

# Sehen und verstehen

## Grundlagen der Lautsprechermesstechnik, Teil 6

Von Fabian Reimann

Der sechste Teil unserer Serie zu den Grundlagen der Lautsprechermesstechnik soll sich mit der akustischen Phase beschäftigen. Dass es sich dabei streckenweise tatsächlich um das „unbekannte Wesen“ (vgl. Literatur) handelt, merke ich immer wieder, wenn mir Kollegen beim Messen über die Schulter schauen. Dinge wie Frequenzgang, Ausschwingverhalten und Abstrahlung lösen dabei selten Verwirrung aus – aber was denn eigentlich diese „Sägezahnkurve am unteren Bildrand“ ist, diese Frage kommt relativ häufig. Anhand einer Vielzahl von Beispielen und auf der Basis bisher behandelter Grundlagenthemen soll im Rahmen dieses Artikels ein Verständnis hierfür erarbeitet und gleichzeitig in die Interpretation der Messungen eingeführt werden.

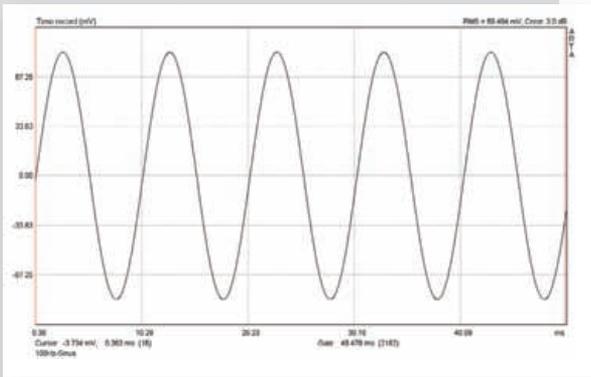


Abb. 1: 100 Hz-Sinusschwingung

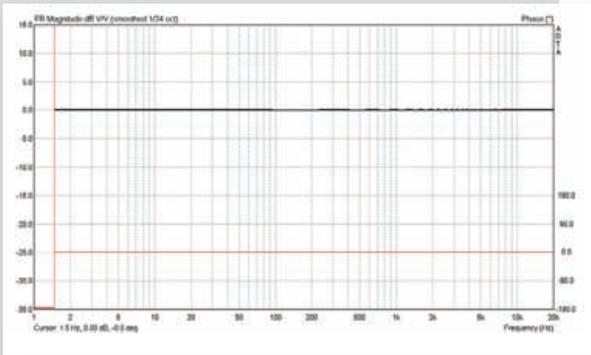


Abb. 2: Idealisierter Frequenz- und Phasenverlauf ohne Verzögerung

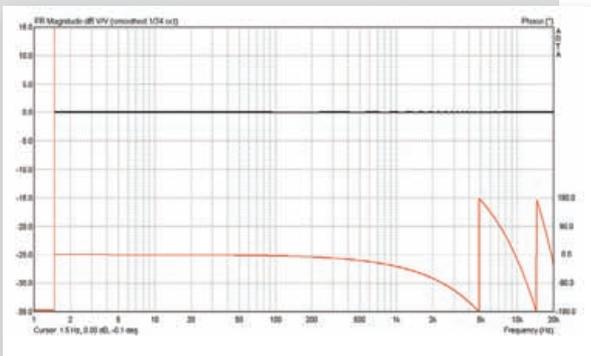


Abb. 3: Idealisierter Frequenz- und Phasenverlauf mit 0,1 ms Verzögerung

Grundsätzlich bezeichnet der Begriff „Phase“ den zeitlichen Zustand einer Schwingung in Relation zu ihrem Ausgangszustand. Reagiert nun z. B. ein Lautsprecherchassis auf eine Anregung mit einer Zeitverzögerung, kann man dies am Frequenzgang erstmal nicht ablesen. Hierfür ist eine Information über den zeitlichen Zustand bzw. Verlauf des wiedergegebenen Signals nötig.

### Grundlegendes

Anschaulich erklären lässt sich der Zusammenhang anhand eines Lautsprecherchassis, welches ein Sinussignal wiedergibt. Bei derartigen Signalen handelt es sich um periodische Signale, die ihrer Schwingungsform nach ein ständig wiederkehrendes Muster zeigen. Ein Beispiel für ein solches Signal zeigt **Abb. 1** anhand eines 100-Hz-Sinus. Zu Beginn der Wiedergabe des Signals durch den Lautsprecher verharrt dieser in seiner Ruheposition. Der erste Ausschlag des Signals nach oben bewirkt, dass sich die Lautsprechermembran ebenfalls

