

Kapitel 6

Die messtechnische Überprüfung der passiven Bauelemente für Frequenzweichen zu den Aussagen aus Kapitel 2 und eine vergleichende Hörbeurteilung 2001-2002

6. Messung der passiven Bauelemente C L R

Die in Kapitel 2 ausgeführten Eigenschaften von passiven Bauelementen sind nur teilweise systematisch. Ferner sind die experimentellen Details unbekannt, so dass unsicher ist, ob alle anderen beeinflussenden Parameter konstant geblieben sind. Es konnten erstmalig alle alten und neuen Bauelemente mit den gleichen Messgeräten vermessen werden. Dazu wurden die unter Kapitel 5 ausgewiesenen Geräte verwendet. Da alle Bauteile unterschiedlichen Einfluss auf den Klang ausüben, haben sich mit der Zeit viele verschiedene Bauteile im Lager angesammelt. Für diesen Messtest und für die spätere Klangüberprüfung wurden auch neue Bauelemente angeschafft, was z.T. sehr kostspielig sein kann, wie z.B. die JENSEN Öl-Papier-Kondensatoren. Über solche eigentlich veralteten Bauteile wird heute nur noch geredet und für „high endig“ erklärt. Messungen wurden bereits gemacht, wenn auch vor langer Zeit, ebenfalls mit alten Messgeräten. Es ist in der Wissenschaft üblich, dass es keine modernen Untersuchungen von bereits in der Vergangenheit durchgeführten Forschungen gibt, also keine Wiederholungen mit modernen Instrumenten, „denn da ist nichts mehr zu holen“.

Eine weitere Übersicht, diesmal speziell zu Kondensatoren von Frequenzweichen für Hochleistungssysteme wie Lautsprecher wurde später in [1] vorgestellt, wobei obige (Kap.2) Grundaussagen von Elektor im wesentlichen bestätigt wurden. Die von Timmermanns schon früher aufgestellte Hypothese „Filter mit Kondensatoren höherer Spannungsfestigkeit klingen besser“ schien mit seinen Messungen bestätigt worden zu sein. Aber es gab auch ein überraschendes Resultat. Der viel von den „audiophilen High-Endern“ gerühmte Papier/Öl-Kondensator wies bei normal niedrigem Verlustfaktor D die höchste Dielektrische Absorption DA = 3,5% auf. Hochgelobt wird dieser Typ auch in [2] : „dass plötzlich jegliche Schärfe aus dem Klangbild verschwand. Der Lautsprecher klang weicher ohne irgend etwas an Information zu verlieren“ und „errinnerten an den plastischen Mittenbereich, den Röhrenliebhaber so schätzten.“ Dieser Bauelemente-Kult kostet immense Summen, da es ja auch Bauelemente einer älteren Generation sind, die nicht mehr in großen Mengen hergestellt werden. Etwas später wurde auch in [3] mit einer anderen Messmethode dieser Kondensatortyp positiv herausgestellt. Im Vergleich zu anderen getesteten Typen hat er den Vorteil, dass er unter hoher AC-Belastung die geringsten Eigenschwingungen aufweist. Vielleicht kommt er gar nicht zum Schwingen, weil der verlorene Energieanteil bereits in Wärme umgesetzt wird?

In der Akustik ist alles interessant, was schwingt. Auch Hochlastwiderstände haben ihr Eigenleben, wie Timmermanns in [4] mit seiner Messmethode des Schwingungsaufnehmers nachweist. Ergebnis: Die getesteten Widerstände unterscheiden sich nicht signifikant in ihren Eigenschwingungen, mit Ausnahme des 10W MOX. Es ist aus den Diagrammen ein Trend ablesbar, dass, im Gegensatz zu den Kondensatoren, die Eigenschwingungen abnehmen, wenn die Größe und Masse der Bauelemente kleiner wird, was übereinstimmt mit den Datenlisten im Elektor. Zusätzlich wurde die Nyquist-Kurve der Widerstände aufgenommen. Die Impedanzen steigen mit der Frequenz ab 5kHz um 1,5% je Oktave an. Die Art des Imaginärteils ist aber unterschiedlich. Bei Draht- und Vishay-Widerständen war sie bei den gering belastbareren Widerständen bei hohen Frequenzen mehr kapazitiv, wie generell bei den MOX und Kohlemassewiderständen, und bei den höher belastbaren mehr induktiv. Das ist auch sinnig, denn die höher belastbaren haben mehr Drahtwicklungen und die MOX/Kohle haben gar keine. Eigentlich müsste die Untersuchung noch mit thermischen und Migrations- oder Driftverhalten ergänzt werden, denn ein Driften von Widerständen gibt es, wie bei Nährmann [5], nachzulesen ist. Driften beruhen meist auf einer Rekristallisation des Widerstandsmaterials.

Und wie kann es anders sein, auch Induktivitäten in Form von Spulen unterliegen dem elektromagnetischen Wechselfeld und produzieren mechanische Schwingungen. Dazu näheres in 6.2 . Da es sich um rein passive Elemente handelt, führt irreversible Umformung von Energie dazu, dass Verluste am Originalimpuls verloren geht.

6.1. Kondensatoren

6.1.1. Impedanz- und Phasengang verschiedener Klassen

An folgenden Kondensatoren aller Klassen in Tab.1 wurde Impedanz und Phase gemessen und mit dem „theoretischen Idealkondensator“ grafisch verglichen. Die Leistung erfolgte so, wie der Elektrotechniker wichten würde, der letzte sollte der beste sein. Die Einteilung nach No. erfolgte danach, wie lange die Ideallinie nicht verlassen wird, d.h. die Phase sollte möglichst lange in Richtung -90° bleiben. Der Jensen ist hier die negative Ausnahme. Positiv ist ihm anzumerken, dass er keine HF-Nebenresonanzen zeigt, er ist hier Vergleichbar mit dem F&T. Wird einem MKP ein kleiner Widerstand vorgeschaltet, dann ist dort auch kein Resonanzpol mehr zu sehen, Abb.1. Das bedeutet der Jensen verhält sich wie ein sehr guter Elektrolytkondensator, aber auch nicht besser! Und so klingt auch eine Weiche mit diesem Bauteil im Signalzweig. Er dämpft praktisch die sehr hohen Töne und verschiebt die Klangbalance in die Mitten. So wird er auch in „Klang+Ton“ beschrieben. Die Metall-Perkussionen werden dumpfer aber auch die unangenehmen oft beschriebenen Grelligkeiten bei CD-Wiedergabe werden gemildert. Der Teufel wurde mit dem Belzebub ausgetrieben.

Der messtechnisch beste Kondensator des Testfeldes im Hochfrequenzbereich ist der Audyn KP-Sn. Er ist kein MKP sondern ein FKP, d.h. kein metallisiertes Polypropylen sondern die Metallschicht wird als Folie gewickelt, in diesem Fall wird Zinnfolie verwendet. Schaut man sich das hochauflösende Diagramm 200...20kHz in der Phase an, erkennt man aber eine etwas schlechtere Phasenlage im Mitteltonbereich gegenüber dem WIMA MKP. Man könnte meinen, es gibt eine endliche nicht stabile Grenzschicht zwischen Metallfolie und Polymerfolie, die sich aus der Berührung nicht ideal glatter Folienoberflächen ergibt. Die schwere Zinnfolie wird bei mittleren Frequenzen besser schwingen als bei den hohen Frequenzen, da die schwere massive Folie mit Erhöhung der Frequenz immer träger werden sollte. So wird eine Aufhellung der Klangbalance vernommen und Instrumente klingen härter als im Vergleich zum MKP. Aber weder der eine noch der andere konnte befriedigen, über den WIMA MKP klang die Musik dunkler, in der Dynamik mehr nivelliert, die Details waren diffuser.

