

APPLICATION NOTE

ANP125 | Die akustischen Auswirkungen harmonischer Verzerrungen von Aluminium-Elektrolytkondensatoren

Dr. René Kalbitz



Abstract: In dieser Appnote wird eine vergleichende Studie der Oberschwingungsgesamtverzerrung (eng. Total Harmonic Distortion, THD) von handelsüblichen Elektrolytkondensatoren, wie sie von Würth Elektronik eiSos hergestellt werden, sowie von speziell angefertigten Bauteilen vorgestellt. Die Diskussion über die Hörbarkeit von Verzerrungen wird auf der Grundlage der menschlichen Klangwahrnehmung geführt. Sie kommt zu dem Ergebnis, dass Kondensatoren bei der Übertragung von Signalen keine nennenswerten Verzerrungen zu den Grundfrequenzen hinzufügen. Änderungen des Elektrolyts oder des Trennpapiers haben fast keinen Einfluss auf die THD.

01. EINLEITUNG

In der Audiotechnik gibt es eine anhaltende Diskussion über die Klangqualität von Verstärkern hinsichtlich der Hörbarkeit von Signalverzerrungen. ^{[1], [2], [3], [4]} Offenbar stehen Kondensatoren im Verdacht, Quelle oder zumindest Mitverursacher von hochfrequenten Verzerrungen zu sein, die den Höreindruck beeinflussen. Mit dieser Arbeit soll der Diskurs über Kondensatoren und deren Einfluss auf Verzerrungen ergänzt werden. Bei der Diskussion über die Hörbarkeit von Verzerrungen geht es nicht nur um die Messung elektrischer Eigenschaften, sondern auch um deren Interpretation im Hinblick auf die Wahrnehmung durch das menschliche Gehör.

Diese Studie vergleicht Oberschwingungsgesamtverzerrung (eng. Total Harmonic Distortion, THD) von handelsüblichen Elektrolytkondensatoren, so wie sie von Würth Elektronik eiSos hergestellt werden, sowie von speziell angefertigten Produkten.

Um die Parameter zu ermitteln, welche die THD beeinflussen, wurden Kondensatoren mit unterschiedlichen Trennpapieren und Elektrolytzusammensetzungen untersucht. Diese Musterkondensatoren wurden unter Bedingungen, die der Massenproduktion nahekommen, in einer Produktionsstätte hergestellt und im Elektroniklabor von Würth Elektronik in Berlin analysiert.

Um den Leser in die Lage zu versetzen, die Ergebnisse zu interpretieren, wird zunächst eine Einführung in das Gebiet des menschlichen Gehörs und der Psychoakustik gegeben,

bevor auf die Untersuchung der harmonischen Verzerrungen in Kondensatoren eingegangen wird. Darüber hinaus werden Ergebnisse aus Modellrechnungen vorgestellt, um die Plausibilität der gemessenen Ergebnisse zu überprüfen.

Um ein Gleichgewicht zwischen Lesbarkeit und technischer Gründlichkeit zu schaffen, ist die Einführung in die technischen Einzelheiten der THD und die Entwicklung mathematischer Kondensatormodelle nicht in den Hauptteil aufgenommen, sondern in den Anhang verlagert worden.

02. MENSCHLICHES GEHÖR

Dieser Abschnitt bietet eine Einführung in die menschliche Schallwahrnehmung und wie sie quantifiziert werden kann. Er definiert Begriffe wie Lautstärke und Hörschwelle und fasst die Diskussion über die Vorhersage der Hörbarkeit von Verzerrungen zusammen.

Das menschliche Ohr kann Schallwellen in einem Frequenzbereich zwischen etwa 20 Hz (untere Grenze) und 16 kHz (obere Grenze) wahrnehmen. ^[5] Schall in diesem Bereich (hörbares Fenster) wird daher als hörbarer Schall bezeichnet. Schall unter 20 Hz wird als Infraschall und Schall über 16 kHz als Ultraschall bezeichnet.

Eine grafische Darstellung der Hörempfindung erhält man, wenn man den Schalldruckpegel über die gerade hörbare Frequenz aufträgt, wie in Abbildung 1. ^[6] Die in der Abbildung eingetragenen Kurven werden als Isophone bezeichnet und stellen Kurven gleicher Lautstärke dar, gemessen in der Einheit Phon. Isophone setzen den Schalldruck, gemessen in dB, in Beziehung zu den Lautstärkepegeln. Ein Ton mit einem Lautstärkepegel von 50 phon wird als genauso laut empfunden wie ein 1-kHz-Ton mit einem Schalldruckpegel von 50 dB. Gleicher Lautstärkepegel bedeutet, dass unabhängig von der Frequenz jeder Ton im Verlauf einer Kurve als gleich laut wahrgenommen wird. Die Lautstärke ist also eine Wahrnehmungsgröße (psychoakustisch), im Gegensatz zum Schalldruck, der eine Anregungsgröße darstellt. ^{[7], [8], [9]}

APPLICATION NOTE

ANP125 | Die akustischen Auswirkungen harmonischer Verzerrungen von Aluminium-Elektrolytkondensatoren

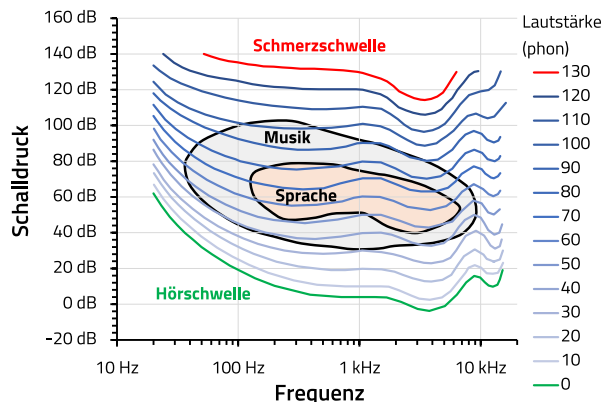


Abbildung 1: Auditorischer Wahrnehmungsbereich (DIN 45630)

In diesem Diagramm zeigt die unterste Kurve die sogenannte Hörschwelle an. Diese Schwelle gilt für Messungen mit Sinustönen in einem freien Schallfeld binauralen Hörens. Der Schalldruckpegel ist auf den Schalldruck 20 μ P bezogen. Nach dieser Definition beträgt der Schalldruckpegel an der Hörschwelle bei 1 kHz 4 dB. Der Bereich für Sprache ist viel kleiner als der Hörbereich. Auch Musik umfasst nur ein Teilgebiet des gesamten Hörbereichs.

Die Hörschwelle ist offensichtlich stark frequenzabhängig. Im Bereich zwischen 2 kHz und 5 kHz ist die Hörempfindlichkeit am größten. In diesem Bereich reicht der niedrigste Schalldruck für eine Hörempfindung aus. Unterhalb und oberhalb dieses Bereichs nimmt die Hörempfindlichkeit schnell ab. Die obere Kurve stellt die Schmerzgrenze dar. In diesem Fall ist der Schalldruck groß genug, um Schmerzen zu verursachen, und führt bei längerer Einwirkung zu dauerhaften Hörschäden.

An dieser Stelle dürfte bereits deutlich werden, dass das Hören zu einem großen Teil eine Frage der subjektiven Wahrnehmung ist. Die Bestimmung der Lautstärke ist komplex und umständlich.

Das subjektive Maß der Lautstärke wird also durch das objektive Maß des gewichteten Schalldrucks ersetzt, wie in Abbildung 2 dargestellt. Hier wird der Schalldruck als Funktion der Frequenz mit einer Filtercharakteristik gewichtet, die in Abbildung 2 in ihrer normierten Form dargestellt ist und die annähernd invers zu den Isophonen (Kurven gleicher Lautstärke) in Abbildung 1 ist. [10] Die normalisierte Gewichtungsfunktion in Abbildung 2 basiert auf der Empfehlung der International Telecommunication Union (ITU). Der Übersichtlichkeit halber enthält Abbildung 2 auch eine Kurve, die das ungewichtete hörbare Fenster angibt.

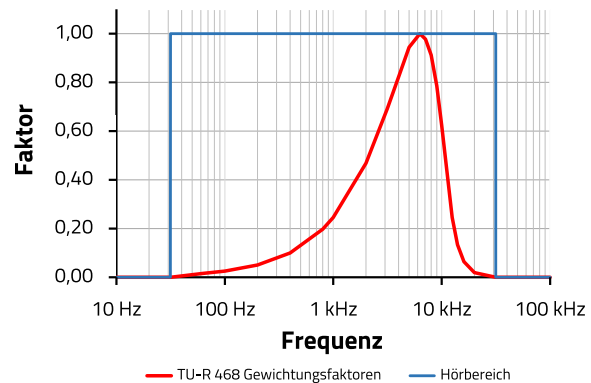


Abbildung 2: Grafische Darstellung der Filterfaktoren für den ungewichteten Hörbereich und der Gewichtungsfaktoren gemäß ITU-R 468. [10]

Beide, die gewichtete und die ungewichtete Filterkurve, können bequem zur Verarbeitung von Audiosignalen verwendet werden.