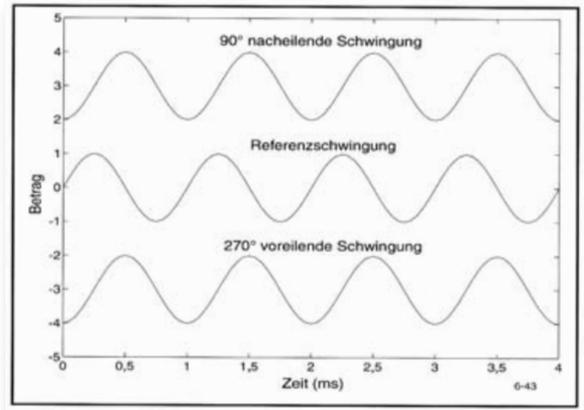
nach vorn bewegt. Bei der folgenden Abwärtsbewegung des Signals durchquert die Membran abermals den Punkt, der zuvor der Ruheposition entsprach (wird auch als „Nulldurchgangspunkt“ bezeichnet). Infolgedessen wird die Lautsprechermembran nach unten ausgelenkt. Dieser Ablauf wiederholt sich kontinuierlich, wobei ein voller Schwingungsdurchgang bis zum Erreichen der vormaligen Ruheposition mit einer Phasendrehung von 360 Grad gleichgesetzt wird. Bildlich gesehen wird während des Verlaufs der beschriebenen Schwingung eine gewisse Strecke auf einem Kreis zurückgelegt. Eine Phasendrehung von 90 Grad würde demnach dem ersten Auslenken der Membran entsprechen (erster Maximalwert auf **Abb 1.**), 180 Grad Phasendrehung wären beim Durchschreiten der Nulllage erreicht und so weiter. Bei der Beurteilung von Wiedergabeeigenschaften von Audiogeräten bzw. Lautsprechern sind jedoch bekanntlich nicht nur einzelne Frequenzen, sondern die Reproduk-

tionsfähigkeiten über das gesamte Frequenzspektrum von Interesse. In **Abb. 2** wird ein idealisierter Frequenzgang (schwarze Kurve) mit dazugehörigem Phasenverlauf gezeigt. Beide Verläufe sind schnurgerade und zeigen keinerlei Auffälligkeiten. In **Abb. 3** wird derselbe, idealisierte Frequenzverlauf gezeigt, jedoch wurde das hierfür zugrunde liegende Messsignal um 0,1 ms (entsprechend einer Wegstrecke von 3,4 cm) verzögert. Infolgedessen zeigt auch der Phasenverlauf (rote Kurve) mit zunehmender Frequenz kontinuierlich zunehmende Verschiebungen. Der Amplitudenfrequenzgang (schwarze Kurve) hingegen bleibt von der Verzögerung unbeeindruckt.

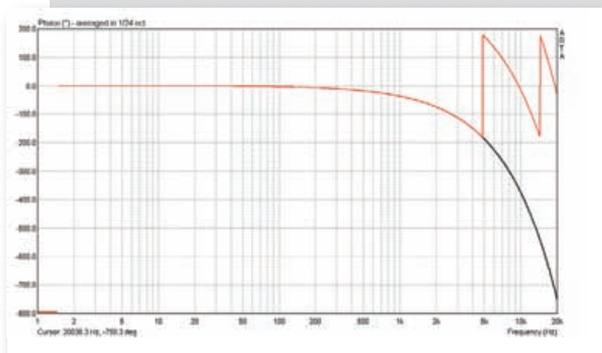
Die Phasendrehung nimmt mit zunehmender Frequenz deswegen zu, weil mit steigender Frequenz auch die Periode der Frequenz (also die Zeit für einen vollständigen Schwingungsdurchgang) immer geringer wird. Und was ist die Ursache für die eigentümliche, sägezahnartige Formung der Kurve? Hierbei hilft eine genaue Betrachtung der Einheiten-skalierung, die sich am rechten unteren Bildrand befindet. Dort ist ein Wertebereich von  $\pm 180$  Grad abzulesen. Jeweils an den Rändern dieses Wertebereiches scheint die Kurve von  $-180$  Grad auf  $+180$  Grad zu „springen“. Dies erklärt sich durch die Periodizität des gemessenen Signals, wie sie schon in **Abb. 1** dargestellt und erläutert wurde – ob der gemessene Phasenwinkel eines Ausgangssignals gegenüber dem Referenzsignal nun voraus- oder nachheilt, lässt sich nicht sagen, sofern nur die Phasenwinkel selbst betrachtet werden. In **Abb. 4** wird dazu ein Beispiel gezeigt. In der Mitte ist eine 1-kHz-Referenzschwingung zu sehen. Darüber steht eine Schwingung mit einem Phasenwinkel von  $-90$  Grad. Die unter der Referenz zu betrachtende Schwingung hingegen zeigt einen Winkel von  $+270$  Grad. Rein optisch sind die Abbildungen nicht zu unterscheiden. Die dadurch erzeugte Zweideutigkeit verhindert daher also Messungen, die über einen Bereich von  $\pm 180$  Grad hi-

ausgehen, was die „sägezahnartige“ Darstellung in **Abb. 3** erklärt.

Tatsächlich verläuft die Phasenkurve des gemessenen Beispiels jedoch kontinuierlich und lässt sich mittels eines kleinen mathematischen Kniffs leicht sichtbar machen. In **Abb. 5** ist die bereits bekannte, „gefaltete“ Phase (rote Kurve) im Vergleich mit der „aufgeklappten“ Variante (schwarze Kurve) abgebildet, die natürlich auf denselben Daten basiert. Bei dieser Darstellung ist vor allem die veränderte Skalierung zu beachten, die jetzt nicht mehr bei  $\pm 180$  Grad liegt, sondern einen Bereich von  $1.000$  Grad überstreicht (Skalierung siehe linke Seite der Darstellung). Die eingangs beschriebene Verzögerung des idealisierten Testsignals um  $0,1$  ms bewirkt eine Phasendrehung von ca.  $750$  Grad bei  $20$  kHz, was sich so sehr bequem ablesen lässt. Immer noch üblich bei Messungen an Lautsprechern oder Audiogeräten (vermutlich auch aus Platzgründen) ist jedoch die Darstellung des Phasenverlaufes im Bereich von  $\pm 180$  Grad (vgl. **Abb. 3**).



