

Kommunikationstechnik I

Prof. Dr. Stefan Weinzierl

Musterlösung 3. Aufgabenblatt

1. Nahfeld und Fernfeld

- 1.1 Beschreiben Sie die drei unterschiedlichen Kriterien, unter denen die Begriffe „Nahfeld“ und „Fernfeld“ definiert werden.

Es existieren unterschiedliche Kriterien, die die Begriffe Nah- und Fernfeld definieren, die auf unterschiedliche Eigenschaften des Schallfelds Bezug nehmen.

Das *erste* Kriterium besagt, dass es im Nahfeld ortsabhängig starke Amplitudenunterschiede der Teilstrahler am Hörerort gibt. Befindet man sich also in der Nähe einer ausgedehnten Schallquelle, dann ist der Abstand zu den einzelnen Teilstrahlern sehr unterschiedlich, die Amplitude, mit der die Schallwellen der einzelnen Teilstrahler den Hörerort erreichen sind dementsprechend deutlich verschieden.

Als Beispiel kann man eine Lautsprecherzeile betrachten, und in dieser Lautsprecherzeile die beiden äußersten Lautsprecher, die mit der gleichen Lautstärke abstrahlen. An einem Punkt in der Nähe des einen Lautsprechers wird der Schalldruck des entfernteren Lautsprechers schon deutlich stärker abgenommen haben, als der Schalldruck des näheren Lautsprechers. Je weiter man sich von der Schallquelle entfernt, desto weniger fallen diese unterschiedlichen Abstände ins Gewicht und man kann davon ausgehen, dass die Amplitudenabnahme für alle Teilstrahler sich mehr und mehr angleicht, da die Schallwellen aller Teilstrahler ungefähr den gleichen Weg zum Hörerort zurücklegen.

Es gilt das Fernfeldkriterium:

$r \gg h$, wobei h die Abmessungen der Schallquelle bezeichnet.

Wichtig hierbei ist, dass über die unterschiedliche Phasenlage, mit der die einzelnen Schallwellen eintreffen hierbei nichts ausgesagt wird, dies wird durch das zweite Kriterium ausgedrückt.

Nach dem *zweiten* Kriterium wird das Fernfeld dadurch charakterisiert, dass sich die Phasenunterschiede, mit denen sich die Beiträge verschiedener Bereiche des Strahlers beim Betrachter überlagern, als Funktion des Winkels beschreiben lassen, unter dem sich der Betrachter vom Mittelpunkt des Strahlers aus gesehen befindet.

In der Nähe einer ausgedehnten Schallquelle sind die Überlagerungen (Interferenzen) der Teilstrahler sehr komplex. Betrachtet man z.B. das Interferenzmuster zweier Punktquellen, und betrachtet diese als Endpunkte

eines Linienstrahlers, dann wird schnell klar, dass die Phasenunterschiede in der Nähe der beiden Quellen nicht in Abhängigkeit des Winkels angegeben werden können.

Befindet man sich jedoch in größerer Entfernung zur Schallquelle, dann lässt sich vereinfachend annehmen, dass die Schallwellen unterschiedlicher Teilstrahler den Betrachter annähernd parallel erreichen. In diesem Fall lässt sich die Wegdifferenz (und damit auch die Phasendifferenz) beschreiben als $r_2 - r_1 = h \cos \theta$, sie hängt also nur noch vom Winkel ab.

Da eine bestimmte Wegdifferenz für verschiedene Frequenzen unterschiedliche Phasenunterschiede bewirkt, ist der Nahfeld-/Fernfeld-Übergang frequenzabhängig. Es gilt das Fernfeldkriterium:

$$r > \frac{h^2}{\lambda}$$

Dieses Kriterium ist die Voraussetzung dafür, dass eine Richtwirkung der Schallquelle angegeben werden kann. Im Nahfeld kann man über bevorzugte und benachteiligte Abstrahlrichtungen einer Schallquelle keine Aussage machen.