Mit Audyn KP-Sn muss der Hochtöner -0,5...1dB tiefer abgetrennt werden, beim WIMA muss er angehoben werden. Die MKT waren höhenfreudiger als der Jensen aber dadurch in den Details deutlich diffuser als der WIMA MKP und in der Feindynamik weniger empfindlich als dieser.

Bemerkenswert ist, dass die beiden schlechtesten Kondensatoren ferromagnetische Anschlüsse aufwiesen, vielleicht begründet dies ihr vorzeitiges Abweichen vom Idealkondensator. Diese klangen, als hätte man einen Dynamikkompressor vorgeschaltet.

Tab.1: 2,2µF Kondensatoren verschiedener Klassen

No.	Hersteller	DC max.	Klasse	Mangel
9	Hytano	350V	Elko Hochvolt Al	ferromagn.
8	Fuhyin	100V	Elko Bipolar Al	ferromagn.
7	Jensen	400V	MP Al	
6	F&T	100V	Elko Bipolar Al	
5	Intertechnik	50VA	Elko Bipolar Al	
4	DDR TGL	100V	MKT Al	
3	Intertechnik	160V	MKT Al	
2	Wima	160V	MKP Al	
1	Audyn KP-Sn	250V	FKP Sn	

Abb.1: verschiedene Klassen 2,2µF im Vergleich NF Bereich

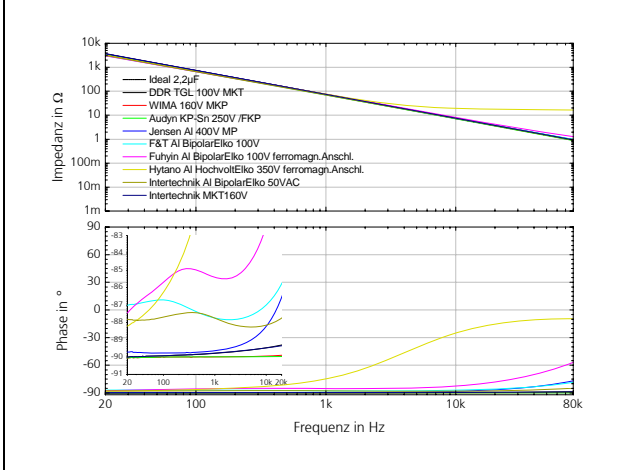
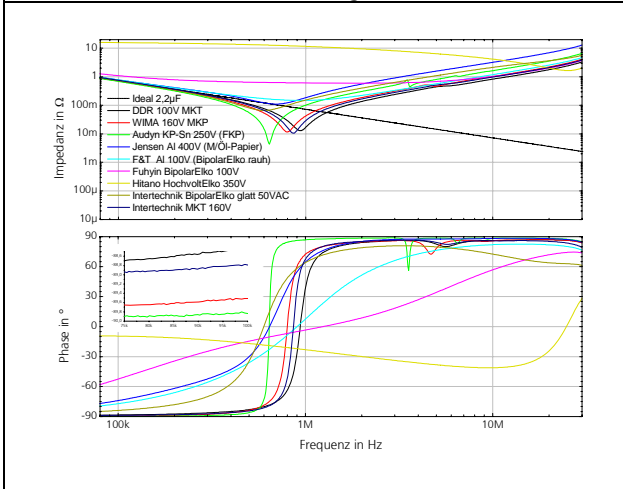


Abb.2: verschiedenen Klassen im Vergleich HF Bereich



6.1.2. Dielektrische Absorption

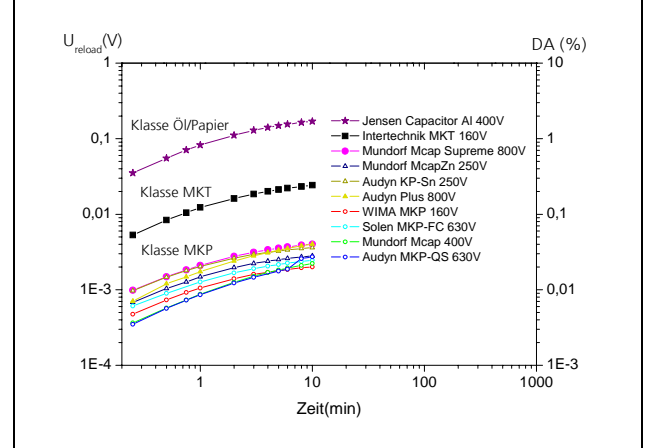
Wie in Kapitel 2 hervorging, ist ein weiteres Kriterium zur Beurteilung von Kondensatoren die Dielektrische Absorption DA. An einer Keithley SMU236 wurde ein Kondensator mit 10V Gleichspannung aufgeladen und anschließend innerhalb von 5s auf einen Reststrom von unter 1pA entladen. Die Kontakte wurden getrennt und nach 30s wurden die Kontakte mit einem Keithley Electrometer 6517A hergestellt und die Restspannung am Kondensator verfolgt. Wenn der Kondensator mit einem Impuls aufgeladen wird, verringert sich die Intensität des Durchgangsimpulses durch die DA entsprechend, danach entsteht sofort eine Störspannung proportional zu DA, die zeitlich abhängig einen Störstrom zusätzlich zum Originalsignal liefert. Der primäre Impulsanstieg wird somit flacher aber dafür werden zusätzliche Signale zeitverzögert implementiert. Dieser Vorgang könnte damit ein Kandidat für im Kapitel 2 monierten Fehler sein.

Die dielektrische Absorption kann in erster Näherung mit einem R-C-Glied ($R_{DA}-C_{DA}$) parallel zum Kondensator mit der eigentlichen Nennkapazität C mit zeitverzögernder Wirkung wiedergegeben werden. Genauer betrachtet, repräsentiert sie nur eine Summe aus mehreren parallelen Zweigen mit $(R_1-C_1) || (R_2-C_2) || \dots || (R_n-C_n)$. Cosmin Iorga [6] modulierte mit dieser Kette an Hand von PSPICE recht erfolgreich das Wiederaufladeverhalten mit dem Ziel Kompensationschaltungen zu entwickeln, die diesen Fehler minimieren.

In der Abb.3 sind die zeitlichen Abfolgen dargestellt. Hier wird deutlich, dass der Öl/Papier Kondensator tatsächlich wie in der Literatur beschrieben wird, eine vergleichsweise riesige DA im Prozentbereich aufweist. Die Restspannung nach dem Originalsignal ergibt hier einen Fremdspannungsabstand von ca. -40...-50dB, liegt also auf jedem Fall im Hörbereich. Die MKP Kondensatoren liegen alle sehr nahe beisammen, es ist ja eine Kondensatorkategorie für sich, während die MKT als eine andere Klasse zwischen Öl/Papier und den

MKP liegen. Die Unterschiede zwischen den Kondensatoren innerhalb der MKP Klasse sind möglicherweise nicht ganz sicher. Aber die schlechteren MKP mit 800V DC Durchbruchsspannung sind in Serie geschaltete Kondensatoren, diese haben also eine größere Anzahl von Grenzflächen, die Ladungen speichern können, so nähern sich diese mit der Zeit an, d.h. gleiche Ladung.

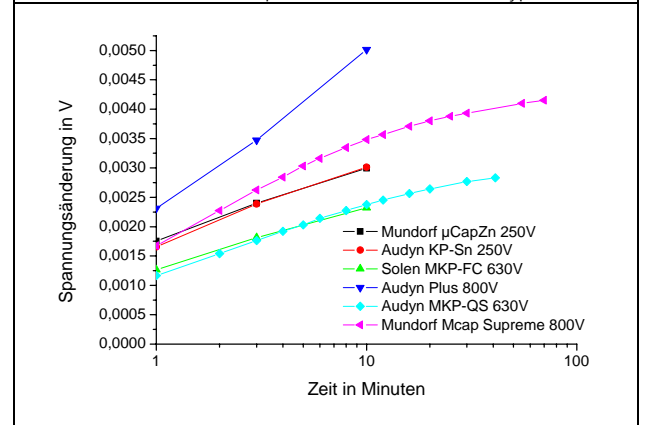
Abb.3: Dielektrische Absorption verschiedener C-Klassen



Die Messung der DA bei diesen hochisolierenden Elektroden der MKP ist nicht so einfach, hier ist ein automatisierter Messplatz sehr wichtig, ansonsten werden praktisch manuell Ladungen eingetragen und der erste klassenunterscheidende Offset verfälscht.

