



## ***Eigenrauschen und Dynamikumfang von Mikrofon und Aufnahmekette***

*Martin Schneider, Georg Neumann GmbH, Berlin*

*Vortrag gehalten auf der 20. Tonmeistertagung, Karlsruhe, 1998*

*Heutige Mikrophone bieten einen Dynamikumfang von über 130 dB und übertreffen damit weitere Glieder in der Aufnahmekette. Um diese Dynamik optimal nutzen zu können, muß Klarheit über einige Parameter der Aufnahmesituation bestehen: über den Schallpegel realer Signalquellen, das Grundgeräusch in Aufnahmeräumen, die spektrale Verteilung des Rauschens, sowie über den Dynamikumfang der nachfolgenden Geräte. Die Extremwerte des Schallpegels werden bei Nahabnahme sehr lauter Instrumente, bzw. bei entfernter Abnahme sehr leiser Signalquellen erreicht. Mit geeigneter Aussteuerung unter Kenntnis der technischen Charakteristika von Mikrofon und Vorverstärker lassen sich solche Signale bestmöglich übertragen und die Übertragungseigenschaften moderner Mikrophone vollständig ausnutzen.*

### **1.1. Dynamik - Begriffsbestimmung**

Der Begriff Dynamik wird in vielen unterschiedlichen Zusammenhängen verwendet [s.a. 1]. In der musikalischen Notation wird damit der Bereich von pianissimo (*ppp*) bis fortissimo (*fff*) verstanden. Akustisch gesehen entspricht dies der Pegeldifferenz zwischen größtem und kleinstem Pegel einer Schallquelle. Bei elektroakustischen Wandlern gibt sie den „Intensitätsbereich an, der einerseits durch Eigenrauschen, andererseits durch nichtlineare Verzerrungen begrenzt ist“ [2]. Für Mikrophone ist dies also die Pegeldifferenz zwischen dem maximalen Schalldruckpegel, den ein Mikrofon mit einer angegebenen, kleinen Nichtlinearität übertragen kann, und dem „äquivalenten Eingangs-Schalldruckpegel eines Mikrophons“.

### **1.2. Maximaler Schalldruckpegel**

Die Grenze für die Nichtlinearität wird, zumindest bei Kondensatormikrophenen, meist aus den Verzerrungen der elektrischen Schaltung allein bestimmt. Übliche Klirrfaktorwerte, für die der maximal zulässige Schalldruckpegel angegeben werden, sind 0,5%, oder selten 1%.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Der Wert x dB für 1% Klirrfaktor läßt sich meist auf x-6dB für 0,5% Klirrfaktor zurückrechnen

Der maximal zulässige Schalldruckpegel stellt also nicht die absolute obere Grenze dar, bis zu der Aufnahmen überhaupt möglich sind, sondern nur die Grenze, oberhalb welcher mit relevanten Klirrfaktoren zu rechnen ist.

### 1.3. Eigenrauschen

Der „äquivalente Eingangs-Schalldruckpegel eines Mikrophons“ (kurz: Ersatzgeräuschpegel) stellt das Eigenrauschen des Mikrophons ins Verhältnis zu seinem Freifeldübertragungsmaß (kurz: Empfindlichkeit). Das im Mikrophon vorhandene Rauschen entspricht dabei dem Ausgangspegel, den ein rauschfreies Mikrophon bei Beschallung mit dem angegebenen Ersatzgeräuschpegel abgeben würde. Der Ersatzgeräuschpegel stellt also die Grenze dar, bei welcher Rauschpegel und Signalpegel gleich groß sind. Dies bedeutet nicht, daß Signale kleiner als der Ersatzgeräuschpegel nicht gewandelt und übertragen werden können. Sie werden in zunehmenden Maße vom Eigenrauschen des Mikrophons überlagert, sind aber noch "im Rauschen zu hören".

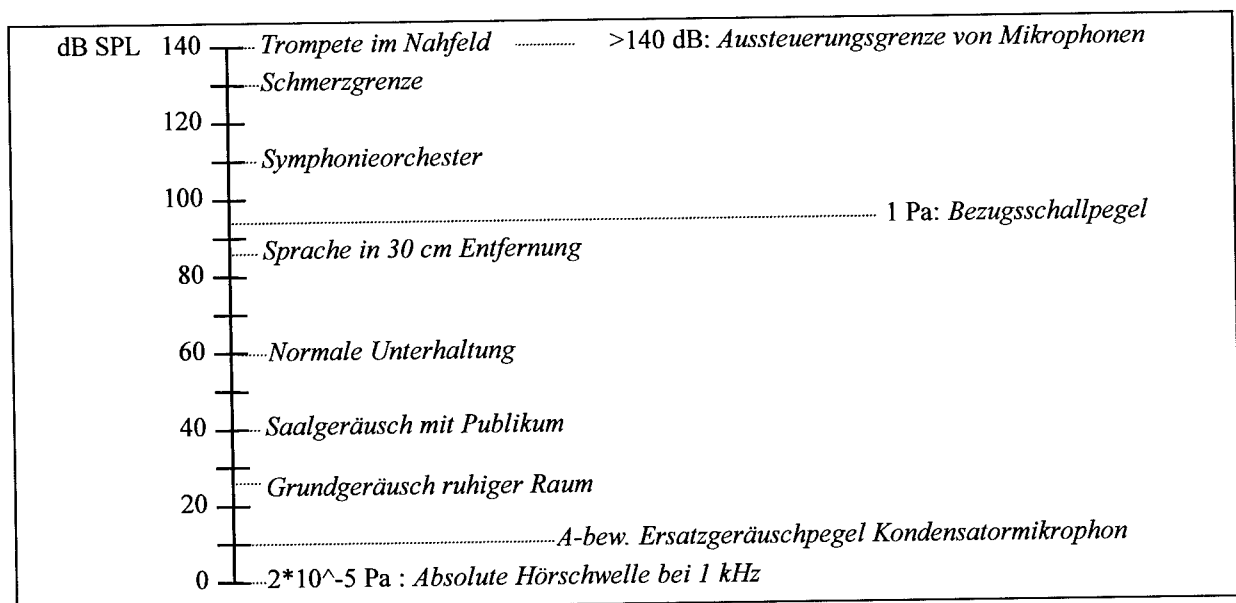
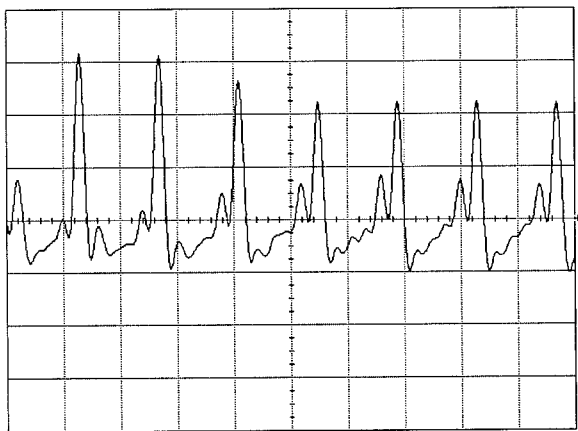


Abbildung 1. Pegel diverser Schallquellen und Übertragungsgeräte

### 1.4. Reale Schallpegel

Um Anforderungen an das Mikrophon und den weiteren Übertragungsweg formulieren zu können, müssen die Schalldruckpegel zu übertragender Signale betrachtet werden. Dieser Bereich kann außerordentlich groß sein. So sind gegebenenfalls Signale im Bereich der Hörschwelle (<0 dB SPL) aufzunehmen, andererseits werden im Nahfeld von einigen Instrumenten Schallpegel von 140 dB SPL oder darüber erreicht.

Bei diesen Pegeln muß insbesondere die Signalform betrachtet werden. Bei stark impulsartigem Signal kann der Spitzenwert weit über dem üblicherweise betrachteten Effektivwert liegen. Abbildung 2 zeigt das mit einem Speicheroszilloskop aufgenommene Signal einer Trompete in ca. 1 cm Abstand. Die Spitzen des Signals liegen bei 140 dB SPL und damit im Grenzaussteuerungsbereich vieler Mikrophone. Einschränkend muß allerdings gesagt werden, daß bei derartigen Schallpegeln eine leichte Begrenzung der Spitzen das Klangbild nicht unbedingt beeinträchtigt. Stünde etwa das Ohr selbst am Platz des Mikrophons, wiese bei Schalldrücken oberhalb der Schmerzgrenze auch das Gehörssystem des Menschen sehr starke Nichtlinearitäten auf.



**Abbildung 2.** Oszillogramm eines Trompetensignals in 1cm Abstand, Spitzenamplitude ca. 3,2V  $\cong$  10dBu  $\cong$  140 dB SPL.

