter als der „Teflon“ Kondensator von SCR, aber bei 100kHz wiederum besser. Der SCR ist in Wirklichkeit kein Teflon sondern FEP (flouriertes Ethylen Propylen). Bisher wurde von den allermeisten gesagt, dass der Teflon-MKP der verlustärmste sein sollte, allerdings mit einer Ausnahme, Analog Devices (siehe Kapitel 2.6.2.1.). Nun konnten die Aussagen von Analog Devices [14] bestätigt werden. Aber beide Typen scheiden mit der Zielstellung einer originalen Musikwiedergabe trotz enorm hoher Durchbruchfestigkeit nicht nur aus Gründen der Messergebnisse aus. Der allgemeine Eindruck war sonst, dass mit steigender VDC die Wiedergabepräzision zunahm.

Abb.12: Vergleich Cp Dp verschiedener Kondensatoren 0,47µF

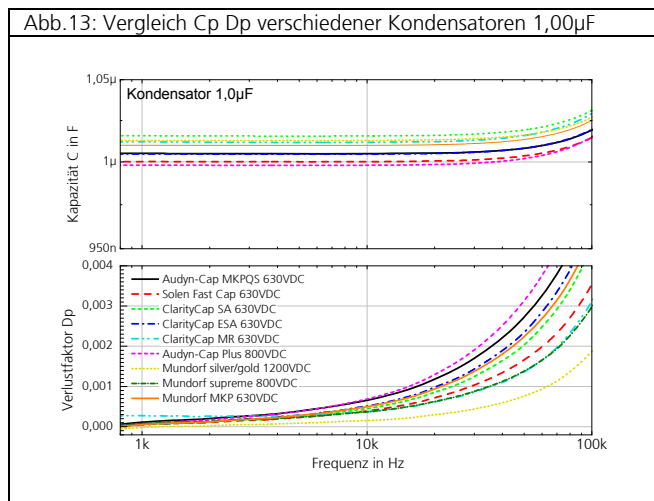


Tab.6: Vergleich der 0,47µF Kondensatoren (1V)

Marke	Typ	VDC	Dp 100kHz	phi 1kHz
Audyn-Cap	MKP-QS	630	0,00188	-89,9961
	MKP-QS	400	0,00359	-89,9975
	Plus	800	0,00290	-89,9961
	KP-Sn	630	0,00074	-89,9990
	Q6	600	0,00396	-89,9963
	Reference	600	0,00081	-89,9992
	True Silver	1k	0,00962	-89,6938
	Silver Gold	800	0,00253	-89,9993
	True Copper	630	-0,00527	-90,0021
	Mundorf	Mcap	630	0,00305
Supreme		800	0,00207	-89,9976
ZN		630	0,00064	-89,9988
silver/gold		1,2k	0,00088	-90,0008
silver/oil		1,2k	0,00129	-89,9990
silver gold/oil		1,2k	0,00107	-89,9995
RXF		600	0,00094	-89,9979
Jantzen	Superior-Z	800	0,00301	-89,9963
	Silver-Z	800	0,00223	-89,9969
Solen	Fast Cap	630	0,00468	-89,9958
SCR	FEP	1k	0,02115	-89,9843
Cornell Dubl.*	CDE Glimmer	1k	0,01955	-89,8104
Wima	MKP4	400	0,00286	-89,9976
	MKP4	630	0,00664	-89,9939
	MKP10	160	0,00282	-89,9968
	MKP10	1k6	0,00257	-89,9967
DDR	MKP1 Q	400	0,00246	-89,9970

* Vertrieb [35], phi in Winkelgrad °

Da der Claritycap MR nur ab 0,82µF lieferbar war, musste der Vergleich mit den anderen Typen bei 1,0µF durchgeführt werden. Dieser besonders auf Eigenschwingungsarmut getrimmte Kondensatortyp zeigte jedoch im Mitteltonbereich Verlustschwächen. Offensichtlich können nicht alle Vorteile vereint werden.



Tab.7: Vergleich der 1,0µF Kondensatoren bei 100kHz

Marke	Typ	VDC	Dp 100kHz	phi 1kHz
Audyn-Cap	MKP-QS	630	0,00556	-89,9935
Solen	Fast-Cap	630	0,00349	-89,9973
ClarityCap	SA	630	0,00444	-89,9966
	ESA	630	0,00506	-89,9964
	MR	630	0,00312	-89,9839

Sogar bei den Mundorf Caps gab es eine Ausnahme. Die Audyn, Solen, SCR und Mundorf 630VDC 2,2µF sahen von ihren Abmaßen so ähnlich aus, dass sie vom gleichen Hersteller zu stammen scheinen. Der SCR zeigte aber dabei die besten Werte. Leider gibt es keinen deutschen Vertrieb.

Tab.8: Vergleich der 2,2µF Kondensatoren bei 100kHz

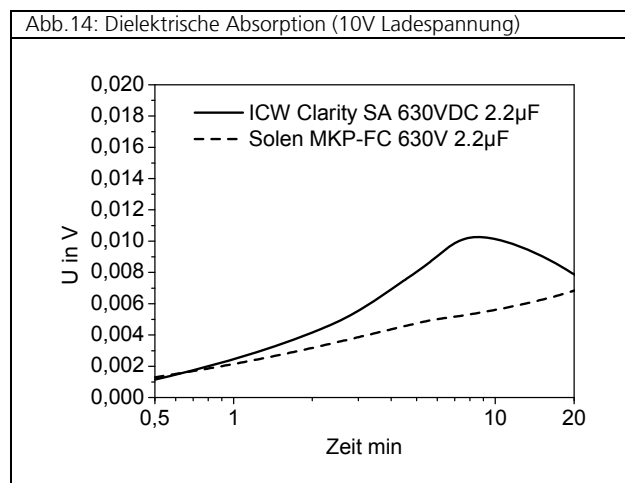
Marke	Typ	VDC	Dp 100kHz	phi 1kHz
Audyn-Cap	MKP-QS	630	0,00845	-89,9929
Claritycap**	SA	630	0,00611	-89,9966
Mundorf	Supreme	800	0,00796	-89,9931
	Mcap	630	0,02984	-89,9740
		400	0,00778	-89,9927
		250	0,04150	-89,9623
Solen	Fast Cap	630	0,00926	-89,9925
SCR	PPE	630	0,00644	-89,9949

** Gefertigt für [12]

Für eine erste Bestimmung der Klangcharaktere im Vergleich der großen Kondensatoren wurde an der rechten Box im Hochtönerzweig ein Kondensator so in 2 Kondensatoren aufgetrennt, dass ein 0,47µF Kondensator austauschbar wurde. 2 Cu-Lackdrähte wurden angelötet und die zwei anderen Enden etwas länger verzinkt und zu einer Schleife gebogen, so dass Kondensatoranschlussdrähte eingeklemmt werden konnten, d.h ohne störende elektromagnetische Kontaktklemmen. Die Klangcharaktere der Kondensatoren waren sehr viel mehr verschieden als die eine Dimension der Abweichung des Phasenwinkels von <0,001° zum Idealen ausgemacht hat. Darin konnte die Ursache nicht liegen. Ob die Wiedergabe über die Zinnfolien (Klasse FKP), über den Reference oder über den Silber/Gold kam, die Klangbalance (Farbe), Impulscharakter und Ortbarkeit waren völlig unterschiedlich. Schon letzteres offenbarte sich in der angegebenen Reihenfolge, ob die Perkussionbrillanz weit vor den Lautsprechern stand oder dahinter, dass konnte einfach nicht am Phasenwinkel liegen.

Normalerweise müsste die Impulsquelle in oder hinter der Lautsprecherebene zu orten sein, wenn nicht, dann aber in der richtigen Reihenfolge. Es kann nicht sein, dass der brillante Teil viel weiter vorn geortet wird als der Präsenzteil. Hier mussten andere Ursachen vorliegen.

Eine gut bekannte Größe war die Dielektrische Absorption DA. Bei dieser Prüfung wurde eine Seltsamkeit am Typ ICW Claritycap SA**[12] festgestellt, sowohl beim 0,1µF als auch beim 2,2µF Kondensator. Beide zeigten nach dem Aufladevorgang einen unnormal hohen konstanten Leckstrom im nA-Bereich. Die resultierende Kurve in Abb.14 bei der DA-Messung war die logische Konsequenz. Die Auflagespannung betrug vorher immer 10V. Vor der Messung „lagerten“ alle Kondensatoren in leitenden Steckschaum für mindestens 1 Woche um alle Restladungen zu beseitigen.



Doch ist die DA Messung eine statische und keine dynamische Messung, wie sie für Musik besser gewesen wäre. Der Kondensator war ein Ladungsspeicher, der nach Aufladung und Abgabe seiner gespeicherten Energie sich in eine Spannungsquelle mit umgekehrter Polarität aber mit höherer Ausgangsimpedanz umwandelte. Die absorbierte Energie verringert den Wirkungsgrad des Kondensators und die wiederfreigesetzte Energie mit umgekehrter Polarität könnte

das Auschwingverhalten ändern. Ist die DA-Messung überhaupt eine taugliche Methode, die die verfälschte Klangwiedergabe proportional zu charakterisieren? Je höher die DA, desto stärker sollte die Wiedergabe verfälscht werden.

Die Grundtöne der natürlichen Musikinstrumente haben den höchsten Pegel. Die Einschwingimpulse werden von Grundtonimpulsen gebildet. Sie haben die niedrigsten Frequenzen und deren Schwingungen dauern am längsten. Da die DA um so größer wird, je länger die angelegte Spannung wirkt, wird durch die Absorption der Impuls verformt. Genau das ist die Erfahrung aus den Impulsbeeinflussungen der verschiedenen Kondensatortypen. Gerade deshalb sind Elektrolytkondensatoren schlechter als Folientypen, MKT schlechter als MKP.

Die DA-Messung selbst erkundigt sich nach dem Militärstandard MIL-C-19978 nur, wieviel nach einer definierten Zeit an Spannung erzeugt wurde. Dabei werden solche Zeitfunktionen, wie in Abb.14 nicht berücksichtigt und eine Momentaussage kann durchaus zu falschen Aussagen kommen.

Diese Zeitfunktionen sahen für alle Kondensatoren anders aus und es ergab sich kein System in Form funktioneller Abhängigkeiten von der Art der Kunststoffolie, der VDC oder der Metallisierung. Die niedrigsten DA lieferten der Mundorf Silber/Gold und der Koweg mit dem Gütezeichen Q, einem besonderen Qualitätssigels aus der DDR. Ein weiteres Beispiel für hervorragende Kondensatorqualitäten, wie sie in der DDR hergestellt worden waren (z.B. der erwähnte MKT TGL oder die Frolyt-Elektrolytkondensatoren). Der mittlere Fehler, gemessen an 6 Audyn's betragen z.B. 4,7±0,5mV.

Tab.9: Vergleich der DA von 0,47µF Kondensatoren nach 300s

Marke	Typ	VDC	DA	C	
		[V]	[mV]	[µF]	
Audyn-Cap	MKP-QS	630	4,7	0,1 - 10	
		400	5,9	0,1 - 220	
	Plus	800	5,6	0,1 - 22	
		KP-Sn	630	1,5	0,1 - 2,2
	Q6	600	3,7	0,1 - 100	
	Reference	600	1,7	0,1 - 4,7	
	True Silver	1k	12,7	0,1 - 12,0	
	Silver Gold	800	2,8	0,1 - 6,8	
	True Copper	630	2,1	0,1 - 2,2	
	Mundorf	Mcap	630	4,4	0,1 - 22
Supreme			800	4,0	0,1 - 22
ZN		630	1,6	0,1 - 1,0	
silver/gold		1,2k	1,2	0,001 - 10	
silver/oil		1,2k	15,8	0,01 - 10	
silver gold/oil		1,2k	5,9	0,01 - 10	
RXF		600	8,6	0,47 - 10	
Jantzen		Superior-Z	800	9,0	0,1 - 22
		Silver-Z	800	7,5	0,1 - 22
Solen		Fast Cap	630	4,4	0,1 - 47
SCR	FEP	1k	3,0	0,22 - 10	
Cornell Dubl.	CDE Glimmer	1k	305	- 10	
Wima	MKP4	630	4,1	0,01 - 10	
	MKP10	1k6	3,3	0,001 - 2,2	
DDR	MKP1 Q	400	1,6	---	

Der Solen war nur um wenige Prozente besser als der Audyn. Der woanders hoch gepriesene Glimmerkondensator zeigte einen völlig inakzeptablen Wert. Und hier scheint das Modell der DA Auswirkung besonders hörbar zu sein. Das Klangbild wird vor die Lautsprecher gesetzt, die Grundtöne besonders stark vermisst.

Überraschend war, dass der beste elektrische Leiter Silber wenig taugt, wenn es um Grenzflächen geht, wie beim True Silver oder des Silver/Oil.

Gegenüber früher waren die neuen Zinnfolienkondensatoren mit höheren Durchbruchspannungsfestigkeiten VDC, sowohl von Audyn als auch von Mundorf, deutlich besser als die alten 250VDC. Leider werden die VDC kleiner wenn die Kapazitätswerte steigen, so dass eine Weichenabstimmung erschwert wird. Betrachtete man die Verfügbarkeit der Kapazitätswerte in Korrelation zur Verlustarmut, tat sich eine Misere auf: i) Gerade die verlustärmeren Kondensatoren standen nicht mit größeren Kapazitätswerten zur Verfügung um die benötigten Werte zu erreichen (siehe Kapitel 9), ii) gerade die

verlustärmeren waren voluminöser und wenn dann iii) mehrere parallel geschaltet werden müssen wird die Lage für 2-Wege-Kompaktboxen prekär, selbst wenn die Trennfrequenz relativ hoch bei 2,6kHz liegt. Eine Weiche 4.Ordnung ist nicht machbar. Der Gewinn der besseren Kondensatoren lag in dieser Klasse MKP/KP nicht so hoch als dass die Ordnung auf 2 oder 1 herabgesetzt werden konnte. Fast unlösbar wird der Fall 3-Wege-Box, wo ein Mitteltöner mit Hoch- und Tiefpass gefiltert werden muss. Die Vorteile des gegen ein geschlossenes Gehäuse arbeitenden Mitteltöners mit verringerter Tieftonintermodulation könnte völlig aufgehoben werden. Es war für die Klangabstimmung der Lautsprecher immer sehr viel schwieriger einen homogenen Eindruck zu bekommen, wenn verschiedene Typen gemischt wurden, vor allem wenn zur Masse/Erde zu im Tiefpass ein anderer verwendet wurde als im Signalweg im Hochpass.