Eine Wiederholung der Messungen für Kondensatoren Polypropylen als Dielektrikum wird in Abb.4 dargestellt. Die besten scheinen die einfach aufgebauten Kondensatoren zu sein. Die Zinnfolienkondensatoren liegen dazwischen, diese haben auch die doppelte Anzahl von undefinierten Grenzflächen als die einfachen metallisierten Polypropylenfolien. Der Zinnfolienkondensator von Mundorf scheint besser zu sein als der ältere von Audyn. Der Audyn MKP-QS 630V ist besser im Kurzzeitverhalten, aber schlechter im Langzeitverhalten als die von WIMA und Solen. Bei 10V Belastung scheint das Auswahlprinzip die Zahl der Grenzflächen zu sein und nicht die DC-Festigkeit. Möglicherweise äußert sich letzteres mehr im Rauschverhalten, was sich im Klangeindruck als „diffus“ widerspiegeln könnte. Der Zeitverlauf der intrinsischen Wiederaufladung der Kondensatoren entspricht der Publikation von [16].

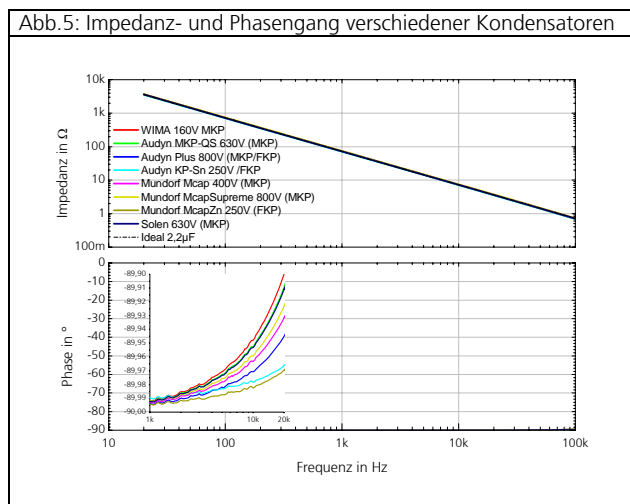
Abb.4: Dielektrische Absorption verschiedener MKP-Typen



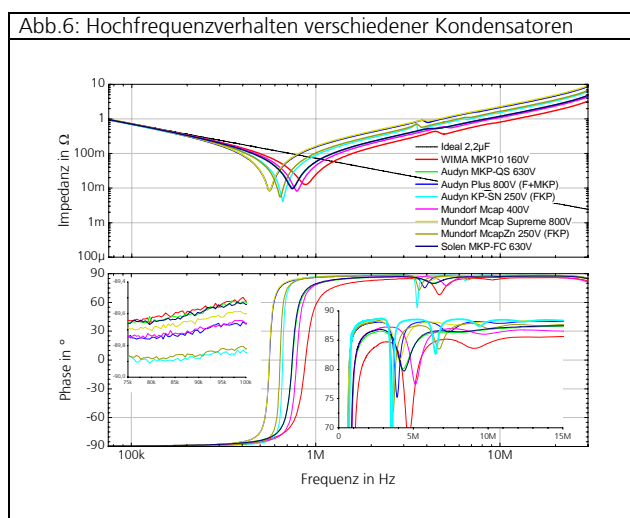
6.1.3. Impedanz- und Phasengang von MKP's

Für eine möglichst exakte Signalreproduktion kommen eigentlich nur MKP in Frage. Auf den ersten Blick zeigen alle Polypropylenkondensatoren ideale Messeigenschaften in Impedanz und Phase an, nur hochaufgelöst werden Unterschiede erkennbar. Aber welcher ist der beste? In den Prospekten werden besonders die Verlustfaktoren, was nur eine andere Zahl für die Abweichung von der idealen Phase -90° ist, und die niedrigen Induktivitäten

hervorgehoben, besonders für die Zinnfolienkondensatoren und dem Mundorf Mcap supreme. Richtig stimmt das nur für den Zinnfolienkondensator von Mundorf, der besser gewickelt wurde, als der von Audyn, hier bestätigt sich die Gruppierung aus der DA. Erkennbar ist die Ähnlichkeit des Audyn Plus mit den Zinnfolien, da dieser auch eine eingelegte Folie neben den MKP Leitbahnen laut Hersteller haben soll. Von besonders geringen Induktivitäten des Mcap supreme kann man aber nicht sprechen, obwohl er extra dafür konstruiert wurde.



Die effektiven C-L-Resonanzen liegen bei allen nahe zusammen. Neu ist hingegen die Existenz von Nebenresonanzen im 3...10MHz Bereich (Abb.6, rechtes Inset), die besonders bei den Metallfolien intensiv ist, mit Ausnahme des WIMA, der eine eigenwillige Konstruktion zu haben scheint. Die mit den geringsten Nebenresonanzen sind der Audyn MKP-QS und der Solen Fast Cap, beide 630V fest, sie sind auch sonst von den Abmaßen wie von den Impedanz- und Phasengängen her identisch. Die Nebenresonanzen hochaufgelöst demonstrieren ganzzahlige Harmonische der Hauptresonanz. Ob dies klangliche Differenzen anzeigt?



Die besten klanglichen Eigenschaften haben die beiden 630V Kandidaten (mit Ausnahme des supreme, der auf Grund seiner Größe noch nicht geprüft werden konnte, da er nicht in die Weiche eingebaut werden kann), sie wirken am neutralsten. Der Audyn Plus beeinflusst den Klang ähnlich den Zinnfolienkondensatoren, er hellt die Musik auf. Nach dem Langzeitbetrieb erscheint er aber weniger anstrengend hell die Musik zu verändern als die beiden Zinnkandidaten, nur die obersten Höhen >10kHz werden betont, man benötigt eine Weile, um herauszubekommen, dass diese „Spitzheit“ so reizvoll sie auch ist, nicht zum Original gehören. Die

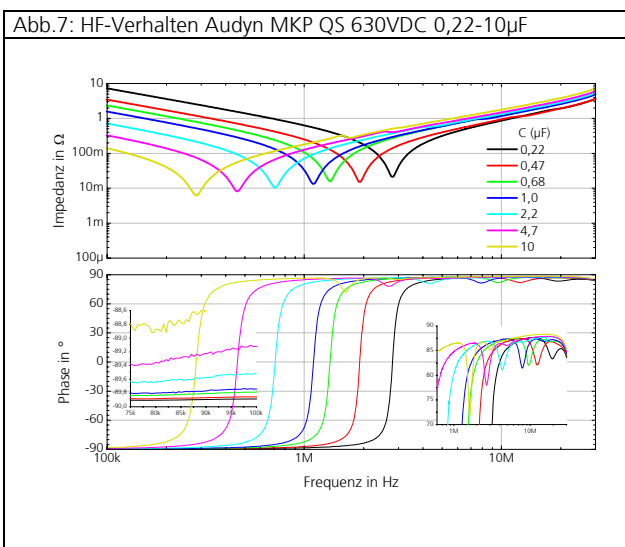
Zinnfolienkondensatoren ändern sich im Betrieb aber zu ihren Nachteil, ihre „Grelligkeiten“ ermüden und befremden den Hörer schneller. Auf den letzten Platz steht mit Sicherheit der WIMA, nach ihm ist die Musik diffuser, dynamisch weniger präzise als alle anderen. Der Mundorf Mcap 400V ist fast neutral, tendiert aber in Richtung WIMA. Die alten Intertechnik MKP 250V liegen hier dazwischen.

