

# Akustische Holografie und Holofonie

## Labor

**SS 2013**

22.05.2013 – 28.05.2013

## Planare Nahfeldholografie

Protokollführer:

Jan Dutz

Rafael Ludwig

Betreuer:

DI Dr. Franz Zotter



# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	2
2. Messungen.....	2
2.1 Messaufbau.....	2
2.2 Kalibrierung der Mikrofone.....	4
2.3 Messmethode.....	4
2.4 Auswertung der Messergebnisse.....	7
2.4.1 Erläuterung der Auswertungsmethoden.....	7
2.4.2 Graphische Darstellung der Ergebnisse.....	9
2.4.3 Interpretation der Ergebnisse.....	12
2.4.4 Messergebnisse bei Verwendung von $cvx$ mit einer L1-Norm.....	13
2.5 Auswertung der Messergebnisse des Labors vom SS 12.....	14
2.5.1 Graphische Darstellung der Ergebnisse.....	14
2.5.2 Interpretation der Ergebnisse.....	17
2.5.3 Vergleich verschiedener Ln-Normen bei der Verwendung von $cvx$ .....	17
3. Schlussfolgerung.....	19
4. Literaturverzeichnis.....	20

# 1. Einleitung

In dieser Übung wird vor einem 64-Kanal Mikrofonarray (8\*8 Kanal) eine quadratische Holzplatte positioniert, in deren Mitte sich ein Loch befindet. Hinter der Holzplatte befindet sich ein Lautsprecher, über den ein Sweep wiedergegeben wird. Die Holzplatte zwischen Lautsprecher und Array soll dabei dafür sorgen, dass so wenig Direktschall wie möglich zu den Mikrofonen gelangt. Dabei soll herausgefunden werden, wie gut es mit dem Diffusschall, der auf die Mikrofone trifft, möglich ist, die Position des Lochs in der Mitte zu bestimmen.

Dabei wird folgendermaßen vorgegangen: Der abgespielte Sweep wird von dem Mikrofonarray aufgezeichnet. Mithilfe der aufgezeichneten Sweeps und dem originalen Sweep werden daraufhin die Impulsantworten berechnet, mittels derer versucht wird, die Position des Lochs in der Platte zu berechnen. Dabei werden vier verschiedene Auswertungsmethoden verglichen: Zunächst wird untersucht, wie gut es mit der Schalldruckverteilung auf dem Array möglich ist, die Lochposition zu bestimmen. Danach wird versucht, mit der Fourierbasierten Holografie das Loch zu finden. Danach wird das Rayleigh-Integral zur Berechnung herangezogen. Zum Schluss wird noch die MATLAB-Toolbox *cvx* verwendet, die ein hilfreiches Werkzeug ist, um konvexe Probleme effizient zu lösen. Die einzelnen Ergebnisse der verschiedenen Auswertungsansätze werden anschließend verglichen.

## 2. Messungen

### 2.1 Messaufbau

Zur Schallfeldaufzeichnung wird, wie schon erwähnt, ein 64-Kanal Mikrofonarray verwendet. Die verbauten Mikrofone sind *Behringer ECM8000*. Die Signale der Mikrofone werden mittels AD-Wandlern der Marke *Presonus*, bzw. *Behringer* in das ADAT-Format gewandelt und anschließend über einen ADAT zu MADI Konverter via MADI an den PC weitergeleitet, wo die Auswertung erfolgt.

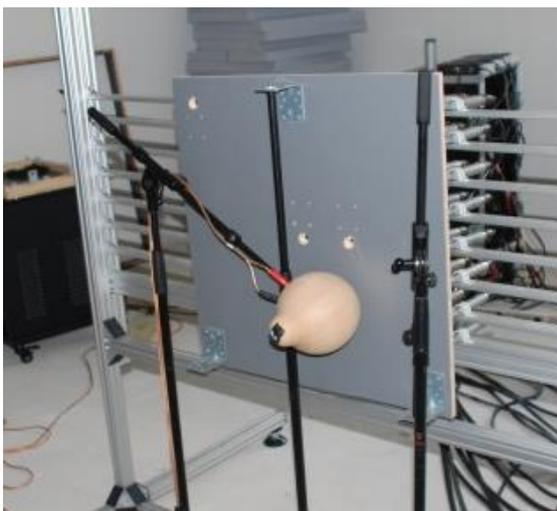
Der kleinste mögliche Abstand, in dem die Mikrofone im Array nebeneinander angeordnet werden können, beträgt dabei 7 cm. Um die Mikrofone alle im gleichen Abstand zueinander

anzuordnen, wird dieser Abstand auch für die horizontale Positionierung verwendet, sodass das Array schließlich eine Abmessung von 49\*49 cm besitzt.



**Abbildung 1: 8\*8 Kanal Mikrofonarray**

Vor dieses Array wird nun im Abstand von etwa 10 cm eine quadratische Holzplatte (60\*60 cm) gestellt, die eine unendliche Platte simulieren soll. In dieser Platte befindet sich mittig ein Loch mit einem Durchmesser von etwa 1 cm. Der Lautsprecher befindet sich dabei, aus Richtung der Mikrofone betrachtet, um wenige Zentimeter nach links unten von der Plattenmitte versetzt.