Außer der Voluminösität gab es noch ein anderes Problem, die Kontaktierung, wie beim Audyn-cap Reference und True Copper. Diese wurden mit sehr langen Zuleitungen geliefert, die, abgesehen von dem reisigen Induktivitätszuwachs den Volumenbedarf weiter erhöhten. Wollte man diese geeignet kürzen, war die Neuverlotung wegen der Tritec-Anschlüsse viel schwieriger. 7 Drähte mit Lack verdrillt erforderten einen speziellen LötKolben, ansonsten blieb das Risiko, das ein oder mehrere Lackdrähte mangelhaft verzinkt wurden, kalte Lötstellen wären die Folge, Unsicherheiten in der Langzeitstabilität und zusätzliche Verzerrungen. Und das bei all den Mühen den Phasenwinkel unter 0,001 zu drücken.

Die neueren Produkte von ICW für Audio-Anwendungen der Marke Claritycap zeigten keine Leckströme bei Erstmessung. Im Vergleich zu den gängigen MKP sind jedoch die DA höher, und zwar um so höher je geringer die elektrisch induzierten mechanischen Eigenschwingungen sein sollen. Wiederum konnte das Entwicklungsoptimum nicht total überzeugen. Dies mag ein Grund sein, warum in [36] der SA dem MR vorgezogen wurde.

Tab.10: DA Vergleich der 1,0µF Kondensatoren nach 300s

Marke	Typ	VDC	DA	C
		[V]	[mV]	[µF]
Audyn-Cap	MKP-QS	630	3,6	0,1 - 10
ClarityCap	SA	630	4,4	1 - 47
		ESA	630	5,1
	MR	630	6,4	0,82 - 27
Mundorf	Mcap	630	3,8	0,1 - 22
Solen	Fast-Cap	400	3,4	1 - 100
Wima	MKP4	630	3,2	0,01 - 10

Tab.11: DA Vergleich der 2,20µF Kondensatoren nach 300s

Marke	Typ	VDC	DA	C
		[V]	[mV]	[µF]
Audyn-Cap	MKP-QS	630	3,2	0,1 - 10
		400	3,8	0,1 - 220
	Q6	600	4,8	0,1 - 100
		Sn	250	7,4
	Claritycap [12]	SA	630	4,0
Mundorf	Supreme	800	5,4	
		Mcap	630	4,3
		400	3,7	
		250	5,6	
	ZN	250	4,5	
Solen	Fast Cap	630	3,3	
SCR	PPE	630	3,8	0,1 - 100
Wima	MKP4	400	2,7	
		630	3,6	

Nach einigen Wiederholungsmessungen der Kondensatoren stellte sich heraus, dass die Leckströme der alten Claritycaps 2,2 und 0,1µF verschwunden waren, wie in Abb.13 durch die DA-Zeitfunktion noch verdeutlicht wurde. Als Ursache kommt erstmal nur die Ausheilung in Frage (s. Kapitel 2). Die Leckpfade wurden durch Nanoentladungen weggebrannt. Überraschend war, dass dies bereits bei Spannungen unter 1Volt für die Z-phi Messungen bis 30MHz und von 10V DA-Messungen erfolgen kann. Höher waren die Messspannungen nicht. Bestätigt wird die Ausheilung durch den

Solen Kondensator, der immer parallel mitgemessen wurde, wie einige andere auch.

Der Claritycap SA, als OEM für [12] gefertigt gewesen, unterschied sich in den Abmaßen vom normalen Typ: OEM 27 x 38 und SA 31 x 39 (mm).

Die im Kapitel 6 gemachten Aussagen stimmen immer noch für die konkret verglichenen Kondensatoren. Aber nun wurde klar, dass die Abhängigkeiten weitaus komplizierter sind. Die Eigenschaften, insbesondere die DA sind nicht nur eine Funktion der Grenzflächenzahl sondern auch abhängig vom Material und der Wicklungsqualität. Die Wicklungsqualität des DDR MKP Q schien herausragend gewesen zu sein.

Die hochgelobten Preis- und Volumen-intensive Kondensatoren von Duellund mit Mineralwachsen und Papiere dürften mit Sicherheit auch eine deutlich erhöhte DA haben, ähnlich den ebenso natürlichen Glimmerkondensatoren.

Nach diesen Ergebnissen wurden die DA-Messungen an den Kondensatoren durchgeführt, die bereits in der Frequenzweiche der Lautsprecher längere Zeit oder nur zeitweilig betrieben worden waren. Aber im Unterschied zu den Messbelastungen hatte der elektrische Stress in der Frequenzweiche vor allem im Hochtonzweig zu Schäden geführt, denn die Zeitfunktionen verschlechterten sich. Einige Beispiele sind in den Abb. 16/17 dargestellt. Am meisten geschädigt wurden Kondensatoren, die den Lautsprecherkonditionierungsvorgang miterlebten. Die in den anderen Kapiteln erwähnte Stromkonditionierung führte dazu, dass das übermäßige Grelle des Klangbildes verschwand. In Brutto wurden die übermäßig hohen Frequenzen abgemildert, was besonders durch hochtonreiche Musik effektiv bewerkstelligt wurde, eben dort wo die Kondensatoren immer mehr Strom durchlassen.

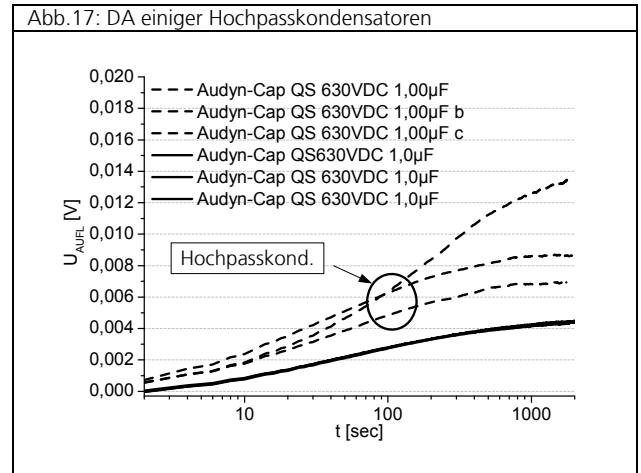


Abb.16 zeigt den langzeitbetriebenen Brückenkondensator aus dem Hochpasszweig. Erst nach einer Minute ist eine Erhöhung der DA, messbar was nach dem Modell (s. Kapitel 2) bedeutet, dass hochohmige RC-Zeitglieder entstanden sind, die bei normalen DA-Messungen vielleicht gar nicht so schnell erkannt werden. Wurden mehrere 1µF Kondensatoren parallel geschaltet (Abb.17), wie sie in Summe als besonders verlustarmer Hochpasskondensator mit großer Kapazität Verwendung fanden, ergab sich eine andere Zeitcharakteristik der DA, etwas niederohmiger RC-Glieder waren herausgebildet worden. Die in den Abb. 16/17 nicht gekennzeichneten Exemplare waren nur mit Messspannungen gestresst worden.

Es gibt außer den ingenieurtechnischen Charakterisierungsparametern (C_p und D_p bzw. $\tan \delta$, oder seltener C_s und R_s bzw. ESR) und dem elektrotechnischen Parameter (DA) noch als drittens die elektromechanisch-schwingungstechnischen und damit auch akustischen Parameter. Von ICW ClarityCap kamen 2008 neue Kondensatoren heraus, die auf minimale Eigenschwingungen im Betrieb entwickelt und optimiert worden sind. Diesen Entwicklungen gingen einige Vorarbeiten voraus. Zu den Publikationen wurden Firmenschriften herausgegeben. Wie aus diesen zu erfahren war, gab es davor bereits einige Untersuchungen. Aber bereits im Jahre 2000 wurden, von der wissenschaftlichen Publikationswelt nicht zitiert, schon unter dem Titel Mikrofonie in [15] Kondensatoren mit einer MLS-Signalsequenz und dem MLSSA-Messsystem sowie einem Beschleunigungssensor schwingungstechnisch vermessen. Die ermittelten Resonanzspitzen waren bei den einzelnen 4,7µF Exemplaren trotz Typkonstanz um bis zu 10dB unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Resonanzen befanden sich allesamt zwischen 1kHz und 40kHz. Größere Kapazitäten kamen auch unter 1kHz. MKT zeigten größere Schwingamplituden. MP, FKP und einzelne MKP zeigten ähnliche geringe Schwingungen. Es waren also nicht nur Metallfolien schwingungsarm, es gab auch gute MKP.

Siami et.al. [16] untersuchte das Hochfrequenzverhalten von Power MKP. Es wurde die Existenz von seriellen und parallelen Resonanzen hervorgehoben und daraufhingewiesen, dass diese zu Oszillationen, Störungen und zusätzlichen Verlusten führen können. Oberhalb der Hauptresonanz, wo kapazitive Charakter in den induktiven übergeht (s. auch Kapitel 9, Abb.37 1-10MHz), wurden mehrere kleinere Resonanzen gefunden, wo die Phase große sprunghafte Änderungen erfuhr (s. auch Kapitel 6, Abb.6). Zur Simulation der experimentellen Kurven mussten zum normalen seriellen Schwingkreis Ls-Cs-Rs weitere serielle aber auch parallele Schwingkreise L-R-C mathematisch hinzugefügt werden. In der Praxis führten diese zusätzlichen Verluste zur Aufheizung der Kondensatoren.

Gerade die in DA und $\tan \delta$ verlustärmsten Zinnfolien-C's zeigen diese intensiven Schwingungen. eventuell sind sie die Ursache für die häufig bekletelten zu grellen Klangeindrücke.

In [17] wurden von Pirani und Rinaldi die Vorarbeiten zur Laservibrationsmessung durchgeführt. Schwingungstechnisch vermessen wurden einfache MKP (400Vrms, 8µm PP, 7.5cm Breite, ohne Transmitterfolie). Genutzt wurden Entladungsstromimpulse mit bedämpftem Ausschwingverhalten. Das Ausschwingverhalten wurde in einer 3-D Grafik veranschaulicht. In der Primärwelle wurde der Kondensator in der Mitte zusammengezogen. Danach aber entspannte sich die Mitte und blähte sich im Folgenden sogar auf,

Abb.15: Dielektrische Absorption - Wiederholungsmessungen

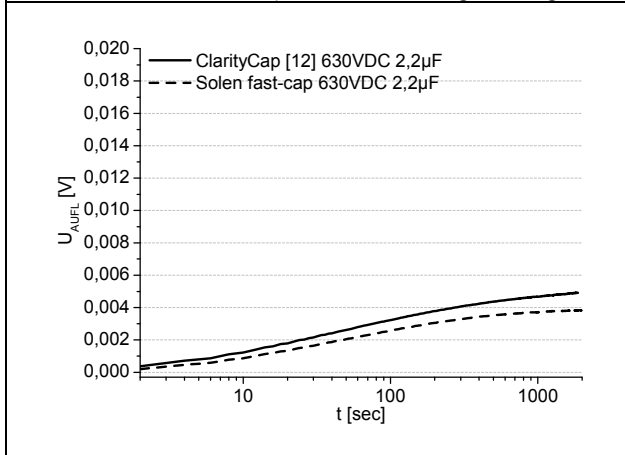
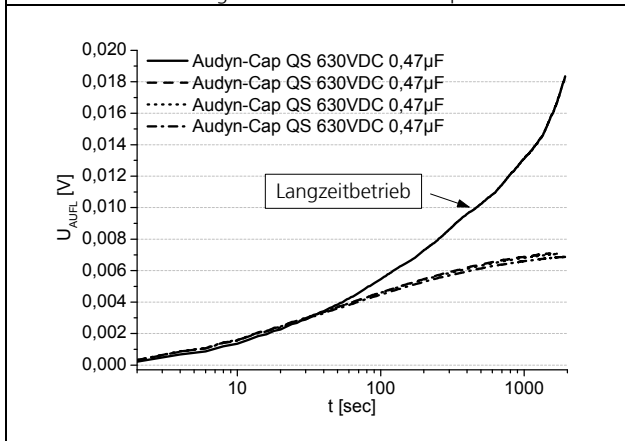
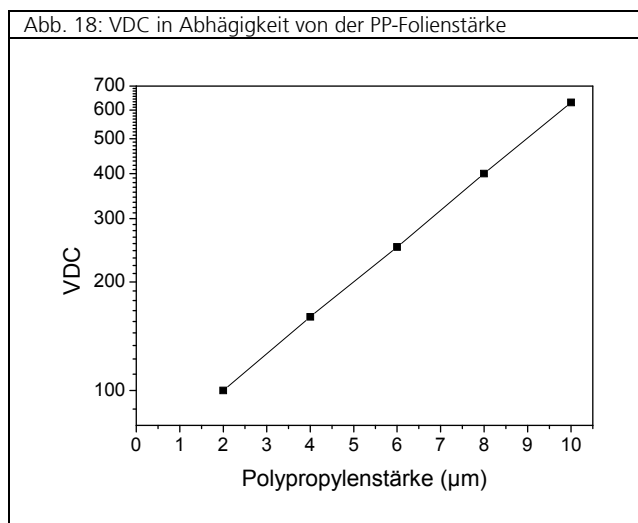


Abb.16: DA nach Langzeitbetrieb aus der Hochpassbrücke



der Rand mit den besprühten Kontaktenden allerdings auch, während zwischen den Rändern und der Mitte eine Einschnürung erfolgte. Anschließend zog sich die Mitte wieder zusammen. Die Schwingung des Randes wurde dann schneller bedämpft als die der Mitte. Das Schwingungsmuster enthielt keine stehende Welle, die Auslenkungswellenlängen in Längsrichtung änderten sich mit der Zeit, was eine gute Bedämpfung anzeigt.