Tab.2: 2,2μF Kondensatoren verschiedener MKP u.a.

No.	Klang	Hersteller	DC	Klasse
8	diffus	Wima	160V	MKP Al
2	hell	Audyn KP-Sn	250V	FKP Sn
1	hell	Mundorf McapZn	250V	FKP Sn
3	gedämpft	Mundorf Mcap	400V	MKP Al
5	neutral	Audyn MKP-QS	630V	MKP Al
5	neutral	Solen Fast	630V	MKP Al
5	spitz	Audyn Plus	800V	MKP/FKP Al
4		Mundorf Mcap supreme	800V	MKP Al

6.1.4. Vergleich verschiedener Kapazitätsgrößen

Beim Vergleich von unterschiedlichen Kapazitätsgrößen am vorläufigen Preisoptimum Audyn 630VDC fällt auf, dass die Hauptresonanzfrequenz kontinuierlich sinkt, ebenso die minimale Impedanz, d.h. die Induktivitätsbeläge werden größer. Die Impedanzminima werden kleiner, d.h. die seriellen Widerstände werden kleiner. Die Nebenresonanzen verhalten sich analog den Hauptresonanzen, die werden leicht ausgeprägter, was an den Phasengängen besser zu erkennen ist. Der 10μF zeigt jedoch bereits ein beträchtliches Phasenrauschen. Seine Induktivität beträgt allerdings erst 31nH, der von 0,22μF nur 14nH.



Kann man die Qualität von z.B. geforderten 10μF Kapazität durch Parallelschalten von kleinen Kondensatoren, sogenannte Brückenkondensatoren verbessern, wie oft suggeriert wird, dass diese dann „schneller“ werden, d.h. die Hauptresonanz in höhere Frequenzbereiche verschieben und die Phase mehr in Richtung -90° drücken?

6.1.5. Parallelschalten von Kondensatoren

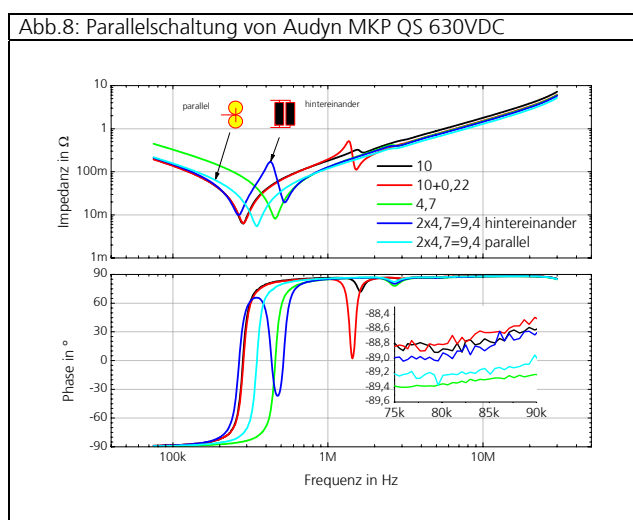
In Abb.8 werden verschiedene Versuche dargestellt, die die Nachteile eines großen Kondensators, wie Phasenrauschen, großer Induktivitätsbelag und Impedanzminimum abzumildern. Der einfache Weg einem großen Kondensator „schneller“ zu machen, indem ein sehr kleiner parallel gelötet wird, was in den „high-end“ Kreisen oft empfohlen wird, stellt sich bei Folienkondensatoren als „Voodoo“ heraus, während es für kleine Elektrolytkondensatoren durch Parallelschalten mittels kleinen Folienkondensatoren von einem gewissen Vorteil ist [7]. Bei

Elektrolytkondensatoren sinkt die Impedanz ab eine bestimmten Frequenz nicht mehr ab, die Filterwirkung hört dann auf. Mit einem kapazitätsmäßig kleinen Folienkondensator parallel kann ein weiteres Impedanzabsinken erzwungen werden, wobei anstelle des relativ hohen Serienwiderstandes ein scharfes Impedanzminimum erzeugt wird, quasi ein Kurzschluss für die entsprechende Frequenz. Das kann auch wieder ein Problem bedeuten.

In Abb.8 werden verschiedene Möglichkeiten der Parallelschaltungen von MKP dargestellt und ihre Messkurven angegeben. Folienkondensatoren sind groß und das Parallelschalten mit kleinen Kondensatoren führt dazu, dass die Anschlusslänge dieser Bauteile sehr lang wird und die damit die Induktivität. Die Folge davon ist, dass zusätzliche Nebenresonanzen und Phasenabweichungen sogar etwas größer werden, wenn ein 0,22µF parallel zu einem 10µF kontaktiert wird (Abb.8). Angenommen die Nebenresonanzen versinnbildlichen wie bei den Zinnfolienkondensatoren einen helleren aber verzerrungsreicheren Klang, dann wäre hier in der Tat ein „schnellerer“ Kondensator entstanden, denn er wirkt heller, nur mit der Originalwiedergabe hapert es.

Wird der Parallelkondensator vergrößert, dann vergrößert und verschiebt sich die Nebenresonanzintensität, aber das Phasenrauschen bleibt gleich, wenn auch jetzt die Phasenabweichung etwas kleiner wird. Setzt man diesen Trend fort, so kann man 2 gleichgroße Kondensatoren 2 x 4,7µF miteinander verbinden, nur wie? Es gibt mehrere Möglichkeiten. Einfach übereinander Löten verringert zwar die Hauptresonanz, aber die Nebenresonanz wird viel intensiver, jedoch verringert sich endlich das Phasenrauschen um eine Winzigkeit. Verschaltet man die Kondensatoren so, dass ihre Anschlüsse praktisch identisch sind, dann verbessert sich das Phasenverhalten sprunghaft und erreicht fast das Niveau des halben Kondensatorwertes 4,7µF und verschiebt die Resonanzfrequenz weiter nach oben. Dies verdeutlicht die Einflussnahme der Anschlussgestaltung. Was aber besser ist als bei dem einzelnen 4,7µF, ist dass die Intensität der Nebenresonanz sogar kleiner geworden ist, was in der obigen Analogie einen originalgetreueren Eindruck bringen sollte. Zuletzt kann noch beobachtet werden, dass das Impedanzminima gesunken ist, weil 2 Rs parallel sind. Man muss nur dafür sorgen, dass es dort keine Störfrequenz gibt.

Noch besser wird eine entsprechende Verschaltung mit 3 Stück 3,3µF sein, die im 3er-Block mechanisch gut stabil gehalten werden können. Weitere zentralsymmetrische Anordnungen sind 4, 5 sowie 6 z.B. auf einem Holzkern. Der Aufwand ist aber dann beträchtlich.



6.1.6. Resümee

Der Verdacht von Herrn Timmermanns, dass die Kondensatoren mit jeweils höherer Durchbruchspannung besser sind, kann bestätigt werden. Je niedriger dieser angegebene Wert wird, desto mehr erscheint zusätzlich eine Art „Rauschen“ in der akustischen Abbildung. Einschränkend muss aber festgestellt werden, dass hierbei das Konstruktionsprinzip gleich sein sollte. Denn der eine 800V Vertreter von Audyn ist seriell als Reihenschaltung zweier Partialkondensatoren ausgelegt, was die Anzahl der Phasengrenzflächen erhöht und damit eine höhere

Ladungsspeicherung ermöglicht, beides führt zu Störsignalen und damit zu Verzerrungen.

Leider fehlen die messtechnischen Voraussetzungen niederimpedant und mit hoher Wirkleistung den Klirr zu messen, was auch ELEKTOR schwer fiel, die vorhandenen Geräte erzeugen unter den niederohmigen Bedingungen von 4Ω selbst schon zuviel Klirr.