### 1.5. Reale Mikrophonausgangspegel

Mikrophone haben unterschiedliche Empfindlichkeiten. Dynamische Mikrophone besitzen typischerweise Übertragungsfaktoren von 1...4mV/Pa, mit 1Pa  $\cong$  94dB SPL. Auch bei 140dB SPL geben sie also ein elektrisches Signal von nur 200...800mV (-11,8dBu...+0,3dBu) ab. Kondensatormikrophone hingegen haben Übertragungsfaktoren von 8...50 mV/Pa und erzeugen damit maximale Signalpegel von 1,6...10V (+6,3...+22dBu) bei 140dB SPL. Im geeigneten (oder ungeeigneten) Ort bieten Kondensatormikrophone dem nachfolgenden Vorverstärker also Pegel an, die oft als „Line-Pegel“ bezeichnet werden und dem maximalen Studiopegel nahe kommen.

## 2. Max. Signalpegel und Grenzschalldruck

### 2.1. Elektrische Verzerrungen

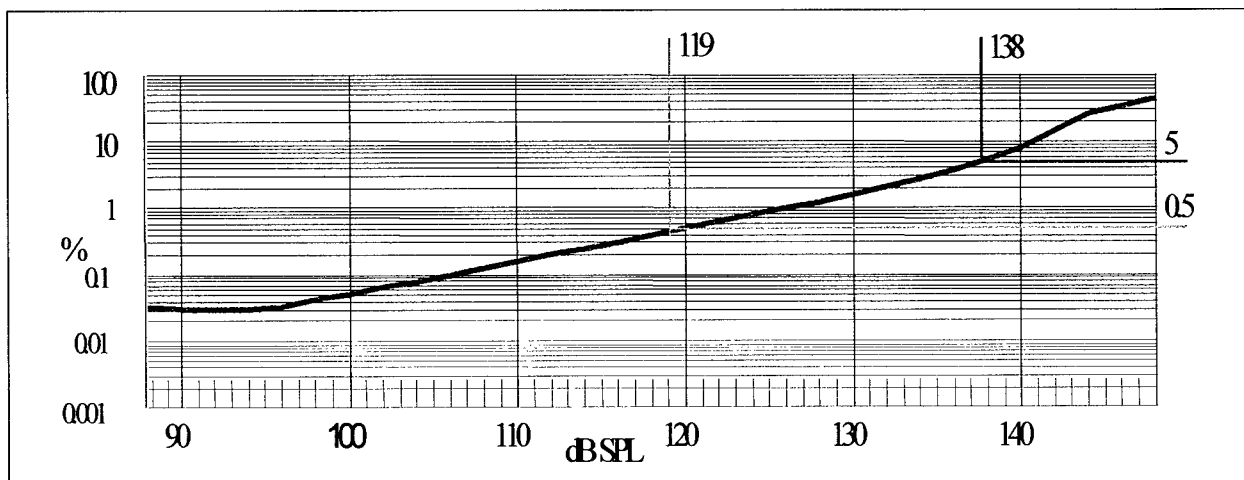
Die Nichtlinearitäten der Schaltungen von Kondensatormikrofonen lassen sich einfach bestimmen: Es wird ein elektrisches Signal direkt über die Kapsel oder einen Ersatz-Kondensator eingespeist, und die Verzerrungen am Mikrophonausgang in Abhängigkeit vom Eingangspegel



und der Frequenz bestimmt. Hier zeigen sich Unterschiede im Klirrverhalten bei verschiedenen Schaltungstechniken, d.h. bei den verschiedenen Mikrophongenerationen. Bis ca. 1965 wurden Mikrophone nur mit einer Röhre als extrem hochohmiger, rauscharmer erster Verstärkerstufe gebaut. Mit der Entwicklung rauscharmer Feldeffekttransistoren konnten dann die ersten Transistorschaltungen realisiert werden, die erhebliche Vereinfachungen in der Speisungstechnik und leichte Verbesserungen im Rauschverhalten der Mikrophone mit sich brachten. In den frühen 80er Jahren setzten sich dann transformatorlose Ausgangsschaltungen durch. Mit diesen konnte das Eigenrauschen der Mikrophone weiter verringert werden. Der Dynamikbereich wurde insbesondere aber zu großen Pegeln erweitert werden, da die durch den üblichen Übertrager verursachten Verzerrungen entfielen. Die elektrische Aussteuerbarkeit ist nur noch durch die maximal zulässige Stromaufnahme aus der Phantomspeisung begrenzt.

## 2.2. Röhrenschaltungen

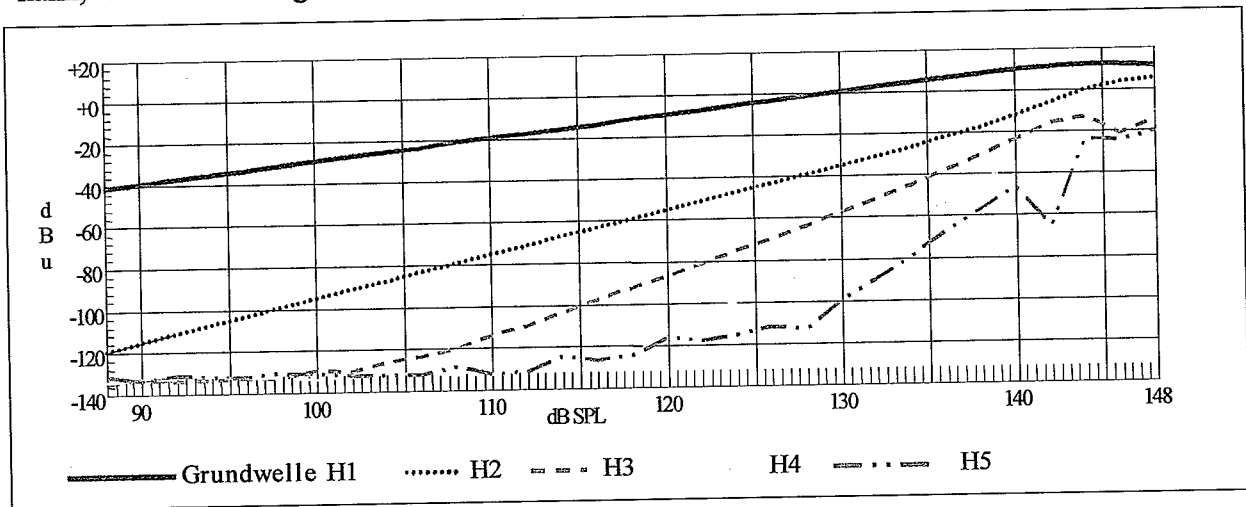
Die verschiedenen Entwicklungsstufen der Kondensatormikrophone zeichnen sich insbesondere durch unterschiedliche Nichtlinearitäten aus. Ältere Röhrenschaltungen besitzen einen langsam, über einen weiten Pegelbereich ansteigenden Klirrfaktorverlauf (Abbildung 3).



**Abbildung 3.** Röhrenmikrophon: Gesamtklirrfaktor in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel, ohne Kapsel gemessen

Diese Gerade ist nach kleinen Pegeln hin durch das Überhandnehmen des Eigenrauschen bestimmt. Zu großen Pegeln hin nimmt der Klirrfaktor linear zu, bis entweder der Übertrager oder die neuerdings auch transformatorlose Ausgangsstufe bei sehr großen Pegeln (hier ca. 136 dB SPL) zu einer symmetrischen Begrenzung (Clippen) führt. Daß sich der Anstieg des Klirrfaktors weitgehend aus der Harmonischen 2ter Ordnung zusammensetzt, zeigt Abbildung 4, in der die einzelnen Harmonischen H2 bis H5 dargestellt sind. Dies stellt eine typische „Röh-

rencharakteristik“ dar, die anwendungsabhängig auch als sehr angenehm empfunden werden kann, wie das derzeitige Revival der Röhrentechnik andeutet.



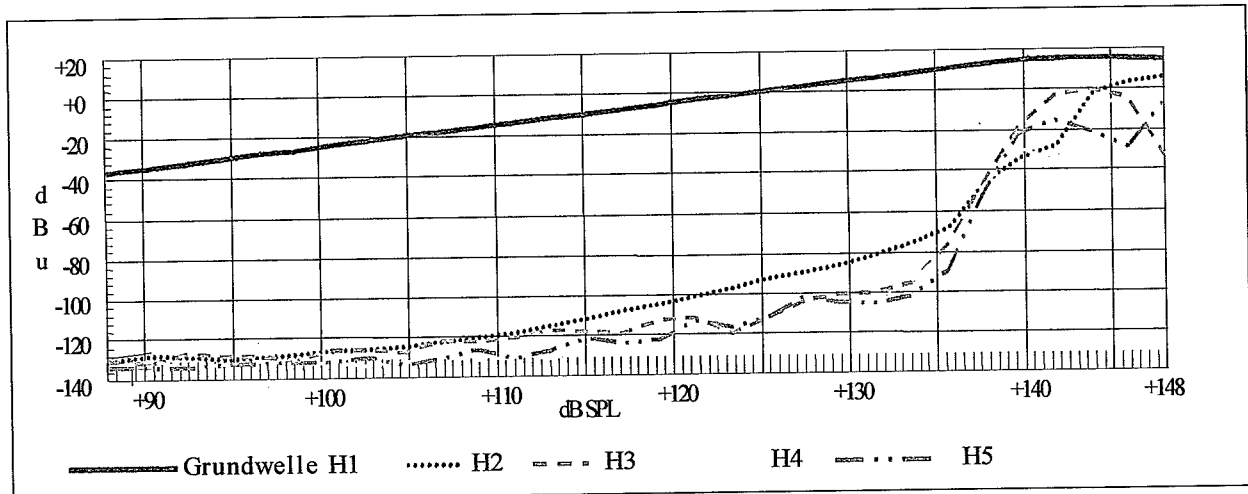
**Abbildung 4.** Röhrenmikrophon: Amplituden der Harmonischen, in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel, ohne Kapsel gemessen

Anmerkung: Auch bei dieser Darstellung ist die untere Meßgrenze durch das Eigenrauschen des Mikrophons, insbesondere aber auch des Meßsystems gegeben.