Der Dynamikbereich des menschlichen Gehörs ist groß und reicht von 130 dB (Schmerzgrenze) bis hinunter zu -9 dB (Hörschwelle). Dieser weite Bereich kann jedoch nicht gleichzeitig an beiden Extremen der Skala wahrgenommen werden. [11] Die Fähigkeit, eine kleine Verzerrung wahrzunehmen, die einem Grund- oder Hauptsignal überlagert ist, hängt sehr stark vom Frequenzbereich und von der Komplexität des Hauptsignals ab. [2], [12], [13] Untersuchungen zeigen, dass bei komplexen Sprach- und Musiksignalen Verzerrungen von 2 % bis 5 % auftreten können, ohne dass sie vom Hörer wahrgenommen werden. [11], [3] Für einzelne harmonische Frequenzen wurde festgestellt, dass das menschliche Gehör unter Laborbedingungen in der Lage ist, Verzerrungen durch einzelne Oberschwingungen (d.h. Obertöne oder harmonische Frequenzen) im Bereich von 0,3 % bis zu 0,01 % (bei 4 kHz, dem Bereich höchster Empfindlichkeit) relativ zur Grundfrequenz zu unterscheiden. [13]

Um eine Analogie für die entsprechenden Unterschiede im Schalldruckpegel zu geben (siehe auch Appendix C): Dies entspricht der Fähigkeit, den Klang einer Trompete (Schalldruckpegel von 120 dB) in einer Entfernung von etwa 10 km zu unterscheiden, während man 1 m von einer anderen Trompete mit demselben Druckpegel entfernt steht. [9], [7], [14] Obwohl diese Analogie eine Vereinfachung darstellt und die Frequenzspektren der Trompeten sowie die Unterschiede zwischen Grundton und Oberton vernachlässigt, kann sich jeder vorstellen, wie empfindlich das menschliche Gehör sein kann und wie gering eine Verzerrung von 0,01 % tatsächlich ist.

Die niedrigsten THDs für die ersten 10 Oberschwingungen aus dem oben erwähnten menschlichen Hörversuch liegen in der Größenordnung von etwa 10 % bis 7 %, abhängig von der Grundfrequenz. (Appendix A enthält weitere Informationen über THD.) Unter bestimmten Bedingungen ist das Gehör also in der Lage, THDs bis zu 7 % zu erkennen, was einer Änderung des Schalldruckpegels von 20 dB entspricht.

Es gibt Hinweise darauf, dass die THD nicht immer das genaueste Maß (Metrik) zur Vorhersage der Hörbarkeit von Verzerrungen in komplexen Wellenformen ist. ^{[1], [2], [3], [12]}

Mehrtönige Signale oder Systeme mit Störungen bei höheren Frequenzen können in Bezug auf die subjektive Störung sehr unterschiedlich wahrgenommen werden. So wurde beispielsweise festgestellt, dass ein sinusbetriebener Lautsprecher ("schlechter Lautsprecher") mit einer THD von 2 % eine "Rub & Buzz"-Verzerrung hervorruft, wenn das Spektrum nicht abnehmende Amplituden von 0,3 % oberhalb der zehnten Oberschwingung, d.h. bei höheren Frequenzen, enthält. ^[14] Ein Lautsprecher ("guter Lautsprecher") mit einer höheren THD von 6 %, aber abnehmenden Amplituden der höheren Oberschwingungen, weist jedoch eine geringere "Rub & Buzz"-Verzerrung und damit einen besseren Klang auf. Für diese Systeme werden Methoden wie die GeddLee-Metrik oder die Verwendung eines Gewichtungsfaktors $n^2/4$ der n -ten Harmonischen empfohlen, um den psychoakustischen Einfluss der hochfrequenten Verzerrungen zu messen. ^[3]

Daher ist die THD ein geeignetes Mittel für Systeme mit geringen nichtlinearen Störungen, die erste Oberschwingungen unter oder um 1 % erzeugen und bei höheren Oberschwingungen gegen Null gehen. Bei größeren nichtlinearen Störungen mit nicht verschwindenden höheren Oberschwingungen ist die THD jedoch möglicherweise kein korrektes Maß für die Hörbarkeit von Störungen.

03. THD EINES KONDENSATORMODELLS

In diesem Abschnitt wird ein Modell vorgestellt, mit dem die Plausibilität der gemessenen THD-Werte, die in Abschnitt 05 vorgestellt werden, überprüft werden kann. In Appendix A wird der rein technische Begriff der THD eingeführt und anhand von Beispielen erläutert.

Abbildung 3 zeigt eine Schaltung, die sich zur Modellierung des Spannungs- und Stromverhaltens eines Kondensators eignet. Sie besteht aus einem äquivalenten Serienwiderstand (ESR) R , einer reinen Kapazität C und einer äquivalenten Serieninduktivität (ESL) L , die den Kondensator modellieren, sowie einer Spannungsquelle und einem Amperezähler.

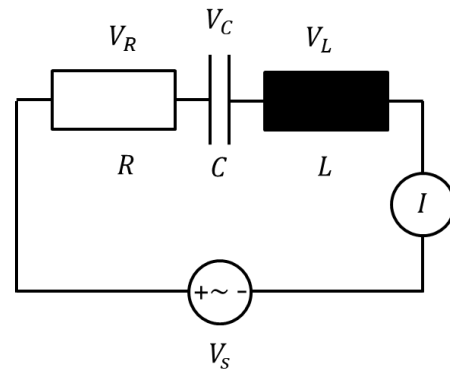


Abbildung 3: Kondensatormodell bestehend aus ESR R , Kapazität C , ESL L , Amperemeter und Spannungsquelle.

Die Anwendung der Kirchhoffschen Regel auf die Schaltung in Abbildung 3 führt zu

$$V_s = V_R + V_L + V_C \quad (1)$$

mit V_s als dem von der Spannungsquelle angelegten zeitabhängigen Spannungssignal, V_R als dem Spannungsabfall über dem ESR, V_L als dem Spannungsabfall über der ESL und V_C als dem Spannungsabfall der reinen Kapazität. Explizite mathematische Ausdrücke für die Lösung von Gleichung (1) sind rein technischer Natur und werden in Appendix B beschrieben. Da der Kondensator keine Oberschwingungen verursacht, ist die THD gleich Null. (siehe Appendix A für weitere Einzelheiten)

Dies ändert sich, wenn die konstante Kapazität durch einen spannungsabhängigen Term, d.h. eine nichtlineare Kapazität, ersetzt wird. Die mathematischen Details sind eher technischer Natur und werden daher in Appendix B behandelt. Anhand von Messungen wird die spannungsabhängige Kapazitätsänderung auf etwa 1 % geschätzt, wie in Abbildung 4 dargestellt. Mit der spannungsabhängigen Kapazität erzeugt das Modell höhere harmonische Schwingungen, wenn es einem oszillierenden Spannungssignal ausgesetzt ist.

APPLICATION NOTE

ANP125 | Die akustischen Auswirkungen harmonischer Verzerrungen von Aluminium-Elektrolytkondensatoren

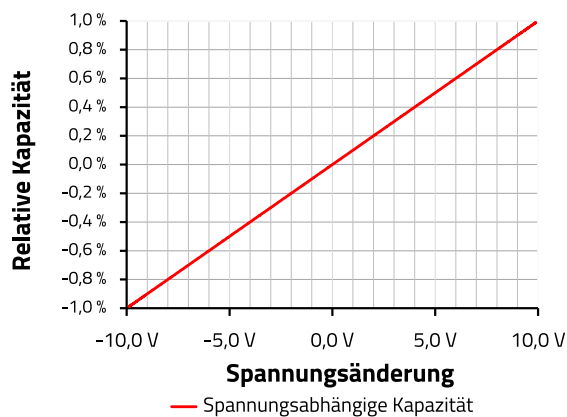


Abbildung 4: Abhängigkeit der relativen Kapazität von der angelegten Spannungsänderung. Stellt eine obere Schätzung der tatsächlich gemessenen Kapazitäts-Spannungs-Abhängigkeit dar.

