

Kenndaten von Lautsprechern

Dipl.-Ing. (FH) Volker Holtmeyer

Die Ermittlung von Messwerten, die Rückschlüsse auf die akustischen Eigenschaften eines Lautsprechers zulassen, ist nüchtern betrachtet keine allzu komplexe Angelegenheit. Die Darstellung selbiger stellt sich da schon als schwieriger heraus. Im Datenblatt eines Lautsprechers findet man dann häufig nur noch einen Bruchteil der eigentlichen Information verkümmert als so genannte Kenndaten. Im Folgenden wird untersucht, wie diese Kenndaten entstehen und wie sie zu bewerten sind.

Der Ausgangspunkt zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften eines Lautsprechers ist in den meisten Fällen die Impulsantwort, aus der sich alle Parameter des linearen Übertragungsverhaltens¹ ableiten lassen. Die Impulsantwort beschreibt ganz allgemein das Verhalten eines Systems bei der Anregung mit einem Impuls. In unserem Fall charakterisiert sie die gedämpfte Membranschwingung, die sich bei Anregung des Lautsprechers mit einem Diracimpuls ergeben würde.

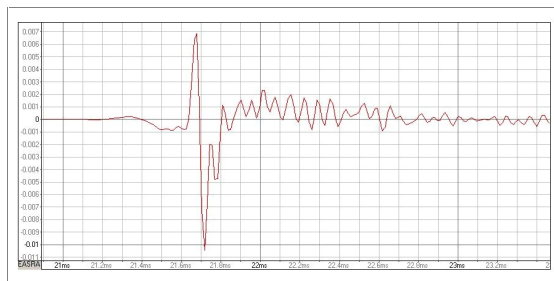


Abbildung 1 Impulsantwort (EASERA)

Durch die Fouriertransformation der Impulsantwort erhält man das komplexe Frequenzspektrum, welches aus dem Amplituden- und Phasenverlauf besteht.

Der Amplitudenfrequenzgang gemessen auf Achse ist leider immer noch die einzige Information die fast allen Datenblättern auch grafisch wiedergegeben wird. Hierbei sollte darauf geachtet werden das die y-Achse die Angabe der Empfindlichkeit (*engl.*: Sensitivity) enthält. Die Empfindlichkeit ist der Schalldruckpegel der in einem Abstand von einem Meter bei einer zugeführten Leistung von einem Watt erzeugt wird.² Durch Multiplikation der Empfindlichkeit mit der maximalen elektrischen Belastbarkeit kann der theoretische maximale Schalldruckpegel errechnet werden.

¹ Sprungantwort, Frequenzgang, Phasengang, Gruppenlaufzeit, Zerfallsspektrum, Impedanzverlauf

² Dabei ist zu beachten, dass die Leistung 1 W sich immer auf die Nennimpedanz (z.B. 8 Ω) bezieht und nicht etwa auf die tatsächliche Impedanz, die über der Frequenz nicht konstant ist. Korrekterweise müsste also der Effektivwert der Spannung (z.B. 2,83 V_{eff} bei 8 Ω), die eine Leistung von 1 W bei der entsprechenden Nennimpedanz bewirkt, angegeben werden.

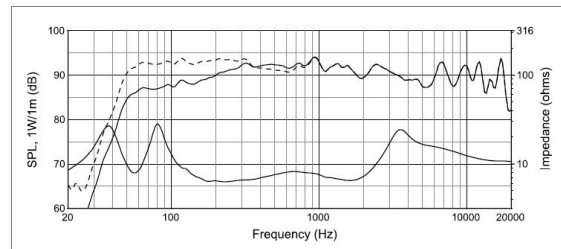


Abbildung 2 Frequenzgang mit integriertem Impedanzverlauf (JBL)

Die Darstellung des Frequenzgangs sollte der besseren Übersichtlichkeit halber geglättet sein, wo bei sich gezeigt hat, dass hier eine Glättung von 1/6 Oktave der Auflösung des menschlichen Gehörs am nächsten kommt. In Datenblättern wird in der Regel der Frequenzgang (*engl.*: Frequency Response) auch als Wertebereich mit einem Grad der Abweichung angegeben, z. B. „67 Hz – 19 Hz (±3 dB)“. Zusätzlich findet man bisweilen die Angabe des so genannten Frequenzbereichs (*engl.*: Frequency Range), z. B. „50 Hz – 20 kHz (-10 dB)“.