Eine Röhrenschialtung muß allerdings nicht prinzipiell ein derartiges Klirrvverhalten zeigen. Die Röhre kann auch sehr linear beschaltet werden, so daß sich ein dem Transistor ähnliches Verhalten ergibt. Durch geeignete Dimensionierung kann sie allerdings auch so eingestellt werden, daß sich ein erwünschter Klirrfaktorverlauf bei bestimmten Pegeln ergibt. Bei der Festlegung des Klirrfaktors wird man sich oft an die „legendären“ Vorbilder der 50er und 60er Jahre anlehnen.

### 2.3. Transformatorlose Schaltungen - TLM

Andererseits ist die Forderung an ein Mikrophon sicherlich berechtigt, ein möglichst linearer Wandler zu sein. Dies führte zur Entwicklung der transformatorlosen Schaltungstechnik, mit kleinstmöglichem Klirrfaktor über einen sehr weiten Dynamikbereich. Damit ist ein Mikrophon sehr weit aussteuerbar, bis die Schaltung - meist symmetrisch - „clippt“, und Klirrfaktoren auch höherer Ordnung überhand nehmen. Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, beträgt der maximale Ausgangspegel ca. 12 dBu, oder ca. 9 Vss! Die Eingangsstufen nachfolgender Vorverstärker, soweit man in diesem Pegelbereich überhaupt noch von Verstärkung reden kann, sollten dementsprechend dimensioniert sein, um bei diesen Signalpegeln nicht zu Verzerrungen zu führen.



**Abbildung 5.** Transformatorloses Mikrofon: Amplituden der Harmonischen, in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel

## 2.4. Kapselverzerrungen

Wie erwähnt, sind die elektrischen Verzerrungen von Kondensatormikrofonen relativ einfach zu bestimmen. Die Einbeziehung der Mikrofonkapsel als möglicherweise nichtlineares Glied hingegen führt zu größeren Schwierigkeiten. Da jeglicher Lautsprecher bei 140 dB SPL Klirranteile erzeugt, die weit über den zu erwartenden Mikrofonverzerrungen liegen, schließt sich die direkte Messung aus. Als Möglichkeiten ergeben sich die Differenztonmessung, sowie die Messung im Impedanzsprung-Rohr (Oberst-Rohr).

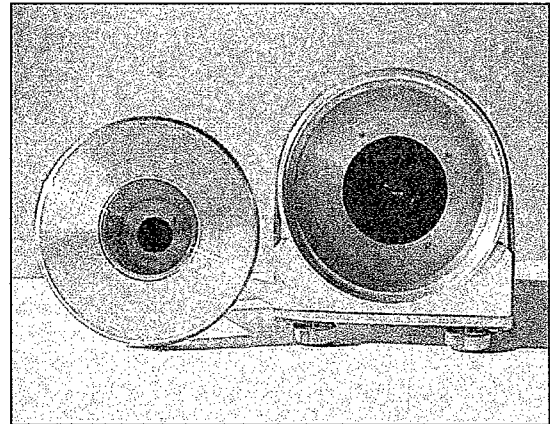
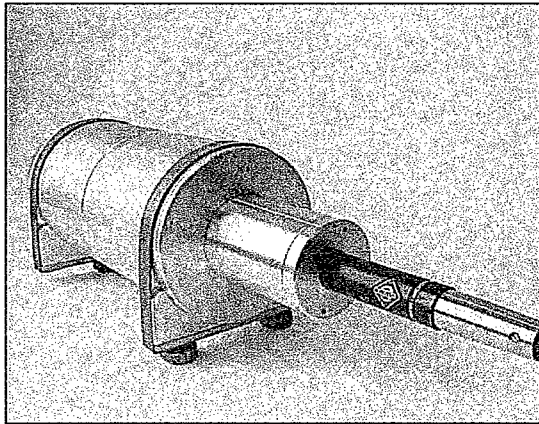
### 2.4.1. Meßverfahren Differenzton

Differenztonmessungen werden in DIN-IEC 60268-4 [3] beschrieben, Ergebnisse sind in [4] und [5] dargestellt. Diese Messungen sind allerdings recht aufwendig und beschränken sich nur auf Nichtlinearitäten 2ter Ordnung. Zudem sind aufgrund der Lautsprecherbeschränkungen nicht beliebige Schalldrücke erzeugbar. In gewissen Grenzen lassen sich die Ergebnisse aber zu höheren Schalldrücken hin extrapolieren.

### 2.4.2. Meßverfahren Impedanzsprung-Rohr (Oberst-Rohr)

Das Impedanzsprung-Rohr ist eine Druckkammer mit einer ausgeprägten Resonanz bei einer Frequenz [6]. Klirranteile, die von dem anregenden Lautsprecher herrühren könnten, werden damit stark unterdrückt. Schalldrücke bis 150 dB SPL können problemlos erzeugt werden, allerdings nur bei bestimmten Frequenzen. Eine Untersuchung des gesamten Frequenzbereichs müßte mit Einzelmessungen in diversen Rohren und punktweise abgestimmten Frequenzen stattfinden. Zudem lassen sich vornehmlich ungerichtete Druckempfänger in dieser Meßvor-

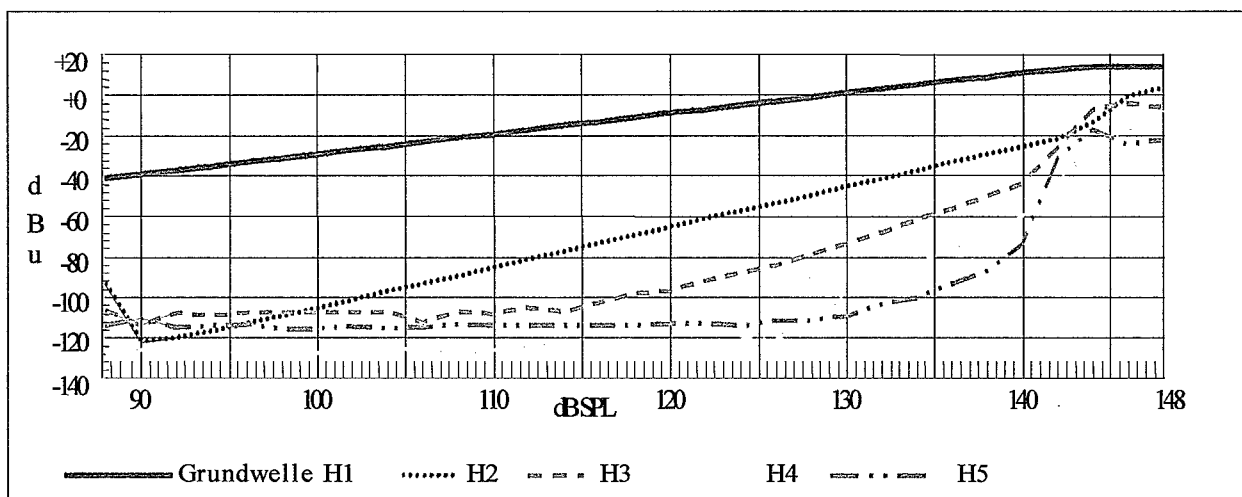
richtung untersuchen, die bündig in das Meßrohr, sozusagen als Teil der schallharten Wand, eingebracht werden können.



**Abbildung 5a.** Impedanzsprung-Rohr (Oberst-Rohr) mit Kleinmikrophon

Hörergebnisse zu Kapselverzerrungen lassen sich noch nicht umfassend präsentieren. Insbesondere der Abgleich mit Hörerfahrungen fällt bei diesen Schalldruckpegeln schwer. Prinzipiell läßt sich aber eine Ähnlichkeit des Klirrverhaltens einiger Druckempfängerkapseln mit demjenigen von Röhrenschaltungen nicht abstreiten.