**Abb. 4** : Doppeldeutigkeit der Phasenmessung (Quelle: D'Appolito, S. 299)



**Abb. 5**: „Aufgeklappte“ Darstellung der Phase (Wertebereich beachten!)

## Wie war das noch ...?

**Phase:** Zustandsbeschreibung einer Schwingung in Relation zum Ausgangszustand

**Phasendrehungen:** mögliche Doppeldeutigkeit, daher im Bereich  $\pm 180$  Grad

**Systeme minimaler Phase:** nach Lehrbuchmeinung aus dem Amplitudenfrequenzgang ableitbare Phase

**Phasendrehungen in Lautsprechern:** durch Frequenzweichenfilter, Gehäusebauarten, mechanisch bedingte Laufzeitdifferenzen zwischen den Schallquellen

**Problematik des Tiefenversatzes bei P.A.-Lautsprechern:** destruktive Interferenzen / inhomogene Abstrahlung

**Phasenverzerrungen:** nicht nur durch Fehlanpassungen der Laufzeit, sondern auch durch Gehäuse-, Membran- oder Filterresonanzen

**Alle bisherigen Grundlagenartikel dieser Themenreihe:**

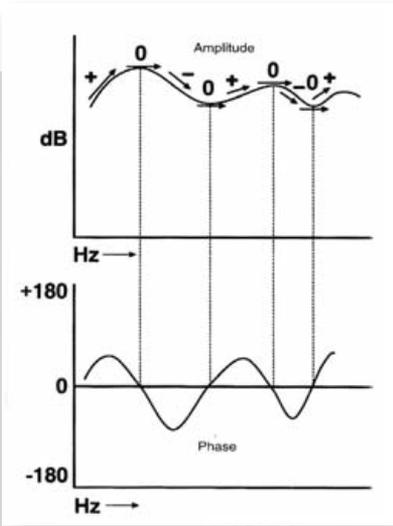
Teil 1 – „Frequenzgänge“, Ausgabe 6/2008

Teil 2 – „Zerfallsspektren“, Ausgabe 1/2009

Teil 3 – „Verzerrungen“, Ausgabe 2/2009

Teil 4 – „Abstrahlung“, Ausgabe 3/2009

Teil 5 – „elektrische Impedanz“, Ausgabe 4/2009



**Abb. 6:** Relation des Phasenverlaufes zum Amplitudenfrequenzgang (Quelle: Dickason, S. 272)

**Abb. 7:** Eine Box mit Coaxialchassis des norwegischen Herstellers Seas, dessen Besonderheit ...



**Abb. 8:** ...in der gelungenen Einbettung der Hochtonkalotte in die Tiefmitteltoneinheit (anstelle einer Dustcap) besteht.



**Abb. 10:** ...in diesem Beispiel einen relativen Laufzeitversatz der Schallquellen von ca. 11 cm verursacht.

### Frequenz- und Phasenverläufe bei Lautsprechern

Bekanntermaßen handelt es sich bei dynamischen Lautsprechern um die schwächsten Glieder der Signalkette. Nicht nur, dass ihr Wirkungsgrad meist lediglich im einstelligen Prozentbereich anzusiedeln ist – zumeist sind ihre Wiedergabefähigkeiten bezogen auf das menschliche Hörspektrum auch stark eingeschränkt und erfordern daher eine Kombination aus verschiedenen Typen von Lautsprechern, die dann denjenigen Frequenzbereich wiedergeben, für den sie geeignet sind. Dies widerspricht in erster Konsequenz erstmal dem physikalischen Idealbild der Punktschallquelle, bei der das komplette Frequenzspektrum aus einem „Punkt“ und in alle Richtungen gleichmäßig abgestrahlt wird. Welche Bedeutung hat dies für die Betrachtung der Phase? Lautsprecherchassis im einzelnen betrachtet (also z. B. der Hoch- oder der Tief-töner in einer Box, nicht jedoch die „Gesamtheit“ daraus) werden als Systeme minimaler Phase bezeichnet, sofern ihre Frequenzgänge es erlauben, direkt daraus die Phasenverläufe abzuleiten. Dies verdeutlicht **Abb. 6** – solange sich der

Frequenzverlauf in der Waagerechten befindet, bleibt auch die Phase konstant. Ein Vergleich mit **Abb. 2** bestätigt dies nochmals. Steigt die Amplitude jedoch an, folgt ihr die Phase in dieser „Bewegung“. Wie gesagt gilt diese Regel jedoch nur für minimalphasige Systeme uneingeschränkt.

Bei Lautsprecherboxen, die mehrere Chassis für die unterschiedlichen Frequenzbereiche kombinieren, wird es nochmal etwas schwieriger. Hier kommen eine Vielzahl von phasenverzerrenden Effekten zum Tragen: Frequenzweichenfilter, Einflüsse von Gehäusebauarten (meist im Tieftonbereich) und vor allem die rein mechanisch bedingten Versätze der verschiedenen Schallwandler in einer Box. Im besten Fall sollten letztere ja, dem Ideal der Punktschallquelle folgend, gar nicht erst existieren, sondern in einem Punkt zusammenfallen. Daher müssen Alternativen entwickelt werden, die sich (wie das Beispiel in **Abb. 8**) schrittweise dem Idealbild annähern können. Hierbei handelt es sich um einen Lautsprecher mit einem sogenannten Coaxialchassis. Die Besonderheit besteht darin, dass sich inmitten der Tiefmitteltoneinheit die Hochtonkalotte befindet, sodass sich – rein räumlich betrachtet – eine Annäherung an das Punktschallquellenideal ergibt (**Abb. 8**). Als Vorteil ist zu vermerken, dass der Abstand der einzelnen Lautsprecher in dieser Konstruktion zum Hörer praktisch immer gleich bleibt, auch wenn sich dieser in der Hörzone bewegt.