Das Ergebnis der Fourier-Analyse in Abbildung 5 zeigt die normierten Amplituden der Oberwellen für eine bestimmte Grundfrequenz $\omega = 2\pi f_1$, wie in Gleichung (5) angegeben. Die Berechnung erfolgt mit $C = 470 \mu\text{F}$, $R = 0.1 \Omega$ und $L = 50 \cdot 10^{-9} \text{H}$. Die Amplitude der ersten Harmonischen beträgt etwa 0,086 %. Die Amplitude der höheren Oberschwingungen nimmt rasch auf unter 0,001 % ab. Entsprechend dem Modell ergibt der Frequenzgang eine THD von 0,086 %.

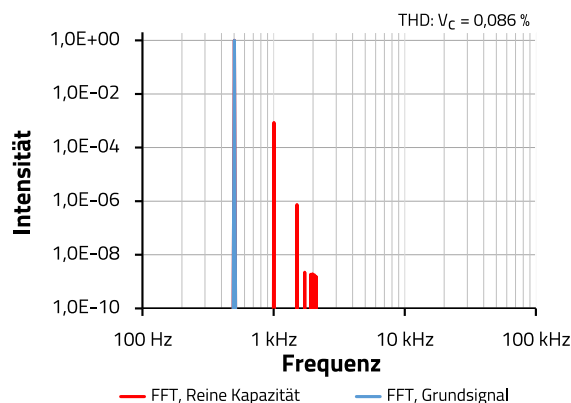


Abbildung 5: Berechnetes Frequenzspektrum des Kondensatormodells mit spannungsabhängiger Kapazität, wie in Abbildung 4 dargestellt. Die Grundfrequenz beträgt $f_0 = 500 \text{ Hz}$

Das Modell kann die Amplituden der harmonischen Frequenzen nicht genau vorhersagen, da diese von der Spannungsabhängigkeit des Kondensators abhängen, die in diesem Fall nur geschätzt wird. Es sollte jedoch eine Annäherung an die tatsächliche Amplitude der THD liefern, und es zeigt, dass die spannungsabhängige Kapazität zu einer harmonischen Verzerrung ungleich Null führt. Ob es sich dabei um eine "große" Verzerrung für eine Audioanwendung handelt, wird unter Bezugnahme auf das menschliche Hörvermögen beantwortet, das in Abschnitt 02 untersucht

wird. Die ersten Oberwellen nehmen schnell ab und haben eine THD von deutlich unter 0,1 %, was darauf schließen lässt, dass diese Verzerrung an der Hörbarkeitsschwelle oder darunter liegt, wobei das Letztere wahrscheinlicher ist.

In den letzten beiden Abschnitten wurde das Thema Verzerrungen und deren Hörbarkeit bearbeitet und anhand von Literatur und Modellrechnungen untersucht. Im weiteren Verlauf werden gemessene harmonische Verzerrungen sowie die elektrischen Eigenschaften verschiedener Elektrolytkondensatoren vorgestellt und diskutiert.

04. EXPERIMENTELLE DETAILS

Die Studie umfasst sowohl Kondensatoren, die bei eiSos Würth Elektronik im Handel erhältlich sind (siehe Tabelle 1) als auch speziell angefertigte Kondensatoren, die am Produktionsstandort hergestellt wurden (siehe Tabelle 2). Die Proben in Tabelle 2 wurden in der Produktionsstätte unter seriennahen Bedingungen hergestellt, um die Zusammensetzung des Trennpapiers, die Dichte des Trennpapiers, die Dicke des Trennpapiers und die Zusammensetzung des Elektrolyts zu variieren. Das Papier wurde von der Nippon Kodoshi Corporation geliefert und die Hauptbestandteile der Elektrolyte sind γ -Butyrolacton, Dimethylcarbonat und Ammoniumtetraborat-Tetrahydrat. (Zum Schutz des geistigen Eigentums von Würth Elektronik (WE) dürfen weitere Einzelheiten der Herstellung nicht ohne Unterzeichnung einer Geheimhaltungsvereinbarung bekannt gegeben werden)

Name der Probe	Serie	Kapazität [μF]	Nennspannung [V]	Artikelnummer
WE, ASLI	WCAP-ASLI	470	10	865080253012
WE, AT1H	WCAP-AT1H	470	10	860240275007

Tabelle 1: Übersicht der im Handel erhältlichen Proben.

Bei den Proben P1, P2 und P3 wurde nur das Papier gewechselt, um dessen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften zu untersuchen. Bei den Proben P4, P5 und P6 sollte der Einfluss des Wassergehalts in Kombination mit verschiedenen Trennpapieren untersucht werden. Alle Kondensatoren haben die gleichen Abmessungen und sind oberflächenmontierte Bauelemente.

Name der Probe	Papier			Elektrolyte	
	Dicke [μm]	Dichte [g/cm^3]	Hauptbestand- teil der Faser	Wassergehalt [%]	Leitfähigkeit [mS/cm]
P1	40	0.45	Manila Hemp	18-21	14
P2	40	0.4	Manila Hemp	18-21	14
P3	40	0.35	Bast	18-21	14
P4	40	0.4	Manila Hemp	49-55	32
P5	30	0.66	Synthetic	18-21	14
P6	40	0.35	Bast	49-55	32

Tabelle 2: Übersicht über Proben und Variationen von Materialien.

Die Messungen wurden mit dem Impedanzanalysator Alpha-AK High Performance Frequency Analyzer durchgeführt, der mit dem Frontend POT/GAL, Electrochemical Test Station (15 V, 10 A) von Novocontrol in einer vierpoligen Kelvin-Konfiguration verbunden war. Die Steuerung des Analysators und die Erfassung der Oberschwingungen wurden mit der WinDETA-Software (V 6.02) von Novocontrol durchgeführt.

Alle nachfolgenden Datenauswertungen sowie die Modellberechnungen wurden mit Wolfram Mathematica 11 durchgeführt. Die ESR- und Kapazitätswerte wurden durch Anpassung eines Widerstands-Kapazitäts-Induktivitäts-Modells an die Impedanzdaten ermittelt.

Vor den Messungen wurde jede Probe 20 Minuten lang bei ihrer Nennspannung (10 V) mit dem programmierbaren Netzgerät HMP4040 von Rohde & Schwarz vorgepolt. ESR und Kapazität wurden mit einem DC-Offset von 1 V und einer Amplitude des Sondenwechselstromsignals von 0,1 V gemessen. Für die THD-Messungen betrug der DC-Offset 6 V und die Amplitude des Sondenwechselstromsignals 1,5 V. Für jeden Kondensatortyp wurden mindestens fünf Kondensatoren gemessen.

05. GEMESSENE THD EINES 470 μF ELEKTROLYTKONDENSATORS

Dieser Abschnitt erläutert die Frequenzanalyse am Beispiel eines Elektrolytkondensators von Würth Electronic mit einer

Kapazität von 470 μF (865080253012). Er behandelt die Berechnung der THD und führt die mittlere THD als Kennzahl für die Signalverzerrung am Kondensator ein.

Zur Messung der harmonischen Wechselspannungskomponenten wird ein Sonden Spannungssignal mit einer spezifischen Frequenz f_1 an den Kondensator angelegt, welches wiederum einen Strom verursacht, der zum Laden/Entladen des Kondensators führt. Die mit separaten Messleitungen gemessene Spannung am Kondensator kann nun mit einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) analysiert werden, um ein Frequenzspektrum der gemessenen Spannungsreaktion des Kondensators zu erhalten. Die angelegte Frequenz f_1 ist bei dieser Messung die niedrigste mögliche Frequenz und damit die Grundfrequenz.