In Abbildung 6 sieht man einen ebenso gleichmäßigen Anstieg der harmonischen Obertöne, vornehmlich H2. Dies ergibt sich aus der prinzipbedingten Unsymmetrie eines Druckempfängers mit nur einer dem Schall ausgesetzten Membranseite bzw. nur einer Gegenelektrode.



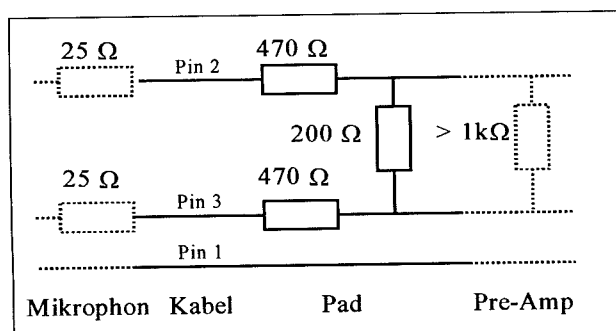
**Abbildung 6.** Druckempfänger: Amplituden der Harmonischen, mit Kapsel im Impedanzsprung-Rohr gemessen

## 2.6. Vordämpfung am Mikrophon

Der Dynamikbereich eines Kondensatormikrophons kann durch den Entwickler und gegebenenfalls den Anwender in bestimmten Grenzen verschoben werden. Bei einigen Mikrofonen ist deshalb ein Vordämpfungsschalter angebracht, mit dem das Kapselsignal um z.B. 10 dB reduziert werden kann. Damit wird der Dynamikbereich des Mikrophons um diesen Betrag verschoben. Die Empfindlichkeit reduziert sich um 10 dB, die maximale Aussteuerungsgrenze wird um 10 dB angehoben und der äquivalente Ersatzgeräuschpegel steigt dementsprechend ebenfalls um 10 dB. Transformatorlose Kondensatormikrophone sind allerdings auch ohne Umschaltung meist in der Lage, Schalldrücke von 140 dB SPL verzerrungsfrei zu übertragen. Verzerrungen im Mikrophon selbst treten dementsprechend nur sehr selten auf. Öfter ist es hingegen der relativ große Ausgangspegel des Mikrophons bei 140dB SPL (s.1.5.), der zur Übersteuerung „sparsam“ dimensionierter Vorverstärkereingänge führen kann. Sollte kein Dämpfungsschalter am Mikrophon vorhanden sein, und auch keine geeignete Dämpfung am Vorverstärker, bietet die Einfügung eines passiven Spannungsteilers („Pad“) eine einfache Lösung.

### 2.6.1. Spannungsteiler ("Pad")

Ein Pad kann auf einfache Weise in einen Adapterstecker oder in einen Kabelstecker eingebaut werden. Er teilt das Ausgangssignal des Mikrophons um einen bestimmten Faktor herunter, ebenso auch das Mikrophonrauschen. Es wird also nicht der Dynamikbereich des Mikrophons verschoben, sondern der elektrische Eingangspegel für das Folgegerät. Auch die Phantomspeisung wird durch die relativ niederohmigen Widerstände nicht beeinträchtigt. Ein Pad sollte möglichst in der Nähe des Vorverstärkers angebracht werden, um die Kabelstrecke vom Mikrophon zum Vorverstärker durch höhere Impedanz nicht unnötig störanfällig zu machen. Die 470 $\Omega$ -Widerstände müssen, zur Erhaltung der Symmetrie, auf z.B. <0,4% genau gepaart sein.



**Abbildung 7.** Signalreduzierung mit externem "Pad", Dämpfung ca. 17 dB.





## 2.7. Vorverstärker und Kabel als Lastimpedanz

Im Impedanzverhältnis Mikrofon / Vorverstärker wird von einer Spannungsanpassung ausgegangen, die ab der Relation 1:5 genügend erfüllt ist [3]. Bei modernen Mikrofonen ist üblicherweise von einem minimalen Lastwiderstand von 1 k $\Omega$  auszugehen. Dies wird von den meisten Vorverstärkern auch gewährleistet. Für den Fall niedrigerer Eingangsimpedanz des Vorverstärkers können, je nach Mikrophonschaltung, folgende Effekte auftreten: 1. Einschränkung der maximalen Aussteuerbarkeit um einige dB, aufgrund der hohen Last und des dadurch notwendigen großen Signalstroms, 2. Dämpfung des tieffrequenten Signalanteils.

Das Kabel hat einen Einfluß als ohmsche und kapazitive Last. Auch bei großen Längen (z.B. 300 Meter) ist bei hochwertigem Kabelmaterial der Einfluß des ohmschen Anteils auf moderne Ausgangsschaltungen vernachlässigbar. Bei Röhrenmikrofonen muß dieser Anteil allerdings zumindest für die Heizspannung der Röhre berücksichtigt werden. In einigen modernen Röhrenmikrofonen wird dieser Spannungsabfall am Kabel deshalb im Netzgerät kompensiert.

Die einzelnen Adern langer Kabel wirken als Teil eines Kondensators. Die Ausgangsschaltung eines Mikrophons sollte so dimensioniert sein, daß auch lange Kabel ohne Einfluß bleiben. Bei geeigneter Dimensionierung ist erst ab einer Kabellänge von z.B. 300m, dies bedeutet z.B. 47nF Kapazität bei hochwertigem Kabelmaterial, ein leichter Höhenabfall und eine geringe Einschränkung der Aussteuerbarkeit festzustellen. Auch aufgrund dieser Kapazität sollte ein externer Dämpfungs-Pad nur vorverstärkerseitig eingefügt werden.

## 3. Eigenrauschen

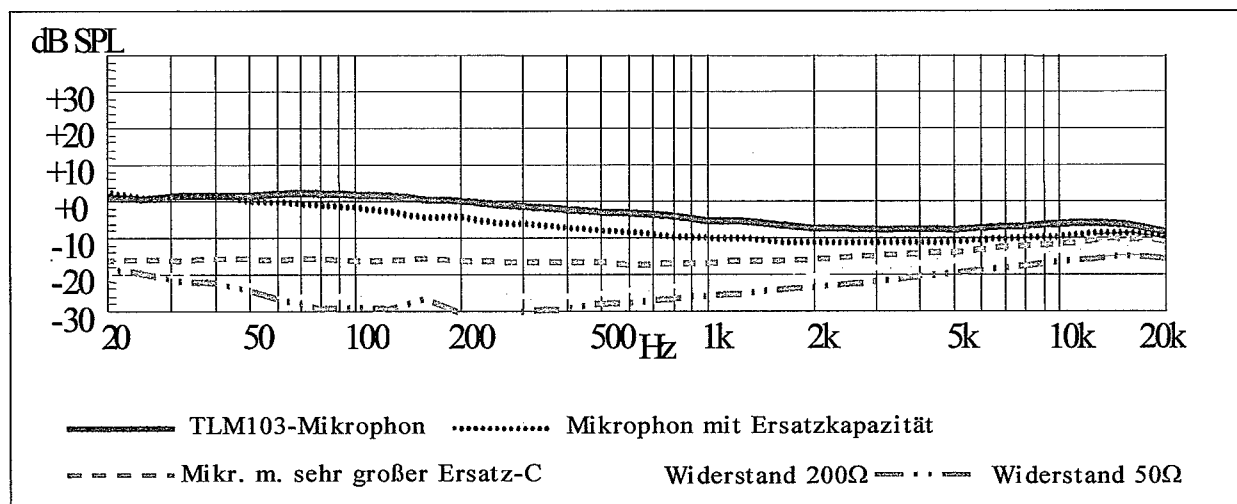
### 3.1. Ursachen

Die Ursachen des Mikrofon-Eigenrauschens sind unterschiedlicher Art. Jeder Widerstand hat aufgrund der Brownschen Molekularbewegung ein thermisches Eigenrauschen, welches prinzipiell weiß, d.h. spektral gleichverteilt ist. Dies gilt für alle Widerstände, d.h. auch für dynamische Mikrophone, die keine aktiven Komponenten enthalten.

Bei Schaltungen mit aktiven Komponenten, wie z.B. Röhren und Transistoren, entstehen weitere Rauschanteile wie Stromrauschen, Spannungsrauschen, Funkelrauschen. Abhängig von der Beschaltung kann dieses Rauschen spektral gefärbt sein. Durch die hochohmige und kapazitive Eingangsbeschaltung ergeben sich bei Kondensatormikrofonen prinzipiell zu hohen

Frequenzen hin abfallende Rauschspektren. Da das menschliche Ohr für tieffrequente Signalanteile weniger empfindlich ist, ergibt sich bei Kondensatormikrofonen somit ein angenehmeres Klangbild des Rauschens, das subjektiv weniger störend als weißes Rauschen empfunden wird.