Als Gegenbeispiel dazu dient **Abb. 9**. Hierbei handelt es sich um eine marktübliche P.A.-Box mit 8-Zoll- / 1-Zoll-Bestückung, wobei der Hochtöner auf ein Horn montiert ist. Zunächst fällt natürlich auf, dass die Schallquellen in der Box räumlich weiter auseinander liegen, als bei der zuvor beschriebenen Box. Zudem ergibt sich ein beträchtlicher Tiefenversatz von ca. 11 cm, der sich aus der Länge des Hochtornhorns ergibt, wie **Abb. 10** anhand der ausgebauten Komponenten zeigt.



**Abb. 9:** 8-Zoll/1-Zoll-P.A.-Box mit horngeladenem Hochtöner, der ...

Dieser Versatz hat beträchtliche Auswirkungen auf die Wiedergabeeigenschaften eines Gesamtsystems, was im Folgenden an einigen idealisierten Beispielen verdeutlicht werden soll.

### Laufzeitunterschiede

Für diese Messreihe wurde ein „idealisiertes Lautsprecher“ mittels diverser Filterfunktionen generiert. Dieser Lautsprecher sollte ein 2-Wege-System mit einer Trennfrequenz von 2 kHz, elektrischen Filterflanken von 24 dB / Oktave mit einer Linkwitz / Riley-Charakteristik und einer Bassreflexabstimmung bei ca. 55 Hz sein.

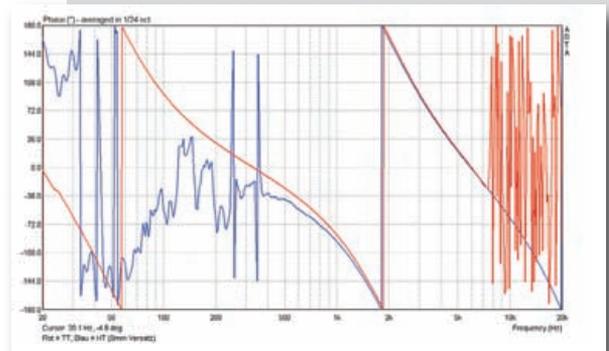
In **Abb. 11** fällt der Blick zunächst auf die Einzelkurven des gedachten Hoch- bzw. Tieftöners (blau bzw. grün) sowie die Summenkurve (rot), die eine perfekte Addition der einzelnen Schallquellen zeigt. Die gedachten Einzelschallquellen lagen bei dieser Messung auf einer Ebene und nicht, wie bei den meisten P.A.-Boxen, aufgrund der Hochtonhörner, mehrere Zentimeter auseinander. Der Phasenverlauf (schwarz) ist mit den üblichen  $\pm 180$  Grad dargestellt, sichtbar wird ebenfalls eine Drehung um 360 Grad bei ca. 55 Hz. Dies entspricht genau dem Verhalten eines Hochpassfilters vierter Ordnung, wie es z. B. für eine Bassreflexbox typisch wäre. Im weiteren Verlauf wird eine weitere 360-Grad-Drehung bei ca. 2 kHz erkennbar, verursacht durch die Frequenzweiche, die sich ebenfalls Filtern vierter Ordnung bedient.

Als Faustregel gilt, dass pro Filterordnung eine Phasendrehung von

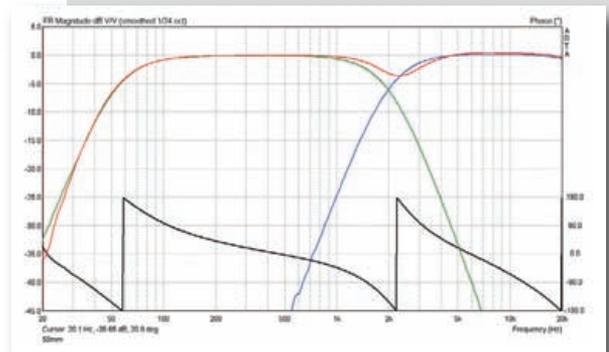
90 Grad in Relation zum Eingangssignal verursacht wird (natürlich nicht „schlagartig“ sondern eher langsam und asymptotisch). Die Funktion der Frequenzweiche in diesem Beispiel und ihren Einfluss auf die Phase der einzelnen Lautsprecher kann man in **Abb. 12** sehen. Hier zeigt sich, dass die Verläufe des Tief- bzw. des Hochtöners (rot bzw. blau) weitestgehend parallel verlaufen, was eine „Überführung“ der Signale ineinander bewirkt – zumindest in dem Frequenzbereich, in dem sie gemeinsam arbeiten. Ebenso ist in **Abb. 12** die Trennfrequenz bei ca. 2 kHz durch die dortigen 360-Grad-Phasendrehungen leicht abzulesen. In den Kurven fallen aber auch einige ziemlich willkürlich anmutende „Zappeleien“ auf (beim Hochtöner unterhalb von 500 Hz, beim Tieftöner ab ca. 7 kHz). Das lässt sich ganz einfach damit erklären, dass diese Frequenzen schon der Sperrwirkung der Frequenzweiche unterliegen, sodass in diesen Bereichen kein Signal mehr gemessen werden konnte, was auch noch so etwas wie eine Phase haben könnte. Um das zuvor problematisierte Thema des Tiefenversatzes weiter zu verfolgen, habe ich nun schrittweise Verzögerungen in den „idealen“ Lautsprecher eingebaut und den Hochtöner virtuell um 50 Millimeter nach hinten geschoben (**Abb. 13 und 14**). Die Effekte dessen lassen sich in der etwas welligeren Summenkurve (rot) und im Phasenverlauf (schwarz) ablesen. Durch den nun vergrößerten Laufzeitunterschied zwischen den Schallquellen kommt es im Über-