Die erste Publikation von ICW Claritycap erfolgte unter Federführung der Universität von Salford in [18] 2006. Im ICW wurden 17 Chargen von 4,7µF MKP nach ESR, C und tanδ (Modell serielle Schaltung L-C-R) mit einer Wayne Kerr 6430B Messbrücke vermessen. Es sollte die Frage beantwortet werden, ob die Filmweite 12 bis 75mm und die Polypropylenstärke 2 bis 10µm direkten Einfluss auf die elektrischen Messwerten haben. ESR war die Summe aus dem ohmschen R_0 und dem dielektrischen Verlust R_d . ESR und C sanken auf einen konstanten Wert ab, wenn die Frequenz von 200 auf 1000Hz anstieg. Vor allem der ESR schwankte besonders bei niedrigen Frequenzen. Deshalb wurde in Anlehnung auf [17] außerdem auf die akustische Emission der Kondensatoren geachtet, die bei großen Strömen entstehen (ICW untersuchte früher z.B. Leistungskondensatoren [19], wo der ESR eine wichtige Größe war). Dazu wurde ein Sinus Sweep mikrofoniert. Beobachtet wurde eine mechanische Resonanz bei 17kHz. Außerdem wurde festgestellt, dass neben den Sinussignal ein weiteres Signal bei der doppelten Frequenz existierte, welches in der Grafik sogar größer war als des Sinussignals! Begründet wurde das, weil sich die Platten immer anzogen, wenn eine elektrisches Feld entstand, egal welche Polarität an den Platten entstand. Bestätigt wurde der Sachverhalt auch an anderen Kondensatoren. Als Folge wurden Intermodulationsverzerrungen befürchtet. Insbesondere, um die Korrelation zur Musik zu haben, wurde im weiteren Impulsmessungen vorgenommen. Die Kondensatoren zeigten im gleichen Frequenzbereich 15 bis 21kHz SPL-Maxima und die Schalldrücke SPL lagen um 20dB und erreichten in den Resonanzen nochmals 10dB bis 20dB Überhöhungen. Die Grafiken enthielten allerdings nur Beispiele von 6µm Polypropylen (s.Abb.). Zum Schluss der Messungen wurden im schalltoten Raum die SPL von Kondensatoren vor einem Hochtöner ermittelt. Der Vergleichselektrolytkondensator bewirkte einen um -1dB geringeren SPL-Wert.

Die Hörtests erfolgten an B&W 805 Lautsprechern. Die sehr geringen Unterschiede, die zwischen den Kondensatoren vernommen werden konnten, wurden den mechanischen Resonanzen zugesprochen

Bei den seriellen L-C-R Modellen ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$ESR=Rs=(Z) \cdot \cos(\phi)=1/(\omega \cdot C) \cdot \tan\delta$$

Der ESR entspricht den andernorts üblichen R_s und ist direkt abhängig vom Verlustwinkel δ , der gerade bei niedrigen Frequenzen sehr klein und damit stärker fehlerbehaftet ist.

Um die Streuung der ESR= R_s Werte von ICW nachzuvollziehen, wurde das neue Hioki 3522-50 LCR HiTester (2003) hinzugezogen, da dieses auch unter 20Hz messen konnte (die Hewlett Packard ging nur bis 20Hz). In Tab.8 wurden 1µF MKP Messungen dargestellt, die mit dem modernen Hioki gemacht worden sind. Die gleichzeitig gezeigten Messwerte für die Impedanz Z, Kapazität Cs und Phasenwinkel phi waren auf 5 Digits konstant. Bei niedrigen Frequenzen streuten die Messwerte R_s auch hier stark. Der Fehler von R_s hing davon ab, womit konkret bei solchen Messbrücken die SHORT Kalibrierung erfolgte. Bei der SHORT-Kalibrierung wurde ein metallisch gut leitfähiges U-förmiges Stück z.B. Draht oder Blech in den Messadapter direkt am Gerät gesteckt. Daraufhin wurden die Kontaktbleche des Adapters mittels der integrierten Schrauben auf das SHORT-Stück angezogen. Während dieser Kontaktierung waren die jeweils wirksamen Widerstandswerte nicht sichtbar, so dass mit Vertrauen auf beste Kontaktierung der Kalibrierungsrun gestartet wurde.

Zur Prüfung der Kontakt-Reproduzierbarkeit wurde ein U-Messingblech vom Hewlett-Packard LCR-Meter genommen, frisch mit einem Glasfaserstift gereinigt und mit einem Mikrofaser-Reinraumtuch gereinigt. Danach wurden aber bei mehrmaligen Wiederholungen des Steckvorganges im Messmode unterschiedliche Werte im Bereich von 0 bis 30mΩ gemessen. Die Reproduzierbarkeit war überraschend niedrig, da waren die Anzeigewerte des Kondensators weniger streuend.

Um die Streuung der Messungen zu reduzieren, wurde versuchsweise der Bauelemente-Messadapter HP16047 der alten HP-LCR Messbrücke an das Hioki angepasst und angeschraubt. Die Kontaktierung dort war wirklich zuverlässiger, obwohl sie 15 Jahre älter war. Ein Blick in die inneren Teile der beiden Adapter erklärte alles. Der Hioki-Adapter hatte elektropolierte Edelstahlplatten, in die jeweils eine Edelstahlschraube mit Gewinde eintauchte. Die Sehnen der 4 BNC-Buchsen waren nicht vergoldet. Um die Schrauben herum sah es korrodiert aus. Im Inneren des HP-Adapters waren vergoldete kuppelförmige Platten, die mit den vergoldeten Kontaktstiften in den BNC-buchsen verlötet waren. Keine Korrosion war zu sehen. Die Kuppelplatten kontaktierten wiederum die gebürsteten Edelstahlplatten der Bauelemente-Klemmvorrichtung.

Im Jahre 2010 konnte eine neue Wayne Kerr Messbrücke ausgeliehen werden. An dieser wurde erschreckend festgestellt, dass der dazu gehörige Bauelementeadapter für die Messung der Kondensatoren einfache Kupfer-kaschierte Epoxidharzplatinen benutzte. Damit war die Kontaktsicherheit noch schlechter als beim originalen Adapter des Hioki. Eine Reinigung mit Glasfaserstiften würde die Cu-Schicht schädigen.

Tab.8: R_s und Fehlerabhängigkeit 1µF MKP*

Hioki	+9265		HP16047	
f	R_s	$\pm\Delta R_s$	R_s	$\pm\Delta R_s$
Hz	mΩ	mΩ	mΩ	mΩ
10	2500	2500	15000	4000
31,5	2700	200	2650	150
100	720	50	720	10
315	150	10	155	2
1k	24	1	21	0,5
3,15k	15	0,1	12	0,05
10k	10	0,05	9,0	0,02
31,5k	9,1	0,01	6,3	0,01
100k	9,0	0,01	5,8	0,01

*Audyn MKP-QS 630VDC

2 Jahre später erschien eine weitere Publication von ICW und Salford, in dem die Untersuchungen fortgeführt wurden [20]. Dazu wurden 350 Typen von MKP's der eigenen Produktion und von anderen Herstellern verwendet. Es wurde in der Publikation aber nur der Konstruktionstyp mit metallisierter Transmitterfolie vorgestellt. Neben den Messungen zum mechanischen Schwingverhalten wurden weitere spezielle Blind-Hörvergleiche durchgeführt. Berichteten wurden jetzt Resonanzen im Bereich von 10kHz bis 30kHz. Der Laserschwingungsdetektor konnte an Kondensatoren Schwingungsmaxima ermitteln, genau an den 2 Stellen, wo die Transmitterfolie mit den Anschlussbelägen überlappte.

Aus den Messerfahrungen wurden neue Designs entwickelt, die die Eigenschwingungen weniger erlauben. Die neu hergestellten Typen wurden in erweiterten Hörsessions zur Verfügung gestellt. Für die

Abhörsektionen zum Differenzieren der Audioqualitäten der Kondensatoren wurden Probanden trainiert. Als Quelle für den Hörvergleich wurde der Profi-CD-Recorder von HHB und ein Sjudgen Class A Verstärker ohne Koppelkondensatoren benutzt. Als Lautsprecher wieder die 2-Wege B&W 805 mit Biwiring für die aufgetrennte Weiche. Verglichen wurde ein Elektrolytkondensator, ein „Standard“-MKP und ein mechanisch stabilisierter MKP. Die wählbaren Variablen zur Beschreibung des Klanges wurden auf 3 vereinfacht: „dumpfer“, „gleich“, oder „heller“ und zur Beschreibung der Räumlichkeit mit „schlecht“, „gleich“ oder „besser“. Die schlechtere Qualität des Elektrolytkondensators wurde von allen erkannt, die Entscheidung der MKP's fiel knapp aus, 4:3 für den mechanisch stabilisierten Typ. Nachdem die Probandenzahl erhöht worden ist, wurde ihnen soviel Zeit gelassen wie sie wollten um sich mit ihren eigenen Lieblingsmusik zu beschäftigen und ihre Bevorzugung aufzuzeichnen. Danach sollten die Hörer ihre Befürwortung auf die verbleibenden 2 Kondensatoren nennen, wobei der eine einen hohen Grad an mechanischer Resonanzen aufwies und der andere nicht. Der weniger resonante erhielt dann 5:3 bezogen auf Klarheit. Und bezogen auf die Räumlichkeit konnten sich nur wenig mehr als die Hälfte für „besser“ als für „gleich“ entscheiden.

Da offensichtlich die Differenzierung zu schwach war, wurde eine neue Wichtungsmethode von 1992 durchgeführt, wonach Hörer mit Vorkenntnissen, viel Übung, analogen Hobbyerfahrungen, die sich professionell oder semiprofessionell aktiv mit Musikbearbeitungen beschäftigten oder selbst ein Instrument spielten, einen höheren Konfidenzfaktor von bis zu 7 erhielten. Dagegen blieb reine Musikbegeisterung ohne zusätzliche Wichtung. So qualifizierten sich die Hälfte der Probanden. Damit erhöhte sich Bepunktung für den mechanisch stabileren Kondensator auf über 12:5 für Klarheit und fast 2:1 für Räumlichkeit.

Nach einer kurzen theoretischen Rechnung wurde eingeschätzt, dass die elektrostatischen Anziehungskräfte dominanter wirkten als die elektrodynamischen Kräfte durch die Stromwechselwirkungen.

In der Firmenschrift [21] wurden einige Aspekte der obigen Publikation z.T. ausführlicher betrachtet, wie z.B. auch die Berechnung der dynamischen Kräfte. Während in [20] sich auf einen „normalen“ MKP mit Transmitterfolie bezogen worden war, ist in [21] der Kondensator in der Einleitung ein einfacher MKP ohne Transmitterfolie dargestellt. Mit dem Wissen der Einleitung wurde dann jedoch das Laservibrometer-Schwingungsbild von [21] wieder abgebildet, hier allerdings farbig und zusätzlich das entsprechende Bild in 3-D. Das farbige zeigte wieder die 2 Schwingungsbäuche und 3 Knoten in Längsrichtung des Signalweges. Das 3-D Bild überraschte, weil der eine Schwingungsbau um 180° phasenverschoben zum anderen ist.

Als Ergebnis der dortigen Hörsektionen wurden neue resonanzarme Kondensatoren entwickelt. Der Herstellungsprozess des bereits vorhandenen ClarityCap SA wurde in 2 nicht näher genannten Parametern optimiert. Es entstand der ClarityCap ESA, der eine Schallresonanzreduktion von -4.3dB SPL erreichte. Für die weitere Absenkung wurden neue Wege eingeschlagen. Viele Hersteller von Leistungskondensatoren segmentierten die Metallisierungsschicht um die Durchbruchfestigkeit zu erhöhen, wobei aber häufig auch der ESR anwuchs. Nach Untersuchungen am Sekundärelektronenmikroskop wurde das Verhalten der Metallisierungsschicht besser verstanden. Es wurde ein Design gefunden, das die Kräfte für die Resonanzen bricht, während die ESR sogar leicht absinkt. Mit diesem neuen Design wurden die Optimierungen wiederholt. Der Kondensator wurde dann noch mit einem optimierten Harz dick verpackt, so dass er ein gutes Verhältnis von Steifheit und Dämpfung aufwies. Es entstand der ClarityCap MR.

In der ergänzenden 2.Firmenschrift [22] wurden 2 neue frequenzabhängige mechanische Resonanzkurven aufgezeigt, die mit ihrer Unstetigkeit die Komplexität des Phänomens Klangunterschied veranschaulicht und den Bereich der Resonanzen auf 5kHz bis 25kHz verschoben hat.

Unverständlich ist nun, warum der herausoptimierte Claritycap MR gerade im Verlustwinkel bei 1kHz entscheidend schlechter war als die meisten anderen MKP (s. Messungen weiter vorn). Mit der Optimierung auf Schwingungsarmut stieg auch die Dielektrische Absorption an. Deshalb vielleicht hatten die Probanden solche Schwierigkeiten Unterschiede zu erkennen.

Aber in den Untersuchungen [19-22] wurde keinerlei Bezug auf die Dielektrische Absorption genommen, vielleicht aus gutem Grund oder aus Unkenntnis? Denn der serielle Widerstand ESR wurde vereinfacht als „dielektrischer Verlust“ bezeichnet.

Der ESR oder R_s gilt für das Modell der Serienschaltung L_s - C_s - R_s mit Vernachlässigung des parallelen Widerstandes R_p zum C_s , obwohl gerade in 2 Claritycap SA** Leckströme gemessen worden sind. Die Eigeninduktivität kann nur erfasst werden, wenn die Hochfrequenzmessung durchgeführt wird. Dort gibt es eine Resonanz, wo der ohmsche Anteil von R_s übrig bleibt. Aus der Resonanzfrequenz und C_s kann L_s errechnet werden. Es musste bedauert werden, dass die veröffentlichten Messdiagramme von anonymen Kondensatoren stammten und dass unbekannt war, ob das Diagramm der Frequenzverdopplung in seiner Aussage verallgemeinerungswürdig war oder ein spektakulärer Sonderfall. Denn, dass die k_2 größer war als das Originalsignal war schon ungewöhnlich. Wenn jedoch der Beispielkondensator gerade dort seine Resonanz hatte, dann wäre es eine wichtige Aussage. Das 3-D Bild in [21] war auch die einzige Darstellung der Phase und entsprach der entgegengesetzten Polung der Anschlussplatten. Es wurde in dieser Beziehung auch nicht der Unterschied zwischen den Kondensatoren mit und ohne Transmitterfolie herausgearbeitet, denn der ist offensichtlich da, wenn die Arbeit von [17] ohne Transmitterfolie herangezogen wird. Zu vermuten wäre, dass die reine k_2 Kurve von einem schlechten Kondensator ohne Transmitterfolie stammte und das Verzerrungsverhalten bei mit Transmitterfolie komplexer ist. Neben der akustischen Oberwelle k_2 sollte es auch Verzerrungen im elektrischen Phasenverhalten geben, so wie es die Lasermessungen bewiesen haben, aber die wurden nicht erwähnt. Möglicherweise waren die Verzerrungen auch nur im Zeitverhalten ermittelbar.