**Abbildung 2: Versuchsaufbau**

## 2.2 Kalibrierung der Mikrofone

Bevor mit der Messung begonnen werden kann, müssen noch die Pegel der Mikrofone zueinander angepasst werden. Dafür werden in einem vorgefertigten PD-Patch die Pegel jedes einzelnen Mikrofons gemessen, wobei sich währenddessen ein Kalibrator (94 dB, 1 kHz) auf der Spitze des Mikrofons befindet. Bei zu großer Abweichung wird am Vorverstärker die Verstärkung nachgeregelt. Hierbei wird darauf geachtet, dass der Pegel jedes einzelnen Mikrofons im Bereich von -16 bis -20 dB liegt. Die unterschiedlichen Pegelwerte werden abgespeichert und später in MATLAB geladen, um so die Pegelschwankungen bei der Messung ausgleichen zu können:

```
g=zeros(64,1);
for k=1:64
    x=wavread(['cal/cut_cal2013_05_28-' num2str(k) '.wav']);
    g(k)=sum(max(abs(fft(x)))));
end
g=min(g)./g;
```

## 2.3 Messmethode

Um die Impulsantworten der einzelnen Mikrofone zu erhalten, mittels derer das Schallfeld ausgewertet werden kann, wird, wie schon erwähnt, über den Lautsprecher hinter der Holzplatte ein Sinussweep von 20 Hz bis 4 kHz wiedergegeben. In der folgenden Abbildung ist der von einem einzelnen Mikrofon aufgezeichnete Sweep dargestellt. Grün eingerahmt kann man deutlich eine Resonanz erkennen, die sich im Bereich zwischen 1.5 bis 2 kHz befindet. Diese tritt wahrscheinlich durch die Position des Lautsprechers auf, da zwischen der Lautsprechermembran und der Holzplatte ein Luftvolumen eingeschlossen ist, welches diese Resonanz erzeugt.

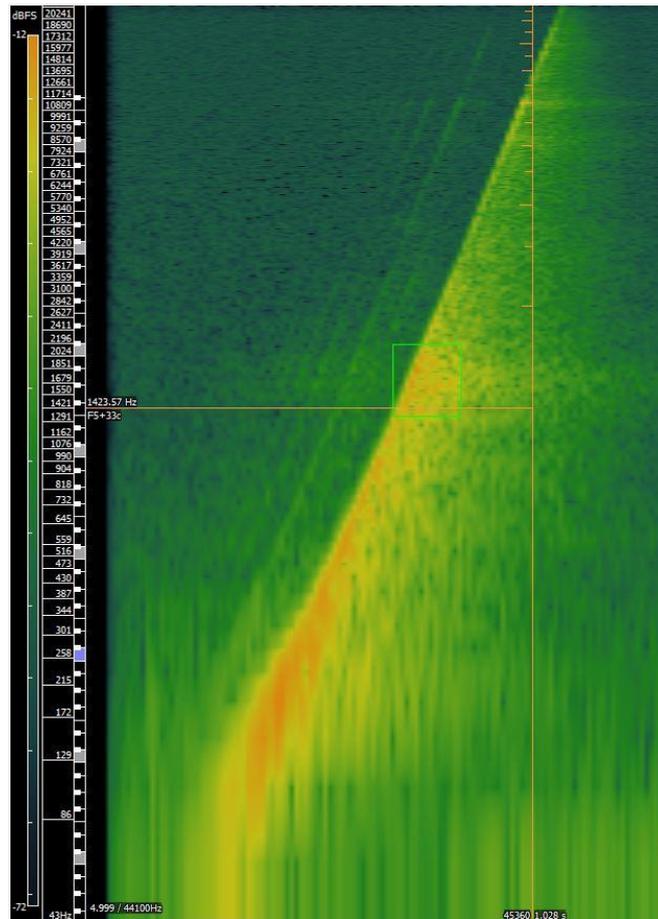


Abbildung 3: Spektrogramm des aufgezeichneten Sweeps

Sowohl der originale Sweep als auch die von den Mikrofonen aufgenommenen Sweeps werden daraufhin in MATLAB geladen. In MATLAB werden schließlich die einzelnen Impulsantworten berechnet. Dabei gilt für die Sweep-Messung einer Impulsantwort der Zusammenhang

$$h_i[n] = idft \left\{ \frac{dft\{y_i[n]\}}{dft\{x[n]\}} \right\}$$

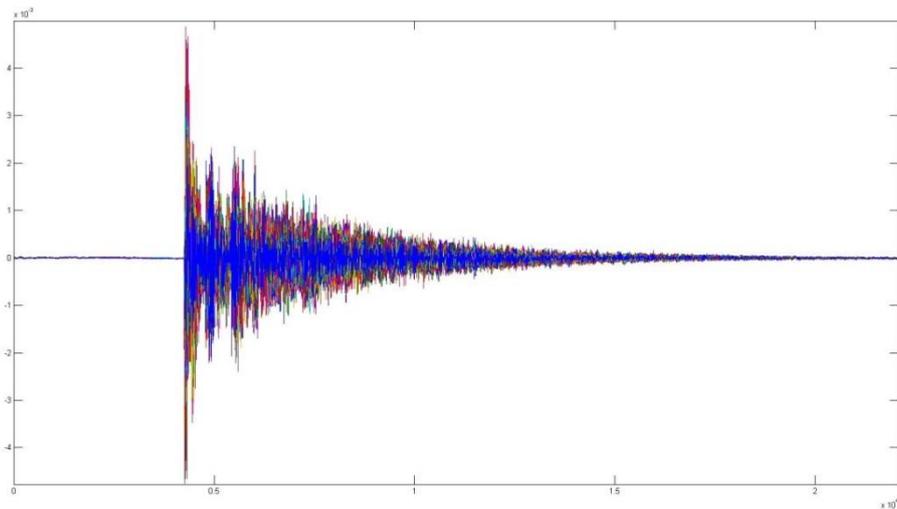
wobei  $x[n]$  dem vom Lautsprecher wiedergegebenen Sweep und  $y_i[n]$  den aufgezeichneten Mikrofonsignalen entspricht.

```
S=wavread('sweep.wav');
Y=wavread('PlatteMLoch.wav');

N=2^nextpow2(size(Y,1));

h=ifft(fft(Y,N)./ repmat(fft(S,N),1,64));
```