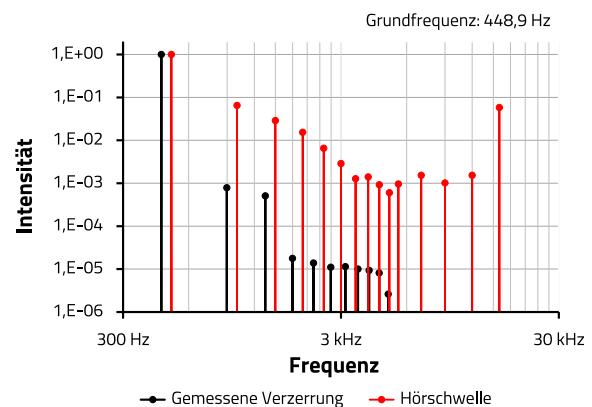


Abbildung 6: Gemessenes Frequenzspektrum eines 470 μF -Aluminium-Elektrolytkondensators (WCAP-ASLI, 865080253012) bei einer Grundfrequenz des Spannungssignals von 448,9 Hz. Ebenfalls dargestellt ist der Schwellenwert für hörbare Verzerrungen, der in einem psychoakustischen Experiment für eine Grundfrequenz von 500 Hz ermittelt wurde. ^[13]

Das gemessene Frequenzspektrum eines Kondensators mit der Grundfrequenz von 448,9 Hz in Abbildung 6 zeigt einen steilen Abfall der Amplituden für höhere Oberwellen, was für alle untersuchten Kondensatoren und Erregungsfrequenzen typisch ist. Die Amplituden der ersten beiden Oberschwingungen sinken im Vergleich zum Grundschwingungssignal auf Werte deutlich unter 0,1 %. Die Oberschwingungen höherer Ordnung erreichen Werte in der Größenordnung von 0,001 % und darunter. Alle Oberwellenamplituden liegen deutlich unter der Hörschwelle, die ebenfalls in Abbildung 6 dargestellt ist. Die dargestellten Hörschwellenwerte wurden in einem separat durchgeführten psychoakustischen Experiment bei einer Grundfrequenz von 500 Hz ermittelt. (siehe auch Appendix C für ein niederfrequentes Beispiel) ^[13]

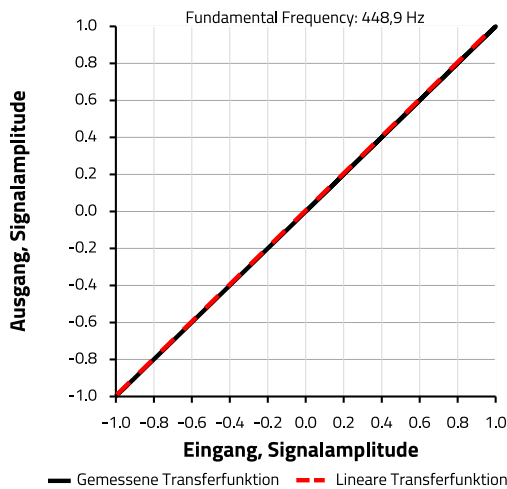


Abbildung 7: Lineare und gemessene Transferfunktion eines 470 µF Aluminium-Elektrolytkondensators (WCAP-ASLI, 865080253012). Die Grundfrequenz des Spannungssignals beträgt 448,9 Hz.

Infolge der geringen Amplituden der Oberschwingungen zeigt die entsprechende Transferfunktion in Abbildung 7 ein nahezu perfektes lineares Verhalten. Die entsprechende Amplitude der überlagerten Störung ist etwa um einen Faktor 1000 kleiner als die Grundschiwingung selbst. Daraus lässt sich schließen, dass der Kondensator in guter Näherung ein lineares System ist.

Andere Messgrößen wie die GeddLee-Metrik oder Metriken, bei denen die höheren Oberschwingungen im Vordergrund stehen, liefern keine zusätzlichen Informationen. [3] Die GeddLee-Metrik beinhaltet die zweite Ableitung der Transferfunktion, die bei Kondensatoren in guter Näherung Null ist, und höhere Harmonische jenseits der 10. Harmonischen zeigen abnehmende Amplituden unter 0,001 %, die vernachlässigt werden können.

Wie in Abschnitt 02 erläutert, ist die THD unter diesen Bedingungen ein geeignetes Maß für die Vergleichsuntersuchung der Verzerrung.

Die Größenordnung der ersten Oberschwingung sowie der steile Abfall bei höheren Oberschwingungen stimmen mit der in Abbildung 5. gezeigten Modellrechnung überein. Die auf der Grundlage der Fourier-Transformation in Abbildung 6 berechnete THD (Einzelheiten in Appendix A) ergibt einen Wert von 0,078 %, der in etwa mit dem in Abschnitt 03 berechneten theoretischen Wert von 0,086 % übereinstimmt. Nimmt man die Modellberechnungen in Abschnitt 03 als Referenz, so entspricht der Frequenzgang des Kondensators den Erwartungen.

Die in Abbildung 8 dargestellten THDs für Grundfrequenzen im Bereich von 1 Hz bis 1 MHz zeigen Schwankungen im Bereich von 0,001 % bis 0,4 %. Dieses THD-Spektrum zeigt

tendenziell niedrigere THD-Werte bei niedrigen Frequenzen und größere THD-Werte bei hohen Frequenzen. Innerhalb des hörbaren Bereichs, der in Abbildung 2 dargestellt ist, liegen die Werte bei etwa 0,05 %.

Wir wollen an dieser Stelle nicht weiter auf die Spektren eingehen, sondern Mittelwerte zur Beurteilung der Qualität eines Kondensators heranziehen. Um eine Kennzahl für die Frequenzverzerrung im hörbaren Bereich $\Delta f = f_2 - f_1$ zu erhalten, berechnen wir numerisch den Mittelwert

$$THD_{Mean} = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} THD(f) df \quad (2)$$

sowie der gewichtete Durchschnitt

$$THD_{ITU} = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} W_{ITU}(f) \times THD(f) df \quad (3)$$

auf der Grundlage der menschlichen Hörempfindlichkeit $W_{ITU}(f)$. Für das gegebene Beispiel sind die Durchschnittswerte: $THD_{Mean} = 0,097 \%$ und $THD_{ITU} = 0,017 \%$. Der gewichtete Mittelwert ist niedriger, da das menschliche Gehör unterhalb von 1 kHz und oberhalb von 10 kHz weniger empfindlich ist.

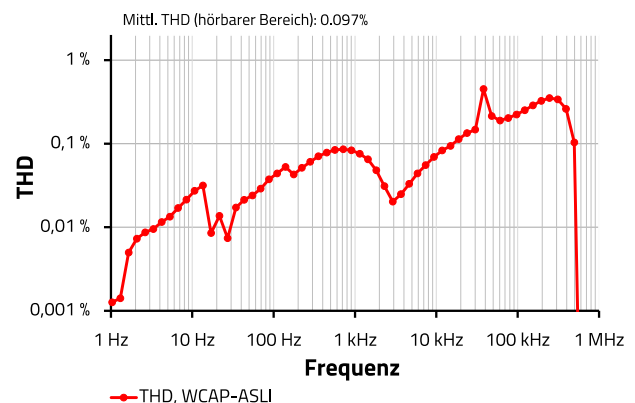


Abbildung 8: THD eines 470-µF-Aluminium-Elektrolytkondensators (WCAP-ASLI, 865080253012), gemessen bei verschiedenen Grundfrequenzen in einem Bereich von 1 Hz bis 1 MHz.

Wie in Abschnitt 02 erörtert, liegt die Hörschwelle für Verzerrungen bei etwa 7 %, insbesondere wenn die Amplituden der Oberschwingungen gegen Null abfallen, wie es im gezeigten Beispiel der Fall ist. Daher liegen die harmonischen Verzerrungen des untersuchten Kondensators um Größenordnungen unter der Hörschwelle.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse ist es unwahrscheinlich, dass Kondensatoren eine signifikante Quelle von Verzerrungen sind, wenn sie zur Signalkopplung (Reihenschaltung) oder Entkopplung (Parallelschaltung) in Audioanwendungen verwendet werden. Die Transferfunktionen von Verstärkern weisen

konstruktionsbedingt höhere Nichtlinearitäten auf als Kondensatoren. [15], [16], [17] Es kann nicht völlig ausgeschlossen werden, dass Übersteuerungen oder andere starke nichtlineare Effekte von Leistungsverstärkern zu einer Verstärkung von kapazitätsbedingten winzigen Verzerrungen führen können, bis zu dem Punkt, an dem sie deutlich hörbar werden.

Die weitere Untersuchung solcher Effekte würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Weitere Untersuchungen dieses Effekts müssten die hohen Verzerrungen, die durch das Clipping selbst hervorgerufen werden, von denen trennen, die durch den Kondensator verursacht werden.

06. VERGLEICHSANALYSE VON KONDENSATOREN

In Abschnitt 05 wurde die Fourier-Analyse an einem einzelnen Kondensator beispielhaft durchgeführt und die durchschnittlichen THD-Werte THD_{Mean} sowie THD_{ITU} als Maß für die Frequenzverzerrung im hörbaren Bereich eingeführt. Im folgenden Abschnitt werden die Werte THD_{Mean} sowie THD_{ITU} verwendet, um den Einfluss unterschiedlicher Elektrolytzusammensetzungen und Separatorpapiere auf die Signalverzerrung zu quantifizieren.

Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die Kapazitäts- bzw. ESR-Werte der verschiedenen Kondensatoren. Wie in Abschnitt 04 erwähnt, sind die Proben von Würth Elektronik (WE) im Handel erhältlich. Für die Proben P1 bis P6 wurden der Wassergehalt des Elektrolyts sowie die Papierdichte systematisch variiert. Alle Proben haben Nennkapazitäten von 470 μF , innerhalb der üblichen Toleranzen von $\pm 20\%$, wie in Abbildung 9 dargestellt.

