

# **Impuls-Verhalten von Mikrofonen**



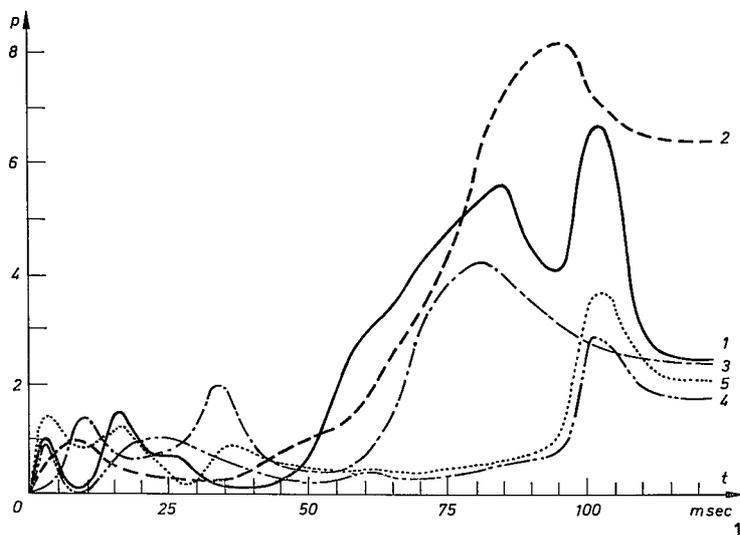
Überreicht durch Georg Neumann GmbH, Berlin

Bei Impulsuntersuchungen werden Übertragungseigenschaften von Mikrofonen direkt am Bildschirm oder am Bildschirmfoto ablesbar, ohne dass komplizierte Geräte für die Transformation in den Frequenzbereich erforderlich sind. Einschwing- und Ausgleichsvorgänge von Sprache und Musik spielen sich im 10...100-ms-Bereich ab, während Ausgleichsvorgänge in hochwertigen Mikrofonen teilweise nach weniger als 1 ms beendet sind. Deshalb erfassen Mikrofone die Feinstruktur eines Klanges. Aber von vielen nur auf optimalen Frequenzgang konstruierten Mikrofonen wird das aufgenommene Schallereignis mit Mikrofon-Eigenschwingungen überlagert, was als Amplituden-Modulation dem Mikrofon dann seinen typischen „Klang“ verleiht. Deshalb sollte die – im folgenden beschriebene – Untersuchung des Impulsverhaltens von Mikrofonen sehr ernst genommen werden, auch wenn sie nur ein Teilaspekt bei der Entwicklung eines neuen Mikrofons ist.

STEPHAN PEUS

### Impulsmessungen und Elektroakustik

Das Impulsverhalten elektroakustischer Übertragungsanlagen ist seit längerer Zeit im Gespräch, es wird zum Beispiel bei Verstärkern mit Rechteckimpulsen gemessen und auch ab und zu veröffentlicht. Über die Impulsmessung von Mikrofonen gibt es im wesentlichen nur Veröffentlichungen in der Erkenntnis, dass die Impulsantwort, also das Ergebnis einer Messung im Zeitbereich, nach einer geeigneten Transformation in den Frequenzbereich alle Informationen über die Übertragungsfunktion – Übertragungsfaktor und Übertragungswinkel – enthält.



1 Entwicklung der Teiltöne der Silbe „ke“.

Die Messung geht sehr schnell und man braucht keinen reflexionsarmen Raum, da Einflüsse des Messraumes erst ausserhalb der Messzeit zum Mikrofon gelangen [1] [2]. Diesen Vorteilen steht aber der apparative Aufwand einer geeigneten Rechenanlage entgegen, die möglichst direkt aus dem elektrischen Signal des Mikrofons die Transformation und graphische Ausgabe erstellen soll.

Zur Impulsmessung an Mikrofonen mit viel geringerem Aufwand hat uns die Frage geführt, warum verschiedene Mikrofone mit beinahe identischem Frequenzgang völlig unterschiedlich klingen können.