Alle Impulsantworten übereinander gelegt ergibt folgendes Bild:



**Abbildung 4: alle Impulsantworten der einzelnen Mikrofone**

Wie zu erkennen ist, beginnen die Impulsantworten erst bei ca. 4200 Samples. Dies hängt wohl mit der AD-DA-Buffer-Verzögerung zusammen, die wahrscheinlich rund  $66 \cdot 64$  Samples beträgt. Außerdem sind recht viele Reflexionen in den einzelnen Antworten enthalten. Daher werden in einem nächsten Schritt die einzelnen Impulsantworten erst ab dem 4200ten Sample betrachtet und nach 1024 Samples abgeschnitten und gefenstert, damit die folgenden Berechnungen durch möglichst wenig Reflexionen gestört werden.

```
Nstart=4200;
Nresp=1024;

h=h(Nstart+(0:Nresp-1),:)*diag(g);

Naus=100;
w=hanning(Naus*2+1);
w=flipud(w(1:Naus));

h(end-Naus+1:end,:)=diag(w)*h(end-Naus+1:end,:);

Nein=10;
w=hanning(Nein*2+1);
w=w(1:Nein);
h(1:Nein,:)=diag(w)*h(1:Nein,:);
save h.mat h
```

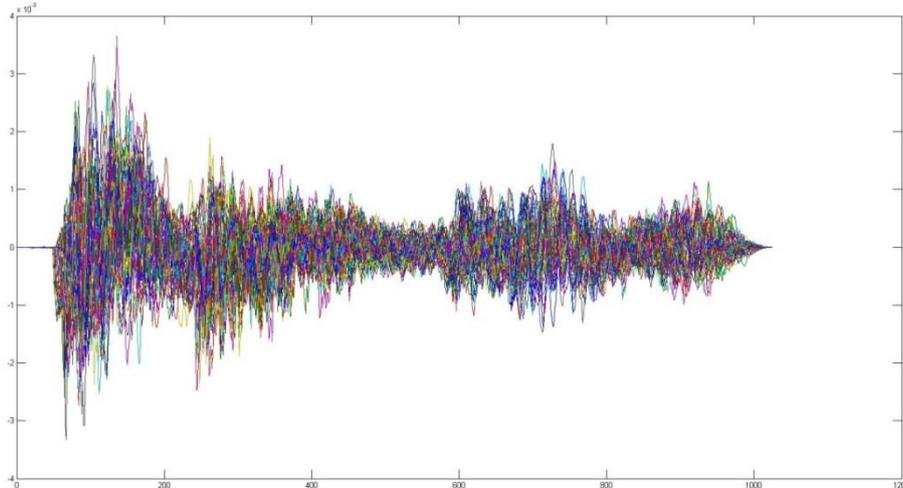


Abbildung 5: auf 1024 Samples beschränkte Impulsantworten

## 2.4 Auswertung der Messergebnisse

### 2.4.1 Erläuterung der Auswertungsmethoden:

Mit den von den Mikrofonen aufgezeichneten Impulsantworten ist es möglich die Wellenzahlspektren  $\Psi(k_x, k_y)$  zu bestimmen. Mit diesen Wellenzahlspektren lässt sich die Schalldruckverteilung auf dem Array beschreiben. Dieses Verfahren wird als erste Auswertungsmethode verwendet.

Der zweite Ansatz ist die Auswertung durch die Fourier-basierte Holografie. Holografie bezeichnet hierbei die Idee, nach der es möglich ist, mithilfe der Wellenzahlspektren, die die Schalldruckverteilung auf dem Array beschreiben, das Schallfeld in einem bestimmten Abstand parallel vom Mikrofonarray zu berechnen. Dadurch ist es also möglich, das Schallfeld auf der Platte zu analysieren.

Dabei gilt für das Feld an den 64 Positionen des Mikrofonarrays:

$$v_z(k_x, k_y) = \frac{k_z}{\omega \rho} \Psi(k_x, k_y)$$

Durch den Verschiebungssatz der Fourier Transformation

$$\Psi(k_x, k_y)|_{r+\Delta r} = \Psi(k_x, k_y)|_r e^{ik^t \Delta r}$$

folgt dabei für die Wellenzahlspektren der Punkte, die sich im Abstand  $r$  parallel zum Array befinden:

$$v_z(k_x, k_y)|_{r+\Delta r} = \frac{k_z}{\omega\rho} \Psi(k_x, k_y)|_r e^{ik^t\Delta r}$$

Danach werden die Messergebnisse mit dem Rayleigh-Integral ausgewertet. Beim Rayleigh-Integral wird der Schalldruck an einzelnen Positionen ermittelt, indem über Monopolquellen an der Platte integriert wird, wobei der Druckgradient an der Platte vorgegeben ist.

$$p = - \iint_{-\infty}^{\infty} \left( G \frac{\partial}{\partial z} p \right) dx dy$$