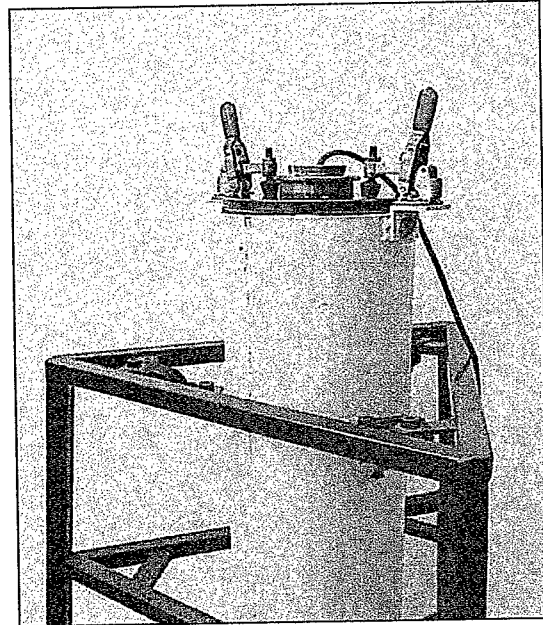
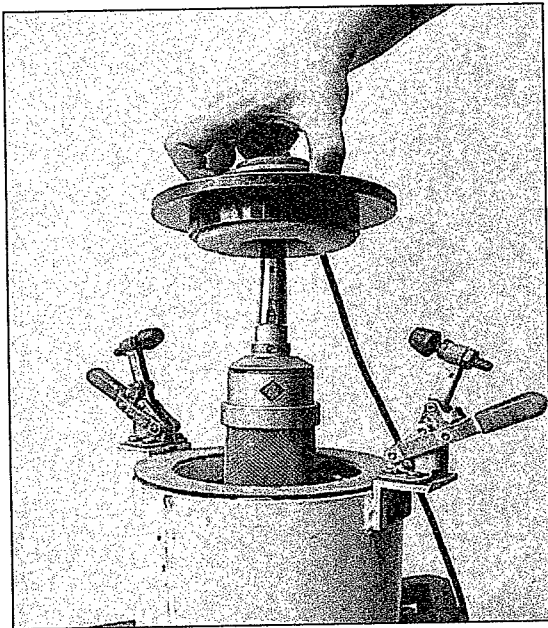
Bei extrem rauscharmen Mikrofonen ist zudem ein weiterer Anteil nicht zu vernachlässigen: das „Rauschen“ der Luft. Da oberhalb des Temperaturminimums von 0 °K die Luftmoleküle sich ebenfalls entsprechend der Brownschen Molekularbewegung verhalten, „prasseln“ die Moleküle sozusagen auf die Membran und erzeugen damit einen Rauschanteil. Dieser begrenzt als untere physikalische Grenze die Möglichkeit, beliebig rauscharme Mikrophone zu konstruieren.



**Abbildung 8.** Terzbewertetes Eigenrauschen eines extrem rauscharmen Mikrophons

### 3.2. Meßmethoden

Das Eigenrauschen von Mikrofonen kann auf verschiedene Art und Weise bestimmt werden. In einem geeignet ruhigen reflexionsarmen Raum kann das Ausgangssignal des vollständigen Mikrophons ohne Beschallung bestimmt werden. Zur einfacheren Messung sind sogenannte „Rauschbomben“ geeignet. Dies sind kleine Kammer, die besonders gut von der Außenwelt abgeschirmt sind (Abbildung 9, sowie IEC 60268-4). Ist eine solche Meßkammer nicht verfügbar, bzw. sollen elektrische Vormessungen ohne Mikrofonkapsel durchgeführt werden, kann beim Kondensatormikrofon die Kapsel durch eine gleich große Kapazität ersetzt werden. Damit entfällt allerdings der Rauschanteil durch die Luftbewegung, aber auch die Empfindlichkeit gegenüber akustischen Störungen während der Messung.



**Abbildung 9.** Rauschmessung: "Rauschbombe" mit Mikrophon

### 3.2.1. Einzahlwerte für Rauschen

In technischen Daten werden allgemein Einzahlwerte gegenüber Kurvendarstellungen bevorzugt. Für die Rauschmessungen an Mikrofonen ergeben sich drei Möglichkeiten: die unbewertete Messung von 22Hz bis 22kHz (Effektivwertmessung oder Quasispitzenwert-Messung), die bewertete Quasispitzenwert-Messung nach CCIR 468-3, sowie die ältere, aber sehr gebräuchliche A-bewertete Effektivwertmessung nach DIN/IEC 651. Publiziert werden zumeist die Daten nach CCIR 468-3 (kurz: dB-CCIR), oder A-bewertet (in dB-A). Im allgemeinen genügen diese Einzahlwerte, um Mikrophone der gleichen Bauart zu vergleichen. Dies allerdings nur unter der Annahme, daß die publizierten technischen Daten auch der Realität entsprechen, was nicht immer der Fall sein muß [7].

### 3.2.2. Spektrale Verteilung - Terzbewertung

Im weiteren soll insbesondere die spektrale Verteilung des Mikrophonrauschens betrachtet werden. Hierzu eignet sich besonders die Effektivwert-Messung mit Terzfiltern [8]. Diese ist auf bestehenden Meßsystemen implementiert und bietet besonders bei höheren Frequenzen eine gute Näherung an die Zwicker'schen Frequenzgruppen, die das psychoakustisch legitimierte Optimum für diese Art von Messung wären [9,10].



### 3.3. Dynamische Mikrophone

Dynamische Mikrophone zeigen ein prinzipiell weißes Rauschspektrum, vergleichbar einem einfachen Widerstand. Mit gehörig stärkerer Gewichtung höherfrequenter Anteile liegen die CCIR-bewertete Angaben damit weit über den unbewerteten. Bei Terzbewertung ergibt sich ein zu höheren Frequenzen ansteigender Verlauf.

### 3.4. Kondensatormikrophone

Bei hochwertigen Kondensatormikrophenen hingegen ergibt sich eine Dominanz der tieffrequenten Rauschanteile. Damit liegen die unbewerteten und die CCIR-bewerteten Meßwerte im allgemeinen nahe beieinander. Um typischerweise 10-12dB geringere Werte ergeben sich durch die A-bewertete Messung, aufgrund des „günstigeren“ Verlaufs der Bewertungskurve (ca. 6...8 dB), sowie der Effektivwertbildung (ca. 4 dB).

Anders als bei dynamischen Mikrophenen erzeugt bei Kondensatormikrophenen nicht nur die Ausgangsimpedanz den relevanten Rauschanteil. Durch geeignete Dimensionierung der Schaltung kann man bei Kondensatormikrophenen aber geringere Ersatzgeräuschpegel erreichen als bei dynamischen.

### 3.5. Weitere technische Daten

In den technischen Daten von Mikrophenen werden meist zusätzliche Angaben aufgeführt, die sich sämtlich aus dem Ersatzgeräuschpegel, dem Übertragungsfaktor sowie dem maximalen Schalldruckpegel bestimmen lassen. Der Zusammenhang dazu ist in Abbildung 10 dargestellt.