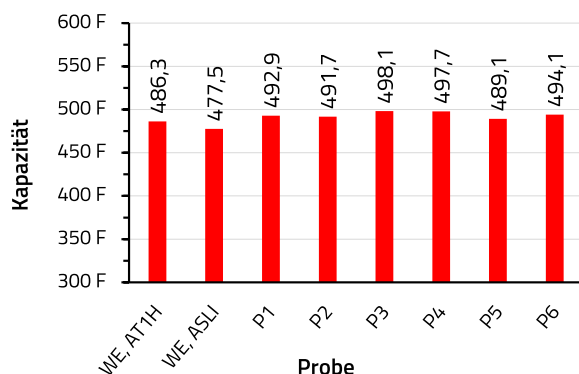


Abbildung 9: Durchschnittswerte der gemessenen Kapazitäten.

Wie in Abbildung 10 dargestellt, weisen die ASLI-Proben den niedrigsten ESR-Wert unter den handelsüblichen Produkten auf, da sie aus einer ausgewiesenen verlustarmen Produktlinie stammen. Die Proben P1 bis P3 zeigen im

Vergleich zur ASLI-Probe einen weiteren Rückgang des ESR-Wertes, wenn die Dichte des Separatorpapiers verringert wird. Dieser Effekt steht im Zusammenhang mit der zunehmenden Mobilität des Elektrolyts, die auf die zunehmende Porengröße des Separatorpapiers zurückzuführen ist.

Für die Probe P4 wurden das Papier und das Elektrolyt mit dem Ziel gewählt, eine weitere Verringerung des ESR zu erreichen. Bei der Probe P6 wurde die Papierdichte weiter verringert, was zu einer weiteren Verringerung des ESR im Vergleich zu Probe P4 führte. P5 veranschaulicht die Auswirkungen eines Papiers mit hoher Dichte auf den ESR, das im Vergleich zu den Proben P1 bis P3 einen größeren ESR aufweist.

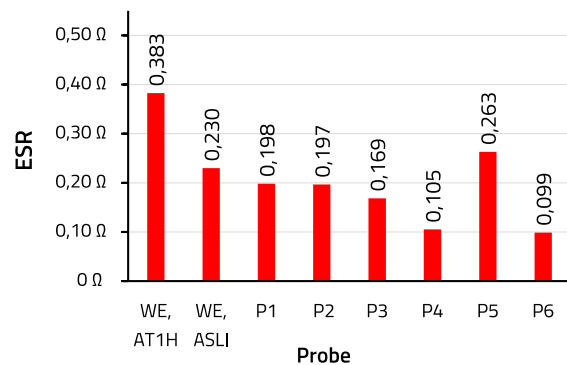


Abbildung 10: Durchschnittswerte der ESR.

Es gäbe in der Tat noch mehr über den Einfluss von Elektrolyt und Separatorpapier auf den ESR zu sagen, aber an dieser Stelle reicht es aus, anzuerkennen, dass die vorgestellten Kondensatoren eine breite Vielfalt von Elektrolyt und Separatorpapier darstellen. Interessanterweise ist die Auswirkung dieser Materialvariationen und Unterschiede in den ESR-Werten auf die THD_{Mean} sowie THD_{ITU} , welche in Abbildung 11 dargestellt sind, praktisch vernachlässigbar, wie der durch die Fehlerbalken angegebene Mittelwertbereich zeigt. Generell kann gesagt werden, dass THD_{ITU} , welche die frequenzabhängige menschliche Hörempfindlichkeit berücksichtigt, um eine Größenordnung niedriger ist als THD_{Mean} .

Die THD_{Mean} und THD_{ITU} des AT1H sind im Vergleich zu P1 nahezu unverändert, obwohl der ESR-Wert von P1 im Vergleich zu AT1H deutlich niedriger ist.

Die Auswirkung von Materialvariationen auf die THD ist aus dem Vergleich der Proben P3 und P4 ersichtlich. Hier wurden Papier und Elektrolyt ausgetauscht, ohne dass sich dies merklich auf THD_{Mean} und THD_{ITU} auswirkte. Ähnliches gilt für

den Vergleich der Proben P2 und P3, die unterschiedliche Separatorpapiere, aber das gleiche Elektrolyt enthalten. Für die Proben P5 und P6 lässt sich eine unterschiedliche THD_{Mean} feststellen. Die Probe P5 mit dem hohen ESR und der großen Papierdicke hat eine niedrigere THD_{Mean} als P6 mit einem niedrigen ESR und niedriger Papierdicke. Dies könnte auf eine umgekehrt proportionale Beziehung zwischen ESR und THD_{Mean} hindeuten. Diese umgekehrte Proportionalität kann jedoch für die Proben AT1H und P5 nicht bestätigt werden. Die THD_{Mean} für diese beiden Proben sind nahezu identisch. Wenn man sich jedoch auf die Frequenzen der hohen Hörempfindlichkeit konzentriert, würden die veränderten THD_{ITU} für die oben erwähnten AT1H und P5 eine direkte Proportionalität nahelegen.

Daher ist es schwierig, die Ursache für die geringen Abweichungen von THD_{Mean} und THD_{ITU} zu finden. Wie die Fehlerbalken zeigen, sind die Unterschiede zwischen den meisten Messungen von geringer statistischer Bedeutung. Somit haben die Variationen von Trennpapier und Elektrolyt die THD nicht signifikant beeinflusst. Dieses Ergebnis wird durch eine andere Studie bestätigt, die mit einer breiten Palette von Kondensatoren durchgeführt wurde und ebenfalls keine signifikanten Unterschiede im Grad der Verzerrungen feststellte. [17]

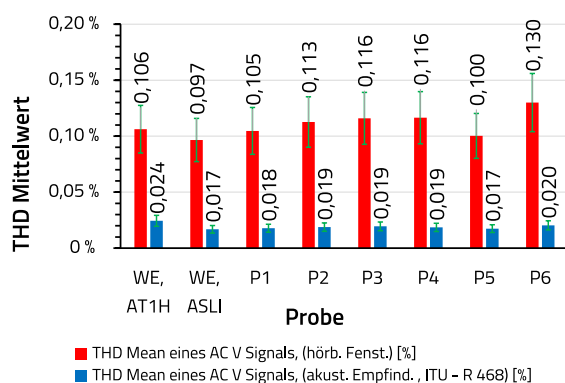


Abbildung 11: Gemessene Werte für THD_{Mean} (hörbares Fenster) und THD_{ITU} (akustische Empfindlichkeit). Die Fehlerbalken zeigen den mittleren Wertebereich an.

07. FAZIT

In dieser Studie wurden der ESR, die Kapazität und die THD von neun verschiedenen Kondensatortypen untersucht. Während die handelsüblichen Kondensatoren sowie die Materialvariationen der Kondensatoren P1 bis P6 Änderungen im ESR aufweisen, hat keiner von ihnen signifikante Änderungen der THD_{Mean} sowie der THD_{ITU} gezeigt. Die Plausibilität des THD-Wertes für eine Grundfrequenz von 500 Hz wurde anhand von Modellrechnungen überprüft.

Die ungewichtete THD_{Mean} lag bei etwa 0,1 % und die gewichtete THD_{ITU} , die weniger hörbare Oberwellen gemäß ITU-R 468 unterdrückt, lag bei etwa 0,02 %. Selbst die THD_{Mean} , die THDs von weniger hörbaren Frequenzen einschließt, deutet darauf hin, dass die Oberwellenverzerrungen weit unter der Hörbarkeitsschwelle von etwa 7% liegen. Im Bereich der höchsten hörbaren Empfindlichkeit sind die THD-Werte von THD_{ITU} sogar 10 Mal kleiner als die Werte von THD_{Mean} .

Daraus lässt sich schließen, dass die Elektrolytkondensatoren bei der Übertragung von Signalen keine nennenswerten Verzerrungen zu den Grundfrequenzen hinzufügen und daher in guter Näherung als lineare Bauelemente betrachtet werden können. Modifikationen des Elektrolyts oder des Trennpapiers haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf die THD. Es ist wahrscheinlich, dass andere spannungsunabhängige Kondensatortypen und passive Bauteile im Allgemeinen ähnlich geringe Verzerrungsamplituden im Vergleich zur Hörbarkeitsschwelle erzeugen.