$G$  ... Green'sche Funktion  $\frac{e^{ikr}}{r}$

Zum Schluss wird noch mit der MATLAB-Toolbox *cvx* versucht, die Daten auszuwerten, die die Berechnungen mit dem konvexen Optimierer *cvx* durchführt. Hierbei handelt es sich um das diskretisierte Rayleigh-Integral, das nicht mehr der oben angeschriebenen skalaren Gleichung, sondern dem Matrixgleichungssystem

$$\mathbf{G} \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{p} = \mathbf{p}$$

entspricht. Diese Gleichung beschreibt die Abstrahlung der schallhart schwingenden, unendlichen Platte mit  $\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{p}$  in das Schallfeld durch  $G$ , das die entsprechenden Green'schen Funktionen zwischen den Punkten der Platte und den Mikrofonen im Schallfeld beinhaltet. Vorteilhaft ist hierbei, dass man die Ergebnisse von einer mikrofonseitig ziemlich groben Auflösung von  $8*8 = 64$  Punkten auf eine bessere Auflösung von beispielsweise  $80*80 = 640$  Punkten optimieren kann. Dadurch ergibt sich die Einschränkung, dass  $\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{p}$  überbestimmt ist. Zur Lösung unterbestimmter Gleichungen wird oft die Ln-Norm des Lösungsvektors minimiert.

$$\min \left( \left| \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{p} \right| \right)_n$$

wobei die Nebenbedingung  $\mathbf{G} \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{p} = \mathbf{p}$  gilt.

Die gewohnte Quadratminimierung, also Minimierung der L2-Norm, verwendet  $n=2$  und führt üblicherweise zu einem Lösungsvektor mit geringstmöglicher Koeffizientenenergie. Eine Lösung mit  $n=1$ , der Minimierung der L1-Norm, begünstigt Abbildungen in  $\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{p}$  mit wenigen vereinzelt Einträgen und ist daher eine Strategie zur Lokalisation örtlich vereinzelter Schwingungsvorgänge.

In der Praxis wird die Nebenbedingung etwas aufgelockert und kleine quadratische Abweichungen werden toleriert, um zu vermeiden, dass das *cvx*-Ergebnis nicht „*Not-a-Number*“ liefert. In der Regel gilt dann für die Nebenbedingung:

$$\left\| G \frac{\partial}{\partial z} p - p \right\|_{2^2} \leq \lambda$$

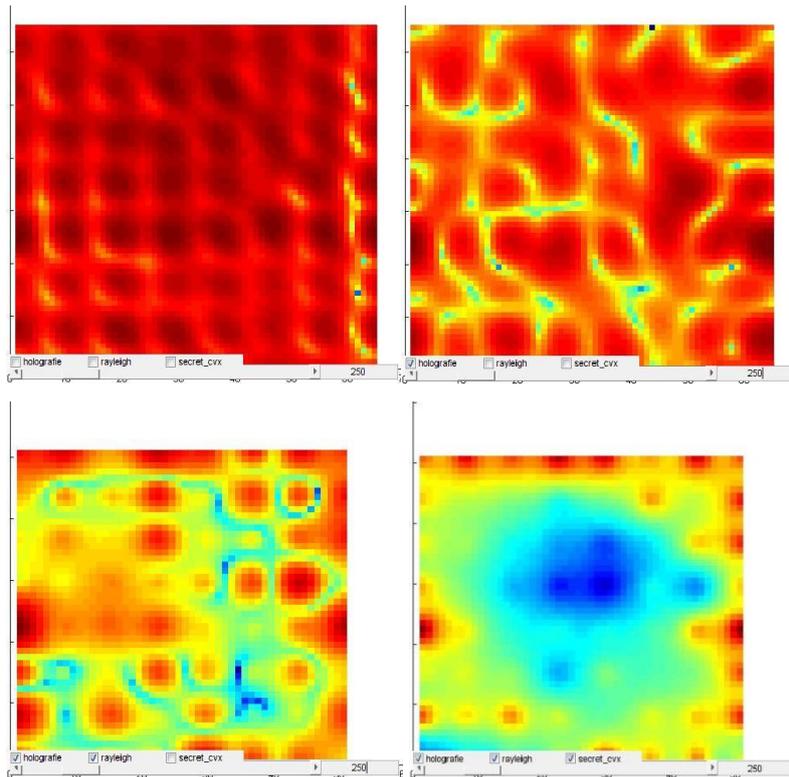
Für eine ausführlichere Erklärung von *cvx* sei auf [3] verwiesen.

Der Vollständigkeit halber noch der bei der Auswertung mit *cvx* verwendete MATLAB-Code:

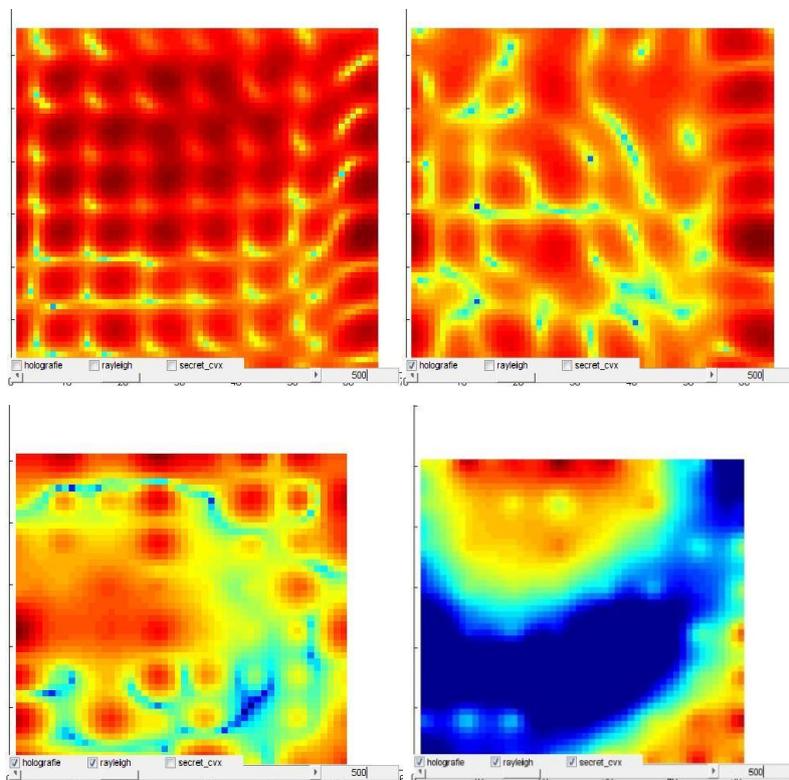
```
alpha=1.1;
lambda=0.1; % Parameter, der die Nebenbedingung abmildert
p=h_alle(:);
[U,S,V]=svd(G);
s=diag(S);
s=s+s(1)/30;
G=U*[diag(s), zeros(size(G,1),size(G,2)-size(G,1))] *V';
lx=size(G,2);
size(G),lx,size(p)
cvx_begin
    variable v(lx) complex;
    minimize norm(v,alpha);
    subject to
        norm(G*v-p,2)<=lambda
cvx_end
```