Das Ausschwingverhalten eines Lautsprechers kann mit dem kumulativen Zerfallsspektrum – auch Wasserfalldiagramm genannt – untersucht werden. Hier lassen sich beispielsweise etwaige Resonanzen des Lautsprechergehäuses durch ein langes Nachschwingen ausmachen.

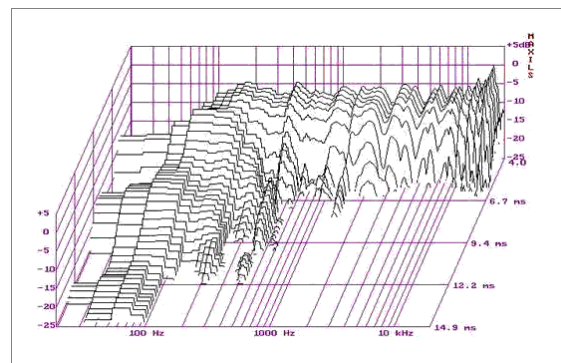


Abbildung 3 Zerfallsspektrum (MAXILS)

Direkt verknüpft mit dem Amplitudenfrequenzgang ist der Phasengang. Hier erzeugt ein akustisches oder elektrisches Filter je Ordnung eine Phasendrehung von 90°, der als minimalphasiger Anteil bezeichnet wird. Abweichungen davon und starke Phasendrehungen im Bereich von Trennfrequenzen lassen auf Laufzeitdifferenzen der einzelnen Wege zueinander schließen.

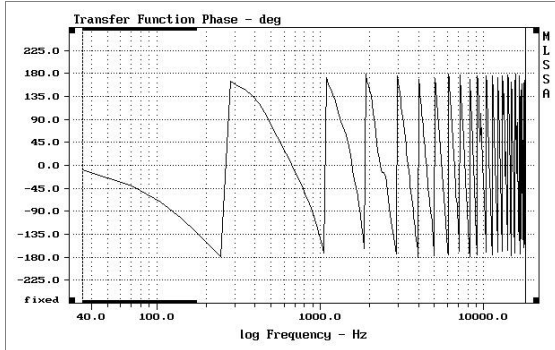


Abbildung 4 Phasengang (MLSSA)

Durch Differenzieren der Phase nach der Frequenz erhält man die Gruppenlaufzeit. Hier gilt ganz allgemein, dass Filter hoher Ordnung lange Gruppenlaufzeiten hervorrufen, die sich grundsätzlich akustisch negativ auswirken.

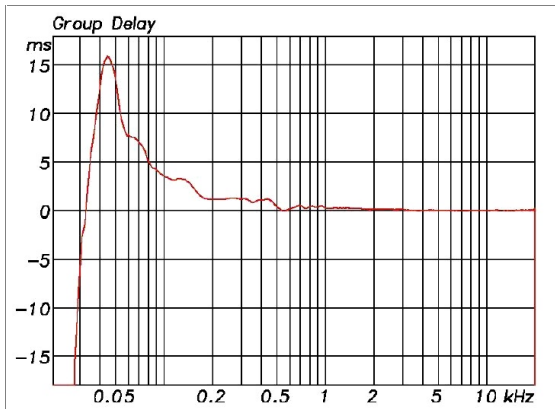


Abbildung 5 Gruppenlaufzeit (Monkey Forest)

Im Impedanzverlauf ist der komplexe Widerstand des Lautsprechers über die Frequenz aufgetragen. Lautsprecher werden auf Grund ihres Impedanzverlaufs in Gruppen verschiedener nomineller Impedanzen bzw. Nennimpedanzen von z. B. 4 Ω oder 8 Ω eingeteilt. Diese Nennimpedanz wird in der Regel in Datenblättern angegeben und lässt sich aus dem Impedanzverlauf entnehmen. Dabei darf das Minimum des Impedanzverlaufs 80 % der Nennimpedanz nicht unterschreiten.