Eine kleine akustische Emission ist noch keine Gewähr dafür, ob im inneren nicht doch mehr Signalenergie in Wärme bzw. Verzerrungen umgesetzt werden, so wie es der äußere Schein zeigt, z.B. wenn der Kondensator schlicht und einfach in eine weniger schalldurchlässige Masse eingebettet wird. Sie ist notwendig, zumindest gegen äußere Schallanregungen, aber nicht hinreichend. Dies hat das Beispiel Mundorf supreme silver/gold 0,1µF bewiesen. Außer den z.B. in [17] angezeigten Ursachen für die Kondensatorverluste wurde bisher noch eines nicht erwähnt, dass sind nämlich die Anfangsbedingungen beim Start der Wicklung, denn dort sind die größten Raumreserven, die der Schwingungsauslenkung Platz schaffen. Die Wicklung selbst kann im weiteren viel glatter und homogener gestaltet werden, ebenso die äußere Verpackung.

11.7.1. Hörtechnischer Vergleich der Clarity-Caps

Natürlich war es interessant, ob die verschiedenen Entwicklungsstufen sich charakterlich unterscheiden und wie. Sind die eigenen Messungen zur DA mit erfassbar?

Die SA, ESA und MR reichten sich in das typische Klangverhalten normaler MKP (ohne Transmitterfolie) ein. Die Unterschiede waren gut reproduzierbar und lagen in der Größenordnung von Schaltprozessen an den Geräten oder Verstärkungsarten: Class A oder AB, Relais-Umschalten oder anderem, wie z.B.: Nach Einlegen einer neuen CD und Start der Wiedergabe war der Klangcharakter anders als nach Pause und Neustart. Verglichen wurde immer nach Pause Neustart. Für diesen Vergleich wurde die erste Hochtonkapazität der rechten Box noch weiter aufgesplittet, so dass nicht nur 0,47µF Kondensatoren sondern auch die 1µF Clarity eingeklemmt werden konnten. Der Vergleich erfolgte nach einem mehrtägigen Konditionieren der neuen Lötstellen mit eingeklemmten Audyn 630VDC Kondensatoren. Als 1µF Vergleichsreferenz wurde wie bei den 0,47µF der bisherige Typ Solen Fast-Cap 630VDC genommen. Die Aufwärmphase der Geräte betrug 1,5Tage. Für einige CD's wurde der linke Cynch-Kanal am Verstärker auf den rechten gelegt, damit einige Instrumente direkter gehört werden konnten, also ein Vergleich wieder in Mono.

Die Klanghölzer wurden über den SA härter dargestellt, die Kontur wurde einfacher im Vergleich zum Solen. Der brachte den Impuls etwas weicher. Der MR war wirklich anders. Der primäre Aufschlag war kaum zu hören, die Impuls insgesamt war auch härter, nicht zuletzt deshalb, zeigte er ein schnelleres Ausschwingen als der Solen. Zurück zum Solen war jetzt der Eindruck, als hätte dieser einen zusätzlichen Nachhall. Es konnte nur ein 30 bis 40s Ausschnitt verglichen werden, da der Charakter der Klanghölzer-„Bedienung“

durch den Instrumentenspieler selbst sich im Laufe des Titels änderte. Zuerst wurde härter Aufgeschlagen, dann musikalischer und schließlich traten erste Ermüdungserscheinungen auf.

Cara Dillons Gesang kam beim SA mehr aus der Box und nüchterer, trockener. Der ESA erweiterte den Raum der Stimme um die Box etwas und die Ortung lag ähnlich dem Solen weiter vorn. Der MR jedoch stellte die Stimme noch weiträumiger dar als der ESA, so dass deren Ursprung kaum ortbar bar, aber nicht diffus. Es war irgendwie irritierend.

Die Eingangsszene von Neil Young „unplugged“ wurde über den Solen mit viel Tiefenstaffelung dargestellt, die Klatscher kamen in der natürlichen Klangfarbenfolge und die Mundharmonika zeigte ein brillantes Feuerwerk nach den natürlichen Grundtonimpulse. Mit dem SA war die Tiefenstaffelung enger. die Klatscher waren schlechter erkennbar, die Mundharmonika wirkte gepresst, als wäre die Dynamik eingengt. Mit dem ESA schien die Mundharmonika weniger brillante Obertöne zu bringen. Nach dem Wechsel auf den MR wurde Tiefenstaffelung völlig zusammengepresst.

Die alte Violine in Hffi-Vision Klassik 3 Titel 5 wurde mittels SA spitzer und härter, man könnte bald an eine hochtourige kleine Säge erinnert werden. Der ESA führte den Strich ohne große Kontur sehr sanft aus. Als einziger machte der MR auf den ersten Eindruck die Wiedergabe sehr durchhörbar, auf den zweiten hin allerdings fiel auf, dass die Anstrichphasen mehr verschluckt wurden und das Ausschwingen war wieder kürzer. Die feinen Mikrovibrationen wurden also „zusammengestrichen“.

In der „drive the cold winter“ von McKennitt wirkte die Zimbal über den SA wieder härter mit weniger feinen Schwebungen, der ESA zeigte diese nüchterer und der MR engte die Dynamik ein. Ebenfalls geringe Unterschiede wurde Clapton's Gitarrensoli festgestellt. Der SA bedämpfte die die Seiten stärker, als wären sie straffer gespannt und stärker mit absorbierenden Materialien am Saitenende festgehalten. Der Anriss hatte weniger Farbe. Der ESA führte zu einer ähnlichen Farbfolge hatte aber weniger Dynamik. Über den MR wirkte das Soli fast schon langweilig.

Zum Schluss wurde der Audyn wieder eingesetzt. Er reihte sich zwischen dem Solen und dem ESA ein. Er war aber konditioniert. Sein Ausschwingen war schneller und die Dynamik größer. Ein neuer Audyn hatte hingegen ein helleres Klangbild und zeigte aber einen präziseren Anschlag der Klanghölzer, der am Start druckvoll sauber kam. Die erhöhte DA des konditionierten führte zu einem unnatürlichen ersten Aufprall. Der Effekt ist bei aufmerksamen Hinhören erkennbar. Leider wurde noch kein messtechnischer Stress gefunden, der die Musik-Konditionierung ersetzen könnte, so dass die Vergleiche verkürzt und exakter, bzw. automatisiert werden könnten.

Insgesamt ist aber formulierbar, dass sowohl die Erhöhung der DA in der Reihe Solen FC, Clarity SA, ESA und MR in der Impulscharakteristik hörbar ist als auch die Verkürzung des Ausschwingvorganges bei gezielt entwickelter mechanischer Festigkeit. Der Klangcharakteristik des MR nimmt eine Sonderstellung ein, so wie es auch die Messwerte in DA und $Dp(\tan\alpha)$ bei 1kHz und 100kHz ausweisen.

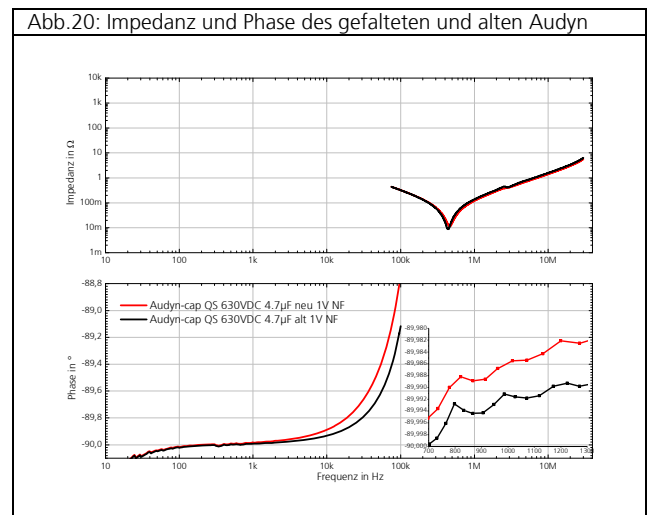
11.7.3. Chargentreue von Audynkondensatoren

Früher ähnelten die MKP-QS 4,7 μ F mit 630VDC Kondensatoren von Audyn denen von Solen in den Größenverhältnissen. Irgendwer gab mal in einer Zeitschrift kund, dass die Q6 dichter gewickelt sind und weniger zu schwingungsanfällig sind. Kurze Zeit später brachte eine neue Bestellung Audyn MKP-QS 630VDC, die deutlich kleineren Wickelradius aufwiesen. Im Schräglicht zeigten die dünneren Kondensatoren Falten. In Abb.19. wurde versucht den Vergleich alt-neu in einem Foto zu dokumentieren.

Vorstellbar wäre, dass die Wickel straffer gezogen wurden und dabei aber Falten warfen. Die Wickeldichte ist tatsächlich größer und die Schwingungsfestigkeit könnte im NF-Bereich geringer sein. Aber welche Nachteile wurde damit erkauft? Die aufgeworfenen Falten bewirken unregelmäßiges Verhalten im Dielektrikum. In Abb.20 wurde das gemessene Impedanzverhalten gezeichnet. Der verfaltete hat einen viel größeren Verlustwinkel, nicht nur in den Höhen, sondern auch bereits bei 1kHz, wie das Inset zeigt. Das ist so kein Zufall, die Kurven gleicher Machart von mehreren Kondensatoren sind praktisch deckungsgleich. Der R_s (HF-Resonanzfall) des gefalteten Konstrukts ist mit 12,2m Ω größer als der glatte mit 9,1m Ω , obwohl er einen größeren Durchmesser hat! Dafür hat der neue keine Resonanzen im induktiven Bereich.

Die DA der neuen ist um ca. 10% ebenfalls schlechter.

Die messtechnischen Eigenschaften der Kondensatoren reagieren also sehr sensibel auf Materialeigenschaften und Konstruktion.



11.7.3. Bewertung der Metalllegierung Ag99Au1

Der Vorteil der Ag99Au1 des Mundorf C's lag nicht, wie bereits festgestellt in seiner nichtvorhandenen besseren elektrischen Leitfähigkeit, sondern vielmehr in der nahezu vernachlässigbaren Elektromigration, d.h. besseren Langzeitstabilität, wie die Untersuchungen zeigten. Die elektrische und die thermische Leitfähigkeit fallen drastisch ab, wenn dem Silber geringe Mengen an Gold zugesetzt wird [H.Fujishiro et al., Cryogenics 33(1993), 11, 1086]. Bei 1%Au Zusatz steigt der elektrische Widerstand von 1,188 auf 1,801 $\mu\Omega$ cm an [24], gleichzeitig steigt die kritische Stromdichte an. Eine andere Quelle bestätigt den Zusammenhang mit dem Anstieg von 1,49 auf 1,883 $\mu\Omega$ cm [25]. Der Charakter der Elektromigration von Ag und Au war für jedes Material in Drahtform entgegengesetzt. Löcher wurden bei Au an der Kathode gemessen und Hillocks an der Anode, für Ag war es umgekehrt [26].

L.Cao et al. studierten die Elektromigration von Ag-Au-Filmen auf Si oder SiO₂ [27]. Bei 4nm Schichten entstand ein Film von dicht zusammenliegenden Metallinseln entsprechend dem Stranski-Krastianov Modell, die sich aber durch den Einfluss von DC infolge Diffusion umformten, zuerst in größere Flecke und dann in eine wellenförmige Struktur. Beide, Ag und Au-Atome diffundierten auf SiO₂ zur Kathode (-). Auf Si bewegten sich die Au-Atome vorwiegend zur Anode (+), ähnlich dem, wo reines Au auf Si(111) abgeschieden worden war, während die Ag-Atome nach wie vor zur Kathode diffundierten. Nach 5min erhöhte sich die XPS-Bindungsenergie verglichen zum Grundzustand, was bedeutete, dass ein effektiver Elektronenverlust eingetreten war. Durch ADXPS Messungen wurde ermittelt, dass durch die Elektromigration schon nach 5min SiO₂ freigelegt wird und dass an der Grenze der Filmflecke AuSi_x gebildet wurde, was überraschend war, weil es nicht thermodynamisch erklärt

werden konnte. Die Verbindung war die Ursache für die Diffusionsumkehr. Das zeigt, wie kompliziert sich Materie verhalten kann und dass die Umfeldbedingungen stark eingehen. Die freie Grenzflächenenergie hat im Unterschied zu den anderen Goldlegierungen im System Ag-Au ein Maximum für Ag₅₀Au₅₀. Die Folge davon ist, dass sich in den Ag-reichen Legierungen nicht wie erwartet Au anreichert, sondern Ag und die Au-Atome sollten in den Körnern bleiben [28].

Al-Filme reagieren viel empfindlicher auf elektromigrative Bedingungen. Al-Filme werden in ihrer Struktur durch hohe Frequenzen, unterstützt durch mechanischen Schwingungsstress, stark verändert und können sogar zerstört werden [29]. Das Al bildet dabei dendritische und seitlich hügelartige Auswüchse, die auch zu Kurzschlüssen führen können. Durch diesen Stofftransport entstehen dabei Hohlräume und Löcher im Film, die den Widerstand erhöhen. Bestimmte Kristallkörner vergrößern sich auf Kosten anderer. Geringe Temperaturerhöhungen beschleunigen diesen Prozess [31].