#### 2.4.2 Graphische Darstellung der Ergebnisse:

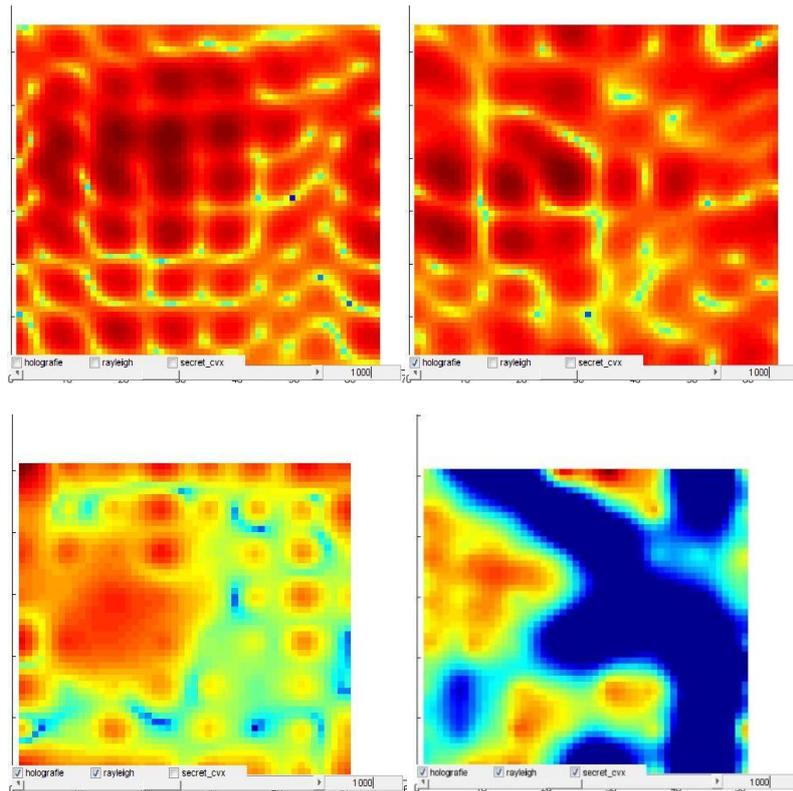
Im Folgenden sind die Auswertungen aller vier Methoden nebeneinander dargestellt, wobei die Lokalisation für verschiedene Frequenzen untersucht wurde. Die Abbildungen zeigen dabei stets eine bessere Auflösung als die 8\*8 Punkte der Mikrofone, da stets zu Beginn der Auswertung durch zero-padding eine Interpolation im Wellenzahlbereich erfolgte.



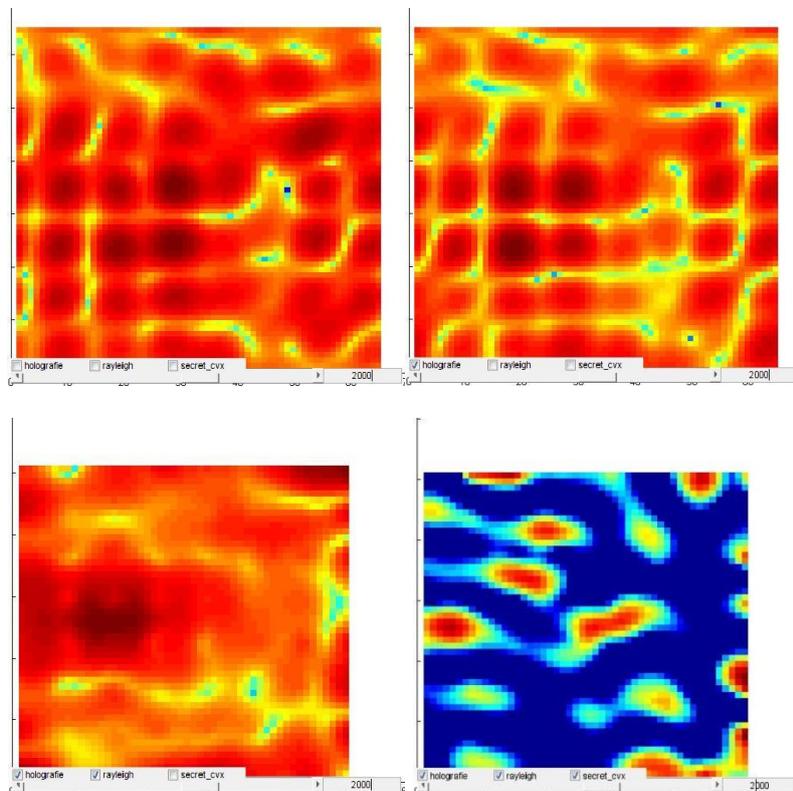
**Abbildung 6: Schallquellenposition bei 250 Hz**  
oben links: Schalldruckverteilung auf dem Array, oben rechts: Schallfeld auf der Platte (Fourier-basierte Holografie),  
unten links: Auswertung mit Rayleigh-Integral, unten rechts: Auswertung mit cvx (L2-Norm)