Hat man keine großen Kondensatoren oder nicht die berechnete Größe zur Hand, denn Abwickeln geht nicht wie bei den Spulen, kann man vorteilhaft gleichgroße Kondensatoren parallel schalten, aber mit symmetrischen Anschlussbedingungen.

6.2. Spulen

In [8] untersuchte Timmermanns die Verzerrungen durch Spulen mit der Induktivität L von 6,8mH bei 5,3A oder Quellenspannung von 25V. Die Spulen erzeugen nichtlineare Verzerrungen, ermittelt als harmonische Klirrkomponenten k_3 und k_2 . Es ist zu erwarten, dass neben den speziell gemessenen Klirrkomponenten höhere und tiefere Verzerrungskomponenten infolge von Intermodulationen entstehen, so dass sich eine Verteilung nach Gauß oder Lorentz mit LogNormal-Hüllkurve bildet. Das bedeutet, dass die Verzerrungsenergie sich verdoppeln kann. Bei höheren Frequenzen sinkt der Stromfluss und die gemessenen Klirrwerte auch, je nach Ausführung exponentiell oder linear. In der Tabelle werden die gemessenen k_3 und k_2 bei 180Hz ausgewiesen. Im Vergleich dazu sind die Verzerrungen für ein sehr gutes Lautsprecher-Chassis dargestellt. Verzerrungswerte, die größer als die der Chassis sind, wurden fett geschrieben.

Die verzerrungsärmsten Spulen mit Kern sind die mit I-Trafokern. Diese werden aber ihren Enden ein konzentriertes Magnetfeld aufbauen und eventuell dort positionierte Bauteile stärker stören. Sie selbst bleiben noch unter den Verzerrungswerten von Chassis.

Tab.3: harmonische Verzerrungskomponenten von Spulen

%	k_2	k_3	k_3 300Hz
Luftspule	-	-	-
Trafokern, I-form	0,050	0,015	0,015
Trafokern, E-Form T84	0,010	0,030	0,025
Trafokern, E-Form T150	0,005	0,025	0,035
Trafokern, E+I-Form N130 „0ohm“	0,005	0,700	0,400
Pulverkern, Corobar 0,6mm	0,010	0,250	0,160
Pulverkern, Aronit 0,6mm	0,015	0,160	0,125
Pulverkern, Corobar 1,4mm	0,005	0,105	0,095
Pulverkern, Aronit 1,4mm	0,005	0,345	0,225
kl. Ferritrollenkern, HPGR 40	0,020	2,000	0,080
kl. Ferritrollenkern, HQ 43/45	0,010	1,080	0,125
gr. Ferritrollenkern, HPGR 56	0,005	0,055	0,030
gr. Ferritrollenkern, HQ 56	0,005	0,210	0,045
gr. Ferritglockenkern HQG 70/43	0,005	0,195	0,100
Lautsprecher-Chassi, minimal	0,3	0,3	-

Die zweitbesten Werte liefern die E-Trafokernspulen, sie erhöhen die Verzerrungswerte nur schwach. Die Pulverkernspulen zeigen breitbandige nahezu frequenzunabhängige k_3 in der gleichen Größenordnung wie Chassis. Vergleicht man den Aufbau mit den von elektrodynamischen Chassis, stimmt dieser auch prinzipiell überein. Die Rollenkerne erhöhen die Verzerrungen exponentiell mit sinkender Frequenz unter 200Hz. Die Glockenkerne haben die gleichen Eigenschaften, nur etwas gedämpfter. Die E+I-Trafokerne sind um Faktor 3 schlechter als die Pulverkernspulen. Generell neigen bisher alle Spulen mit Kern zur spezifischen Erhöhung harmonischer Verzerrungen in Form von k_3 , dürften also wesentlich das Klangbild mitbestimmen. Es ist bisher noch nicht gelungen, trotz Erhöhung der Induktivität des Kernmaterials und damit die benötigte Cu-Drahtlänge zu senken ohne dass die Verzerrungen steigen.

Da die unterschiedlichen Bauformen von Luftspulen über Verzerrungsmessungen nicht gewichtet werden konnten, weil die Verzerrungen zu klein waren, vermutlich kleiner als der oben genannte Minimalwert von 0,01%, da kein Messdiagramm dazu mit abgebildet war, wurden diese in [9] mit anderen Methoden vermessen. Dazu sind Spulen mit ca. 2,2mH und <1Ω DC-Widerstand genommen worden. Es wurden dann die Wirkwiderstände R (Realteil des komplexen Widerstandes Z) ermittelt. Theoretisch sollten Spulen mit 2,2mH und 0,89Ω (Draht 1mm) eine

Impedanz von etwa 250...275Ω bei 20kHz haben und ihr Realteil sollte konstant bleiben. In den Messungen stieg er jedoch unverständlichlicherweise an. Darüberhinaus enthalten Spulen kapazitive Anteile. In [5] sind entsprechende kapazitive Blindwiderstände für mehrlagige Spulen benannt worden, diese liegen für vorliegende Runddrahtspulen bei ca. 10pF ...20pF. Nach den Messungen ist das Anwachsen der Wirkwiderstände bei Runddrahtspulen höher als bei Litzen- und deren Werte sind wiederum höher als das Anwachsen der Wirkwiderstände bei Flachbandspulen. Das Anwachsen der Wirkwiderstände zeigt bei 1,4mm Draht ein Maximum und ist für Inter Technikspulen im Vergleich zu Munddorf geringer, während die Flachbandspulen keine Abhängigkeiten zeigen. Timmermanns untersuchte ferner die durch AC-Belastung verursachten Eigenschwingungen. Je nach Ausführung der Spulenbauweise weisen diese klare Unterschiede auf. Die Eigenschwingungen verringern sich bei Luftspulen in der Reihenfolge (Draht, Litze, Flachband <1,3mm² eff. Querschn.), vakuumgetränkt, verbacken, Flachband (ab 2mm² eff. Querschnitt). Ein allgemeiner Zusammenhang scheint nachvollziehbar zu sein, dass Spulen mit massiveren Draht und Flachband weniger zu Eigenschwingungen neigen. Bei Runddraht wird sicher die Masse vorwiegend die Hauptursache sein eben wegen dem Produkt „Masse x Beschleunigung“. Anders verhalten sich die Flachbandspulen, deren Lage sind geometrisch bedingt stabiler, während es für Runddraht auf Rollen gewickelt überhaupt keine Ideale Lage geben kann, da die Drähte am Anschlag der Rollenwand geneigt sind und in der Rückführung die untenliegenden Drähte kreuzen, was die Lage labil macht.

Auch bei Flachbandspulen scheint es eine Abhängigkeit der Schwingungsanfälligkeit zu geben und zwar je größer und dünner der Kunststoffring ist, auf dem die Spule gewickelt ist, desto größere ist die Eigenschwingung. Bei Flachbandspulen mit massivem Holz kern sind die Schwingungen noch geringer. Flachbandspulen werden mit Kunststoffolie gewickelt, da das Kupferband nicht isoliert ist.

Es gibt leider keine Korrelation der Eigenschwingungs empfindlichkeit, weder mit der Empfindlichkeit auf Mikrofonie beim Einbau in die Lautsprecherkammer, noch dass z.B. die Verzerrungen in den Eigenschwingungsresonanzen deutlich höher sind, geschweige denn welche konkreten Auswirkungen diese auf den Klang haben, denn zumindest bei den relativ ungebräuchlichen Flachbandspulen, wäre es interessant, welchen Einfluss die bereits öffentlich diskutierten Wirbelströme in den Flachbandspulen haben. Hier wäre eine feinauflösende Verzerrungsmessung angebracht.

Leider gibt es noch keine Ringspulen ohne ferromagnetischen Kern in Torroidform, die kein Streufeld aufweisen. Die Effizienz dieser Spulenart ist aber viel geringer als die der Zylinderbauform, da das Verhältnis Länge/Querschnitt sehr ungünstig ist. Wenn man aber die Analogie der Verzerrungserhöhung durch Schließen eines E-Kernes mit einem I-Kern heranzieht, ist zu befürchten, dass die Verzerrungen ansteigen.