**Abb. 11:** Idealisierter Lautsprecher – Wege zueinander, kein Quellenversatz



**Abb. 12:** Idealisierter Lautsprecher – Phasen zueinander, kein Quellenversatz



**Abb. 13:** Idealisierter Lautsprecher – Wege zueinander, 50 mm Quellenversatz

Anzeige

## Der Röhrenhall

- Klassischer Sound in High End Röhrentechnik für Instrumental- und Studioanwendungen
- Handgefertigt in Deutschland



Reussenzehn

Tel. 01 73 / 783 73 13 · [www.reussenzehn.de](http://www.reussenzehn.de)

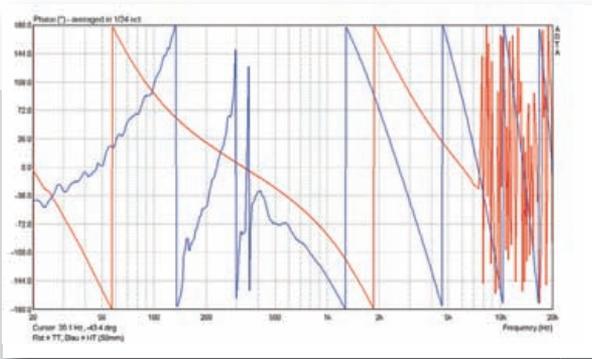


Abb. 14: Idealisierter Lautsprecher – Phasen zueinander, 50 mm Quellenversatz

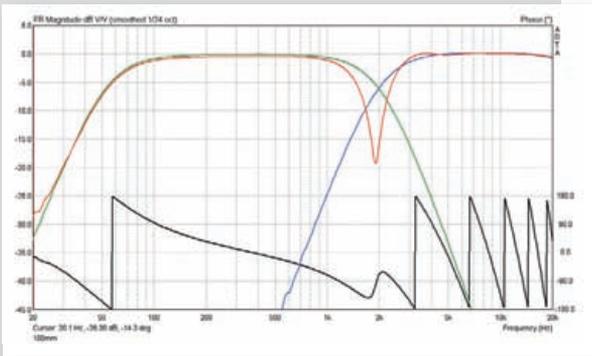


Abb. 15: Idealisierter Lautsprecher – Wege zueinander, 100 mm Quellenversatz

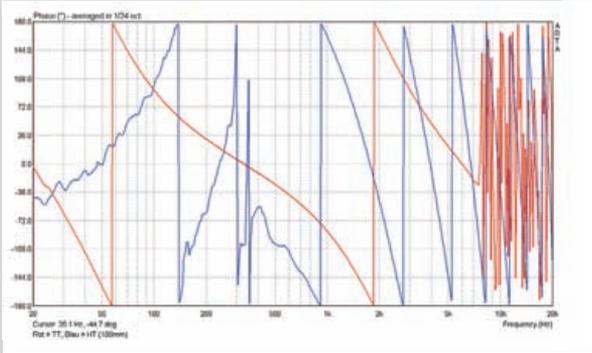


Abb. 16: Idealisierter Lautsprecher – Phasen zueinander, 100 mm Quellenversatz

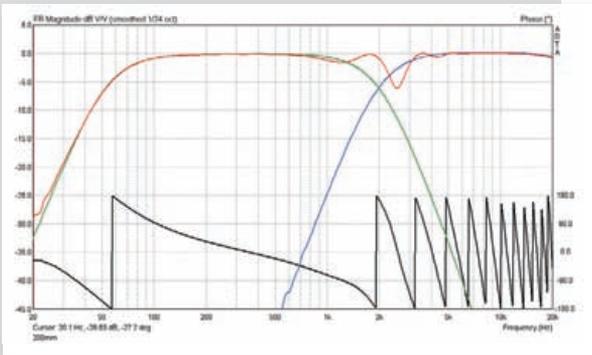


Abb. 17: Idealisierter Lautsprecher – Wege zueinander, 200 mm Quellenversatz

nahmereich zu einer Fehlanpassung, die in suboptimaler Addition der Quellen resultiert – wo früher noch eine perfekte Aufsummierung zu beobachten war, „verliert“ das System aufgrund destruktiver Interferenzen nun bereits ca. 4 dB bei knapp über 2 kHz. Wird der virtuelle Versatz der Schallquellen nun auf in der Praxis nicht unübliche 100 mm (Abb. 15 und 16) bzw. ganze 200 mm (Abb. 17 und 18) gesteigert, wird das Problem großer Phasenversätze immer deutlicher. Auch die oftmals bei Lautsprechermessungen in tools 4 music zu beobachtende „Sägezahnkurve“ im Hochtonbereich ist in diesem Zusammenhang ein untrügliches Indiz dafür, dass die Schallquellen nicht „zeitgleich“ arbeiten. Tatsächlich sind Phasendrehungen von mehreren hundert Grad über den gesamten Wiedergabebereich bei P.A.-Lautsprechern keine Seltenheit. Diese Messungen machen unter anderem auch deutlich, wie sinnvoll coaxiale Konstruktionen (Abb. 7 und 8) sein können, wenn es darum geht, Phasenfehler durch mechanisch bedingte Versätze zwischen Einzelschallquellen schon rein konstruktiv zu vermeiden. Je dichter die Schallquellen dabei aneinander „rutschen“ können, desto stabiler bleibt ihre Phasenbeziehung auch unter veränderten Abhörwinkeln.