Folglich hat die Wahl der nichtlinearen Bauelemente wie Operationsverstärker und Dioden größere Auswirkungen auf die verzerrungsbedingte Audioqualität des Verstärkers, d. h. die Gesamtverzerrungseigenschaften, als die Wahl des Elektrolytkondensators.

Es kann spekuliert werden, dass vielleicht andere Effekte wie schallwelleninduzierte Vibrationen, die von der Leiterplatte auf die Kondensatorbaugruppe übertragen werden, das Audiosignal stören und sich somit auf die Audioqualität auswirken könnten. Dies kann jedoch nicht durch diese Studie beantwortet werden, sondern muss Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Danksagung

Diese Forschung wäre ohne das R&D-Team am Produktionsstandort nicht möglich gewesen. Besonderer Dank gilt dem technischen Experten Eric Fischer sowie Jon Izkue-Rodriguez vom Würth Elektronik Kompetenzzentrum Berlin, die technische Unterstützung geleistet haben.

A. Anhang, Überblick über THD und Fourier-Transformation

Aus elektrischer Sicht ist ein Audiosignal eine oszillierende Spannung, die häufig im für den Menschen hörbaren Bereich liegt. Audiosignale können durch Parameter wie Frequenzbandbreite und Signalpegel charakterisiert werden. Bei analogen Audiosignalen entspricht der Signalpegel, der gewöhnlich in Dezibel (dB) angegeben wird, direkt der Amplitude der elektrischen Spannung, die wiederum proportional zum Schalldruck ist. Jedes Tonsignal kann als Überlagerung von harmonischen Schwingungen dargestellt werden. Jede dieser Schwingungen hat ihre eigene Frequenz und Amplitude.

Der mathematische Prozess der Diskretisierung beliebiger Signale in harmonische Schwingungen wird mit der Fourier-Transformation (oder Fourier-Analyse) durchgeführt. Jedes zeitabhängige Signal $F(t)$ kann durch eine Fourier-Reihe dargestellt werden

$$F(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin(k\omega_0 t) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos(k\omega_0 t) \quad (4)$$

wobei a_0 ein konstanter Offset ist, ω_0 die Grundfrequenz, k die Indexzahl und a_k sowie b_k Fourier-Koeffizienten sind. Die erste harmonische Schwingung ($k = 1$) wird auch als Grundschwingung oder Grundtonsignal bezeichnet. Es ist das Signal mit der niedrigsten harmonischen Frequenz in der Summe der harmonisch zusammenhängenden Signale.

Der Fourier-Koeffizient kann zur Berechnung der gesamten harmonischen Verzerrung (THD) eines Signals verwendet werden,

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2)}{a_1^2 + b_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} |c_k|^2}{|c_1|^2}} \quad (5)$$

Wobei c_k die Amplitude der k -ten Harmonischen ist. Die THD ist ein Maß für die Signalverzerrung im Vergleich zum Grundfrequenzsignal.

Abbildung 12 und Tabelle 3 zeigen als Beispiel einige allgemein bekannte Wellenformen bzw. die berechneten THD. Aufgrund ihrer mathematischen Beschreibung ist es nicht nur möglich, die numerischen THD-Werte zu berechnen, sondern auch die analytischen Ausdrücke für THD. Auch wenn es nicht immer möglich ist, einen relativ einfachen analytischen Ausdruck zu finden, ist es immer möglich, eine Fourier-Analyse durchzuführen und den THD-Wert zu berechnen.

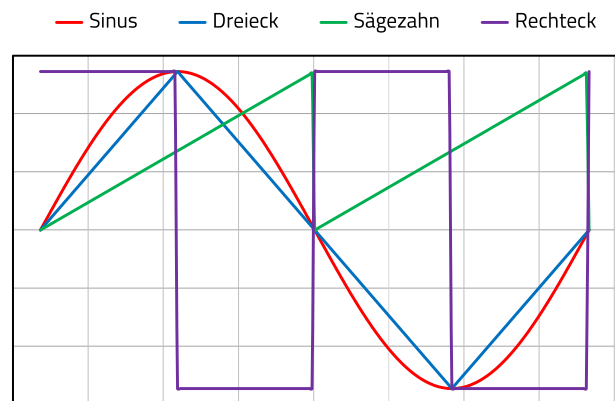


Abbildung 12: Qualitative Darstellungen von Wellenformen.

Diese Beispiele verdeutlichen, dass die THD-Werte (in %) zunehmen, je weiter die Wellenform von der Sinusform abweicht. Es ist fast intuitiv. In den genannten Beispielen ist das Dreieck in seinem Aussehen dem Sinus sehr ähnlich und hat, abgesehen vom reinen Sinus, die geringste THD (Tabelle 3). Der Sägezahn hingegen zeigt die stärkste Abweichung und hat die größte THD.

Signal	THD-Gleichung	THD
Sägezahnwelle	$100 \% \cdot \sqrt{\frac{\pi^2}{6} - 1}$	80,3 %
Rechteckwelle	$100 \% \cdot \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1}$	48,3 %
Dreieckswelle	$100 \% \cdot \sqrt{\frac{\pi^4}{8} - 1}$	12,1 %
Sinuswelle	$100 \% \cdot \sqrt{\frac{0}{1}}$	0 %

Tabelle 3: Beispiele für häufig verwendete Signale und deren THD.

Abbildung 13 zeigt ein Fourier-transformiertes Signal einer Sägezahnwelle mit 20 harmonischen Komponenten bei einer Grundfrequenz von 500 Hz. Da das transformierte Signal nur 20 Komponenten enthält, beträgt die THD etwa 77 %, bei mehr Komponenten würde sie sich dem theoretischen Wert von 80,3 % (siehe Tabelle 3) nähern.

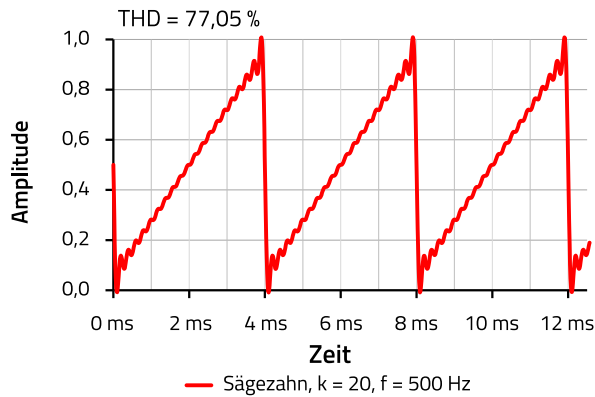


Abbildung 13: Beispiel eines Sägezahnsignals mit einer Grundfrequenz von 500 Hz und 20 höheren Oberwellen.

B. Anhang, Kondensatormodell

Die Anwendung der Kirchhoffschen Regel auf die Schaltung in Abbildung 3 führt zu

$$V_s = V_R + V_L + V_C \quad (6)$$

Mit V_s als dem von der Spannungsquelle angelegten zeitabhängigen Spannungssignal, V_R als dem Spannungsabfall über den ESR und V_L als dem Spannungsabfall über die ESL.

Die Substitution der Spannungen durch

$$V_R = IR = RC \frac{dV_C}{dt} \quad (7)$$

und

$$V_L = L \frac{dI}{dt} = LC \frac{d^2 V_C}{dt^2} \quad (8)$$

ergibt

$$V_s = RC \frac{dV_C}{dt} - LC \frac{d^2 V_C}{dt^2} + V_C \quad (9)$$

Die Lösung von Gleichung (9) mit dem Ansatz

$$V_s(t) = V_0 \cos(\omega t) \quad (10)$$

und

$$V_C(t) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (11)$$

Wobei V_0 die Signalamplitude, ω die Signalfrequenz, A eine Spannungsamplitude und ϕ die Phasenverschiebung der Kondensatorantwort ist, ergibt sich

$$I(t) = \frac{C\omega V_0}{(LC\omega^2 + 1) \cos(\phi) - RC \sin(\phi)} \cos\left(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (12)$$

$$V_C(t) = \frac{V_0}{(LC\omega^2 + 1) \cos(\phi) - RC \sin(\phi)} \cos(\omega t + \phi) \quad (13)$$

$$V_L(t) = - \frac{LC\omega^2 V_0}{(LC\omega^2 + 1) \cos(\phi) - RC \sin(\phi)} \sin\left(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (14)$$

sowie

$$\phi = \arctan\left(-\frac{RC\omega}{LC\omega^2 + 1}\right) \quad (15)$$

Die Gleichungen (12), (13), (14) und (15) lassen eine Frequenzverschiebung zu, enthalten jedoch keine oszillierenden Terme mit anderen Frequenzen als der Signalfrequenz ω . Da der Kondensator keine Oberschwingungen verursacht, ist die THD gleich Null.