Nichtlineare Verzerrungen

Als nichtlineare Verzerrungen bezeichnet man Frequenzanteile die im Originalsignal nicht enthalten sind, wobei geradzahlige und ungeradzahlige Vielfache auftreten. Geradzahlige Oberwellen wirken sich im Höreindruck weniger kritisch aus als ungeradzahlige, und Oberwellen höherer Ordnung sind grundsätzlich problematischer als die niedrigen Ordnungen $k=2$ oder $k=3$. In einem Klirrspektrum wie in der Abbildung 6 werden die Klirranteile einzeln aufgezeigt, so dass neben der Grundwelle die Oberwellen mit ihrem Betrag dargestellt werden.

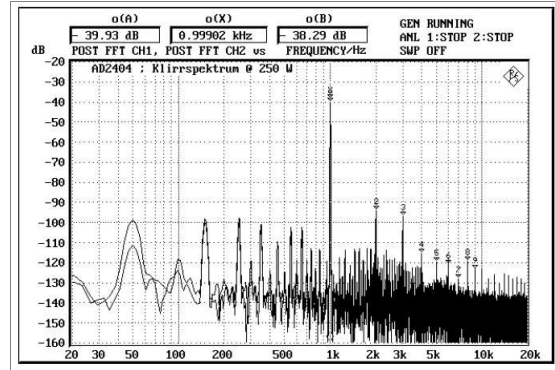


Abbildung 6 Klirrspektrum (Rhode & Schwarz)

Zur Bestimmung der Klirranteile wird ein Sinussignal auf den Lautsprecher gebracht und das wiedergegebene Signal wird mittels einer FFT-Analyse untersucht. Um den so genannten Klirrfaktor (*engl.*: Total Harmonic Distortion, THD) zu errechnen, werden alle Harmonischen ins Verhältnis zur Grundwelle gesetzt und man erhält eine prozentuale Angabe des Klirranteils.

Auf Grund der nichtlinearen Verzerrungen lassen sich auch detailliertere Aussagen über den maximal zu erzeugenden Schalldruckpegel eines Lautsprechers machen, als sie die simple Angabe eines einzigen Wertes beinhaltet. Wie nachzuvollziehen ist, ist die maximale Lautstärke, die ein Lautsprecher vermag zu erzeugen, nicht kurz vor dem Zerstören des Lautsprechers zu sehen, sondern viel früher. Mit zunehmendem Schalldruckpegel steigen die nichtlinearen Verzerrungen stark an. Wie sich gezeigt hat, wird ein Klirrfaktor von 10 % als noch tolerabel angesehen.

Zur Bestimmung des maximalen Schalldruckpegels bei einer bestimmten Frequenz bietet es sich nun an, ein Sinussignal auf den Lautsprecher zu geben, dessen Amplitude immer weiter erhöht wird. Gleichzeitig wird der Klirrfaktor bestimmt und beim Erreichen eines bestimmten Grenzwertes (hier 10 %) wird der erreichte Schalldruckpegel aufgetragen.

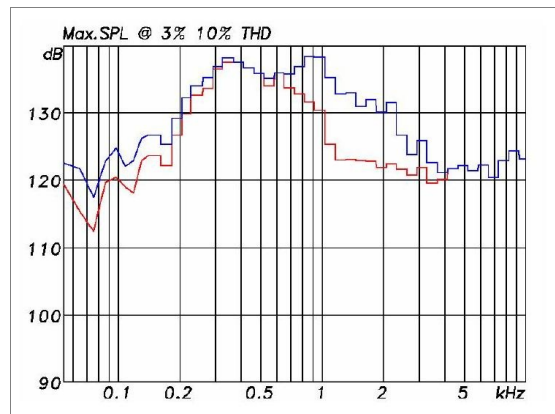


Abbildung 7 Maximalpegel bei 3 % und 10 % THD (Monkey Forest)

So bekommt man einen dezidierten Überblick des tatsächlichen Arbeitsbereichs des Lautsprechers, wo

mögliche Schwächen in einigen Frequenzbereichen deutlich zu Tage treten.