Das *dritte* Kriterium beruht auf der Tatsache, dass Druck und Schnelle in entsprechender Entfernung von der Schallquelle phasengleich sind, während sie in der Nähe der Schallquelle um 90° phasenverschoben sind. Dies ist am einfachsten nachvollziehbar, wenn man sich die Gleichungen für den Schalldruck und die Schallschnelle ansieht:

Schalldruck:
$$p(r) = \frac{A}{r} e^{-jkr}$$

Schallschnelle:
$$v(r) = \frac{A}{r} \left(\frac{1}{\rho_0 c} + \frac{1}{j\omega\rho_0 r} \right) e^{-jkr}$$

$$= \frac{A}{r} \left(\frac{1}{\rho_0 c} - j \frac{1}{\omega\rho_0 r} \right) e^{-jkr}$$

Betrachtet man den Fall, das man sich in sehr großer Entfernung von der Schallquelle befindet, also $r \rightarrow \infty$, dann wird der Klammerterm in der Gleichung der Schallschnelle rein reell, da der zweite Bruch gegen 0 geht. Die Phasen von Druck und Schnelle sind demnach gleich. Desweiteren nehmen Druck und Schnelle mit $1/r$ ab.

Betrachtet man den umgekehrten Fall, dass man sich sehr nah an der Schallquelle befindet, dann wird der zweite Bruch in den Klammern sehr groß und überwiegt den ersten Bruch, sodass sich eine Phasenverschiebung von 90° bzw. $\pi/2$ ergibt. Die Schnelle nimmt mit $1/r^2$, der Druck jedoch weiterhin mit $1/r$ ab.

Als Übergang zwischen Nah- und Fernfeld bezeichnet man nun den Abstand r , bei dem die Phasenverschiebung zwischen Druck und Schnelle genau 45° beträgt. Dies ist genau dann der Fall, wenn die beiden Brüche im Klammerterm der Gleichung für die Schallschnelle gleich groß sind. Demnach ergibt sich als Fernfeldbedingung:

$$\frac{1}{\omega\rho_0 r} < \frac{1}{\rho_0 c} \text{ bzw., wenn man die Ungleichung umstellt:}$$

$$r > \frac{c}{\omega} = \frac{\lambda}{2\pi}$$

- 1.2 Betrachten Sie die Abstrahlung einer Klarinette ($h = 0.66 \text{ m}$) und berechnen Sie den Übergang von Nahfeld und Fernfeld für jedes der drei Kriterien. Für das zweite und dritte Kriterium sei angenommen, der Hörer befindet sich in einer Entfernung von $1,50 \text{ m}$ vom Instrument. Für welche Frequenzen befindet er sich im Nahfeld, für welche im Fernfeld?

1. Kriterium:

$$r \gg 0.66 \text{ m}$$

2. Kriterium

$$r > \frac{h^2}{\lambda} = \frac{h^2 f}{c}$$

$$\Rightarrow f < \frac{r \cdot c}{h^2} = \frac{1,50 \text{ m} \cdot 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{(0,66 \text{ m})^2} = 1,18 \text{ kHz}$$

3. Kriterium

$$r > \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f}$$

$$\Rightarrow f > \frac{c}{2\pi r} = \frac{343 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2\pi \cdot 1,50 \text{ m}} = 36,39 \text{ Hz}$$

- 1.3 Welche Konsequenzen ergeben sich aus den unterschiedlichen Kriterien für die Tonaufnahme?

1. Kriterium:

In der Nähe des Instruments ergibt sich eine starke Abhängigkeit der Klangfarbe von der Position, an der das Mikrofon aufgestellt wird. Befindet man sich in der Nähe des Mundstücks, wird dieses wesentlich stärker bevorzugt, als der Klang der aus den Klappenöffnungen kommt. In größerer Entfernung zum Instrument verschwindet dieser Unterschied.

2. Kriterium:

Befindet man sich in der Nähe der Klarinette, dann kann schon eine kleine Änderung des Aufstellungsortes des Mikrofons eine deutliche Änderung der Klangfarbe hervorrufen, da an den beiden Orten jeweils unterschiedliche Frequenzbereiche von Abschwächung und Verstärkung betroffen sind.