### Einschwingvorgänge

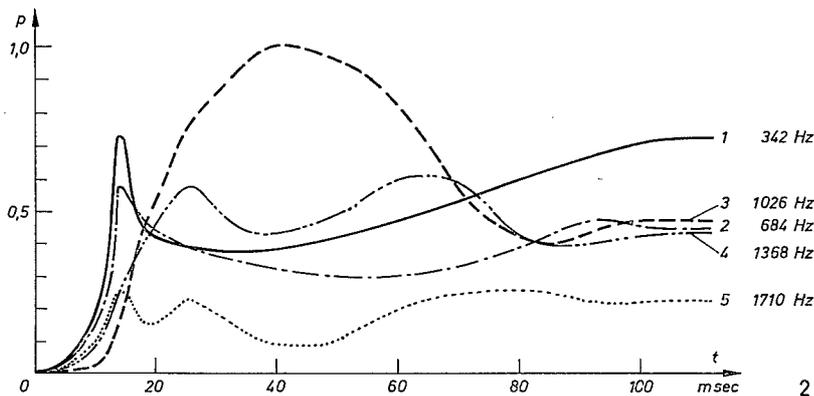
Die Messung des Frequenzganges erfolgt im stationären, also eingeschwingenen Zustand des Systems in mässiger Geschwindigkeit, wohingegen das „tägliche Brot“ eines Mikrofons überwiegend impulsförmigen Charakters ist. Um welche Grössenordnung es dabei geht, zeigen die ersten beiden Abbildungen.

Bild 1 gibt den zeitlichen Ablauf des Einschwingvorganges der Silbe „ke“ wieder, zerlegt in die einzelnen Harmonischen aus Untersuchungen von Backhaus [3]. Charakteristisch für diesen Gutturallaut sind das impulsförmige Anklingen und die verhältnismässig lange Einschwingdauer von etwa 120 ms. Typisch für die Sprachlaute ist eher eine kürzere Anklingdauer, die aber allmählicher abläuft statt impulsartig. Einzelne gesprochene Vokale sind am schnellsten eingeschwingen, zum Beispiel „e“ nach nur 6 ms, womit immer die Zeit gemeint ist, bis zu der sich die Amplituden der Harmonischen noch wesentlich ändern. Von einem eingeschwingenen Zustand kann man allerdings höchstens bei für Untersuchungen einzeln gesprochenen Lauten reden, nicht aber für fließende Sprache.

Charakteristisch für Musik-Instrumente ist nicht nur deren längeres Anschwingen, sondern auch der Formverlauf dieses Vorganges; Bild 2 zeigt ein Beispiel für eine besonders kurze Einschwingdauer einer Trompete, wieder zerlegt in die Harmonischen. Beim Spielen des Instrumentes ergeben sich natürlich sehr viel kleinere Zeiten, da es sich dabei nur noch um Änderungen von einem „quasi eingeschwingenen“ Zustand in einen anderen handelt.

Diese beiden Beispiele mit besonders kurzen Periodendauern im Einschwingvorgang wurden deshalb ausgewählt, weil in Veröffentlichungen, die die Forderung nach der Impulsuntersuchung elektroakustischer Geräte stellen, bisweilen der Eindruck entsteht, die Pulsfolge im Anklingvorgang sei so kurz, dass ein System – in diesem Fall ein Mikrofon – zu träge sein könnte, die Feinstruktur zu übertragen. Dass die Dinge etwas anders liegen, soll dieser Beitrag klären helfen.

Dipl.-Ing. Stephan Peus (27) studierte an der Technischen Universität Berlin Nachrichtentechnik und Akustik und ist seit 1974 bei der Georg Neumann GmbH, Berlin, auf dem Gebiet der Entwicklung von Kondensator-Mikrofonen tätig. Dieser Artikel geht auf einen Vortrag des Autors anlässlich der 10. Tonmeistertagung, 19. bis 22. November 1975 in Köln, zurück.



2 Entwicklung der Teiltöne beim Einschwingvorgang einer b-Trompette mit einer Frequenz  $f_1$  von 340 Hz.

### Der Messimpuls

Zum Messen des Impulsverhaltens von Mikrofonen braucht man ein sehr kurzes, reproduzierbares Signal, wie es zum Beispiel mit einem Pistolknall oder durch eine Funkenentladung eines Kondensators verwirklicht werden kann.