Elektrische Belastbarkeit

Die wohl größten Differenzen und Unklarheiten von Lautsprecherkenndaten findet man bei der Angabe der elektrischen Belastbarkeit. Das ist vermutlich darin begründet, dass sich die Ermittlung diesbezüglicher Daten vergleichsweise schwierig gestaltet, ob der starken Abhängigkeit der Art und Einwirkungsdauer des verwendeten Testsignals.

Üblicherweise wird als Kriterium für die elektrische Belastbarkeit die Leistung herangezogen. Die Leistung ist definiert als Energie pro Zeit. Mit dem Umstand, dass sich Leistung nicht direkt messen lässt und der Zeitabhängigkeit begegnet man hier schon zwei Problemstellen.

Grundsätzlich kann man die maximale elektrische Belastbarkeit eines Lautsprechers in mechanischen und thermischen Grenzen begründet sehen. Im ersten Fall ist die Auslenkung der Membran zu groß und die Schwingspule schlägt an die Polplatte oder springt aus dem Spalt oder die Membran selbst zerreißt. Im zweiten Fall heizt sich die Schwingspule derart stark auf, dass sich der Kleber der Schwingspule löst oder die Isolation des Schwingspulen-drahtes schmilzt, wodurch ein Kurzschluss entsteht.

Beide Fälle treten ein, wenn im Lautsprecher eine bestimmte Leistung umgesetzt wird. Diese Leistung lässt sich naturgemäß nicht direkt bestimmen, sie steht aber im direkten Zusammenhang zur angelegten Spannung. Die Leistung P ist der Quotient des Quadrates der Spannung U und der Impedanz Z des Lautsprechers.

In der Praxis, wo zumeist Musik oder Sprache wiedergegeben werden soll, ist das Signal und damit die Spannung, die am Lautsprecher anliegt, aber sehr zeitvariant und damit nur schwer zu beschreiben. Allerdings lassen sich für je einen bestimmten Zeitabschnitt der Spitzenwert und der Mittelwert der Spannung bestimmen. Das Verhältnis dieser beiden Größen wird als Crest-Faktor bezeichnet und als logarithmisches Maß in dB angegeben.

Im Fall der mechanischen Überlastung ist der Spitzenwert der Spannung und im Fall der thermischen Überlastung der durchschnittliche Wert der Spannung zur Berechnung der Leistung relevant.

Die Abbildung 8 zeigt ein Signal mit einem Crest-Faktor von 6 dB. Der Pegel der Signalspitzen liegt also um 6 dB höher als der Durchschnittspegel. Das ist vergleichbar mit einem Verhältnis von 2:1 zwischen dem Spitzenwert (*engl.*: Peak) und dem quadratischen Mittel (*engl.*: RMS) einer Spannung, oder mit einem Verhältnis von 4:1 zwischen dem

Spitzenwert und dem quadratischen Mittel einer Leistung.

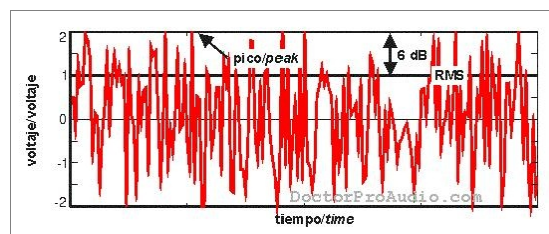


Abbildung 8 Crest-Faktor

Konsequenterweise könnte man sagen, dass eine aussagekräftige Testreihe zur Bestimmung der Belastbarkeit eines Lautsprechers nur mit einem realen Musik- respektive Sprachsignal durchgeführt werden kann. Aus verständlichen Gründen ist dies mit Blick auf ein einheitliches Testverfahren nur bedingt praktikabel.

Um ein praxisgerechtes und dennoch reproduzierbares Testsignal zu haben, wird in der Regel ein Rosa-Rauschen eingesetzt, welches ein Zufallssignal ist, das für alle Frequenzbänder den gleichen Energiegehalt aufweist. Rosa-Rauschen ist im Pegel nicht konstant über die Zeit und hat so einen gewissen Grad an Dynamik. So erfährt der Lautsprecher sowohl thermische als auch mechanische Belastungen. Je nachdem wie groß die Dynamik ist, überwiegt die thermische oder die mechanische Belastung.