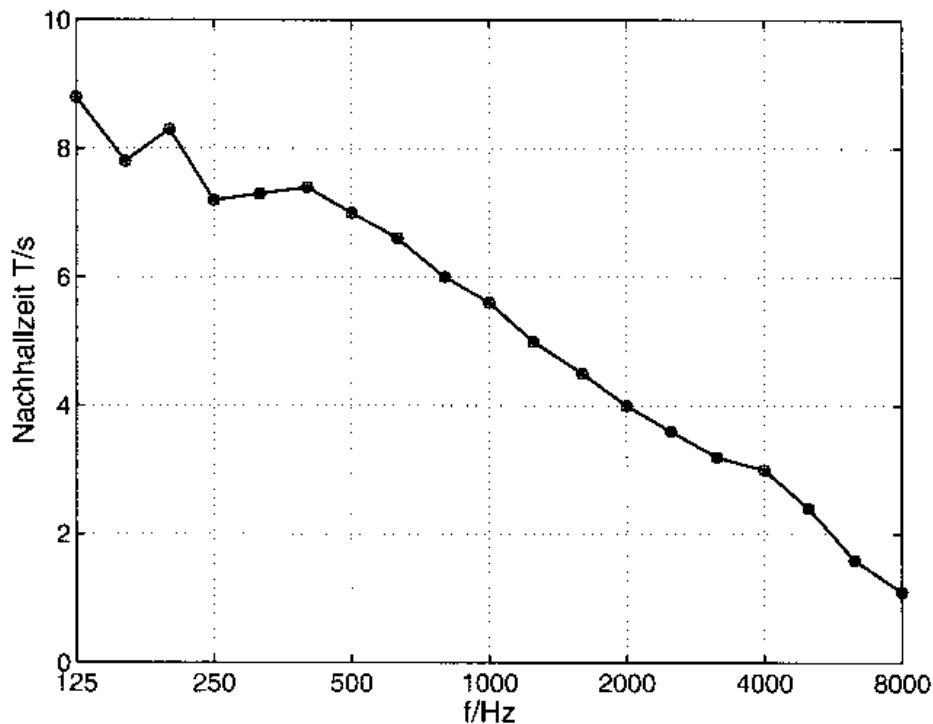
Darüber hinaus gelten die angegebenen Abstrahlcharakteristiken des Instruments nur im Fernfeld. In unserem konkreten Beispiel, ist also die Abstrahlcharakteristik des Instruments für tiefe Frequenzen besser eingehalten als für hohe.

3. Kriterium:

Für Mikrofone, deren Ausgangsspannung proportional zur Schallschnelle ist (Druckgradientenempfänger), ist in der Nähe der Schallquelle ein Anstieg der tiefen Frequenzen im Vergleich zu einer entfernteren Position zu verzeichnen.

2. Absorptionsgrad und Nachhallzeit

Die Nachhallzeit im Hallraum des ITA der TU Berlin ($V=200 \text{ m}^3$) hat folgenden Frequenzgang:



2.1 Wie groß ist in diesem Raum der Hallabstand einer omnidirektionalen Quelle bei 1000 Hz ?

$$\begin{aligned}
 r_H &= 0,057 \cdot \Gamma_{st} \cdot \sqrt{\frac{V}{T_{60}}} \\
 &= 0,057 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{200 \text{ m}^3}{5,5 \text{ s}}} \\
 &= 0,34 \text{ m}
 \end{aligned}$$

- 2.2 Warum benutzt man für Messungen des Absorptionsgrades einen Hallraum und keinen „normalen“ Raum ? Welches andere Verfahren zur Bestimmung von Absorptionsgraden gibt es ? Warum liefert es andere Werte für α ?

Viele Absorber zeigen für unterschiedliche Schalleinfallrichtungen unterschiedliche Absorptionseigenschaften. Um den Absorptionsgrad eines bestimmten Materials zu bestimmen ist es daher notwendig, Schalleinfall aus möglichst vielen verteilten Richtungen zu gewährleisten. Im Hallraum wird ein ideales Diffusschallfeld angenähert. Der so erhaltene Absorptionsgrad ist demnach ein über alle Einfallrichtungen gemittelter.

Ein anderes Verfahren zur Messung des Absorptionsgrades ist die Messung im Kundtschen Rohr. Das Kundtsche Rohr ist eine beidseitig geschlossene Röhre, in der annähernd ebene Wellen erzeugt werden können. Am Ende des Rohres wird das zu untersuchende Absorbermaterial eingebracht und der Absorptionsgrad bestimmt. Aufgrund des Messaufbaus gilt dieser Absorptionsgrad nur für frontalen Schalleinfall und liefert demnach einen anderen Wert für α als das oben beschriebene Verfahren.

- 2.3 Im Hallraum wird ein Absorptionsmaterial mit einer Fläche von 5 m² auf dem Boden angebracht. Die Nachhallzeit sinkt auf folgende Werte:

125	250	500	1000	2000	4000
8.0 s	6.3 s	6.0 s	4.5 s	2.8 s	2.2 s

Berechnen Sie an diesen Frequenzpunkten die Absorptionsgrade des Materials nach Sabine und tragen Sie sie in Kurvenform auf.