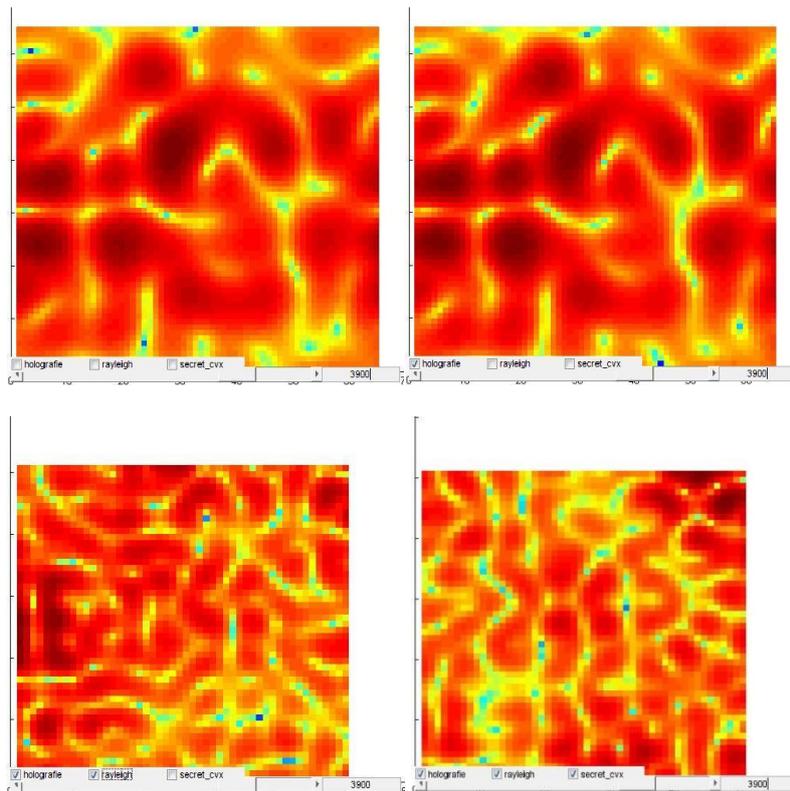
**Abbildung 7: Schallquellenposition bei 500 Hz oben**  
oben links: Schalldruckverteilung auf dem Array, oben rechts: Schallfeld auf der Platte (Fourier-basierte Holografie),  
unten links: Auswertung mit Rayleigh-Integral, unten rechts: Auswertung mit cvx (L2-Norm)



**Abbildung 8: Schallquellenposition bei 1000 Hz**  
oben links: Schalldruckverteilung auf dem Array, oben rechts: Schallfeld auf der Platte (Fourier-basierte Holografie),  
unten links: Auswertung mit Rayleigh-Integral, unten rechts: Auswertung mit cvx (L2-Norm)



**Abbildung 9: Schallquellenposition bei 2000 Hz**  
oben links: Schalldruckverteilung auf dem Array, oben rechts: Schallfeld auf der Platte (Fourier-basierte Holografie),  
unten links: Auswertung mit Rayleigh-Integral, unten rechts: Auswertung mit cvx (L2-Norm)



**Abbildung 10: Schallquellenposition bei 3900 Hz**  
 oben links: Schalldruckverteilung auf dem Array, oben rechts: Schallfeld auf der Platte (Fourier-basierte Holografie),  
 unten links: Auswertung mit Rayleigh-Integral, unten rechts: Auswertung mit cvx (L2-Norm)

### 2.4.3 Interpretation der Ergebnisse:

Wie zu sehen ist, ist es hier mit allen vier Methoden sehr schwer die Position des Lochs zu bestimmen. Auch bei unterschiedlichen Frequenzen lassen sich keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Position des Lochs ziehen. Bei der Messung ist es wohl zu Fehlern gekommen, die nun im Nachhinein bei der Auswertung nicht mehr korrigierbar waren. Auch eine Veränderung der Länge der Impulsantwort, die Wahl eines anderen Fensters, oder eine andere Impulsantwortengewichtung brachte kein besseres Ergebnis.

Die Fehler bei der Messung sind möglicherweise aufgetreten, weil zwischen Lautsprecherkonus und Platte ein Luftvolumen eingeschlossen war, das, wie oben gezeigt, eine starke Resonanz erzeugte. Des Weiteren erfolgte die Schallausbreitung bei manchen Frequenzen um die Ränder der Platte herum, die auch die Genauigkeit der Messung beeinträchtigte. Eine Platte, die weiter über das Mikrofonarray hinausragt, hätte diesen Effekt vielleicht besser kompensieren können.