Musik hat in der Regel einen Crest-Faktor von 20 dB und mehr. Nur sehr stark komprimierte Popmusik weist mitunter Crest-Faktoren von etwa 12 dB auf. Kleinere Crest-Faktoren sind als eher ungewöhnlich zu bezeichnen; um ihnen aber Rechnung zu tragen basieren die meisten Testverfahren auf einem Rosa-Rauschen mit einem Crest-Faktor von 6 dB. Dadurch simuliert man bezüglich der thermischen Verträglichkeit gewissermaßen den „worst case“.

Durch den Crest-Faktor erhält das Testsignal also in etwa den zeitlichen Charakter eines Musiksignals. Um das Testsignal auch spektral seinem Vorbild anzugleichen, sollte es auch frequenzselektiv bearbeitet werden. Da sich die spektrale Energieverteilung von Musik im mittleren Frequenzbereich verdichtet, ist hier eine Kombination aus Hoch- und Tiefpassverhalten angebracht. Da die Temperatur der Schwingspule maßgeblich eine Funktion der Zeit ist, sollte auch die Dauer des Tests festgelegt sein.

Hieraus haben sich Standards zur Bestimmung der elektrischen Belastbarkeit von Lautsprechern entwickelt, die im Folgenden beschreiben werden:

1. Der AES2-1984 Standard

Dieser Standard für Lautsprecherkomponenten ist von der Audio Engineering Society festgelegt worden. Er ist sehr verbreitet und sowohl für einzelne Wandler als auch für die einzelnen Wege eines aktiven Systems gedacht. Das Testsignal ist ein Rosa-Rauschen mit einem Crest-Faktor von 6 dB

und einer Bandbreite von einer Dekade. Beispielsweise könnte für einen Tieftonlautsprecher eine Bandbreite von 60 Hz bis 600 Hz oder für einen Hochtonlautsprecher eine Bandbreite von 1,5 kHz bis 15 kHz verwendet werden. In der Abbildung 9 sind beide Beispiele verdeutlicht. Die Dauer des Tests beträgt 2 Stunden, nach denen der Lautsprecher keinen ersichtlichen Schaden aufweisen soll.

2. Der IEC268-1 Standard

Dieser Standard ist von der International Electrotechnical Commission festgelegt und schreibt ebenfalls ein Rosa-Rauschen mit einem Crest-Faktor von 6 dB als Testsignal vor. Das Signal durchläuft aber ein spezielles IEC-Filter, das aus einem Hochpassfilter (40 Hz, 2. Ordnung) und einem Tiefpassfilter (5 kHz, 2. Ordnung) besteht, womit die spektrale Energieverteilung von Musik nachempfunden werden soll. Der Verlauf ist in der Abbildung 9 dargestellt. Die Dauer des Tests ist auf 100 Stunden angelegt, nach welcher der Lautsprecher keine ersichtlichen Schäden aufweisen soll.

3. Der EIA RS-426-A Standard

Dieser Standard ist von der Electronic Industries Association spezifiziert und die Dauer des Tests beträgt 8 Stunden, welche der Lautsprecher unbeschadet überstehen soll. Auch hier wird als Testsignal ein Rosa-Rauschen eingesetzt, allerdings mit einer Filterung, die anders ist, als die nach der IEC-Norm und die ebenfalls in der Abbildung 9 zu sehen ist.

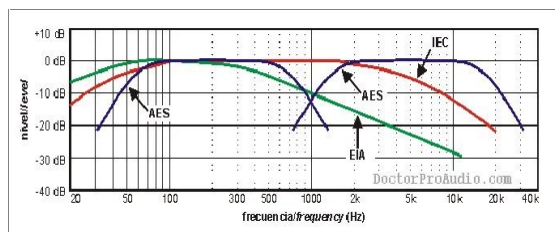


Abbildung 9 Filterkurven zur Leistungsmessung

Je nachdem, welche Spannung zur Berechnung der elektrischen Belastbarkeit herangezogen wird, unterscheidet man folgt:

1. Spitzenbelastbarkeit (engl.: Peak Power)

Die Spitzenbelastbarkeit basiert auf der Berechnung mit dem Spitzenwert der Spannung und ist ein Maß für die mechanische Belastbarkeit eines Lautsprechers. Für ein Signal mit einem Crest-Faktor von 6 dB ist die Spitzenbelastbarkeit beispielsweise viermal so groß wie die Dauerbelastbarkeit.