Unter anderem wurde deshalb in der Mikroelektronik geringe Menge Si (~1%) und in der weiteren Integrationsskalierung ebenfalls geringe Mengen Cu zugesetzt. Die leichte Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit war verschmerzbar, wenn dadurch die Zuverlässigkeit, d.h. die Stabilität der Leitbahnform, deutlich anstieg. Der Hauptgrund für dieses Verhalten war der relativ niedrige Schmelzpunkt des Al (660°C) und die schwache Bindungswechselwirkung zwischen den Al-Metallatomen. Die Elektromigration der neuen Cu-Metallisierung (Schmelzpunkt 1080°C) in der Hochtechnologie ist viel geringer.

Das Zink, das andere gebräuchliche Metall für die Filme auf den Kondensatorfolien (nicht nur als Kontaktflächenmaterial) hat einen noch niedrigeren Schmelzpunkt von 420°C und dazu noch einen niedrigen Siedepunkt von 910°C, was zu einem hohen Dampfdruck bei niedrigen Temperaturen führt und nicht zuletzt nur eine 2-wertige Bindungsfähigkeit. Theoretisch würde dann eine noch höhere Elektromigration erwartet, wenn nicht die höhere Atommasse die Bewegung wieder bremsen könnte. Hierzu waren leider keine Publikationen zu praktischen Untersuchungen der Elektromigration im Vergleich zum Al zugänglich.

Es hatte sich bei den Vergleichsmessungen zu Al-metallisierten Folienkondensatoren gezeigt, dass bei Audyn Plus und Mundorf Supreme mit isolierten Transmittermetallfilmen die dielektrische Absorption etwa doppelt so groß war, wie die der einfachen Grenzflächen von Audyn MKP QS und SOLEN FAST CAP. Das war zunächst auch so erwartet worden, da eine erhöhte Anzahl von Grenzflächen auch eine erhöhte Dielektrische Absorption bringen sollte.

Die Differenzierung der Kondensatoren war ungleich schwieriger, da der wechselnde Wiedergabeeindruck komplexer war als bei den Widerständen. Das entsprach auch dem ungleich komplexeren Aufbau dieser „Stromunterbrecher“. Es war auch so, dass dieser komplexe Eindruck auch durch das elektrische Schaltungsumfeld an sonstigen Weichenbauelementen beeinflusst wurde. Was ehemals besser rüberkam, war nach Bauteilwechsel gar nicht mehr so besser. Allein die Mischung von Elektrolytkondensatoren mit MKP in einer Weiche konnte schon die Klangbalance völlig verändern, zumal sich gezeigt hat, wie empfindlich der Hörsinn selbst auf Signale über der obersten Oktave (c^6 - h^6) war.

Kondensatoren mit Transmitterfolie wurden oft als impulsfester bezeichnet, nur weil sich die effektive Isolationsdicke verdoppelt hatte? Es gab auch welche, deren Gesamtdicke gleich der Einzeldicke des Isolators eines Kondensators ohne Transmitterfolie war.

Mit dem Kenntnisstand des Aufbaus konnte bei material-identischen und bei leichten Abweichungen im Aufbau hörtechnisch mit den Klanghölzern ein klassenspezifischer Unterschied festgestellt werden. Ohne Transmitterfolie war der Impuls härter und kürzer, innerhalb des Impulsgangs aber auch leicht diffus. Mit Transmitterfolie war der Impuls länger und damit „fassbarer“, manchmal war dann der erste Einschwingeneindruck weicher und wärmer, so wie gewünscht, der Grundton zuerst, aber danach stimmte das Ausschwingen nicht, weil im Vergleich zur Erfahrung das Ausschwingen viel zu hell und deutlich war, als würde irgendwo noch Energie hergezaubert werden. Der Mundorf Silver/Gold schaffte die Balance noch am besten. Dieses Ergebnis konnte höchstwahrscheinlich erst einmal einfach im Vergleich zum Supreme o.ä. dem Material Ag₉₉Au₁

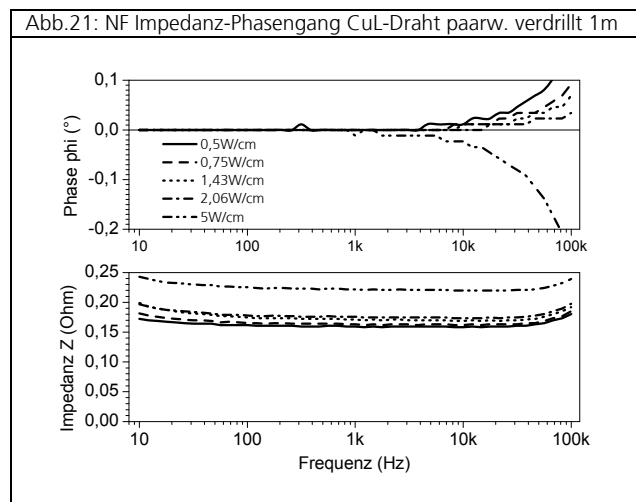
zugeordnet werden, da die Oberfläche einfach „edler“, d.h. weniger z.B. mit einem Oxid verunreinigt war. Al Filme haben an den Oberflächen auch direkt nach Herstellung (Dampfen, Sputtern) immer ein amorphes Aluminiumoxid von 2 bis 3nm Dicke bereits Sekunden nach dem Kontakt zur Luft, Zink ähnlich. Ein weiterer Grund könnte sein, dass die Oberfläche der Edelmetalllegierung glatter ist und nicht so zur Unregelmäßigkeit wie das Al neigt. Welchen akustischen Wiedergabeeindruck würde ein Silver/Gold ohne Transmitterfolie machen?

Auch ohne Transmitterfolie gibt es immer eine Fläche, die durch Wicklung und nicht durch einen PVD-Prozess im Vakuum erzeugt wird. Hier entstand eine Idee, wie eine neue Art der Folienkonstruktion gewickelt werden konnte, die es erstmalig erlaubt den fehlerhaften „Wickel-Kontakt“ quasi ideal zu beseitigen. Und das sogar mit dem Al genauso gut wie mit Ag₉₉Au₁. Aber im Gegensatz zur Widerstandherstellung ist es unter DIY nicht möglich solche Kondensatoren zu bauen.

11.8. Optimierung Cinch-Kabel

Nach den Untersuchungen zum Lautsprecherkabel war eine Überprüfung der Annahmen im Kapitel 1 zum Cinch-Kabel aus verdrehten CuL-Draht 0,52mm Durchmesser notwendig geworden. Dort wurde die Verdrehung abgebrochen sobald eine merkliche Verkürzung eingetreten ist. Denn dann bestand die Gefahr, dass die angemessene Länge nicht mehr stimmte.

Nun wurden 5 verschiedene Verdrehungsgrade getestet. Diesmal wurden 2 Bohrmaschinen genommen, damit die Gleichmäßigkeit noch besser eingestellt wurde. Die Maschinen wurden fixiert, damit der Draht gespannt blieb. Um den höchsten geplanten Verdrehungsgrad einzustellen, musste die 2. Bohrmaschine manuell mindestens 10cm nachgeführt werden, da die Verkürzung des Kabels ein Abknicken des Drahtes am Bohrfutter bewirkt hat. Mit dem Hioki 3522-50 konnte die Messung bis 10Hz nach unten ausgedehnt werden. Die Kalibrierung erfolgte wie bei den Hewlett-Packard's 4284A und 4285A über OPEN und SHORT mit der auf den Vishay LTO30 angepassten Kurzschlussbrücke. Als Abschlusswiderstand wurde der 47Ω gewählt, ein 75Ω war nicht vorhanden. Im Gegensatz zur Audio/Videotechnik sind die Messlabore auf 50Ω Abschlusswiderstände bzw. Wellenwiderstände geeicht. Die Präzision in der Messung auf Phase am Messgerät beschränkte sich beim Hioki auf 0,01° (Abb.21).



Die starke Verdrehung führte zu einer stark kapazitiven Charakteristik. In Abb.22 wurde der Phasenwert bei 100kHz gegen den Verdrehungsgrad aufgetragen. Der Nulldurchgang erfolgte bei 4,8 halbe Windungen (W) je Zentimeter. Diese Angabe resultierte aus der besseren Zählbarkeit der Windungen.

Dieser fantastische Phasengang mit 2,06 Windungen (W) auf einen Zentimeter (Durchschnittswert für mehrere Zentimeter) musste ja bei höheren Frequenzen ja nicht so bleiben. Es wäre aber für eine Übertragung von Digitalsignalen vorteilhaft. Deshalb wurde noch der Hochfrequenzgang mit der HP 4285A gemessen.

Alle nicht verkürzten Kabel zeigen auch in der Hochfrequenz einen qualitativ besseren Impedanz- und Phasengang, bis zur doppelten

der SACD Taktfrequenz von 2,822MHz ist die Impedanz fast konstant. Das beste Impedanzverhalten würde ein Kabel interpoliert mit 0,96 halbe Windungen zeigen (s.Abb.22). Die HP4285A macht erfahrungsgemäß ab 20MHz mehr Messfehler.

Abb.22: Einfluss Verdrillungsgrad auf die Phase bei 100kHz

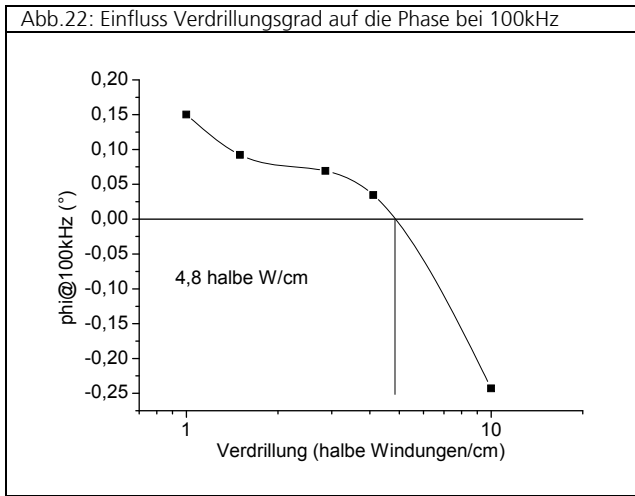
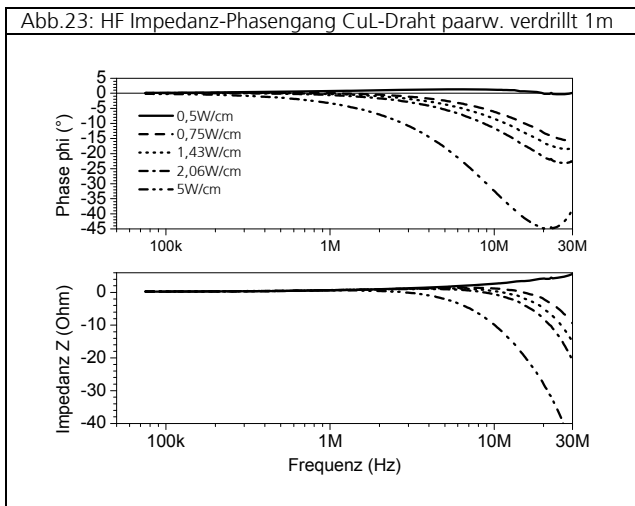


Abb.23: HF Impedanz-Phasengang CuL-Draht paarw. verdrillt 1m



Damit wäre ein Doppeldrahtkabel 2,4W/cm für NF optimal, da durch die noch relativ starke Verdrillung die gewünschte innere Steifheit gegen elektrodynamische Kräfte gewährleistet ist. Für sehr hohe Frequenzen ist eine solche Steifheit nicht mehr erforderlich, da die Trägheit der Drähte dann ausreichend hoch wäre.

Für Cynch-Kabel von weniger als 1m Länge und Abschlusswiderstand von 33kΩ (Marantz PM-80) war erfahrungsgemäß der Fremdspannungseintrag ausreichend gering. Gemessen wurde eine Erhöhung des 50Hz Pegels von -92,5dBV auf -90,9dBV. Genutzt wurden auch nur Längen von weniger als 50cm im Rack. Für die Übertragung der Digitalsignale wären allerdings noch die Wellenwiderstände der Stecker zuberücksichtigen. Praktisch war der Weg nur 40cm lang. Als Schutz kam wieder ein Teflonschlauch von 1mm Innendurchmesser zum Einsatz. Jede andere Montage mit Drähten, die dickeren Isolationskunststoff als dem Lack haben, führt wie bei den Lautsprecherkabeln praktiziert zur Aufweichung der Steifheit zwischen den Drähten.

Abb.24: Verdrillter CuL-Draht als Cynch-Kabel



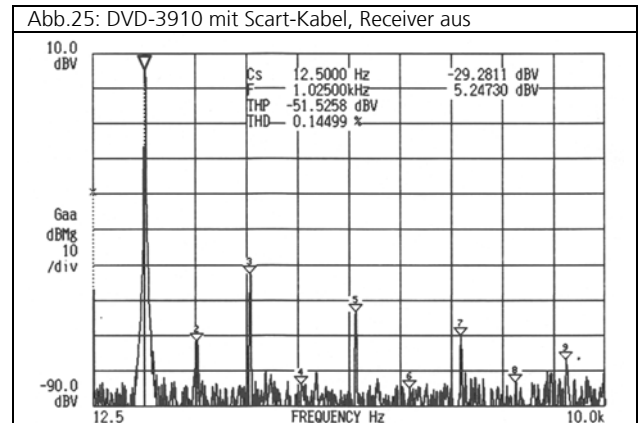
Interessehalber wurden 3 verschiedene Kabel für den Datentransport vom Denon DVD-3810 (Videosektion abgeschaltet) zum Sony DAT-

59ES in der Audiowiedergabe verglichen. Bei normaler Zimmerlautstärke 70-80dB in Class A Verstärkung waren keine Unterschiede zu vernehmen, außer dass sich die Klarheit der Abbildung ein wenig änderte. 10dB lauter wurden sofort Unterschiede erkennbar, wobei das BNC-Kabel (Messkabel koaxial mit Bajonetstecker und Cynch-Adaptoren) nur geringe Unterschiede zeigte. Genutzt wurde das DAT als DA-Wandler. Die stärkste Verdrillung erhöhte die Klarheit und die Räumlichkeit etwas, aber es verursachte ein Anhebung oberhalb der Brillanz, das Ausschwingen von Gitarrenseiten zeigten ein gewisses Hochtonflirren, oder so ähnlich, wie es von einigen Röhrenverstärkern in der Erinnerung war. Das war nicht unbedingt unangenehm, eher anregend, hatte aber nichts mit dem Original zu tun. Fazit: Die starke Verdrillung führte dazu, dass der Ausgangsendeverstärker zu zusätzlichen Eigenschwingungen angeregt wurde. Das Kabel, das auf die 0,64 Windungen getrimmt wurde, war zunächst unauffällig, brachte aber Percussionsimpulse schärfer und ohne das Hochtonflirren. Bei größeren Lautstärken, d.h. größerer Dynamik (Test-CD's nur mit einem Dynamikbereich von 12dB) öffnete sich der Wiedergaberaum deutlich nach hinten und die Vordergrundigkeit mancher Passagen verschwand fast. Und nicht nur die Instrumente wurden naturgetreuer wiedergegeben, auch der Dynamikeindruck hatte sich erhöht und vor allem, was überraschte, war, dass Gesangsstimmen ebenfalls noch lebhafter wirkten, noch feinere Nuancen waren ermittelbar.