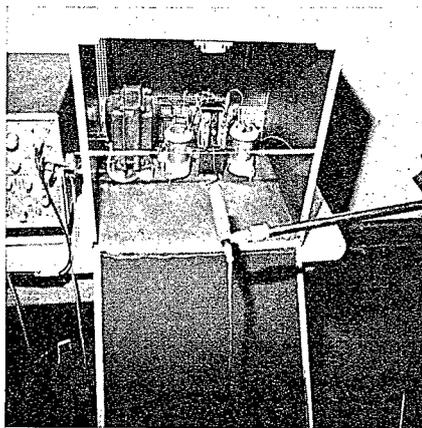
Vor mehreren Jahren hat Boré eine Funkenknall-Apparatur aufgebaut, in der die Netzspannung auf etwa 5 kV transformiert wird und nach Gleichrichtung einen Kondensator von 600 pF auflädt. Parallel zu dessen Elektroden liegt eine Funkenstrecke, deren Länge einstellbar ist, so dass die Energie der Funken und mit einem RC-Glied ihre Folgefrequenz veränderbar sind. Das Ganze ist zum Zweck der Abschirmung in einen Metallkasten eingebaut. Zum Schutz der Elektroden und als Filter für Frequenzen weit oberhalb der Hörgrenze dient eine Filzspannung des Deckels, der auf Bild 3 heruntergeklappt ist.

Ein einseitiger Impuls wie der bei elektrischen Impulsmessungen übliche Rechteckimpuls ist akustisch nicht herstellbar, weil die Luft zusammen mit der sich entladenden Kapazität einen Schwingkreis bildet, über den sich die stark erhitze und komprimierte Luft als Kugelwelle ausbreitet — eine gewisse Strecke mit Überschallgeschwindigkeit, dann nach den bekannten Differentialgleichungen des Schallfeldes. Die hohe Dämpfung dieses Kreises durch den Strahlungswiderstand der Luft lässt dabei nur eine Schwingung nahe dem aperiodischen Grenzfall zu [4], [5].

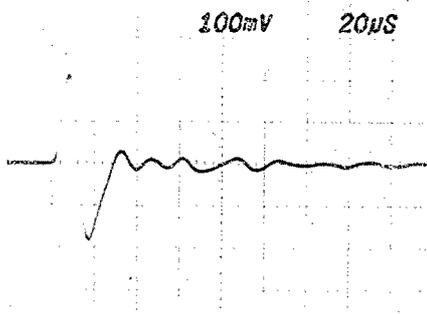
Das Oszillogramm Bild 4, mit einem sehr guten Messmikrofon aufgenommen, soll den Schalldruck-Verlauf dieser Entladung zeigen. Typisch sind der schlanke positive Teil des Impulses und der anschließende, infolge des Strahlungswiderstandes etwas breitere und flachere negative.

### Impulsantwort des Mikrofons

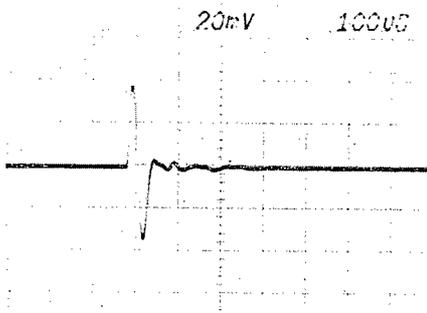
Jedes Mikrofon ist ein Übertragungssystem mit beschränktem Übertragungsbereich. Sehr vereinfachend gesagt, ist es ein Tiefpass mit einer oberen Grenzfrequenz  $f_g$  und einem mehr oder weniger ebenen Frequenzgang bis zu dieser Grenze. Diese Grenzfrequenz bewirkt



3 Aufbau der Funkenknall-Apparatur.

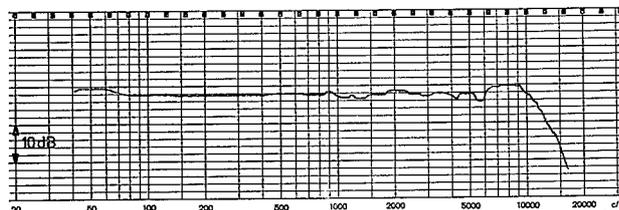


4 Schalldruckverlauf der Funkenknall-Entladung aufgenommen mit einem Messmikrofon. Die Zeitachse ist hier in 20 µs Abschnitte eingeteilt!