2. Dauerbelastbarkeit (engl.: Average Power)

Die Dauerbelastbarkeit wird mit dem quadratischen Mittel der Spannung errechnet und ist ein Maß für die thermische Belastbarkeit eines Lautsprechers. Daher wird sie auch häufig nicht ganz korrekt als „RMS-Leistung“ bezeichnet.

Als eine weitere Angabe ist häufig die so genannte Programmbelastbarkeit (engl.: Program Power)

angegeben. Dieser Wert stammt ursprünglich aus der Wobbelmesstechnik. Heutzutage hat er keine wirkliche Bedeutung. Für die meisten Lautsprecherhersteller ist er einfach das Doppelte der Dauerbelastbarkeit, wenngleich andere Hersteller auch andere Verhältnisse verwenden. Die Programmbelastbarkeit kann als Richtwert für die Wahl der Endstufenleistung herangezogen werden. Beispielsweise könnte ein Lautsprecher mit einer Dauerbelastbarkeit von 300 W und einer Programmbelastbarkeit von 600 W an einer Endstufe mit 600 W betrieben werden. Das gilt für sorgfältig kontrollierte Bedingungen, unter Umständen könnte die entsprechende Endstufe aber auch zu groß sein.

Hin und wieder findet sich auch die Bezeichnung „Continuous“, die ganz einfach besagt, dass das Anregungssignal ständig anliegt; da einige Standards mit periodischen Signalen arbeiten.

Im HiFi-Bereich wird auch oft die Bezeichnung „Sinus“ benutzt. Eine Angabe der Leistung die umgesetzt wird, wenn ein Lautsprecher mit einem Sinussignal belastet wird, ist aber nicht wirklich aussagekräftig, da in der Praxis wohl in den seltensten Fällen ein reines Sinussignal wiedergegeben werden soll.

Wie man sieht, können die Leistungsangaben eines Lautsprechers je nach Beschaffenheit des Testsignals und Dauer des Tests stark differieren, wenngleich sie denselben Lautsprecher beschreiben. Dies gilt ganz besonders für die Dauerbelastbarkeit. Daher ist die Angabe des Standards, nach dem die elektrische Belastbarkeit eines Lautsprechers bestimmt wurde, von essentieller Bedeutung, wenn die Kenndaten vergleichbar sein sollen.

Räumliches Abstrahlverhalten

Das räumliche Abstrahlverhalten lässt sich im wahrsten Sinne des Wortes umfassend darstellen in Form so genannter Daten-Balloons. Diese Daten sind auch die Basis für die Beschreibung von Lautsprechern in raum- und elektroakustischen Simulationsprogrammen.

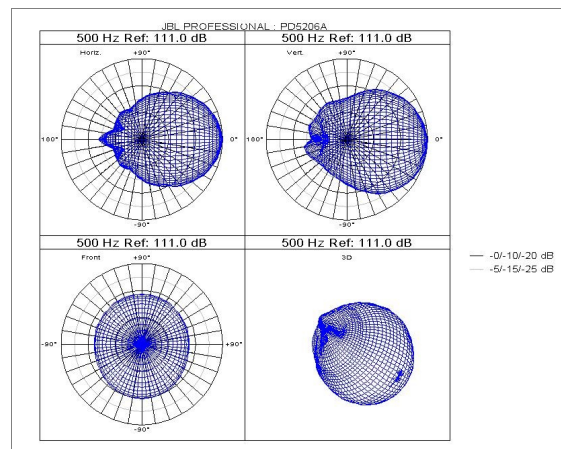


Abbildung 10 Daten-Balloon (Ulysses)

Hier ist der Schalldruckpegel entsprechend seines Wertes dreidimensional als Entfernung zum Mittelpunkt aufgetragen. Dazu werden die Messwerte üblicherweise auf konzentrischen Bahnen um den Lautsprecher in einem 5°-Raster aufgenommen. Diese Umläufe werden ihrerseits wieder um 5° geneigt, so dass eine komplette Kugeloberfläche angefahren wird.