Erwartet war eigentlich, dass die 15-Jahre alte DAT-DA-Wandlung schlechter als der neue Denon sein sollte und Unterschiede nur zwischen den Schlechtigkeitsgraden zu finden sein sollten.

Daraufhin wurde das Verzerrungsspektrum des Denon noch einmal geprüft. Im Unterschied zur Eingangsmessung nach Inbetriebnahme des Players wurden plötzlich viel mehr Verzerrungen bei 1kHz Vollaussteuerung aller Test-CD's entdeckt, Faktor 10 mehr (s. Abb.24). Es war zu befürchten, dass eine Übersteuerung des Analogausgangs für diesen Player vorlag oder eine Asymmetrie der Mutingschaltung. Dann müsste bei niedrigeren Pegel der Klirrfaktor kleiner werden. Die Stereoplay Test-CD 1997 hatte eine Pegelstaffelung des 315Hz Tones von 0dB bis -120dB. Es ergab sich ein unverständlicher Zusammenhang. Der Klirrfaktor war aber bei -6dB sogar mit 0,1% größer als bei 0dB. Bei -12dB war er zu Anfang etwas tiefer, begann aber nach 3s langsam zu sinken bis er bei 0,015% landete. Und das war sehr gut reproduzierbar.

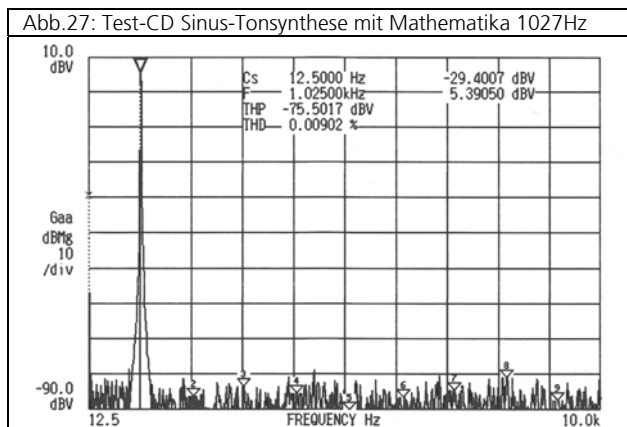
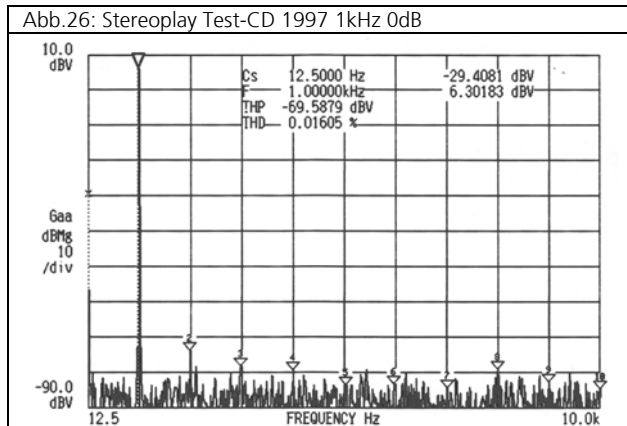
Abb.25: DVD-3910 mit Scart-Kabel, Receiver aus



Nach einigen erfolglosen weiteren Verdächtigungen wurde zur Neueinstellung des Setups der Satellitenreceiver (Kathrein UFD 233) angeschaltet. Da verschwanden alle überhöhten Verzerrungen augenblicklich. Eine Abtrennung des Scart-Kabels brachten den gleichen Erfolg. Der Analogausgang des Denon-Players zum Verstärker war schaltungstechnisch im Denon parallel geschaltet zum Analogausgang der Scartbuchse, die eine extra Schaltung aufwies.

Eine der „erfolglosen“ Maßnahmen war die „Erdung“ des FFT-Analyzers mit der Phonoerdung des Verstärkers. Dieser brachte aber „nur“ eine Absenkung des Rauschpegels mit sich. Nun konnte vielleicht die Frage beantwortet werden, welche der Test-CD die reinsten Sinussignale lieferte, die von Stereoplay oder vom Mathematika-Programm synthetisierte (s. Kapitel 5).

Der synthetisierte 1kHz Ton hat zwar keinen harmonischen Klirr aber eine Verbreiterung am Fuß, was vielleicht auch auf den Brennprozess bzw. Auslesequalität der gebrannten Kodak CD-R Gold Ultima zurückzuführen ist. Kann man einen Unterschied hören? Die Kodak bringt einen etwas wärmeren, aber klareren Sinuston, der an den Bruel&Kjaer Ton des Kalibrators erinnerte.



Ohne die Denon internen untypischen Verzerrungen waren die Klangunterschiede zum DAT aber immer noch recht deutlich erkennbar, wenn auch gerade noch bemerkbar geringer. Offensichtlich liefert die Digitalverarbeitung des neuen Players Denon DVD-3910 mit seinem AL24 Prozessing Plus eine hervorragende Genauigkeit, der Prozess der DA-Umsetzung und die Verschaltung danach im Denon selbst dem jedoch nicht folgen kann. Bereits mit dem Marantz CD-72 war der Eindruck hochgekommen, dass die DA-Wandlung vom DAT gerade noch vernehmbar besser war. Die Wiedergabe konnte damals auch verbessert werden, als der parallele Analogausgang im CD-72 mit Lautstärkeregelung abgetrennt worden ist. Die Abtrennung der Zuführung zum Scart behindert vorerst die DVD-Funktionsfähigkeit. Das war also der nachteil des Universal-Players.

Das neue Kabel und die externe DA-Wandlung führte dazu, dass die Zimbel und die Tambourins (Schellentrommel) in MCKennitts „Drive the cold..“ (Track4) und in Pawnshop (1, Track 1) jegliche lästige Übertriebenheit der Hochtonausschwingungen verloren. Das Ausschwingen der Zimbel zeigte feine Schwebungen auf. Die Tambourins waren allerdings noch etwas grundtonarm, bzw. wurde die feine Aufziselierung vermisst, die käme eventuell erst, wenn der Frequenzgang über 22kHz hinausginge, so wie es von der LP bekannt war. Die Mundharmonika von Neil Young's „unplugged“ hatte nun auch ein authentisches Bild gegeben. Die Stimme der Cara Dillon (Track 5) wanderte in der virtuellen Lokalisation tiefer und schien nur noch 40cm über der Hochtonerverbindungsline zu orten zu sein, ebenso wurde der scheinbare Durchmesser auf 20cm verkleinert. Ein gleichsinniges Verhalten stellte sich immer ein, wenn nach dem Einschalten der Geräte die Ortung mit dem verglichen wird, wenn die Geräte 14 h an waren und wenn auf Class A geschaltet wurde.

Bei einer beabsichtigten Aufnahme am DAT war plötzlich der langsame Vorlauf defekt. Nach der Reparatur (s. Kapitelabschnitt 11.9.) konnte im Modus „Record.Pause“ festgestellt werden, dass sich die Klangbalance noch mehr in Richtung Grundton verschoben hatte und jegliche Schärfe auch neuerer CD's verschwanden über diesen DA-Wandlungsmodus. Offensichtlich war die elektrische Anpassung zwischen den Schaltungsstufen nicht optimal. Die Wiedergabe nach Aufnahme auf Band hingegen brachte dann keine weitere Änderung mehr.

Für einen Test wurden die 10µF MKP am Analogausgang des DAT durch Kurzschlussbrücken ersetzt. Der Unterschied nach dem Einspielen des Systems war gering und beschränkte sich auf geringfügig präzisere und intensivere Bassimpulse und einer leicht verbesserten Grundtondynamik, nicht jedoch eine verbesserte Mitten- und Hochtonauflösung.

Ein Blindvergleich mit einer anderen Person [37] bestätigte die gehörten Charakterunterschiede zwischen dem Denon und dem DAT mit MKP-Kopplung: „Die 2. Wiedergabe kommt deutlich plastischer und räumlicher“.

Den Wellenwiderstand oder Wellenimpedanz kann in erster Näherung aus den geometrischen Gegebenheiten des Kabels berechnet werden, wenn das Kabel eine Paralleldrahtleitung ist.

$$Z = \frac{120\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{2a}{d}\right)$$

Ist der Abstand gleich dem Drahtdurchmesser, wenn wie hier die Drähte sich berühren und ϵ_r von 1 für Luft angenommen wird und die Berührungsstelle sehr schmal ist, dann ergibt sich ein Wellenwiderstand von 83Ω, was den geforderten 75Ω sehr nahe kommt. Und das gilt für alle Konstrukte egal welchen Drahtdurchmessers, was erstmal sehr praktisch ist. Der Lack hat eine Dicke von 20µm und erhöht dadurch die Impedanz auf 83Ω bei 0,5mm Drahtdurchmesser und wenn ϵ_r von 2,1 bei 1MHz für den Lack berücksichtigt wird, wird die Impedanz wieder verringert. Voll mit Polyurethan vergossen, würde sich Z auf 61Ω verringern. Damit kommt das Konstrukt dem geforderten 75Ω Wellenwiderstand sehr nahe.

Die Wellenimpedanz wird auch aus der Kurzschlussinduktivität L und der Leerlaufkapazität C berechnet.

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Leider wurde die Messung mit offenen Leitungsenden bei hohen Frequenzen stark verfälscht, da die Anordnung bei hohen Frequenzen wie eine Sendeantenne Energie abstrahlt und die Impedanz stehende Wellen abbildet.

11.9. Reparatur des Sony-DAT 59ES und Probleme mit der Abwärme
Das DAT hatte schon seit einigen Jahren Probleme beim Kassettenauswerfen nach einigen Stunden Betrieb. Das Band wurde nicht vollständig in die Kassette eingespult und trotzdem wurde die Kassette herausgebracht. Es war zu spüren, dass da ein Widerstand war, wenn die Kassette aus dem Schacht herausgezogen werden sollte. Ein nochmaliges Laden oder vollständiges Zurückspulen ließ dann den Auswurf erfolgreich verlaufen. Die Entnahme der Kassette war dann ganz leicht. Nun funktionierte beim Play Start kein Bandvorlauf mehr. Nach einer Recherche konnte bei [38] eine Reparaturanleitung gefunden werden. Die Fehlerursache soll eine Depositionierung des „Bremsfilzes“ sein. Nach Ausbau des Laufwerks wurde sichtbar, dass die Befestigungsschraube vom Zugmagneten und der Zugmagnet selbst herausgefallen war. Der Zugmagnet wurde wieder eingesetzt und die Schraube mit Reparaturlack fixiert. Dann wurde das Laufwerk zerlegt. Der Andruckfilz bzw. Bremsfilz war vom rechten Wickel ganz verschwunden. Laut Service Manual befand dieser sich auf einem Hebel, der die Ref.No. 379 und die Part.No. X-3363-24-1 sowie Description Lever (BT) Assy hatte. Diese

Ersatzteile gab es nicht mehr. Es wurde ein Sony DTC-57ES ersteigert, wo die Mechanik noch nachweislich funktionierte. Der Hebel wurde einfach ausgewechselt. Die Kunststoff-Sprengringe ließen sich einfach, mit etwas Wackelgeduld, von der Achse abziehen. Der Filz wurde mit Alkohol-Wattestäbchen abgerieben, was vielleicht zuviel war, denn nach der Montage lief das Band erstmal stottrich. Nach Schnell-Umspulen war eine Wiedergabe möglich, aber mit viel Fehlern. Es wurde mit Reinigungsband 4s lang gereinigt. Dann war die Wiedergabe besser. Nach jedem Umspulen war die Wiedergabe fehlerfreier, offensichtlich musste der Filz eingerieben werden.

Nach Anschalten des Gerätes mit geöffnetem Deckel war bemerkt worden, dass sich die Spannungsstabilisatoren trotz Kühlkörper stark aufheizten, sowohl die freistehenden mit Kühlkörper als auch die, die an der Rückwand angeschraubt worden waren. Der Vorläufer -57ES hatte an der Rückwand noch einen Kühlkörper, das -59ES nicht mehr, der Nachfolger -60ES jedoch hatte ihn wieder, warum wohl? Das bedeutete, dass die Kühlung wichtig war. Jedoch reichte der Kühlkörper des -57ES nicht aus. Es wurde von Conrad ein möglichst großer beschafft und angepasst. Nun blieben die Rückwand-Bauelemente lauwarm. Die beiden inneren Stabilisatoren heizten das Gerät von innen auf, so stark, dass nach 1h das Laufwerk immer noch warm wurde und der Auswurf wieder Probleme bekam. Dann wurde der Deckel über den beiden Leistungselementen mehrfach mit 3mm Breite geschlitzt, so dass die sich erwärmende Luft durch den Deckel direkt entweichen konnten. Die Luft wurde unter dem Laufwerk durch Löcher im Boden „angesaugt“. In diesem Zustand, wenn das DAT-Deck freistand, gab es keine Probleme mehr. Aufgestellt in einem Rack, in einer Ecke des Raumes mit verminderter Luftzirkulation kam es nach Stunden wieder zu Auswurfproblemen.