Verfahren zur Bestimmung des Absorptiongrads im Hallraum:

Auf Grundlage der Sabine'schen Nachhallformel wird zunächst die Nachhallzeit des leeren Hallraums gemessen und daraus die äquivalente Absorptionsfläche des Hallraums bestimmt:

$$T_{60,leer} = 0,163 \frac{V}{A_{leer}}$$

$$\Rightarrow A_{leer} = 0,163 \frac{V}{T_{60,leer}}$$

Daraufhin wird das absorbierende Material in den Raum eingebracht und erneut die Nachhallzeit gemessen. Für die äquivalente Absorptionsfläche gilt nun:

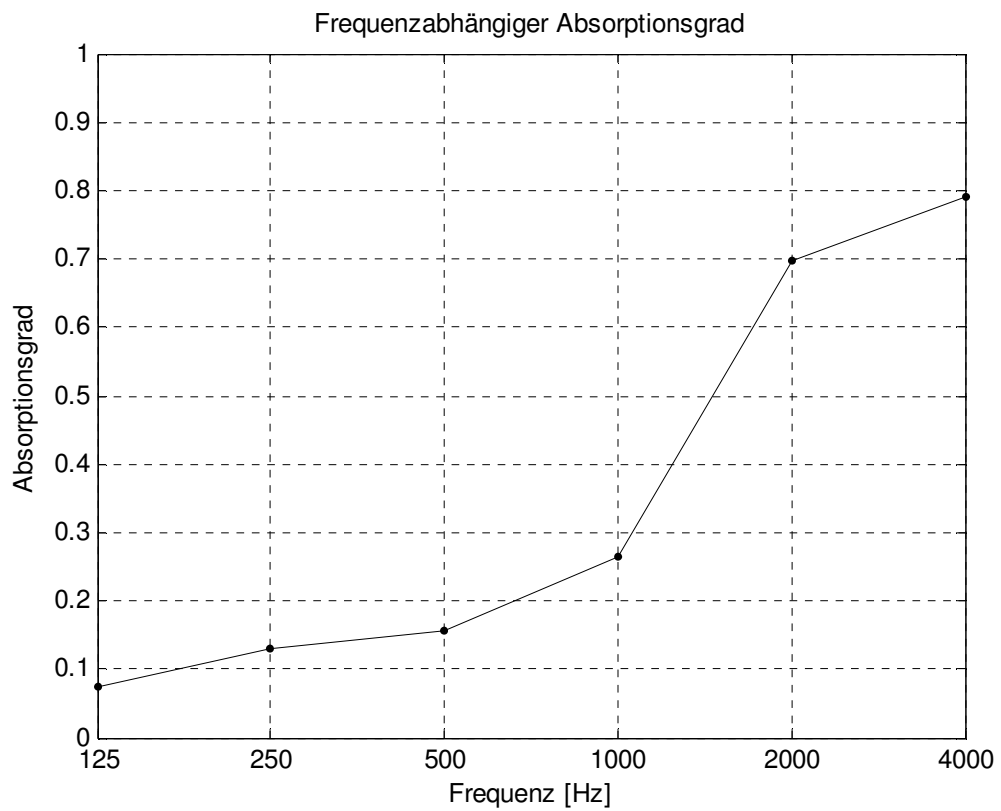
$A_{neu} = A_{leer} + \Delta A$, wobei $\Delta A = \alpha \cdot S$. α ist dabei der zu bestimmende Absorptionsgrad der Probe und S deren Fläche. Streng genommen müsste man A_{leer} noch um die Fläche der Probe reduzieren, da die Fläche ja von der Probe bedeckt wird, es zeigt sich jedoch, dass dieser Fehler im Vergleich zu Messungenauigkeiten der Nachhallzeit nur sehr wenig ins Gewicht fällt.

Durch Umstellen der Sabine'schen Nachhallformel erhält man den Absorptionsgrad:

$$T_{60,neu} = 0,163 \frac{V}{A_{neu}} = 0,163 \frac{V}{\alpha \cdot S + A_{leer}}$$

$$\Rightarrow \alpha = 0,163 \frac{V}{T_{60,neu} \cdot S} - \frac{A_{leer}}{S} = 0,163 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{T_{60,neu}} - \frac{1}{T_{60,leer}} \right)$$

Berechnung und Plot siehe Matlab-File ‚Aufgabe2_3.m‘



2.4 Welchen Absorbententyp vermuten Sie auf Grundlage der berechneten Absorptionsgrade ? Begründen Sie Ihre Antwort.

Das Diagramm zeigt, dass hohe Frequenzen deutlich stärker absorbiert werden als tiefe. Es handelt sich somit um einen Höhenabsorber. Typische Höhenabsorber sind poröse Absorber (z.B. offenporiger Schaumstoff).