Bei hohen elektrischen Strömen werden in Spulen mit höherem Wirkwiderstand mehr Leistung in Wärme umgesetzt. Da Kupfer wie Silber einen hohem Temperaturkoeffizienten von +0,4% je 1°C hat, ist bei Temperaturerhöhung der höhere Widerstand bei großen Strömen in der Frequenzweiche zu berücksichtigen.

Nur Luftspulen sind allgemein anerkanntermaßen mit zur Zeit nicht mehr messbaren Klirr behaftet, wie gesagt, gilt dies nur für Spulen in „solo“. Es gibt 3 gebräuchliche Grundklassen in ihrer Bauart: Zylinderspule, Toroidspule und die Spiralspule in ihrer Sonderform der Flachbandspule, meist mit Kupfer als Leitmaterial. Vor Jahrzehnten (1985) baute die Firma Musikelektronik Geithain Aluminium-Flachbandspulen. Neuerdings werden auch Silberflachbandspulen von Mundorf angeboten, allerdings sind die Preise nicht praktikierbar.

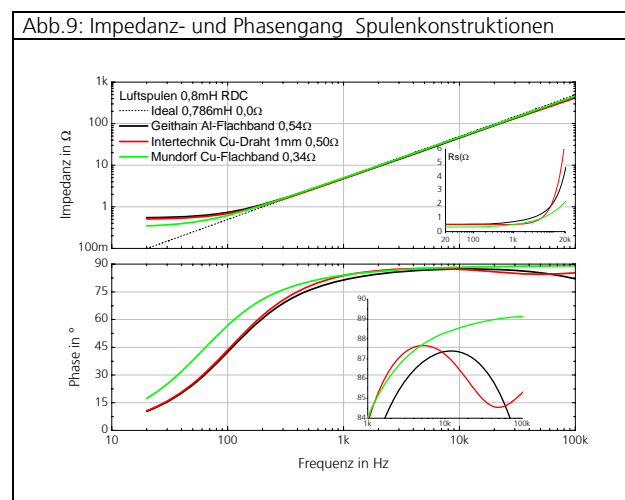
Bei Spulen kommt es auf eine möglichst effektive „Herstellung“ von Induktivität an, das ist bei Luftspulen ohne Kern recht schwierig. Hier geht insbesondere die Länge der Spule ein. Daher hat die Toroidspule die weitaus geringste Induktivität, die kurze Flachbandspule die höchste und etwas weniger bringt die Zylinderspule.

Spulen erzeugen nicht nur Eigenschwingungen sondern demzufolge auch Schall, wenn sie mit großen Wechselströmen betrieben werden, das bedeutet, sie schwingen in sich und produzieren elektromotorisch so Verzerrungen. Die gebräuchlichste Bauform ist die Zylinderspule und demzufolge die preiswerteste. Egal ob vakuumgetränkte, Backlack- oder normale Cu-Lackdrahtspulen, sie

unterscheiden sich bei gleicher Drahtstärke z.B. 1mm im Durchmesser nur um einige dB hörbarer Lautstärke. Nur wesentlich massivere Spulendrahtstärken, wie 2mm Durchmesser oder mehr sind deutlich leiser, d.h. ihre Massenträgheit verringert maßgeblich die Eigenschwingung. Die Eigenschwingungen sind axial und radial möglich. Die Eigenschwingungen sollen durch Verkleben der Windungen, Backlack oder vakuumgedrängt, unmöglich gemacht werden. Wer schon mal selbst Drahtluftspulen gewickelt hat, weiß dass ein richtig fester Sitz aller Drahtschlingen unmöglich ist und man kann sich an Hand der dichten Wicklungen nicht vorstellen, dass beim Vakuumtränken auch die inneren Windungen richtig fixiert werden können. Am besten kommt die Backlackspule, weil auch hier die innersten Windungen gleich mit Lack beschichtet sind wie die äußeren, es sei denn man spart in der Aufheiz- und Backzeit bis auch die inneren Windungen die erforderliche Temperatur und Vernetzungszeit erreicht haben. Wenn allerdings Gasreaktionen beteiligt sind, wird die Behandlungszeit nochmals deutlich verlängert. Erfahrungsgemäß ist die praktizierte Aushärtung nicht ideal und damit noch leicht mobil, vermutlich aus ökonomischen Gründen. Untersuchungen zum Schwingungsverhalten mit Aufnehmer machte Timmermanns in [2].

Die Toroidspule ist ringförmig mit sich selbst verbunden. Bei einer dichten Wicklung können sich die Windungen im Ring innen kaum bewegen. Nach außen gehen die Drahtwicklungen sternförmig, d.h. auseinander, was wieder Bewegung ermöglicht. Die Selbsterregung der Toroidspule ist allerdings sehr klein, da das Magnetfeld nur im Kern ist, außerhalb der Spule ist das Streufeld fast nicht messbar. Leider gibt es aber konstruktive Probleme für einen praktischen Test mit ausreichender Induktivität mit einem $\mu_{rel} = 0$ Kern. Worauf und wie soll der Draht gewickelt werden? Holzringe wären praktisch. Die Zahl der Drahtdurchmesser ist im Ringloch kleiner als außen, innen stapeln sich die Drähte und außen liegen sie locker, damit sind Schwingungen der Drähte leicht möglich. Die Toroidspule ist relativ sehr lang, was die Induktivität verringert und so die Zahl der Wicklungen hochschraubt. Der lange Draht müsste auch noch jedesmal durch den Ring gewickelt werden, was den Draht nicht gerade hält und die Wicklung inhomogen macht. Toroidspulen sind nur einlagig für kleine Induktivitäten praktikierbar (s. Kapitel 1) als Filterelemente für hochohmige Schaltungen.

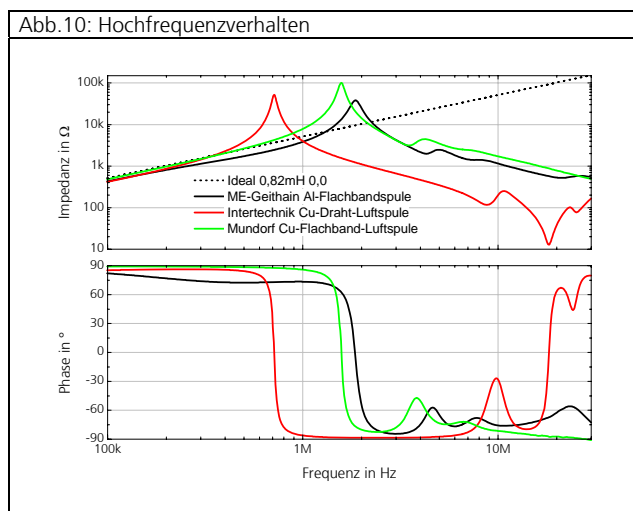
Wie wirkt sich die Wicklungsform der Flachdrahtspule auf die Tiefpassfiltereffektivität aus? In den Abb.9 und 10 sind 2 Flachbandspulen mit unterschiedlichen Leitungsmetallen mit einer Zylinderspule verglichen.



Zuerst einmal fällt auf, dass die Tiefpasseffizienz im niederfrequenten Bereich ganz entscheidend vom Gleichstromwiderstand der Spule abhängt, je niedriger dieser ist, desto besser ist jener, desto schneller werden die erforderlichen filterwirksamen Impedanzen erreicht.