Die eigentliche Ursache sich entwickelnder Defekte von DAT-Laufwerksmechaniken der Nichtprofiserien war vermutlich immer die starke Aufheizung im Gerät. Die unterschiedlichen Materialien, Metalle und Kunststoffe, die miteinander kombiniert wurden, haben unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten. Eine Justage funktioniert dann nur in einem bestimmten Temperaturintervall. Wenn dazu noch geringer mechanischer Abrieb als Verschleiß dazukommt, entstehen derartige Probleme, so dass sich sogar die Klebschicht am Filz lösen konnte. DAT-Geräte, die innen in mehrere Kammern aufgeteilt waren, wo die aufgeheizte Luft nicht überall hingelangte, waren damit geringfügig aufwändiger aber wesentlich teurer aber auch vor allem wesentlich langzeitstabiler. Die Stabilität wurde weiter erhöht, je weniger Kunststoff verwendet wurde. Kunststoffe dehnen sich 5x bis 10x soviel aus wie Metalle. Darüberhinaus ist auch die Wärmeleitung von Kunststoffen viel schlechter als von Metallen, nämlich 100x weniger, was dazu führt, dass die Aufwärmung die Konstruktionsgeometrie noch mehr verzerrt und damit den Verschleiß erhöht.

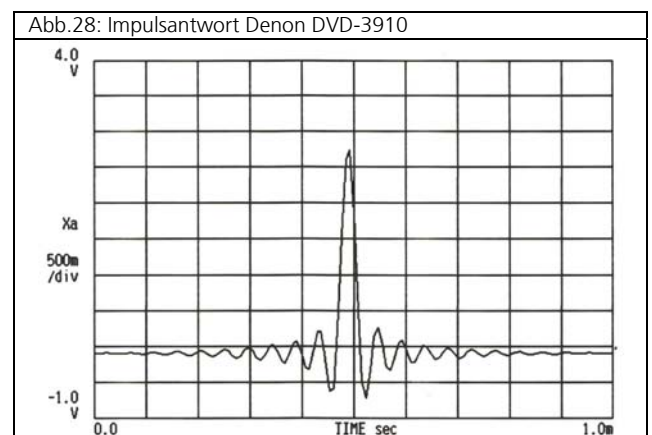
Damit wurde klar, dass elektronische Geräte mit mechanischen Elementen (auch optische Disk-Laufwerke gehören dazu) möglichst freistehen sollten. Wahrscheinlich testet kein Hersteller die Geräte in einem engen Rack. Bereits die Eigenerwärmung von rein elektronischen Geräten wie Verstärkern kann den Arbeitspunkt beträchtlich verschieben, wenn die Luftzirkulation oder Wärmeabstrahlung ein wenig behindert wird.

11.10. Nachjustage der Frequenzweichen

Bei aller Entwicklung hin zu weniger Verzerrungen bestätigt sich die alte Ansicht, dass die natürlichen akustischen Musikinstrumente einschließlich natürlicher Geräusche wie Beifall vom Einschwingen wie vom Ausschwingen originalgetreuer dargestellt werden können. Die Natur der menschlichen Stimme jedoch scheint im Gehör jedoch eine Ausnahme zu machen. Es ist aber auch schwierig Stimmen richtig beurteilen zu können, da der Gesang sehr häufig anders klingt als die Sprache, die noch ohne elektrische Umwandlung bei Konzerten gehört werden kann. Gesang ist eigentlich nur über Mikrofon bekannt und damit schon verzerrt. Einem normalen Hörer ist es auch nicht möglich, die Stimmen im Aufnahmestudio zu hören. So bleibt denn nur der deduktive Schluss, wenn alle akustischen Instrumente, die man sehr wohl aus dem Konzert live ohne Elektronik kennt, originalgetreu erklingen, dass dann auch die Stimme richtig dargestellt wird, auch wenn sich das Gefühl sträubt, wenn es das anders haben will. Genau so ist es mit der ClassA oder ClassAB Verstärkung des PM-80 vom Marantz. Das Empfinden der Stimme profitiert vom k2 der ClassAB Technik. Merkwürdigerweise

ist es aber so, dass gerade die ClassA Technik die gefühlsmäßige physiognomische Übereinstimmung zwischen Coverbild der Person und des Akustikbildes besser in Übereinstimmung bringt. Einbildung? Die ClassAB Technik bewirkt eine etwas lautere Wiedergabe, was auch verständlich ist, denn anders als die passiven Bauelemente, die die Energie nur transformieren können und die Phasen verschieben, verstärkt die elektronische Schaltung aktiv und fügt Verzerrungen als zusätzliche Energie ein. Ob diese phasengleich eingekoppelt wird oder nicht, hängt vom jeweiligen Arbeitspunkt ab. Übernahmeverzerrungen der AB-Technik liegen im nichtlinearen Bereich der Transistorkennlinien, daher liegt die Vermutung nahe, dass sich die Phasen der harmonischen etwas unterscheiden sollten.

Der Stimmenbereich liegt im Obertonbereich gerade im dem Trennfrequenzbereich vom Hochtöner zum Tieftöner bei 2.4kHz. Ist durch eine bessere elektrische Phasenübernahme, die den horizontalen Versatz des AL130 ausbügelt, eine bessere Wiedergabeprecision zu erreichen? Der exakte Versatz der realen Schallquelle ist nicht so einfach bestimmbar. Die allermeisten DA-Wandler haben einen Standardfilter, die eine Impulsantwort gemäß Abb.28 liefern. Die Messung erfolgte mittels Stereoplay Test-CD. Es gibt ein Preringing und ein Postringing. Das Preringing erreicht etwa -20dB, liegt also noch im hörbaren Bereich. Die selteneren Filter ohne Preringing zeigen ein intensiveres Ausschwingen.



Was ist noch machbar mit der vorliegenden Konstruktion? Liegt die mangelnde Hochtton-Feinauflösung mit nicht exakt übereinstimmenden Phasenanschnitt zwischen Hochtöner und Tiefmitteltöner zusammen?

Aus Erfahrung mit den Simulationsprogrammen ist bekannt, dass eine Feineinstellung der Phasen mit individueller Variation der Weichenbauelemente möglich ist, ohne dass die Schalldruckamplitude wesentlich verändert wird (< 0,5dB). Das geht um so schlechter, je weniger Bauelemente zur Trennung benutzt werden. Unter Berücksichtigung der Lage der jeweiligen Schallentstehungsorte des Tieftöners und des Hochtöners lassen sich dann eventuell die Phasen entsprechend zur Deckung bringen, unter Voraussetzung, dass exakte 360° Phasenverschiebung vom Ohr in diesem Frequenzbereich nicht dedektiert werden kann, (s. Kap.2). Die erste Näherung sollte die Schwingspulenvorderkante sein. Das kann aber nicht bestimmt werden, ohne den HT zu zerlegen. Als nullte Näherung könnte zunächst die Sicke/Membrankante angenommen werden, denn der Schwingspulenträger ist Al und trägt kaum zur Verzögerung der Laufzeit bei, weil die Schallgeschwindigkeiten sich wie 18:1 verhalten. Die Schallgeschwindigkeit des Kapton vom AL130 beträgt nur 2500m/s, aber trotzdem 7:1 im Verhältnis zu Luft. 7mm von der Schwingspule bis zur Dustcap/Membran gehen dann nur als 1mm ein. Theoretisch ergeben sich dann nur -19mm für den AL130. Da dieser aber auf die Schallwandfront aufgeschraubt ist, können 4mm abgezogen werden, es bleiben 15mm. Werden jetzt 5mm Versatz des HT NoFerro12 subtrahiert, bleiben 10mm Versatz für den AL130. Das war in die Simulationsprogramme eingegeben worden und der Schalldruck dahingehend linear optimiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die simulierten Phasen innerhalb $\pm 10^\circ$ übereinstimmten. Das war der Stand Kapitel 9 Ende.

Wegen der mangelnden Hochttonimpulsprecision stand die Frage Phase erneut zur Debatte. VISATON gab für den AL130 -35mm an,

das war überraschend viel. Leider konnte kein Wert für den SEAS NoFerro12 ermittelt werden. Abschätzungen von anderen lauteten -10mm. Was in etwa -25mm für den Versatz des AL130 erbrachte. Aber stimmt das überhaupt?

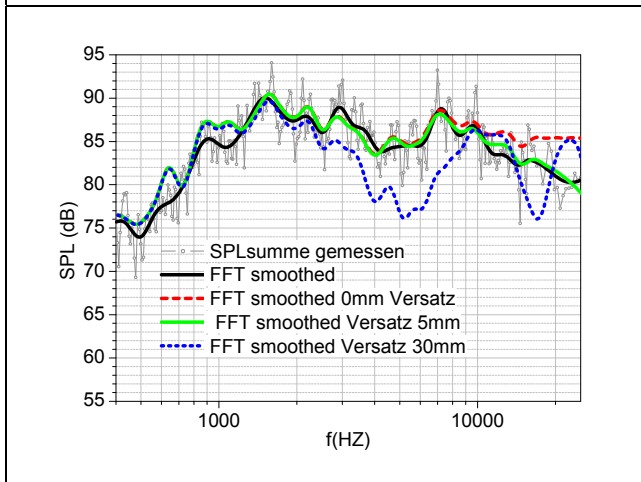
In [32] wurde ein einfaches Anpassungsverfahren vorgestellt, mit dem der Tiefenversatz über die Simulation durch probieren zu ermitteln war. Zunächst wurden die Töner einzeln vermessen und dann parallel gemeinsam.

Das war möglich, da der Marantz PM-80 impedanzstabil bis 2Ω blieb. Die Simulation musste dann die Summenmessung aus der Summe der Einzelmessungen wiedergeben, wenn der richtige Versatz eingegeben worden ist.

Bei der Eintragung des Tiefenversatzes von 5mm für den Tiefmitteltöner, ergab sich bei 1 bis 6mm eine Absenkung der hohen Töne proportional zur Frequenz. Und hier wurde die Sollkurve in Abb.29 bereits bei 5mm Versatz erreicht. Bei weiteren Versatzvergrößerungen senkt sich der Hochtonast weiter ab und bildet anschließend einen Einbruch, der sich zu niedrigeren Frequenzen verschiebt. Bei 30mm resultierten dann 2 Einbrüche. Keine der anderen Versatzwerte konnte also eine bessere Übereinstimmung liefern als die mit 5mm.

Auch in [32] wurden nur 3mm für 2 Tiefmitteltöner Excel W15CY001 in D'Appolito Anordnung mit dem darunter geklemmten T25CF002 Hochtöner ermittelt, was der Kante von 3mm um den Hochtöner entsprach und was trotz Filzbedämpfung einen schmalen Einbruch im Schalldruck-Frequenzgang formte.

Abb.29: Gemessene und simulierte Summenkurve mit Versatz



Durch diese Messmethode brauchte die akustische Phase nicht direkt gemessen werden. Der gemessene Schalldruck ergab sich aus der Wechselwirkung der akustischen Phasen. Der Phasenstart im AL130 erfolgt also 5mm tiefer als der des Hochtöners Seas NoFerro12, dessen Frontplatte mit der Schallwandebene gleichauf lag, obwohl der AL130 auf der Schallwand aufgesetzt worden war. Die Kalotte des Seas war etwa um die Stärke der Frontplatte 3mm nach hinten versetzt. Die Simulationskurve des Tiefenversatzes entsprach ziemlich genau der praktisch gemessenen Kurve. Das ergibt nach Abb.30 einen Phasenstart in etwa der Linie, wo der Sickengummi auf der Al-Membran ansetzt.

Wie müssen nun die elektrischen Phasen eingestellt werden, damit der Hochtöner in einem möglichst breiten Frequenzbereich um die Trennfrequenz herum in Phase zum Tieftöner kommt?

Die Lösung der Aufgabenstellung erfolgt unter Annahme des Modells, dass die im Kapitel 2 erwähnten 40ms Taktzeit (25Hz) als Scanzzeit genau so wie für den Sehsinn gilt und der Erkenntnis aus Kapitel 4, dass ein Phasensprung in dieser Scantaktzeit von 180° als sehr desorientierend und unangenehm empfunden wird.

Unterhalb der Trennfrequenz bleibt der Tieftöner theoretisch zunächst bei 0° und wird dann nach der Trennfrequenz zu -360° angesteuert, aber da ist er nicht mehr zu hören. Im Übergangsbereich der Trennfrequenz liegt er bei -180°. Dort teilt er den abgestrahlten Schall mit dem Hochtöner, der dort mit +180° seinen Schall abgibt. Bei niedrigen Frequenzen, wo der HT noch nicht

zu hören ist, liegt die Phase bei +360° und driftet dann bis der TT nicht mehr zu hören ist auf 0°. Im Übergangsbereich der Trennfrequenz, die bei Weichen 4. Ordnung sehr schmal ist, wird also der Ton einer halben Periodendauer zu früh abgestrahlt, aber nur mit halber Leistung, die andere Hälfte mit einer halben zu spät. Das Signal wird also verschmiert. Eigentlich müsste dieser Bereich unter 2,1kHz gelegt werden können, dort wo nach BLAUERT sowieso eine diffuse Ortungscharakteristik erfolgt, dann würden aber die Verzerrungen des Hochtöners ansteigen und die Belastbarkeit gesenkt werden.

Abb.30: AL130 seitlich mit Maßstab



Zunächst wurden die berechneten elektrischen Phasenwerte bei 3 Stützfrequenzen notiert und die Differenz zwischen Hochtöner und Tieftöner erfasst. Dann wurden die Größenbeträge der Bauelemente verändert, um die elektrischen Phasen anzunähern, wobei die Schalldruckamplituden nicht mehr als 0,5dB verändert werden sollten.

Dann wurden die Filterelemente des Hochtöners getestet. Keines der Weichenelemente brachte die notwendigen Verbesserungen, immer wurden nur Verschlimmbesserungen erhalten. Der Saugkreis der Hauptresonanz des HT wurde entfernt. Dieser hatte keinen Einfluss auf den Schalldruck-Amplitudengang. Wahrscheinlich, weil der Impedanzanstieg des Hochpasses 4.Ordnung steiler war. Aber er brachte die entscheidenden Fortschritte: Von 1,3kHz bis 3kHz blieb der HT unter dem TT. Schließlich konnten die Phasendifferenzen in der Simulation auf die in der Tab.9 angeführten Werte verringert werden. Für den linken Kanal gelang Deckungsgleichheit fast ideal.