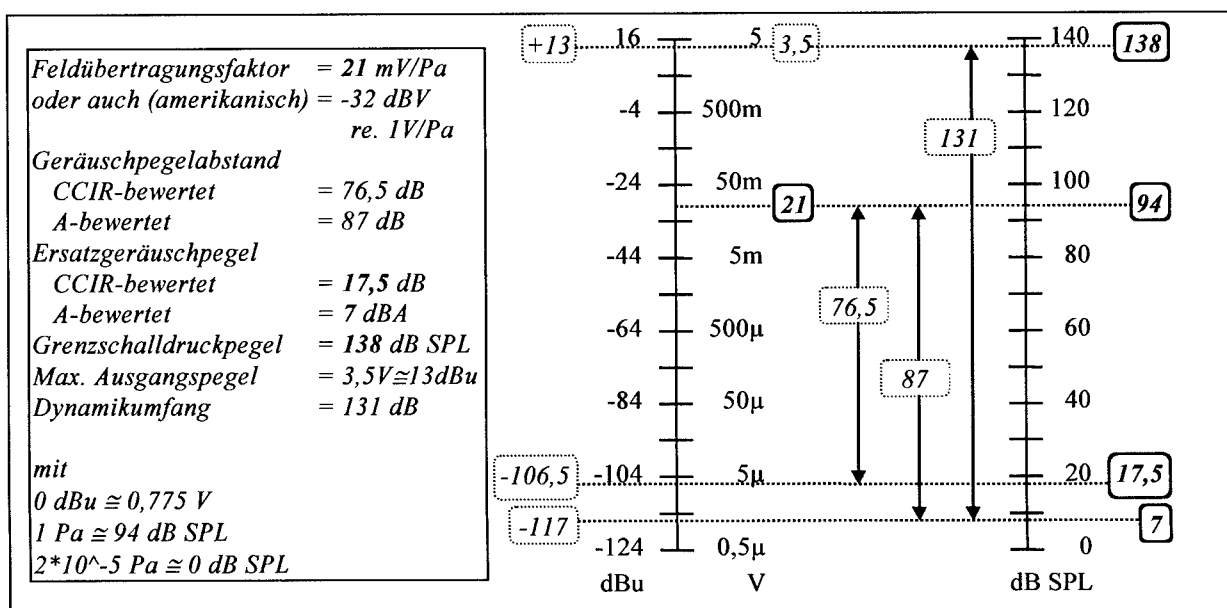
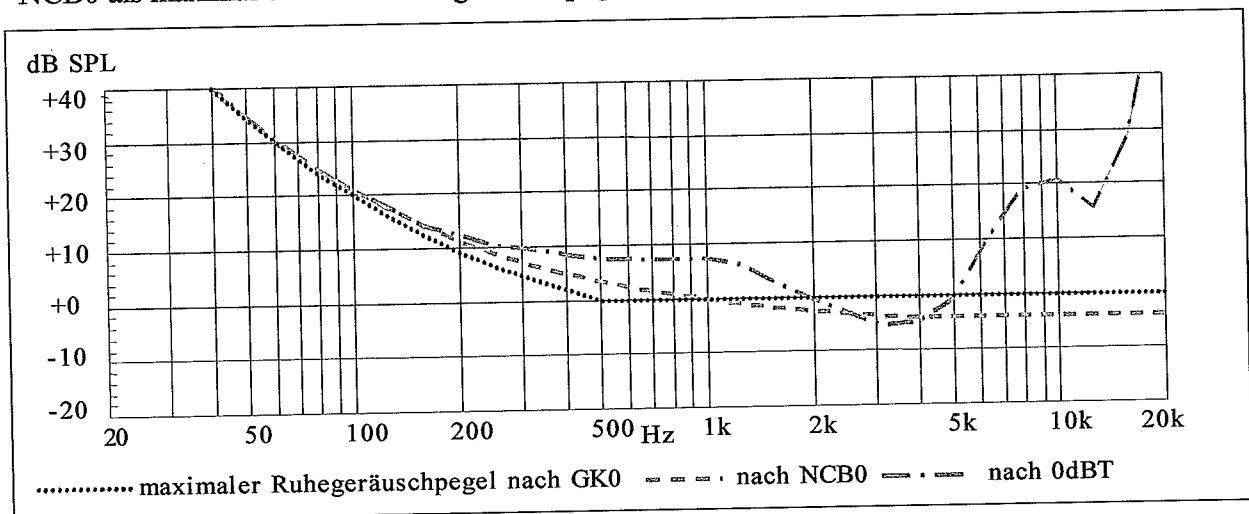


Abbildung 10. Technische Daten: Herleitung

#### 4.1. Anforderungen an das Aufnahmeumfeld

Um die bestmögliche Aufnahmequalität zu gewährleisten, muß natürlich das entsprechend störungsarme Umfeld gegeben sein. Anforderungen an Aufnahmestudios sind in verschiedenen internationalen bzw. Hausnormen festgelegt. Beispielhaft seien hier die Grenzkurve GK0 in Terzmessung aus DIN 15996 [11], sowie die 0 dB-T und NCB0-Kurven aus [9] dargestellt. Die 0dB-T-Kurve ist der menschlichen Hörschwelle nachempfunden. Für kritischste Anwendungen, wie Hörspielproduktionen und kammermusikalische Aufnahmen, werden z.B. GK0, 0dB-T oder NCB0 als maximal erlaubte Dauergeräuschpegel empfohlen.



**Abbildung 11.** Maximal zulässige Dauergeräuschpegel in Aufnahmerräumen

Ein Mikrofon sollte also ein Eigenrauschen unterhalb dieser Grenzkurven aufweisen, um die Aufnahmequalität geringstmöglich zu beeinträchtigen. Der maximal zu erwartende Schallpegel muß verzerrungsfrei übertragen werden. Dieser Dynamikbereich sollte, möglichst ohne das Mikrofon durch schaltbare Vordämpfung (s.o.) anpassen zu müssen, von allgemeintauglichen Studio-Mikrofonen verarbeitet werden können.

#### 4.2. Mikrofonvorverstärker

In der Aufnahmekette folgt dem Mikrofon ein Mikrofonverstärker, sei es als Teil des Mischpults, sei es als separates Gerät. Die Funktion eines Vorverstärkers ist vornehmlich, wenn man ihn nicht bewußt als klangbildendes „Effektgerät“ betrachtet, den (signalabhängig) geringen Ausgangspegel eines Mikrofons auf den üblichen Studiopegel anzuheben. Der Dynamikbereich und das teils exzellente Rauschverhalten, das moderne Mikrofone liefern, sollten durch das Eigenrauschen des folgenden Vorverstärkers selbstverständlich nicht beeinträch-

tigt werden. Dennoch ist der Informationsgehalt vieler technischer Dokumentationen in dieser Hinsicht sehr dürftig. Zudem ist es manchmal etwas schwierig, die Korrelation zwischen Mikrophondaten und angegebenen Vorverstärkerdaten herzustellen.

Es wird zwar gelegentlich behauptet, das Rauschverhalten eines Vorverstärkers werde erst kritisch bei großen Verstärkungen, z.B. wegen großer Aufnahmeabstände. Gerade bei großen Verstärkungswerten ist ein Rauschverhalten nahe dem physikalisch Möglichen mit modernen Operationsverstärkern relativ einfach zu erreichen. Zu berücksichtigen ist eher das Rauschverhalten bei Verstärkungen  $< 20$  dB. In diesem Bereich steigt das auf den Eingang bezogene Rauschen überproportional an. Sollen große Dynamikbereiche übertragen werden, muß gelegentlich eine solche geringe Verstärkung gewählt werden, um den Vorverstärker nicht zu übersteuern. In einem solchen Fall kann der Rauschanteil eines nicht-idealen Vorverstärkers z.B. um 15 dB über dem des Mikrophons liegen!

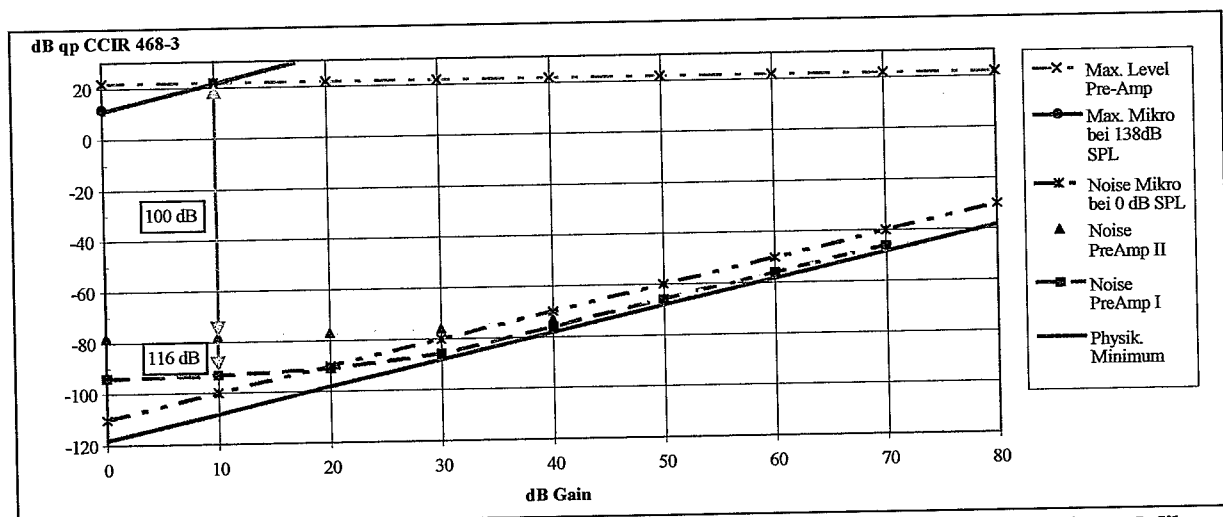


Abbildung 12. Pegeldiagramm: Maximale Aussteuerbarkeit und Eigenrauschen Mikrofon/Vorverstärker als Grenzen der maximalen Dynamik (CCIR-bewertet).

#### 4.3. Mikrophon und Vorverstärker als Kombination

Beispielhaft seien die technischen Daten eines Mikrophons und zweier Vorverstärker in Abbildung 12 dargestellt. Die Maximal-Kurve der Vorverstärker ergibt sich mit +22 dBu aus der internen Übersteuerungsgrenze. Die Noise-Kurven der Vorverstärker stellen das CCIR-bewertete Rauschen am Ausgang bei einem Eingangsabschluß mit  $200 \Omega$  dar. Nur bei großen Verstärkungen werden Rauschwerte nahe dem physikalischen Minimum erreicht. Das physikalische Minimum ist mit ca. -118 dB CCIR „auf den Eingang bezogenes Rauschen“ gegeben. Dieses ergibt sich aus der Addition von Rauschen am Ausgang und gewählter Verstärkung.