Dennoch kann man bei obigen Messergebnissen erkennen, dass die Berechnung über die Schalldruckverteilung auf dem Array die ungenauesten Ergebnisse liefert, da man dort bei egal welcher Frequenz fast nur Maxima erkennen kann. Verwendet man den Ansatz über die Fourier-basierte Holografie, so lassen sich schon bessere Unterschiede erkennen. Bei der Auswertung über den Rayleigh-Ansatz kann man auch bei tiefen Frequenzen bereits erste Minima erkennen. Die besten Ergebnisse liefert allerdings dennoch die Auswertung mit der *cvx*-Toolbox, weil sich dort am deutlichsten Maxima und Minima voneinander unterscheiden lassen. Allerdings können auch mit dieser Methode keine korrekten Rückschlüsse auf die Lochposition gezogen werden. Bei 3900 Hz zeigen alle vier Ansätze ein ähnliches Ergebnis, da es aufgrund des diskreten Abstandes der Mikrofone zu räumlichem Aliasing kommt. Räumliches Aliasing tritt hierbei ab einer Frequenz auf, bei der der Mikrofonabstand der halben Wellenlänge entspricht. Dies ist bei 7 cm ab 2450 Hz der Fall.

#### 2.4.4 Messergebnisse bei Verwendung von *cvx* mit einer L1-Norm:

Zum Schluss wird noch untersucht, ob bei der Berechnung mit *cvx* eine L1-Norm ein besseres Ergebnis liefern könnte. Dies war allerdings auch nicht der Fall, wie man bei folgenden Plots sehen kann:

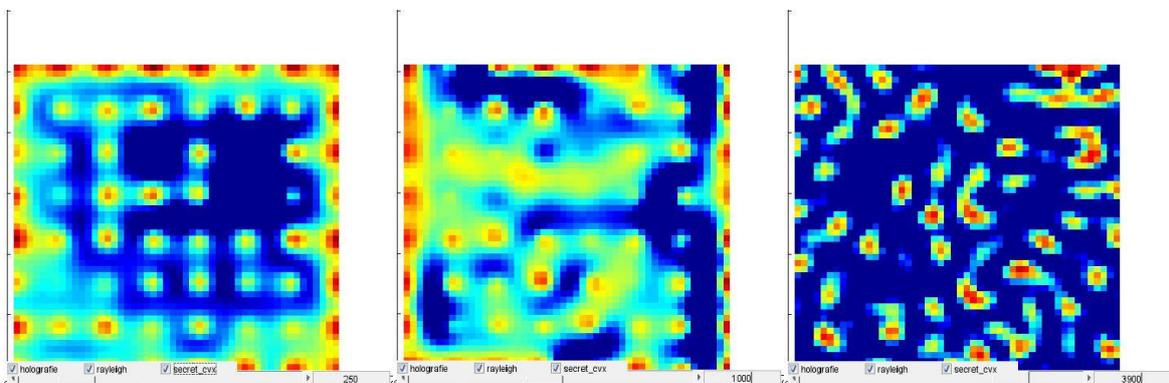


Abbildung 11: Ergebnisse bei Berechnung mit einer L1-Norm links: 250 Hz, mitte: 1000 Hz, rechts: 3900 Hz

Wie zu sehen ist, tritt also das Problem auf, dass der Messaufbau trotz guter Kalibrierung und aktuell überprüfter Funktionstüchtigkeit des Arrays für Fernfeldholografie keine leicht interpretierbaren Messergebnisse liefert.

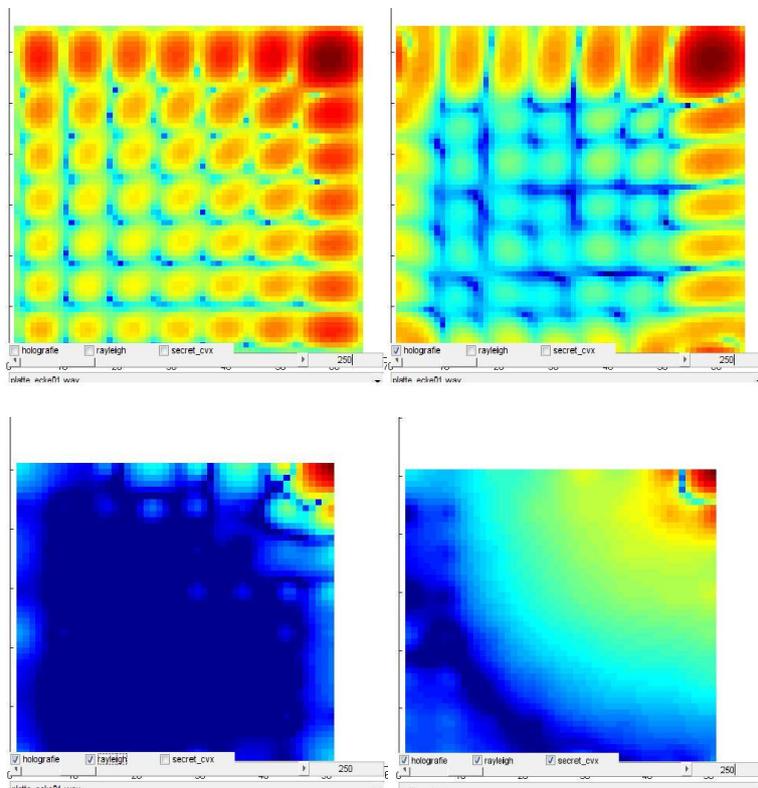
Wie oben gezeigt, tritt eine Resonanzfrequenz auf, die die Ergebnisse wohl etwas verfälscht. Weitaus schwerwiegender ist wohl allerdings, dass Schall auch über den Umweg der Plattenränder auf die Mikrofone trifft und so das Modell der unendlichen Platte, von dem eigentlich ausgegangen wird, nicht mehr herangezogen werden kann.