5 Impulsverlauf bei einem Studiomikrofon.

6 Frequenzgang eines Nieren-Kondensatormikrofons mit 16 mm Membrandurchmesser.



eine Verbreiterung des Stosses, also des ersten positiven Teiles der Impulsantwort. So ist die mittlere Dauer und damit in der Abbildung die mittlere Breite des Stosses umgekehrt proportional der doppelten Grenzfrequenz

$$t = \frac{1}{2f_g}$$

Den Übergang vom Durchlass- in den Sperrbereich des Tiefpasses sieht man in der Impulsantwort als Eigenschwingung mit der Grenzfrequenz. Dauer und Amplitude dieser Schwingung sind folgendermassen miteinander gekoppelt: ein steiles Ende des Durchlassbereiches bewirkt ein kurzes, hohes Nachschwingen, ein flacher Übergang hat dagegen längeres Nachschwingen mit kleinerer Amplitude zur Folge.

Es kommt also nicht darauf an, die Grenzfrequenz möglichst hoch zu legen entsprechend dem Anwendungszweck, sondern den Übergang, sofern er im Hörbereich liegt, bei dieser Frequenz so zu gestalten, dass das Verhältnis aus Schwingungsamplitude und Dauer des Nachschwingens für den jeweiligen Anwendungsfall optimal wird [6].

Diese Erscheinung war bereits an der Impulsantwort des Messmikrofons zu erkennen, bei der sich die Grenzfrequenz von 60 kHz sowohl in der entsprechenden Stossbreite von etwa 8 µs als auch in der abklingenden Eigenschwingung dieser Frequenz bemerkbar macht.

### Kondensator-Mikrofone

Bild 5 zeigt die Impulsantwort eines Studiomikrofons, das den Impuls gemäss den physikalischen Grenzen getreu überträgt. Die Grenzfrequenz von über 20 kHz zeigt sich wieder in einer entsprechenden Verbreiterung des Stosses, aber so gut wie gar nicht in Eigenschwingungen mit dieser Frequenz infolge eines richtig gewählten Überganges am Ende des Übertragungsbereiches. Dieses Mikrofon lässt also keinerlei Klangfärbungen entstehen [7].

Im Gegensatz dazu gibt es Mikrofone, in denen schwingfähige Gebilde, zum Beispiel in Form von kleinen, für den Schall erreichbaren Hohlräumen eingebaut sind, sei es, um damit einen bestimmten Frequenzbereich für grössere Brillanz anzuheben, sei es, um einen zu kleinen Übertragungsbereich durch diese Massnahme zu verbreitern.

Als Beispiel diene der in Bild 6 gezeigte Frequenzgang mit einer Überhöhung von allerdings nur 2 dB bei etwa 8 kHz und

einem frühzeitigen Abfall der Kurve. Im Impulsdiagramm, Bild 7, spiegeln sich diese Eigenschaften in der der Grenzfrequenz entsprechenden Breite des Impulses wider und in der Schwingung des eingebauten Resonanzsystems bei etwa 8 kHz.

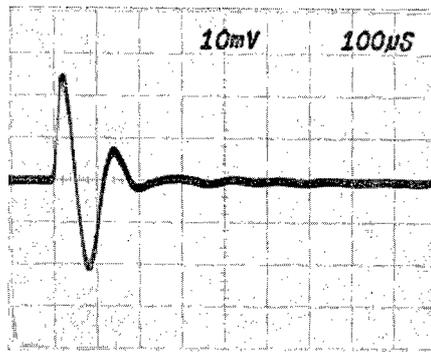
So werden bei dieser Art des Mikrofonaufbaus Frequenzen im Bereich von 8 kHz aufgrund der Anhebung des Frequenzganges um etwa 2 dB stärker übertragen; sie treten ausserdem auch deshalb hervor, weil sie ein schwingfähiges System zur Resonanz anregen. Die anhebende Wirkung wird dadurch verstärkt. Allerdings darf man sich dieses Mittels nur sehr vorsichtig bedienen, denn akustische Resonatoren sind schmalbandig und in ihrer Wirkung für geschulte Ohren sehr leicht erkennbar.