Dies gilt jedoch nur für einen Kondensator, der unabhängig vom angelegten Spannungssignal ist. Um die Größe der THD eines nichtlinearen Kondensators abzuschätzen, wird der konstante Term C durch eine spannungsabhängige Kapazität ersetzt

$$\begin{aligned} C(V,t) &= C_0 (1 - aV_s(t)) \\ &= C_0 (1 - aV_0 \cos(\omega t)) \end{aligned} \quad (16)$$

Wobei C_0 die Kapazität bei null V ist und a ein Faktor, der die Spannungsabhängigkeit bestimmt. Dabei wird angenommen, dass sich die Kapazität beim Anlegen eines äußeren Feldes sofort ändert, d. h. die Abhängigkeit der Kapazität ist proportional zu $V_s(t)$.

Gleichung (16) enthält einen Faktor für die Größe der Spannungsabhängigkeit; dieser Wert muss vor jeder Berechnung festgelegt werden. Die Gleichspannungsabhängigkeit für einen Elektrolytkondensator über der Nennspannung ist im Durchschnitt nie größer als 1 %, wie in Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6 beispielhaft für verschiedene Typen von Elektrolytkondensatoren gezeigt wird.

C. Anhang, Formeln, Tabellen und Anmerkungen

Berechnung der Schalldruckdämpfung L_2 über die Entfernung für einen Punktschall in einer schalltoten Umgebung:

$$L_2(r_2) = L_1(r_1) - 20 \log_{10} \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (17)$$

Wobei $L_1(r_1)$ der bekannte Schalldruckpegel im Abstand r_1 und $L_2(r_2)$ der unbekannte Schalldruckpegel im zweiten Abstand r_2 ist. ^[7]

Beispiel: Trompete ^[14]

Variable [Einheit]	Wert
$L_1(r_1)$ [dB]	120
r_1 [m]	1
$L_2(r_2)$ [dB]	40
r_2 [m]	10000

Gleichspannung [% of V_r]	C [nF]	ΔC [%]
0	90.256	0.000
2	90.198	-0.064
4	90.166	-0.099
6	90.138	-0.130
8	90.117	-0.154
10	90.095	-0.177
20	90.071	-0.204
30	90.076	-0.198
40	90.109	-0.161
50	90.161	-0.105
60	90.226	-0.033
70	90.301	0.051
80	90.383	0.142
90	90.470	0.238
100	90.559	0.337

Tabelle 4: Messungen bei 120 Hz von: Serie: WCAP-ATG8, 860010672001, 100 nF, AC- Level: 1 V, Keysight E4980A, Halterung: 16065A.

Gleichspannung [% of V_r]	C [nF]	ΔC [%]
0	107.346	0.000
2	107.281	-0.061
4	107.261	-0.080
6	107.218	-0.122
8	107.154	-0.181
10	107.095	-0.237
20	107.032	-0.296
30	107.044	-0.284
40	107.095	-0.238
50	107.171	-0.167
60	107.267	-0.078
70	107.378	0.026
80	107.504	0.143
90	107.643	0.273
100	107.796	0.415

Tabelle 5: Messungen bei 1 kHz von: Serie: WCAP-ASLU, 865090640001, 100 nF, AC- Level: 1 V, Keysight E4980A, Halterung: 16065A.

APPLICATION NOTE

ANP125 | Die akustischen Auswirkungen harmonischer Verzerrungen von Aluminium-Elektrolytkondensatoren

Gleichspannung [% of V_r]	C [μ F]	Δ C [%]
0	465.552	0.000
2	465.117	-0.093
4	464.741	-0.174
6	464.436	-0.240
8	464.174	-0.296
10	463.910	-0.353
20	463.070	-0.533
30	462.433	-0.670
40	462.456	-0.665
50	462.810	-0.589
60	463.682	-0.402
70	464.843	-0.152
80	466.137	0.143
90	467.913	0.507
100	469.796	0.912

Tabelle 6: Messungen bei 120 Hz von: Serie: WCAP-ASLI, 865080253012, 470 μ F, AC-Level: 0,2 V, Impedanzanalysator Alpha-AK, POT/GAL von Novocontrol in einer vierpoligen Kelvin-Konfiguration.

Die Obertöne, die in Tabelle 7 und Tabelle 8 angegeben sind, liegen an der Hörschwelle und wurden in einem psychoakustischen Experiment von Hong Yue Lin ermittelt.^[13] In diesem Experiment hörte der Testhörer die Grundfrequenz mit 90 dB. Jeder einzelne Oberton konnte einzeln überlagert werden. Der Hörer stellte dann die Lautstärke der Obertonfrequenz auf die Hörschwelle ein.

Die entsprechenden THD für diese Oberschwingungen liegen bei etwa 10 %. Die THD der ersten 10 Obertöne betragen 9,4 % und 7,3 % für Grundtöne von 50 Hz bzw. 500 Hz. Entsprechend der Hörempfindlichkeit sind die Amplituden bei 5 kHz am geringsten und nehmen zu niedrigen und hohen Frequenzen hin zu. Die Werte in Tabelle 8 sind umgekehrt proportional zum Trend der ITU-R 468-Filterkurve in Abbildung 2 in Abschnitt 02 und spiegeln somit die Empfindlichkeit des menschlichen Ohrs wider.

Der Vergleich der prozentualen Amplitudenabnahme in Tabelle 7 und Abbildung 6 zeigt, dass die Oberwellen des Kondensators (Grundfrequenz ca. 500 Hz) deutlich unterhalb der auditiven Wahrnehmung liegen. Das gleiche Ergebnis ergibt sich beim Vergleich der Amplituden, die bei einer Grundfrequenz von etwa 50 Hz gemessen wurden (siehe Tabelle 8 und Abbildung 14).

Nr.	Freq. [Hz]	diff. Werte [dB]	Werte [dB]	Werte [%]
1	500	90	90	100.000
2	1000	-23.7	66.3	6.531
3	1500	-30.8	59.2	2.884
4	2000	-36.3	53.7	1.531
5	2500	-43.7	46.3	0.653
6	3000	-50.8	39.2	0.288
7	3500	-57.9	32.1	0.127
8	4000	-57.1	32.9	0.140
9	4500	-60.75	29.25	0.092
10	5000	-64.4	25.6	0.060
11	5500	-60.35	29.65	0.096
14	7000	-56.3	33.7	0.153
18	9000	-59.8	30.2	0.102
24	12000	-56.3	33.7	0.153
32	16000	-24.7	65.3	5.821

Tabelle 7: Die Charakteristik der Hörschwelle bei verschiedenen Oberwellen einer Grundfrequenz = 500 Hz. Jede Signalamplitude oberhalb der 1. Grundfrequenz liegt an der Hörschwelle.^[13] Die Werte für die 6., 8., 9. und 11. Harmonische wurden durch Interpolation ermittelt und für die THD-Berechnung verwendet.

APPLICATION NOTE

ANP125 | Die akustischen Auswirkungen harmonischer Verzerrungen von Aluminium-Elektrolytkondensatoren

Nr.	Freq. [Hz]	diff. Werte [dB]	Werte [dB]	Werte [%]
1	50	90	90	100.00
2	100	-21.2	68.8	8.7096
3	150	-30.5	59.5	2.9854
4	200	-36.2	53.8	1.5488
5	250	-40.8	49.2	0.9120
6	300	-46.2	43.8	0.4898
7	350	-51.6	38.4	0.2630
8	400	-57.65	32.35	0.1311
9	450	-58.225	31.775	0.1227
10	500	-58.8	31.2	0.1148
11	550	-61.25	28.75	0.0866
14	700	-63.7	26.3	0.0653
20	1000	-67.9	22.1	0.0403
28	1400	-71.5	18.5	0.0266
60	3000	-77.2	12.8	0.0138
80	4000	-77.8	12.2	0.0129
100	5000	-76	14	0.0158
132	6600	-73	17	0.0224
240	12000	-54.9	35.1	0.1799
320	16000	-25.6	64.4	5.2481

Tabelle 8: Die Charakteristik der Hörschwelle bei verschiedenen Oberwellen einer Grundfrequenz = 50 Hz. Jede Signalamplitude oberhalb der 1. Grundfrequenz liegt an der Hörschwelle. ^[13] Die Werte für die 6., 8., 9. und 11. Harmonische wurden durch Interpolation ermittelt und für die THD-Berechnung verwendet.