Die obere Mikrofonkurve stellt das maximale Ausgangssignal von +13 dBu eines Mikrophons mit 21 mV/Pa bei 138 dB SPL dar. Die untere Mikrofonkurve ergibt sich aus dem Eigenrauschen des Mikrophons, das hier mit -108 dB CCIR  $\cong$  17,5 dB-CCIR angenommen ist. Dies liegt bereits unterhalb der Ruhegeräuschpegel aus 4.1., wie weiter unten gezeigt wird.

Abbildung 12 zeigt, daß bei größeren Verstärkungswerten das Rauschen des Mikrophons überwiegt. Das Rauschen hochwertiger Vorverstärker geht demnach nicht relevant in das Signal ein. Der Dynamikbereich wird bei diesen Verstärkungswerten „nach oben“ durch die maximale Aussteuerbarkeit der Vorverstärker begrenzt.

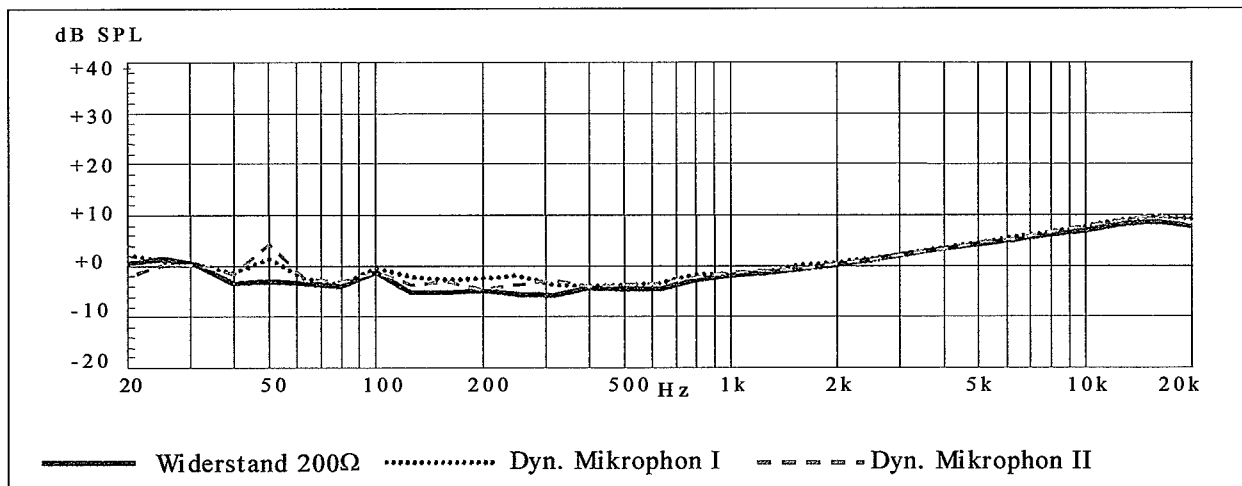
Bei kleineren Verstärkungswerten (0-30dB) allerdings zeigen sich Unterschiede im Rauschverhalten verschiedener Vorverstärker. Hier erkennt man, daß das Mikrophonrauschen durch das Verstärkerrauschen weitgehend überdeckt wird. Die Dynamik des Mikrophons wird, von den maximal möglichen 120 dB (CCIR-bewertet), im besten Fall auf 116 dB begrenzt. Bei einem ungeeigneten Vorverstärker ergibt sich eine Einschränkung auf sogar nur 100 dB Dynamik! Verständlicherweise werden in den technischen Daten von Vorverstärkern Rauschwerte bei geringen Verstärkungen seltener publiziert.

## 5. Dynamikbereiche von Mikrofon und Vorverstärker

Die Dynamikbereiche von Mikrofon und Vorverstärker können „nach oben“, d.h. zu großen Signalwerten hin, relativ einfach erweitert werden. Bei transformatorlosen Mikrofonen werden, wie beschrieben, Werte erreicht, die eine weitere Ausdehnung nicht sinnvoll erscheinen lassen. In den folgenden Abbildungen wird das z.Zt. technisch Machbare in Bezug auf das Rauschverhalten dargestellt. Um die Korrelation zu den Ruhegeräuschkurven herzustellen, wird das Rauschen terzbewertet analysiert und, unter Berücksichtigung der Empfindlichkeit des Mikrophons, als äquivalenter Schalldruckpegel dargestellt.

### 5.1. Dynamisches Mikrofon

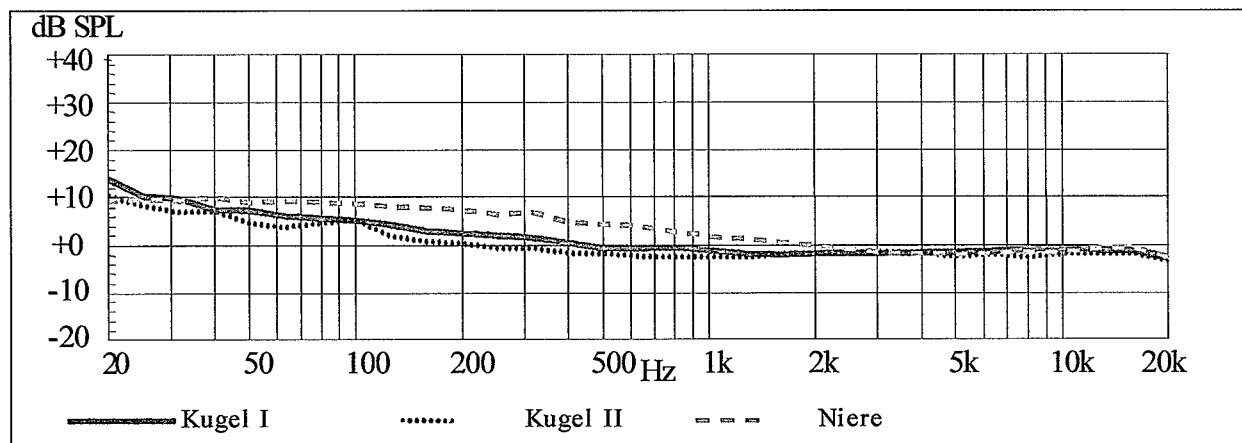
Das Rauschverhalten des dynamischen Mikrophons ist durch das „weiße“ Widerstandsrauschen seines Quellwiderstands bestimmt. Die Kurve des mit einem 200 $\Omega$ -Widerstand abgeschlossenen Vorverstärker (Abbildung 13) zeigt auf, daß sich das gemessene Rauschen fast ausschließlich aus dem Eigenrauschen von Widerstand plus Vorverstärker zusammensetzt. Man erkennt den typischen Anstieg des terzbewerteten Rauschens zu hohen Frequenzen hin. Durch die geringe Empfindlichkeit des Mikrophons ergibt sich ein relativ hoher Ersatzgeräuschpegel.



**Abbildung 13.** Dynamische Mikrophone: Terzbewertete Darstellung des Eigenrauschens. Ersatzgeräuschpegel: 24,5dB (20...20kHz), 30dB CCIR, 16,5dB-A (inkl. Vorverstärker).

### 5.2. Kleinmembran-Kondensatormikrophone

Das Rauschverhalten der in Abbildung 14 dargestellten Kleinmembran-Mikrophone ist typisch für Kondensatormikrophone. Man erhält ein zu hohen Frequenzen abfallendes Terzspektrum. Die unterschiedlichen Kapselkapazitäten bewirken dabei leicht unterschiedliche Verläufe. Die Empfindlichkeit dieser Mikrophone ist fast 20 dB größer als die der dynamischen Mikrophone in Abbildung 13. Obwohl der elektrische Pegel des Rauschens der Kondensatormikrophone zwar größer ist, ergibt sich damit ein geringerer Ersatzgeräuschpegel.



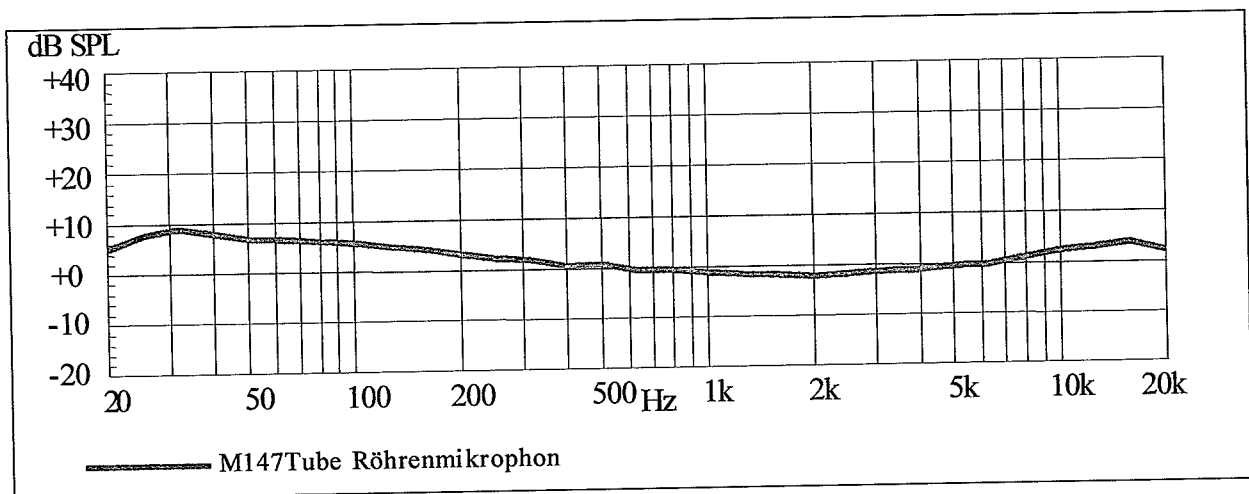
**Abbildung 14.** Kleinmembran-Kondensatormikrophone: Terzbewertete Darstellung des Eigenrauschens. Ersatzgeräuschpegel: 27...30dB(20...20kHz), 25...27dB CCIR, 16dB-A.