In Vertretung einer bestimmten Gruppe von Kondensator-Mikrofonen, die nur im Hinblick auf einen „schönen“ Frequenzgang konstruiert worden sind, möge Bild 8 stehen, das zeigen soll, dass die Anwendung des Kondensator-Wandlerprinzips bei gutem Frequenzgang nicht selbstverständlich ein gutes Mikrofon ergibt. Hierbei handelt es sich übrigens nicht um ein europäisches Produkt.

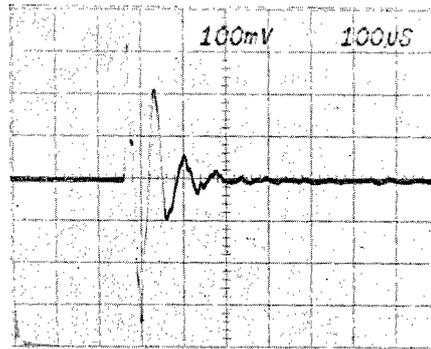
An dieser Stelle muss auf eine Kenngrösse des Empfängers „Ohr“ aufmerksam gemacht werden: die sogenannte „physiologische Einschwingzeit“. Untersuchungen haben gezeigt, dass zwei Signale, die unterschiedliches Einschwingverhalten haben, nur dann vom Ohr als klangverschieden wahrgenommen werden, wenn ihre Einschwingvorgänge länger als 250  $\mu$ s dauern, [8].

Diese Bedingung war bei dem Mikrofon mit Resonanzkreis (Bild 7) nicht erfüllt, so dass mit diesem aufgenommene einzelne Impulse nicht mit einer scheinbaren Tonhöhe von 8 kHz klingen dürften. Es ist jedoch zu beachten, dass das Wandlersystem Mikrofon durch den impulsartigen Charakter von Sprache und Musik ständig zum Schwingen angeregt wird, wobei es zu einer quasi-stationären Schwingung dieser Frequenz kommt, die zweifellos färbend auf das entstehende Klangbild wirkt, was bisweilen wohl erwünscht sein soll.

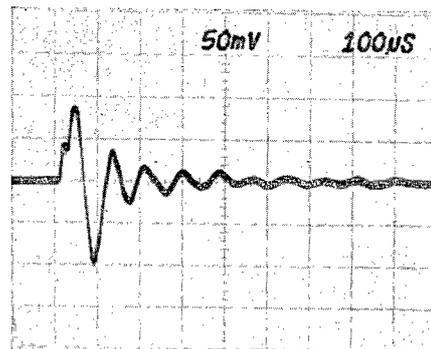
Ohne beabsichtigte Einbauten von Resonanzgebilden mit einer Anregungsfrequenz im Hörbereich bildet bei jedem Mikrofon die Membran mit ihrer Masse und der Steife ihrer Aufhängung ein schwingfähiges System, wobei zur Masse des Membranmaterials immer noch ein nicht zu vernachlässigender Anteil der mitschwingenden Luft kommt.



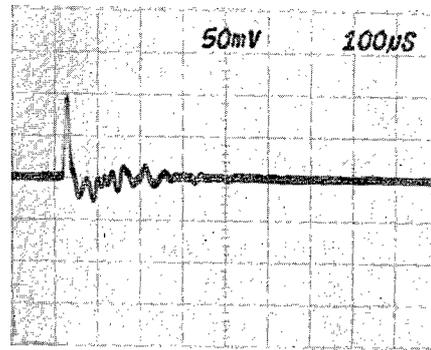
7 Impulsdiagramm zum Frequenzgang nach Bild 6.