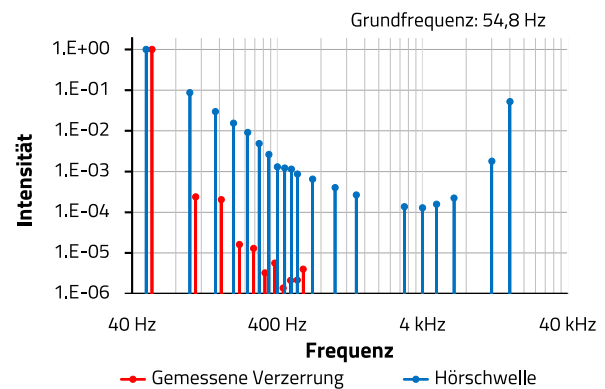


Abbildung 14: Gemessenes Frequenzspektrum eines 470 µF Aluminium Elektrolytkondensators (Capxon, P4, 317000012224000) bei einer Grundfrequenz von 54,8 Hz (Wechselspannungssignal). Gezeigt ist auch die in einem psychoakustischen Experiment ermittelte Schwelle für hörbare Verzerrungen bei einer Grundfrequenz von 500 Hz. ^[15]

A.1 Quellenangaben

- [1] I. W. Lee et al., Auditory Perception of Nonlinear Distortion, Audio Engineering, Audio Engineering Society, Convention 115, Paper 5891 (2003)
- [2] E. R. Geddes et al., Auditory Perception of Nonlinear Distortion – Theory, Audio Engineering Society, Convention 115, Paper 5890 (2003)
- [3] A. Voishvillo, Assessment of Nonlinearity in Transducers and Sound Systems – From THD to Perceptual Models, Audio Engineering Society, Convention 121, Paper 6910, (2006)
- [4] S. Temme et al., Practical Measurement of Loudspeaker Distortion Using a Simplified Auditory Perceptual Model, Audio Engineering
- [5] K. Fellbaum, Hörphysiologie und Psychoakustik. In: Sprachverarbeitung und Sprachübertragung, pp 99-126, Springer, Berlin, Heidelberg (2012)
- [6] DIN 45630-1, Physical and subjective magnitudes of sound, German Institute for Standardisation, (1971)
- [7] H. Fastl et al., Psychoacoustics - Facts and Models, Third Edition, Springer Verlag (2007)
- [8] W.A. Yost, Psychoacoustics: A Brief Historical Overview, Acoustics Today, 11:3 (2015)
- [9] E. Boer, Auditory physics. Physical principles in hearing theory. I, Physics Reports, 62:2 (1980)
- [10] ITU-R BS.468-4, Measurement of audio-frequency noise voltage level in sound broadcasting, International Telecommunication Union (1986)
- [11] R. Plomp, Detectability Threshold for Combination Tones, The Journal of the Acoustical Society of America 37:6, 1110-1123 (1965)
- [12] E. M. de Santis et al., Report: Perception & Thresholds of Nonlinear Distortion using Complex Signals, Department of Electronic Systems, Aalborg University (2007)
- [13] H.Y. Lin, Measurement of Auditory Distortion with Relation Between Harmonic Distortion and Human Auditory Sensation, IEEE Transactions on Instrumentation And Measurement, IM-35:2 (1986)
- [14] A. Miśkiewicz et al., Loudness level versus sound-pressure level: A comparison of musical instruments, The Journal of the Acoustical Society of America 96:6, 3375-3379 (1994)
- [15] P.J. Baxandall, Audio power amplifier design, Wireless World, Page 52-73 (1978)
- [16] S. Möller et al., A Measurement Technique for Highly Nonlinear Transfer Functions, Proc. of the 5th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-02) (2002)
- [17] I. Z. Anderson, Evaluating Electrolytic Capacitors Specified for Audio Use: A Comparative Analysis of Electrical Measurements and Capacitor Distortion Products in Line Level Interstage Coupling Applications, Journal of the Audio Engineering Society, 68:7/8 (2020)

WICHTIGER HINWEIS

Diese Anwendungsinformation basiert auf unseren Kenntnissen und Erfahrungen über typische Anforderungen in diesen Bereichen. Sie dient als allgemeine Orientierungshilfe und ist nicht als Zusage für die Eignung für Kundenanwendungen durch Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG. Die Informationen in der Anwendungsinformation können ohne vorherige Ankündigung geändert werden. Dieses Dokument und Teile davon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden, und sein Inhalt darf nicht an Dritte weitergegeben oder für einen nicht genehmigten Zweck verwendet werden.

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und ihre Tochter- und Beteiligungsgesellschaften (WE) haften nicht für Anwendungshilfen jeglicher Art. Kunden können die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für ihre Anwendungen und ihr Design nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und den Einsatz von WE-Produkten in einem bestimmten Kundendesign liegt immer in der alleinigen Zuständigkeit des Kunden. Daher obliegt es dem Kunden, zu bewerten und gegebenenfalls zu untersuchen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produkteigenschaften für die jeweilige Kundenanwendung gültig und geeignet ist oder nicht.

Die technischen Spezifikationen sind in den aktuellen Datenblättern der Produkte angegeben. Daher sollten die Kunden die Datenblätter verwenden und sich vergewissern, dass die Datenblätter aktuell sind. Die aktuellen Datenblätter können unter www.we-online.com heruntergeladen werden. Der Kunde hat produktspezifische Hinweise, Vorsichtsmaßnahmen und Warnungen strikt zu beachten. WE behält sich das Recht vor,

Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und andere Änderungen an seinen Produkten und Dienstleistungen vorzunehmen.

WE GARANTIERE ODER SICHERT NICHT ZU, DASS EINE AUSDRÜCKLICHE ODER STILLSCHWEIGENDE LIZENZ UNTER EINEM PATENTRECHT, URHEBERRECHT, MASKENWERKRECHT ODER EINEM ANDEREN GEISTIGEN EIGENTUMSRECHT IN BEZUG AUF EINE KOMBINATION, EINE MASCHINE ODER EINEN PROZESS, IN DER/DEN PRODUKTE ODER DIENSTLEISTUNGEN VON WE VERWENDET WERDEN, GEWÄHRT WIRD. VON WE VERÖFFENTLICHTE INFORMATIONEN ÜBER PRODUKTE ODER DIENSTLEISTUNGEN VON DRITTANBIETERN STELLEN WEDER EINE LIZENZ VON WE ZUR NUTZUNG SOLCHER PRODUKTE ODER DIENSTLEISTUNGEN NOCH EINE GARANTIE ODER BEFÜRWORTUNG DERSELBEN DAR.

WE-Produkte sind nicht für den Einsatz in sicherheitskritischen Anwendungen oder in Bereichen zugelassen, in denen ein Ausfall des Produkts nach vernünftigem Ermessen zu schweren Verletzungen oder zum Tod führen kann. Darüber hinaus sind WE-Produkte weder für den Einsatz in Bereichen wie Militär, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, U-Boote, Transport (Automobilsteuerung, Zugsteuerung, Schiffssteuerung), Verkehrssignale, Katastrophenschutz, Medizin, öffentliche Informationsnetze usw. konzipiert noch vorgesehen. Die Kunden müssen WE vor der Entwurfsphase über die Absicht einer solchen Verwendung informieren. Bei bestimmten Kundenanwendungen, die ein sehr hohes Maß an Sicherheit erfordern und bei denen die Fehlfunktion oder der Ausfall eines elektronischen Bauteils das Leben oder die Gesundheit von

APPLICATION NOTE

ANP125 | Die akustischen Auswirkungen harmonischer Verzerrungen von Aluminium-Elektrolytkondensatoren

Menschen gefährden könnte, müssen die Kunden sicherstellen, dass sie über das erforderliche Fachwissen in Bezug auf die Sicherheit und die regulatorischen Auswirkungen ihrer Anwendungen verfügen. Die Kunden erkennen an und erklären sich damit einverstanden, dass sie allein für alle gesetzlichen, behördlichen und sicherheitsrelevanten Anforderungen in Bezug auf ihre Produkte und die Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen

Anwendungen verantwortlich sind, ungeachtet jeglicher anwendungsbezogener Informationen oder Unterstützung, die von WE bereitgestellt werden kann.

DER KUNDE STELLT UNS VON ALLEN SCHÄDEN FREI, DIE DURCH DEN EINSATZ UNSERER PRODUKTE IN SOLCHEN SICHERHEITSKRITISCHEN ANWENDUNGEN ENTSTEHEN.

NÜTZLICHE LINKS



Application Notes
www.we-online.com/appnotes



RED EXPERT Design Platform
www.we-online.com/redexpert



Toolbox
www.we-online.com/toolbox



Product Catalog
www.we-online.com/products

KONTAKTINFORMATIONEN



appnotes@we-online.com
Tel. +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG
Max-Eyth-Str. 1 · 74638 Waldenburg
Germany
www.we-online.com