### Beispielmessungen realer Lautsprecher

Im Folgenden sollen einige Übungsbeispiele der Reihe nach behandelt werden. Die Abb. 19 stellt die Messung einer preisgünstigen 12-Zoll- / 1-Zoll-P.A.-Box dar. Der Phasenverlauf (rote Kurve) zeigt zunächst eine 360-Grad-Drehung bei ca. 95 Hz, wobei es sich um die Bassreflexresonanz der Box handelt. Im weiteren Verlauf geht die Kurve ab ca. 1,5 kHz in die bereits mehrfach beschriebene, für große Laufzeitunterschiede charakteristische Form über und dreht sich um mehrere hundert Grad. Betrachtet man hierzu den Frequenzgang oberhalb der Trennfrequenz (2 bis 3 kHz), so sind die dortigen scharfen Einbrüche mit Sicherheit durch die unvermeidbaren, destruktiven Interferenzen verursacht (wie in Abb.

13 - 18). Die Abb. 20 ist in dieser Hinsicht ein Gegenbeispiel. Dabei handelt es sich um die Messung einer 2x 12-Zoll/ 1,4-Zoll P.A.-Box, bei welcher über ein spezielles passives Allpassfilter der Laufzeitunterschied zwischen den einzelnen Schallquellen ausgeglichen wurde, sodass bei der Trennfrequenz (ca. 1,2 kHz) nur noch der minimalphasige Rest der Frequenzweichenfilter, nicht jedoch irgendwelche laufzeitbedingten Artefakte sichtbar werden.

Eine 3-Wege-P.A.-Box wird in Abb. 21 gezeigt. Der Phasenverlauf setzt sich wie folgt zusammen: Bei 45 Hz findet sich eine 360-Grad-Drehung, die der dortigen Bassreflexabstimmung entspricht (Hochpassfilter vierter Ordnung). Darauf folgend ist bei ca. 400 Hz eine weitere 360-Grad-Drehung zu sehen, die der Trennfrequenz zwischen dem dort verbauten Tief- und Mitteltonchassis entspricht. Da sich hier nur der minimalphasige Anteil der Frequenzweiche und keine sonstigen Phasendrehungen abzeichnen, ist davon auszugehen, dass die betreffenden Chassis wohl keinen allzu großen Tiefenversatz zueinander haben. Etwas anders sieht es hingegen im Hochtonbereich oberhalb von 2,5 kHz aus. Hier liegt der Übernahmereich zwischen Mittel- und Hochtönen, wo abermals kräftige Phasendrehungen zu beobachten sind, die für einen großen Laufzeitunterschied (mit den bekannten Folgen) stehen.

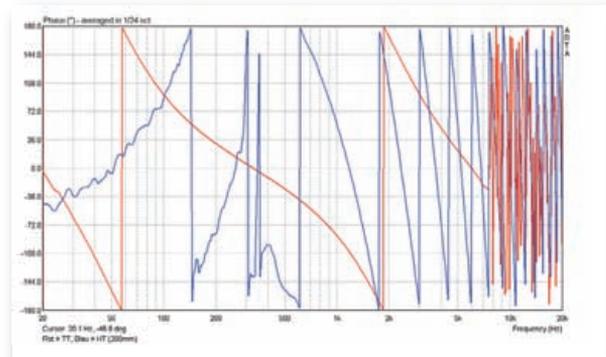
Abb. 22 zeigt die Messung einer kleinen Hi-Fi-Box. Der Phasenverlauf offenbart die relativ tief abgestimmte Bassreflexresonanz (ca. 40 Hz), in Kombination mit der ungewöhnlich niedrigen Trennfrequenz (ca. 200 Hz), da hier ein 6,5-Zoll Tieftöner mit einem 3-Zoll-Breitbandlautsprecher kombiniert wurde. Im weiteren Verlauf zeigt sich dann auch der Vorzug von Breitbandlautsprechern, die ein sehr weites Frequenzspektrum abdecken und oftmals sogar zusätzliche Hochtonlautsprecher verzichtbar machen können – der Phasenverlauf ist oberhalb der Trennfrequenz sehr stabil und frei von durch Laufzeitfehler verursachte Fehlanpassungen.

Die Messung eines gewöhnlichen 18-Zoll Bassreflexsubwoofers wird in **Abb. 23** dargestellt. Dieser zeigt eine 360-Grad-Drehung bei ca. 60 Hz sowie mehrere Anomalien im weiteren Verlauf (vor allem bei ca. 350 und 650 Hz). Dabei handelt es sich um die Auswirkungen von Gehäuseresonanzen, die bekanntermaßen beträchtlichen Einfluss auf das Ausschwingverhalten in den betreffenden Frequenzbereichen haben können (siehe hierzu auch Grundlagenartikel Teil 2, Ausgabe 1/2009). Dementsprechend sind auch Phasenverzerrungen zu beobachten, hier vor allem bei ca. 650 Hz, wo eine sehr schmalbandige, aber dennoch 360 Grad umfassende Phasendrehung zu sehen ist.