Erstaunlich ist, dass selbst gute Spulen, wie es die Bandspulen darstellen, bei weitem nicht die Phasengüten wie die Folienkondensatoren erreichen. Die 0,8mH Spulen liefern nur für den Hochton gerade so gute Phasengänge. Die Cu-Flachbandspule unterdrückt die hohen Frequenzen am besten. Angesichts der

Phasenfehler der Spulen wirken die Diskussionen über die 0,00... Phasenfehler von Kondensatoren etwas überzogen. Durch die Eigenkapazität der Spulen haben auch diese elektrische Resonanzen. Oberhalb dieser verhalten sich die Spulen wie Kondensatoren. Hochfrequente Störsignale werden einfach durchgelassen. Von 100kHz bis 2MHz ist die Cu-Flachbandspule den Zylinderspulen deutlich überlegen. Ob es eine Steigerung mit Silberflachbandspule gibt? HF-Techniker versilbern jedenfalls alle spannungsführenden Teile und polieren diese. Ein Begebenheit macht deutlich, wie wichtig die Reinheit der Silberoberfläche ist. Bei einem Plasmaätzen war die Leistung sehr klein geworden. Alle elektronischen Prüfungen halfen nichts. Bei der Durchsicht fiel auf, dass das Silberverbindungsblech, 10cm x 2cm x 0,5mm, zwischen Generator und Sender (13,65MHz) völlig schwarz geworden war. Selbst ein „Anbrummen“ der Zahnkranzunterlegscheiben brachte nichts. Ein Aufklärung über die Eigenschaften von Ag₂S [s. Kapitel 1.12] überzeugte den Mechatroniker die Blechenden um die Schraubenöffnungen 1,5cm mittels ATA-Scheuerpulver blank zu polieren. Nach einer DI-Wasser Spülung und Ethanol Trocknung waren wieder 90% Leistung verfügbar. aber eben nur 90%. Die Reinigung der Kontakte reichte wahrscheinlich nicht. Ein Versuch kostete nichts, den Blechstreifen völlig zu reinigen. Danach kam die volle Leistung rüber, 100%! Das Ag₂S hat offenbar die Oberflächenleitfähigkeit so stark bedämpft, und das bereits bei 13MHz, die eigentlich gar nicht so hoch sind. In Abb.10 zeigt die Al-Bandspule trotz höheren Widerstands eine bessere HF-Leitfähigkeit als Cu. Manfred von Ardenne hatte in seinen betriebsinternen Lexika zu Stoffkonstanten, die im ZFTM Dresden eingesehen werden konnten, dem Al die zweithöchste HF-Leitfähigkeit nach dem Ag zugeordnet. Das war damals doch recht überraschend.



Theoretisch sollte die Cu-Flachbandspule wirklich einen geringeren Einfluss auf den Klang ausüben, der höhere Preis wäre dann gerechtfertigt. Ein kleines Manko bleibt noch. Die neuen Cu-Flachbandspulen von Mundorf sehen sehr gut aus, aber das mag nicht so bleiben, über längere Zeit könnte das Cu dunkel werden, andere Hersteller liefern schon ladenfrisch dunkle Cu-Bänder. Das bedeutet, oberflächlich hat sich intensiv bereits Kupfer-(I)-oxid Cu₂O gebildet, was die elektrischen Eigenschaften verändert (s. Kapitel 1.12). Im Betrieb wird nicht nur die Elektromigration angeregt (Musik ist leicht asymmetrisch), da Sauerstoff seitlich eindiffundiert und so auch Feuchtigkeitspuren, dann werden sich die Bänder in Abhängigkeit von Zeit, Temperatur, Strom, Spannung, Umweltgase nicht nur braunrot färben sondern die Migration wird auch „Hillocks“ und „Voids“ entstehen lassen. Die Vergrößerung der Reibung wird unwesentlich sein und die Eigenschwingungen nur unbedeutend verringern. Aber der HF-Leitfähigkeit wird geringer werden, wie oben beim Ag₂S und den Wirkwiderstand erhöhen, was die Filterwirkung verschlechtert. Wenn die Bänder eine Lackisolation erhalten würden, würde i) eine mechanisch mobile Phasengrenze // fehlen, denn die blanken Bänder sind durch einen Kunststoffband isoliert: Cu//Kunststoff//Cu -> Cu/Lack//Lack/Cu. Bei der Benutzung von Polyimidlacken, wie früher üblich für Cu-Lackdraht, wäre zwar die Kapazität größer aber die Cu-Atome sind dort z.T. durch Charge-

Transfer-Bindungen über das einsame elektronenpaar am stickstoffatom Cu-IN≡ geschützt, was die Reaktion mit O₂ verzögert (s. Lagerstabilität Cu-Lackdraht Kapitel 1). Der Nachteil mit der Entfernung des Lackes zur Kontaktierung sollte wie bei Cu-Lackdraht doch eher langzeitstabil von Vorteil sein. Eine Verlackung der Bänder könnte mit etwas Forschung soweit optimiert werden, dass der Lack nur zu „99%“ und anschließend in der Spule vollständig ausgehärtet wird, was die letzte mobile Phasengrenze quasi unbeweglich macht.

Die gleichen Probleme der Oberflächenreaktion gibt es bei Silberbändern, nur dass es dort länger dauert und die Beeinflussung nicht so intensiv ist. Der Vorteil von Silber wäre auch die etwas größere Masse von 11% bei gleicher NF-Leitfähigkeit, damit höhere Trägheit und geringeres Eigenschwingen [5], aber das sind nur „peanuts“

Der nachteil der Al-Bänder ist ihre schlechte Lötbarkeit.

6.3. Widerstände

Widerstände sind überall in jeder Elektronik in der Überzahl gegenüber Kondensatoren und erst recht gegenüber diskreter Induktivitäten. Die Frequenzweiche im Lautsprecherbau wird allgemein üblich so optimiert, dass der Strom möglichst wenig bedämpft wird. Aber ganz kommt man meist nicht aus. Bei Widerständen m Lautsprecherbau gilt es genauso wie für Kondensatoren in elektrischen Schaltungen, der beste Widerstand ist gar keiner, er setzt die Empfindlichkeit herab. Doch bereits in den meisten 2-Wegesystemen werden, sobald man die Mittelhochtöner mit Papiermembranen verlässt, weil man noch Frequenzen jenseits von 13kHz original getreu hören will, diese Bauelemente dringend erforderlich. In Schwingkreisen sind aber spezielle Bedämpfungen notwendig sind, weil immer irgendwelche Resonanzen auftreten.

Seit 2002 bietet auch Intertechnik [10] 2 Typen „antimagnetische“ Widerstände an: einen nach Ayrton-Perry-Verfahren gewickelten und den PBH von Isabellenhütte [11]. Letzterer ist ein Metallfolienwiderstand mit TO-Gehäuse und einem „metal heat sink“. Der neue Chefredakteur von „Klang+Ton“ nach Timmermanns, Herr Schmidt, hatte sich in einem kleinen Artikel sehr lobend über den PBH geäußert, dieser würde einen sehr „warmen“ Klang liefern.

In den hochwertigsten Lautsprechern werden Filmwiderstände mit TO-Gehäuse und integrierter Metallkühlplatte bereits eingebaut und vermarktet [12,13]. Bei Merlin wird der MP821 mit Metalloxidfilmwiderstand von Caddock [14] eingebaut und in der Nautilus 800 von Bowers&Wilkins laut Foto von [15] werden 3 Filmwiderstände mit TO-Gehäuse eingelötet.