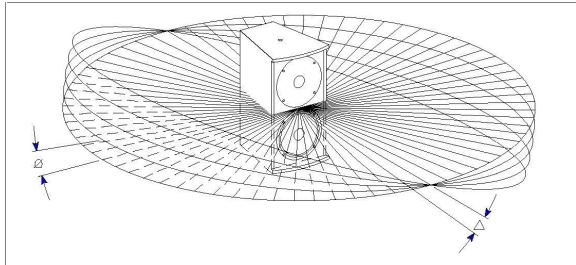


Abbildung 11 Daten-Balloon-Erfassung

Allerdings ist ein solcher Balloon immer auf die Darstellung des Abstrahlverhaltens einer bestimmten Frequenz respektive eines Frequenzbandes beschränkt.

Wenn man einen Überblick über das gesamte Spektrum haben möchte, ist da die so genannte Isobaren-Darstellung geeigneter. Hier ist die Darstellung allerdings auf eine Ebene (vorzugsweise die horizontale oder die vertikale) beschränkt. Auf der x-Achse ist die Frequenz aufgetragen und auf der y-Achse findet man den jeweiligen Winkel unter dem gemessen wurde. Durch farbliche Abstufungen ist dann der Schalldruckpegel bei der jeweiligen Frequenz unter entsprechendem Winkel aufgetragen. Man kann so sehr leicht auf einem Blick einen Eindruck des gesamten Abstrahlverhaltens (in der jeweiligen Ebene) bekommen. Zu beachten ist, dass die Pegel in der Regel auf die Hauptabstrahlachse normiert sind. Das bedeutet, dass sich vermeintliche Side-Lobes unter Umständen auf einen Frequenzeinbruch auf Achse zurückführen lassen.

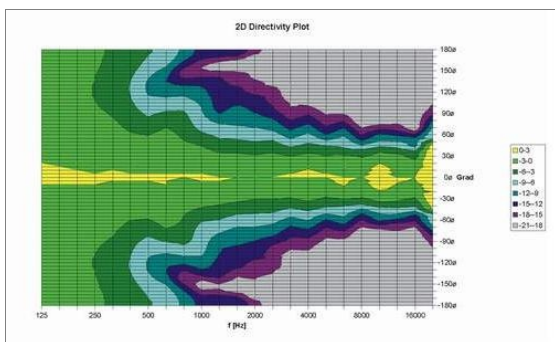


Abbildung 12 Isobaren-Darstellung

Die gleiche Information würde man erhalten, wenn man sich entsprechend viele Polardiagramme des Systems anschauen würde. Hier liegt für jede Frequenz respektive jedes Frequenzband ein gesondertes Diagramm vor, wo der Wert des Schalldruckpegels in Abhängigkeit vom Winkel als Radius zum Mittelpunkt aufgetragen ist. Üblicherweise ist auch hier der Pegel auf die Hauptab-

strahlachse normiert, so dass die jeweiligen Werte relativ zum Wert unter 0° zu sehen sind.

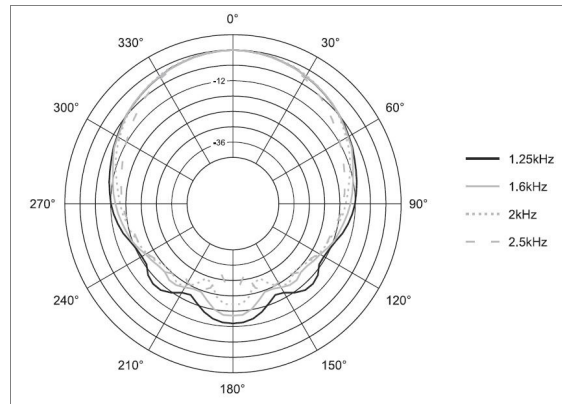


Abbildung 13 Polardiagramm (JBL)

Aus den Polardiagrammen oder der Isobaren-Darstellung kann man den nominellen Abstrahlwinkel des Lautsprechers ableiten, der in Datenblättern zu finden ist. Dieser ist definiert als der Winkel zwischen den beiden Punkten, an denen der Pegel gegenüber der Hauptabstrahlachse jeweils um 6 dB abgefallen ist. Dieser Wert sollte über einen weiten Frequenzbereich eingehalten werden und ist als grobe Kategorisierung des Lautsprechers zu sehen.