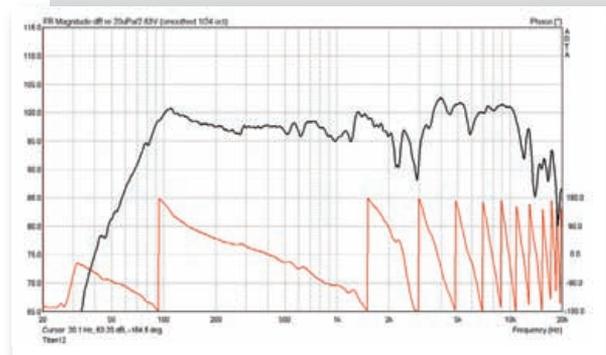
Phasenverzerrungen, wenn auch in „leichterer Form“, sind auch durch den Einsatz von Equalizern möglich, wie **Abb. 24** zeigt. Dort wurde der bekannte „idealisierte Lautsprecher“ mit einigen Filtern unterschiedlicher Güte beaufschlagt. Die Phasenverzerrungen korrespondieren sehr deutlich mit den jeweiligen Anhebungen bzw. Absenkungen des Frequenzverlaufes. Man sollte daher im Hinterkopf behalten, dass ein Equalizer mit Sicherheit nicht das beste Werkzeug ist, um durch mangelhafte Phasenbeziehungen hervorgerufene Störungen im Frequenzgang zu beheben – ganz entgegen der gewünschten Wirkung werden dem Phasenverlauf dadurch nur

## Literatur

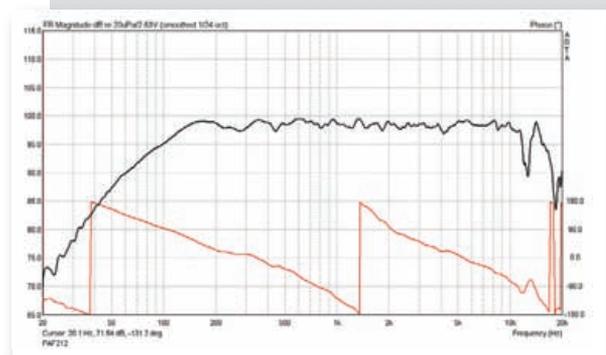
- Ahlsmeyer, Thomas und Winterscheid, Theo: „Die akustische Phase, das unbekannte Wesen“; Link: [http://www.hifi-selbstbau.de/index.php?option=com\\_content&task=view&id=93](http://www.hifi-selbstbau.de/index.php?option=com_content&task=view&id=93) (Stand September 2009)
- D’Apollito, Joseph: „Lautsprechermesstechnik“, Elektor Verlag, 1999, S. 294 ff.
- Dickason, Vance: „Lautsprecherbau“, S. 184 - 208; S. 272 - 273; S. 350 ff., Elektor Verlag, 3. Auflage 2001
- Heyser, Richard: „Loudspeaker Phase Characteristics And Time Delay Distortion: Part 1“, JAES Volume 17 Issue 1, 1969
- Heyser, Richard: „Loudspeaker Phase Characteristics And Time Delay Distortion: Part 2“, JAES Volume 17 Issue 2, 1969
- Sengpiel, Eberhard: „Laufzeitdifferenz und Phasenverschiebung“, Link: [www.sengpielaudio.com/LaufzeitdifferenzUndPhasenverschiebung.pdf](http://www.sengpielaudio.com/LaufzeitdifferenzUndPhasenverschiebung.pdf) (Stand September 2009)
- Weinzierl, Stefan: „Grundlagen“ in: ebd. (Hrsg.): „Handbuch der Audiotechnik“, S. 5 - 32



**Abb. 18:** Idealisierter Lautsprecher – Phasen zueinander, 200 mm Quellenversatz



**Abb. 19:** Frequenz- und Phasenverlauf einer 12-Zoll / 1-Zoll-P.A.-Box



**Abb. 20:** Frequenz- und Phasenverlauf einer 2 x 12-Zoll / 1,4-Zoll-P.A.-Box

Anzeige



Höchste Qualität und flexible Produktion  
für individuell handgefertigte Mikrofone

Qualität durch Tradition  
Handmade in Germany!