### 5.3. Röhrenmikrophon

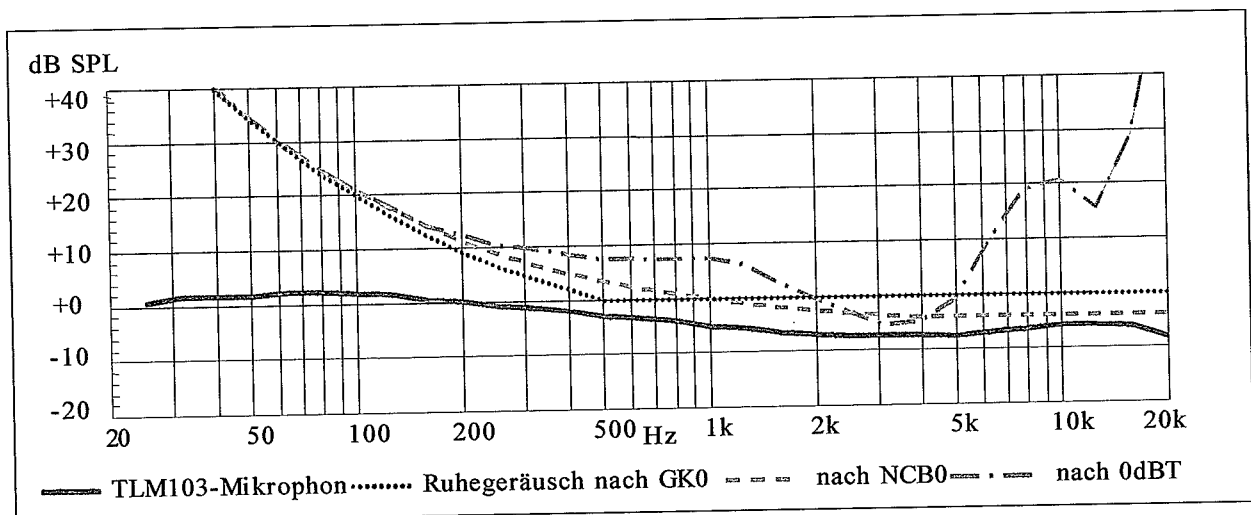
Das Rauschspektrum dieses modernen Röhrenmikrophons verläuft dem der Kleinmembran-Mikrophone sehr ähnlich und zeigt, daß auch Röhrenmikrophone sehr rauscharm gestaltet werden können. Zu höchsten Frequenzen ist ein leichter Anstieg zu erkennen, der sich im ver-



gleichsweise höheren CCIR-bewerteten Ersatzgeräuschpegel äußert. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit des Mikrophons ist das Vorverstärkerrauschen vernachlässigbar.



**Abbildung 15.** Röhren-Kondensatormikrophon: Terzbewertete Darstellung des Eigenrauschens. Ersatzgeräuschpegel: 25 dB (20...20kHz), 25 dB CCIR, 12 dB-A.



**Abbildung 16.** Transformatorloses Großmembran-Kondensatormikrophon: Terzbewertete Darstellung des Eigenrauschens im Vergleich zur Hörschwelle. Ersatzgeräuschpegel: 23,5 dB (20...20kHz), 17,5 dB CCIR, 7 dB-A.

#### 5.4. Extrem rauscharmes Großmembran-Mikrophon

Die Grenzen derzeitiger Studio-Mikrophone werden in Abbildung 16 gezeigt. Dieses Mikrophon kann durch seine rauscharme Schaltung sowie die hohe Empfindlichkeit der Großmembrankapsel erstmals ein Terzspektrum aufweisen, das vollständig auch die „härtesten“ Anforderungen an den Ruhegeräuschpegel unterbietet. Die verbleibenden Rauschteile im aufgenommenen Nutzsignal werden sich dementsprechend aus Umgebungsgeräusch (Abbildung 11), Vorverstärkerrauschen (Abbildung 12) und geringem Mikrophonrauschen (Abbildung 16) zu-



sammensetzen. Wie aus Abbildung 8 zu erkennen, besteht das Mikrofonrauschen schon zu einem relevanten Anteil auch aus dem „Rauschen“ der Luft, das die physikalische Grenze des Möglichen darstellt und darüberhinaus keine weiteren Verbesserungen zuläßt.

### 5.5. Einschränkungen

Die aufgezeigte, mit analogen Ketten erreichbare maximale Dynamik kann durch ungeeignete Glieder in der Aufnahmekette eingeschränkt werden. Die technischen Daten von Consumer- oder Home-Recording-Equipment weisen oft nur sehr viel geringere Maximalpegel auf, bei gleichzeitig höheren Rauschwerten.

Aber auch die Möglichkeiten bisheriger Analog-Digital-Wandler und Mikrophone mit eingebautem A/D-Wandler stellen eine Verringerung des Dynamikbereichs dar, vergleichbar dem zusätzlichen Rauschen nicht-idealer Vorverstärker. Auch bisherige „24-bit“-Anwendungen zeigen eine maximale A-bewertete (!) Dynamik von 120 dB-A auf, entsprechend 20 Bit realer Auflösung (bzw. ca. 110dB CCIR-bewertet). Der Dynamikbereich moderner Mikrophone wird damit um ca. 10 dB eingeengt. Die mögliche Anpassung des Mikrophonausgangssignals an die jeweilige Aussteuerung ist ein ungeliebtes Behelfsmittel, das seit der Einführung der transformatorlosen Ausgangsschaltung eigentlich obsolet geworden ist. Ob die Digitalwandlung die noch ausstehenden 10 dB Dynamik wird beisteuern können, um den Dynamikbereich der besten analogen Kondensatormikrophone zu übertragen, bleibt abzuwarten.

## 6. Zusammenfassung

Wie gezeigt wurde, kann das Eigenrauschen moderner Kondensatormikrophone unterhalb der Hörschwelle und damit unter dem Ruhegeräuschpegel auch der besten Aufnahmeräume liegen. Die obere Dynamikgrenze liegt dabei sehr hoch und ist nicht prinzipiell beschränkt. Zur maximalen Ausnutzung dieses sehr weiten Dynamikbereichs sind allerdings Vorverstärker höchster Güte notwendig, damit der Vorverstärker weder durch sein Rauschen dominiert, noch Verzerrungen bei großen Pegeln beiträgt, und damit die Signalqualität beeinträchtigt.



## 7. Literatur

- [1] Dickreiter, M., Mikrofon-Aufnahmetechnik, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1995
- [2] M. Rieländer, M. [Hrsg.], Reallexikon der Akustik, Frankfurt/Main, 1982
- [3] IEC 60268-4, Sound System Equipment, Part 4: Microphones, 1998
- [4] Hibbing, M. & G.Griese, New Investigations on Linearity Problems of Capacitive Transducers, Preprint 1752, 68<sup>th</sup> AES Convention, Hamburg, 1986
- [5] Peus, S., Measurements on Studio Microphones, Preprint 4617, 103<sup>th</sup> AES Convention, New York, 1997
- [6] Oberst, H., Eine Methode zur Erzeugung extrem starker stehender Wellen in Luft, Akust. Z., 5, S. 27-38, 1940
- [7] Homann, B., Berausende Mikrofone, Workshop Nr. 12, 1997
- [8] DIN IEC 268-1, Elektroakustische Geräte, Allgemeines, Juli 1988
- [9] Cohen, E.A. & L.D. Fielder, Determining Noise Criteria for Recording Environments, J. Audio Eng. Soc., vol.40(5), S. 384-402, May 1992
- [10] Fielder, L.D., Dynamic-Range Issues in the Modern Digital Audio Environment, JAES 43(5), 1995 May J. Audio Eng. Soc., vol.43 (5), S. 322-339, May 1995
- [11] DIN 15996, Elektr. Laufbild- und Tonbearbeitung in Film-, Video-und Rundfunkbetrieben, April 1996