Hilfreich ist der nominelle Abstrahlwinkel bei der Cluster-Bildung von Lautsprechern. Hier sollten die Lautsprecher so zueinander angeordnet werden, dass sie bei ihrem nominellen Abstrahlwinkel überlappen. So addieren sich hier die Pegel beider Lautsprecher (bei konstruktiver Interferenz) derart, dass der gleiche Wert wie auf der jeweiligen Hauptabstrahlachse erzielt wird und man erhält eine weitestgehend gleichmäßige Pegelverteilung.

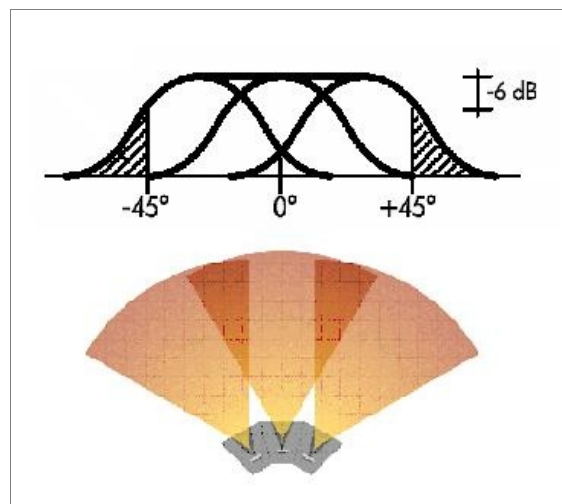


Abbildung 14 Prinzip der Cluster-Bildung

Eine weitere Möglichkeit die Bündelungseigenschaften eines Lautsprechers zu beschreiben ist der Bündelungsgrad (*engl.*: Directivity Factor, Q) oder auch Q-Faktor genannt. Hier werden für je ein Frequenzband die Bündelungseigenschaften über alle Raumrichtungen beschreiben. Dabei werden die

Balloon-Daten herangezogen und es wird der Pegel auf der Hauptabstrahlachse ins Verhältnis gesetzt zu dem durchschnittlichen Pegel aller Messpunkte. Der Bündelungsgrad wird auch gelegentlich in dB angegeben und wird dann Bündelungsmaß (*engl.*: Directivity Index, DI) genannt.

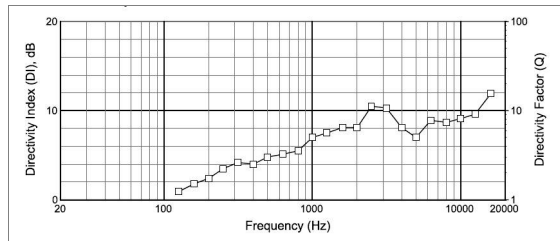


Abbildung 15 Bündelungsmaß und -grad (JBL)

Hin und wieder findet man auch die Darstellung von Off-Axis-Frequenzgängen, wo die Frequenzgänge, die unter verschiedenen Winkeln (horizontal oder vertikal) zur Hauptabstrahlachse gemessen wurden, in ein gemeinsames Diagramm eingetragen sind.

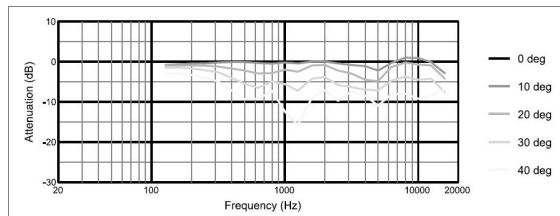


Abbildung 16 Off-Axis-Frequenzgänge (JBL)

Fazit

Die reinen Kenndaten eines Datenblattes geben nur die dürftige Basis für eine grobe Einschätzung der akustischen Eigenschaften eines Lautsprechers. Erst durch die grafische Darstellung frequenz- und zeitvarianter Parameter und die detaillierte Abbildung des räumlichen Abstrahlverhaltens lassen sich valide Aussagen machen, die als Grundlage der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Lautsprecher hinreichen.

Abbildungen: 8, 9 DoctorProAudio; 11 EAW; 14 d&b Audiotechnik / Nexo