8 Impulsdiagramm eines auf „schönen Frequenzgang“ konstruierten Kondensatormikrofons.



10 Impulsdiagramm zum Frequenzgang nach Bild 9.



11 Impulsdiagramm aufgenommen an einem Doppelbändchenmikrofon.

## Dynamische Mikrofone

Gradientenmikrofone nach dem Kondensatorprinzip haben allgemein mit dynamischen Mikrofonen die im Hörbereich liegende Eigenresonanz des Membransystems gemeinsam, die je nach Mikrofontyp möglichst frequenzunabhängig (reibungsgehemmt) oder frequenzabhängig (massegehemmt) bedämpft wird [7].

Dynamische Mikrofone besitzen aufgrund ihres Wandlerprinzips meistens grössere Membransysteme mit entsprechend grosser Masse und damit grosser Nachgiebigkeit der Aufhängung, um die gewünschte Resonanzfrequenz zu erreichen. Daher schwingen diese Systeme teilweise erheblich länger nach als Mikrofone mit kleinerer wirksamer Membranmasse und damit kleinerer Nachgiebigkeit der Einspannung oder Aufhängung wie Kondensator- und Bändchenmikrofone.

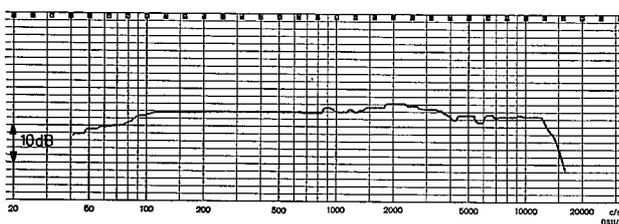
Zwei Bilder sollen die Auswirkung auf die Impulsantworten dieser Mikrofontypen anschaulich machen: Bild 9 zeigt den Frequenzgang eines dynamischen Studiomikrofons, der in einem weiten Frequenzbereich eben ist und bei rund 13 kHz den für dynamische Mikrofone typischen steilen Abfall besitzt.

Im zugehörigen Impulsdiagramm, Bild 10, ist diese Grenzfrequenz deutlich wiederzufinden in der Impulsbreite und der langsam abklingenden Schwingung. Auf der ersten Flanke ist noch eine Periode von etwa 20  $\mu$ s zu finden, die hier nicht geklärt werden und wegen ihrer Kürze auch nicht interessieren soll.

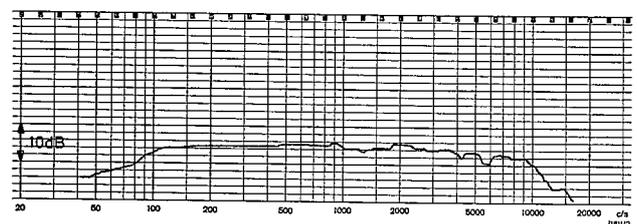
## Bändchen-Mikrofon

Als letztes Beispiel soll Bild 11 die Impulsantwort eines Doppelbändchen-Mikrofons zeigen, in der die geringe schwingende Masse in der Impulsbreite wie auch in den Eigenschwingungen mit sehr hohen Frequenzen zum Ausdruck kommt. Zu erkennen sind solche von etwa 25 kHz und 50 kHz. Die letzte geht auch scheinbar als Grenzfrequenz aus der Impulsbreite hervor. In Bild 12 dagegen wird deutlich, dass der Übertragungsbereich schon bei etwa 10 kHz endet, so dass vermutet werden muss, dass nur ein Teil des Doppelbändchens mit dieser hohen Schnelle ausgelenkt ist und die hohe Grenzfrequenz vorgetäuscht hat.

*Einige Übertragungseigenschaften von Mikrofonen sind also direkt – ohne Transformation in den Frequenzbereich – vom Bildschirm ablesbar. Dabei wird die Feinstruktur des Signals erfasst und erkennbar, wie bei so manchem nur auf guten Frequenzgang konstruierten Mikrofon der typische „Klang“ entsteht.*



9 Frequenzgang eines dynamischen Studiomikrofons.



12 Frequenzgang des Doppelbändchen-Mikrofons