Tab.9: Stützwerte

f	d _{HT-TT,re}	d _{HT-TT,re}	d _{HT-TT,li}	d _{HT-TT,li}
	alt	neu	alt	neu
Hz	°			
1600	29	6	16	1
2500	9	3	-1	-3
4000	-20	-19	-8	-9

Der eine Saugkreiskontakt wurde an einer gut zugänglichen Stelle der rechten Box abgelötet und die gelösten Stellen sauber nachverzint. Dann konnten die beiden Drahtabschnitte mit einer Kunststoffbüroklemme zusammen gehalten werden oder eben nicht. Dadurch wurde ein Klangvergleich direkt möglich. Nacheinander wurden wieder die aus Kapitel 10 verwendeten Testtracks in Mono durchgehört. Der erste Eindruck war, dass die korrigierte Form klarer und durchhörbarer klingt. Aber so richtig beschreiben konnte man diese Modifikation nicht. Schließlich kam CD Eric Clapton „UNPLUGGED“ dran, eine sehr gut gelungene Live-Aufnahme. Das Gitarrensolo in Tack 13 nach 3min wurde plastisch so echt, dass die Anrisse, die Andruckprozesse und Loslassen der Saiten fast 100%ig wie live dargestellt wurden, dass es spontan überwältigte. Das war es!

Es war nicht zu fassen, dass so geringe Phasenänderungen eine Verbesserung der Impulsvorgänge erlaubten. Aus Kapitel 2 war bekannt, dass der Einfluss der Phasenverschiebung mit steigender Frequenz niedriger wird, die größere Differenz bei 4kHz sollte daher weniger auffällig sein. Besser ging es erstmal nicht.

Nun wurde die Weiche der linken Box umkonstruiert. Hier musste allerdings zusätzlich der 2.Kondensator um 0,56µF erhöht werden. Dann wurde alles verlötet. Anschließend mussten die Weichen neu eingespielt werden. Das war ja bekannt.

Die Abhörungen erfolgten jetzt immer mit ClassA.

Cara Dillons Stimme (Track 5) erklang wie live und ihr Ursprungsort war auf 10cm im Durchmesser in der Mitte zusammengeschmolzen und scheinbar nur noch 20cm über den Lautsprechern. Die Z- und K-Laute wurden am unteren Ende dieses Kreises geortet. Das Piano schien jetzt noch länger auszuschielen, wenn es härter angeschlagen wurde. Kontur und Schwebung traten klarer hervor. Bei Celine Dion gab es kaum mehr zu hören. Zu Beginn der CD FleetwoodMac's „The Dance: Der einzelne Beifall rechts zeigte ein richtiges Verhältnis vom dumpfen Aufprall, der hohlen Hand und des hellen Klatsches. Desweiteren wurde erstmals der Gesang lokal aufgetrennt und vom Rest losgelöst. In HiFi Vision's Klassik CD 3 klopfte der Taktstock im Titel 13 akkurat und sauber und wurde nur durch den Hall der Kirche begrenzt. Alle Instrumente wurden besser im Raum angeordnet und fixiert. Die beschriebenen Nebengeräusche wie das verhaltene Hüsteln kamen natürlicher und wurde lokal schärfer abgegrenzt. Die Klanghölzer zeigten einen natürlichen Anschlag, erstmalig wurde auch Anzupfen der Gitarren plastisch wahrgenommen. Die Gitarrensaiten von NeilYoung „Unplugged“ 1 hatten ein klareres Nachschwingen und das Anblasen der Mundharmonika konnte sauberer erkannt werden. Der Akustik-Bass in Norah Jones „Come away with me“ SACD 5 wurde noch schärfer konturiert. Die Beckenanschläge gewannen nur an Luftigkeit und Leichtigkeit, aber nicht an Auflösung, was höchstwahrscheinlich an der Bandbegrenzung liegt, die messtechnisch nachgewiesen wurde. Andererseits wurde die Szene mit den Tubular Bells in Mike Oldfields gleichnamiger LP so klar und plastisch aufgelöst, dass sogar der Chor als selbständige Quelle identifiziert wurde, die Bells hatten das richtige Ein- und Ausschwingen. Es gab auch Überraschungen. So wurden plötzlich auch sehr tiefe Bässe wahrgenommen, die vorher nie gehört wurden (Laura Veirs „Year of meteors“ Tr.7). Beim Aufrechtstellen oder auf den Boden setzend konnte die Impulsabbildung wieder verändert werden, aber weniger als vorher, aber was das wichtigste war, das Optimum rastete am Hörplatz ein.

Das Abgleichen der elektrischen Phase lohnt sich also. Anders als Frequenzweichen niederer Ordnung, gelingt es ohne den Schalldruck zu „verbiegen“. Das System hat nur einen Nachteil, es sollten nur verlustärmste Bauelemente verwendet werden. Der Eigenbauwiderstand schuf die Voraussetzungen dafür, neben den Bandspulen und den MKP mit 630VDC.

Aufklärend war folgende Information nach [34]: „Die frequenzabhängige Phasendrehung von Tieftonlautsprechern wie den Konsummembranen erfolgt vorwiegend unter den Bedingungen, wenn der akustische Kurzschluss wirken kann. An vollständig geschlossenen Gehäusen sollte Phasenstartpunkt an der Chassi-Front sein, dort wo der aufgestaute Luftdruck zu Seite weg kann. Das betrifft genauso den HT. So dass das Vorsetzen des TT um 5mm wegen der fehlenden Schallwandeinfräsung nur einen Phasenversatz vom 5mm verursacht hatte und keine auch nur annähernde 35mm, wie sie VISATON als virtuellen Schallentstehungsort kennzeichnet. Dieser trifft nur für die offenen Systeme.“

Der Vorteil der Weichen 4.Ordnung liegt nicht nur in der zwanglosen Gleichpolung von HT und TT an allen Frequenzpositionen sondern auch in der gut optimierungsfähigen Phasengestaltung sowie in dem besonders schmalen Trennfrequenz-Übergangsbereiches, der sich weniger störend im Gesamteindruck bemerkbar macht. Deshalb sprach sich der Test der verschiedenen Ordnungen im Kapitel 4 so klar für die 4.Ordnung aus. Hätte die bloße Phasendrehung von 360° einen so verheerenden Einfluss auf die akustische Abbildung, wie sie so oft für Weichen 1-Ordnung mit minimaler Phase als besser propagiert wird, dürfte es keine natürlich-räumliche Staffelung für live-Aufnahmen geben. Gerade das macht sie aber. Nur Studioaufnahmen wirken viel häufiger flacher. Eine wichtiges, aber leider viel zu selten praktiziertes Beispiel für Weichtrennung 4.Ordnung an einem 3-Wege-System wurde in [33] vorgeführt. Ein Vergleich einer aktiven Weiche 4.Ordnung mit einer passiven in 2.Ordnung. Beide zeigten an der gleichen Box gleiche Sprungantworten. Aber die 24dB/Oktave wurden nicht nur in der Mitteltöner/Hochtöner-Trennung realisiert, sondern auch zwischen Tieftöner und Mitteltöner. Dort wurde diese Trennung nach einigem Probieren sogar von 250Hz auf 200Hz nach unten verlagert, da der Lautsprecher davon profitiert, so [33]. Hauptvorteil auch dieser hohen Trennungsteilheit war die Durchhörbarkeit, sie war „hochauflösend und absolut authentisch“.

Es gab nur einen konstruktionsbedingten Nachteil der aktiven Lösung. Durch die höhere Trennungsteilheit vertiefte sich die Schallauslöschung bei 3,3kHz mit einer effektiven Ausdehnung von 1/2 Oktave um -6dB wegen der Schallfrontseitenkanten, obwohl eine große 45° Anfasung von 38mm Breite auf der Front vorhanden war. Diese Senke könnte zur Durchhörbarkeit beitragen, weil der unmittelbare Präsenzeindruck geschwächt wurde.

11.10.1. Änderung der Klangbalance und Abschluss

Beim Vergleich zwischen Elko und MKP, im Marantz schaltbar über source-direct, wurde immer wieder festgestellt, dass mit Elko viel zu viel zuviel Brillanz verloren ging oder mit MKP die Brillanz etwas zu spitz war, wenn manche CD's, SACD's oder DVD-Audio's gehört wurden. Offensichtlich musste der Hochtonfrequenzgang etwas bedämpft werden. Die kleinste Dämpfung, die mit dem Equalizer eingestellt werden konnte, war -2dB bei 20kHz, was aber schon viel zu viel war. Die Dämpfung mit dem Filter war wie die meisten breitbandig und reichten von 4kHz mit 0dB über 10kHz mit -1dB, daher war der Effekt eher zu vernehmen. Der Höhensteller am Verstärker musste bei Elko-Betrieb ca. 1dB bei 10kHz angehoben werden, um den scheinbaren Verlustpegel auszugleichen, obwohl nur -0,5dB fehlten.

Vermutet wurde, dass in den meisten Studio's noch Koppelkos im Betrieb waren. In [39] wurden verschiedene Kondensatoren im Signalweg zum Hochtöner in der Box mittels Schalldruckmessung in einem schalltoten Raum auf ihren effektiven Frequenzgang geprüft. Obwohl bei 3kHz die Pegel noch identisch waren (Differenz < 0,1dB), waren Pegelunterschiede bei 20kHz von bis zu 0,5dB ermittelbar.

Daher wurde ein breitbandiger Feinabgleich mit -0,5dB bei 20kHz im Widerstands- und Kondensatornetzwerk der Frequenzweichen vorgenommen, ohne dass die elektrischen Phasen im Kreuzungsbereich ± 1 Oktave die Winkel zu stark änderten, ≤ 3 Grad. Entweder verringerte sich die Phasendifferenz unterhalb der Trennfrequenz und oberhalb nahm sie zu oder umgekehrt.

Da nur wenige Bauteile betroffen waren, beschränkte sich die Konditionierung auf wenige Tage mit jeweils 2 bis 3h.

Die Impulsschärfe ist erhalten geblieben, nur die Klangbalance Grundton/Brillanz hat sich zu Gunsten der Grundtöne verschoben. Der Effekt war relativ leicht erkennbar, wirklich erstaunlich. Bei der nächsten Vorstellung vor 3 Gästen (Alter 30 bis 35) wurde gefragt, ob sich zu der vorhergehenden Vorstellung (nach Anpassung der Phasen) etwas geändert hatte. Als Vergleichsbeispiel diente das Gitarrensoli von Eric Clapton. Die Antwort kam nach einigen Sekunden noch ziemlich spontan: „ Es ist jetzt etwas dunkler“. Die neue Abstimmung wurde als angenehmer empfunden.

Damit wurden 2 Fakten bestätigt.

Die Empfindlichkeit gerade über die oberste Oktave hinaus ist außerordentlich hoch* und erklärt viele „Voodoo“ und „Tuningmaßnahmen“.

Bei Anwendung verlustärmster Bauelemente muss der Wiedergabefrequenzgang bewusst entsprechend den Aufnahmebedingungen so nachgeregelt werden, dass zu den Höhen hin eine leichte Absenkung erfolgt. -Daher ist erklärbar, dass einige Personen die Nutzung von MKP, gleich an welchem Ort in der Signalkette, als zu schrill empfunden wird.

* vorausgesetzt, das Gehör ist noch intakt und nicht geschädigt oder der Hörsinn ist noch nicht zu sehr durch Computermusik und MP3 fehlangepasst.

Literaturverweise:

- [1] www.mundorf.com
- [2] Dieter Nährmann, „Das Große Werkbuch Elektronik“ Franzis Verlag
- [3] Steroplay 3/2003 S.16
- [4] www.music-line.biz
- [5] Fachhochschule Giessen Friedberg, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, „Leitungswellen vom Lecher-Typ“
- [6] www.conrad.de
- [7] www.spulen.com
- [8] www.eichmannables.com, www.eti-research.com.au
- [9] www.wbt.de
- [10] www.furutech.com
- [11] Stereoplay 1991/9

- [12] www.ees-audio.de
- [14] www.analog.com
- [15] Hobbyhifi 2000, 5, 66-69
- [16] S.Siami et.al., IEEE Trans. Power Electronics 16 (2001), 2, 157
- [17] St.Pirani, Paola Rinaldi, IEEE Trans.Power Delivery, 18 (2000), 1, 277-282
- [18] P.Dodds et.al., Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 28 (2006), Pt.8, 99
- [19] N.Williams, IEE Colloquim on capacitors and inductors for power electronics, 7th march 1996
- [20] P. J. Duncan, P. S. Dodds, N. Williams, AES Paper 7314, 2008
- [21] ClarityCapFullTechnicalPaper_4_.pdf
- [22] Claritycapreport.pdf
- [23] H.Fujishiro et.al., Cryogenics 33(1993), 11, 1086
- [24] Hiroyuki Fujihiro et.al., IEEE Trans.Magn. 30(1994), 4, 1645
- [25] R.S.Crisp and J.Rungis, Phil.Mag. 22 (1970), 176, 217
- [26] B.Stahlmecke et.al., AIP Conf.Proc.817 (2006), 66
- [27] L.Cao et.al., Surf. Interface Anal. 28(1999), 258
- [28] H.Y.Wang, et.al., Interf.Sci. 1 (1993), 31
- [29] C.Ebert et.al. J.Appl.Phys.99 (2006), 113501
- [30] Hobbyhifi
- [31] mündl. Mitteilung, Dr.K.Lukat, FHG IPMS, Zuverlässigkeit+ Elektromigration
- [32] Ingemar Johansson, The ugly duckling, 2003 aus ingemar.johanson@ijdata.com
- [33] Hobbyhifi 2004, 3, 42-50
- [34] mündl. Information, Peter Horwath, Akustikstudium 1964-70
- [35] www.thel.de
- [36] www.aos-lautsprecher.de
- [37] Erik Reike, Fagottspieler, Staatskapelle Dresden
- [38] <http://www.siski.de/~carsten/dat-dtc790-repair.html>
- [39] P.Dodds et.al., Proc. Inst. Acoust. 28(2008), 8, 99