Tab.4. 2,2ohm Leistungswiderstände verschiedener Klassen

No.	Hersteller	P	Aufbau	L	magnetisch
				1kHz	
7	DDR	2W	Draht/Keramik	214nH	ja
6	Intertechnik	10W	Draht/Zement	320nH	ja
6	Conrad	4W	Draht/Keramik	212nH	ja
4	Intertechnik	4W	Metalloxid	18nH	ja
5	Intertechnik	10W	Metalloxid	25nH	ja
3	Thel	5W	Metalloxid	16nH	ja
	Conrad	1W	Metallfilm	13nH	ja
2	Isabellenhütte	2/10W	Metallfolie	48nH	nein
	Mills	12W	Draht/Keramik	41nH	nein
1	Caddock	/15W	Metalloxid	< 2nH	nein

Die meist gebräuchlichsten Widerstände, besser gesagt Leistungswiderstände, kommen aus der Klasse der Drahtwiderstände, wie die von Intertechnik Draht/Zement 10W. Im Diagramm zeigt er eine konstante Impedanz bis 100kHz, eigentlich ausreichend und knapp halb so billig wie der MOX 10W. Dieser Drahtwiderstand beginnt aber schon im Hörbereich die Phase zu drehen. Oberhalb von 100kHz entwickeln sich alle Widerstände mit höher werdender Frequenz zu Induktivitäten oder zu stark verlustbehafteten Induktivitäten, mit einer Ausnahme, dem von Caddock. Das heißt, dass Widerstände, insbesondere die großen Intertechnik 10W Draht/Keramik wie kleine Spulen mit Parallelwiderstand zu behandeln

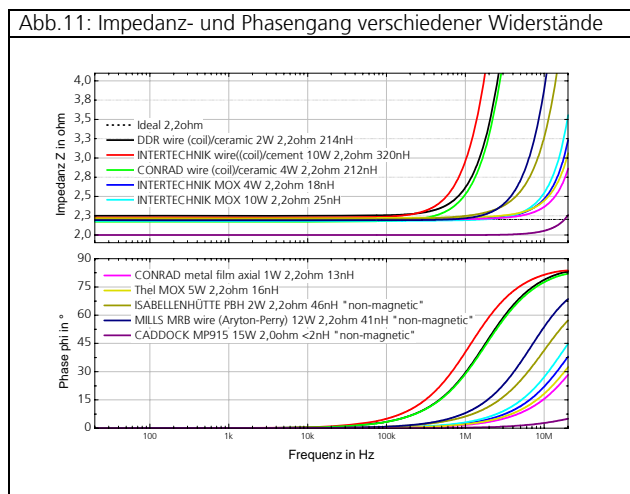
sind. Widerstände gegen Masse geschaltet würden dann HF in den Signalweg drücken.

In der Tab.4 sind die am meisten verwendeten Widerstände für Lautsprecherweichen gelistet.

Das getestete Caddock Musterexemplar wird für schwächere Leistungen vorgeschlagen und hat einen ceramic-heat-sink. Neu für den High-End Selbstbaulautsprechermarkt sind die Isabellenhütten-Widerstände. Equivalenttypen zu diesem Typ, d.h. mit metal-heat-sink auf Kühlkörper montierbar, werden auch von Caddock angeboten. Eine besondere Konstruktion ist der Mills-Widerstand deren 2 Wicklungen entgegengesetzt sind und dadurch die scheinbare Gesamtinduktivität verringert. Der Widerstandsdraht verhält sich analog den anderen. Völlig neu hingegen ist der Caddock Typ, der noch nicht im Lautsprechermarkt aufgetaucht ist. Durch seine Konstruktion sollte er sich bei der Inbetriebnahmeformierung wie MOX (Metalloxid-Widerstand) verhalten, nämlich in der Inbetriebnahme sich weniger klanglich zu ändern als die Draht/Zement Typen. Bei kleinen high-end Herstellern werden Bauteile bevorzugt, die frei von ferromagnetischen Materialien sind, da diese Materialien für sich bereits den Klang verschlechtern sollen. Die letzten drei Typen erfüllen diese Bedingungen. Diese Behauptung ist anhand der gemessenen Induktivitäten und des Hochfrequenzverhalten erstmal nicht verständlich. Auch nicht die Klangunterschiede zwischen MOX und Draht-Widerständen. Hier wäre eine niederimpedante Klirrmessung erforderlich.

Jeder Elektrotechniker würde kein schlechtes Gewissen bekommen, wenn er den Intertechnik Drahtwiderstand einbaut. NF ist ja kein HF, und die meisten Verstärker gehen so wie so nur bis höchstens 100kHz. Und die Phasendrehungen, selbst der Drahtwiderstände überschreiten nur 4° bei 100kHz, viel weniger als jeder einfache 6dB Filter.

Und wenn der Herr Ingenieur vielleicht doch etwas Bammel vor HF hat, dann nutzt er für den Anspruchsvollen die MOX-Widerstände 10W, da ist die Induktivität viel niedriger als bei den Isabellenhütten-Widerständen.



6.4. Abschlussgedanken

Die messtechnischen Untersuchungen haben bewiesen, dass die Wahl der Kondensatoren von Audyn MKP-QS 630V im Kapitel 4 Verschreihen nicht falsch war. Der Einbau von vakuumgetränkten Zylinderspulen anstatt von Flachbandspulen könnte einer der Ursachen sein, dass der Grundton überdeckt wird. Aber der Hauptgrund ist es nicht, da die Wiedergabe über die Vinyl-Langspielplatte, die viel weniger Höhen aufweist, wegen der Abtastfähigkeit und der Schneidbegrenzung, genauso ohne natürliches Einschwingverhalten daher kommt. Bemerkenswert sind die Klangunterschiede und das Langzeitbetriebsverhalten zwischen den Draht- und MOX-Widerständen.

Was heißt das eigentlich, alle normalen Widerstände sind magnetisch? Selbst solche renomierten high-end Hersteller wie THEL bevorzugen magnetische, weil diese korrosionsfester sein sollen. Aber ist das der Grund?

Widerstände sind überall enthalten, von der Aufnahme bis zur Wiedergabe und je mehr davon enthalten waren, um so schlechter wurde der Klang. Deshalb hat man vielleicht noch nie über die Wiedergabe das richtige Einschwingen eines natürlichen Instrumentes hören können.

Es gibt aber einen kleinen Kreis Besessener, die das 1-Wege Konzept bei Lautsprechern vehement begeistert verteidigen. Warum?

Warum klingen alte Lautsprecher so warm? Vielleicht weil dort kaum ein Widerstand drin ist?

Bei Vorverstärkersystemen kann man relativ leicht exakt den Klirr ermitteln, der liegt bei guten Geräten unter 0,009%, d.h. < -81dB.

Möglicherweise liegt es daran, wieviel Strom durch den Widerstand fließt?

Es ist schon mal ein besonderes Erlebnis, wenn man alle die üblichen Widerstände, die so in den Regalen rumliegen, an einen Magneten hält, besser halten will, denn diese werden so schnell angezogen, das man fast erschrickt, es klackt richtig, so eine Kraft steckt dahinter, selbst die kleinsten ¼ W ziehen kräftig.

Wenn man so an die 20 verschiedenen Typen getestet hat und dann die extra erworbenen „nichtmagnetischen“ Typen prüft, ist man fast enttäuscht, da sie wie „tot herumliegen“. Ein derartig prägnanter Effekt muss doch zu hören sein, wenn selbst solche vernachlässigbaren Konstruktionen wie der „Simba“-Chip einen Einfluss auf die Wiedergabe hat.

[1] HobbyHiFi 2/2000, S.68

[2] Klang und Ton 4/2000, S.24

[3] HobbyHiFi 5/2000

[4] HobbyHiFi 3/2000, S.64

[5] Dieter Nührmann, „Das große Werkbuch der Elektronik“, Franzis 2002

[6] Cosmin Iorga, „Compartmental Analysis of Dielectric Absorption in Capacitors“, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol7 No.2, April 2000

[7] ELEKTOR 1991, Heft 11, S.32

[8] HobbyHiFi 1/2000 S.68

[9] Hobby HiFi 4/2000, S.10

[10] www.intertechnik.de

[11] www.isabellenhuetten.de

[12] www.merlinmusic.com

[13] www.bwspeakers.de

[14] www.caddock.com

[15] „Stereo“ 3/2002

[16] <http://www.national.com/rap/Application/0,1570,28,00.html>