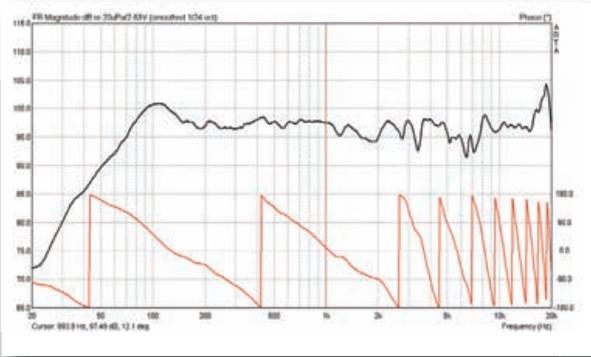


Abb. 21: Frequenz- und Phasenverlauf einer 3-Wege-P.A.-Box

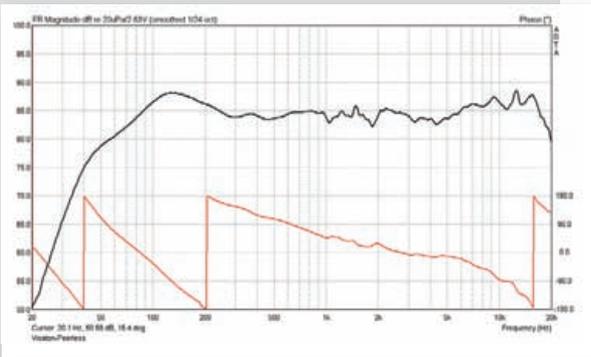


Abb. 22: Frequenz- und Phasenverlauf einer 2-Wege-Hi-Fi-Box

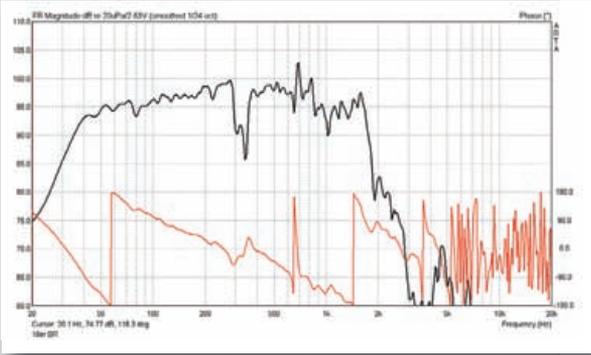


Abb. 23: Frequenz- und Phasenverlauf eines 18-Zoll-Bassreflexsubwoofers

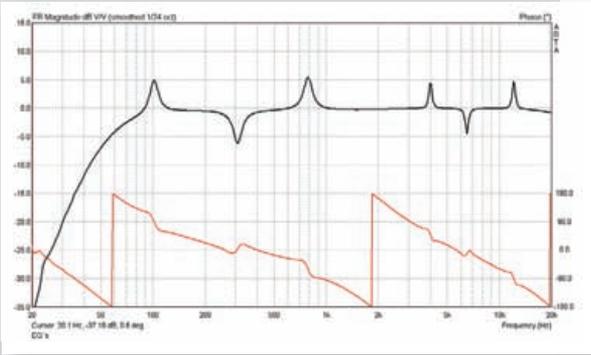


Abb. 24: Frequenz- und Phasenverlauf des „idealisierten Lautsprechers“ mit diversen Equalizern zur Veranschaulichung der dadurch verursachten Phasenverzerrungen

weitere, wenig zielführende Verzerrungen beigelegt.

### Finale

Im sechsten Teil dieser Grundlagenserie wurde knapp eine Einführung zur akustischen Phase gegeben sowie in die beispielhafte Interpretation derartiger Messungen eingeführt.

Wie immer gilt, dass unsere Grundlagenartikel lediglich einen groben Einblick in die Materie bieten können. Durch Beiträge im tools 4 music-Forum unter [www.tools4music.de](http://www.tools4music.de) oder eine Mail ([redaktion@tools4music.de](mailto:redaktion@tools4music.de)) lassen sich verbleibende Fragen klären.

Bei dieser Folge handelt es sich um den letzten Teil der Serie zu den Grundlagen der Lautsprechertechnik. Ich möchte mich ausdrücklich für die Geduld bei allen Lesern bedanken – wohl wissend, dass es sich bei diesen Grundlagen um „harte Kost“ handelt. Aber es ist meines Erachtens der einzige Weg, um zu einem fachkundigen Urteil bei der Bewertung von Lautsprechern zu kommen. Denn die Klangeigenschaften eines Lautsprechers – auch wenn in manchen Fachgesprächen ein anderer Eindruck aufkommen könnte – lassen sich immer auf grundlegende physikalische Zusammenhänge zurückführen. ■

## In eigener Sache

Im letzten Grundlagenartikel zur Messung elektrischer Impedanzen (vgl. tools 4 music, Ausgabe 4/2009) hat sich an mehreren Stellen der Fehlerteufel eingeschlichen.

- 1.) Das Einheitenzeichen des elektrischen Widerstands  $\Omega$  (griechisches Omega, in Anlehnung an den Namensgeber Georg Ohm) wurde fälschlicherweise als „Formelzeichen“ bezeichnet;
- 2.) Des Weiteren stand zu lesen, es würde „schwierig, wenn man (...) Endstufe[n] eine zu geringe Last anbieten würde“. Der Lastbegriff ist hier nicht eindeutig verwendet, da die Last gegenläufig zur Impedanz ist. Richtig formuliert müsste es also heißen: „(...) eine zu geringe ohm'sche Last“ oder „eine zu hohe Last (= geringe Impedanz)“;
- 3.) Im Infokasten „Wie war das noch...?“ wurde mit Bezug auf DIN EN 60268, Teil 5, eine „Unterschreitung des Maximalwerts um 80 Prozent“ für die Nominalwertangabe beschrieben. Richtig ist, wie zuvor im Text mehrfach erwähnt, dass der Wert um maximal 20 Prozent unterschritten werden darf. Der eigentliche Minimalwert darf demzufolge nicht kleiner als 80 Prozent des Nennwertes ausfallen.

Mein Dank geht an die Leser, die mich, trotz der zugegebenermaßen „sperrigen Inhalte“, auf diese Unstimmigkeiten aufmerksam gemacht haben. Abonnenten finden ab sofort eine berichtigte Version des letzten Artikels im Archiv unter [www.tools4music.de](http://www.tools4music.de), wo sich auch alle früheren Grundlagenartikel downloaden lassen.