Um zu zeigen, dass sich mit dieser Methode dennoch gute Ergebnisse erzielen lassen, erfolgt nun ein Vergleich mit den Messergebnissen des Labors des letzten Jahres.

## 2.5 Auswertung der Messergebnisse des Labors vom SS 12<sup>1</sup>

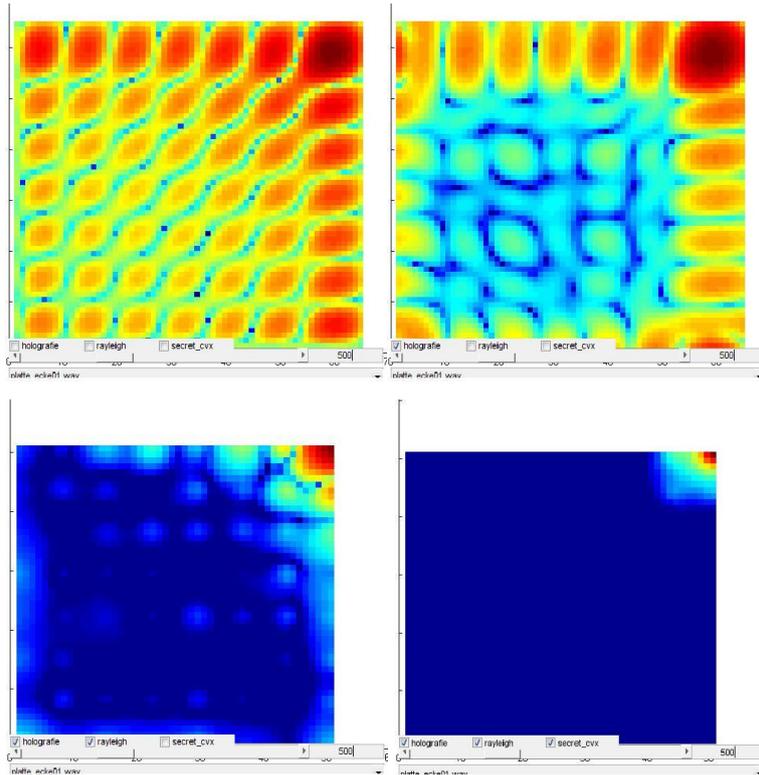
Im letzten Jahr wurde mit derselben Versuchsanordnung versucht, auf die Position eines Lochs in einer Platte zurückzurechnen. Allerdings wurde dabei das Schallfeld nicht durch einen gewöhnlichen Lautsprecher, sondern durch eine Volumenschallquelle angeregt und das Loch befand sich nicht in der Mitte, sondern aus Mikrofonsicht am rechten oberen Plattenrand. Der Vorteil der Volumenschallquelle liegt darin, dass der Schall hier nicht um die Ränder der Platte herum zu den Mikrofonen gelangt sein kann, womit das Modell der unendlichen Platte gültig ist. Es konnte sich auch keine durch ein eingeschlossenes Luftvolumen auftretende Resonanz ausprägen. Zudem wurde bei der Messung ein Sweep verwendet, der bis 22.05 kHz ging, um Rauschen im oberen Frequenzbereich zu vermeiden.

### 2.5.1 Graphische Darstellung der Ergebnisse:

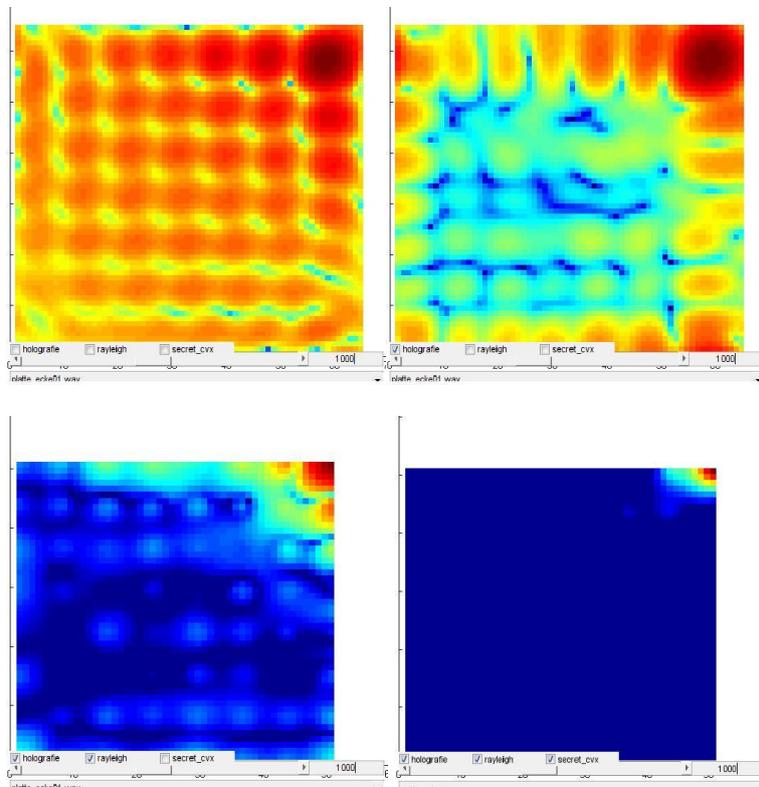


**Abbildung 12: Schallquellenposition bei 250 Hz**  
**oben links: Schalldruckverteilung auf dem Array, oben rechts: Schallfeld auf der Platte (Fourier-basierte Holografie),**  
**unten links: Auswertung mit Rayleigh-Integral, unten rechts: Auswertung mit cvx (L2-Norm)**

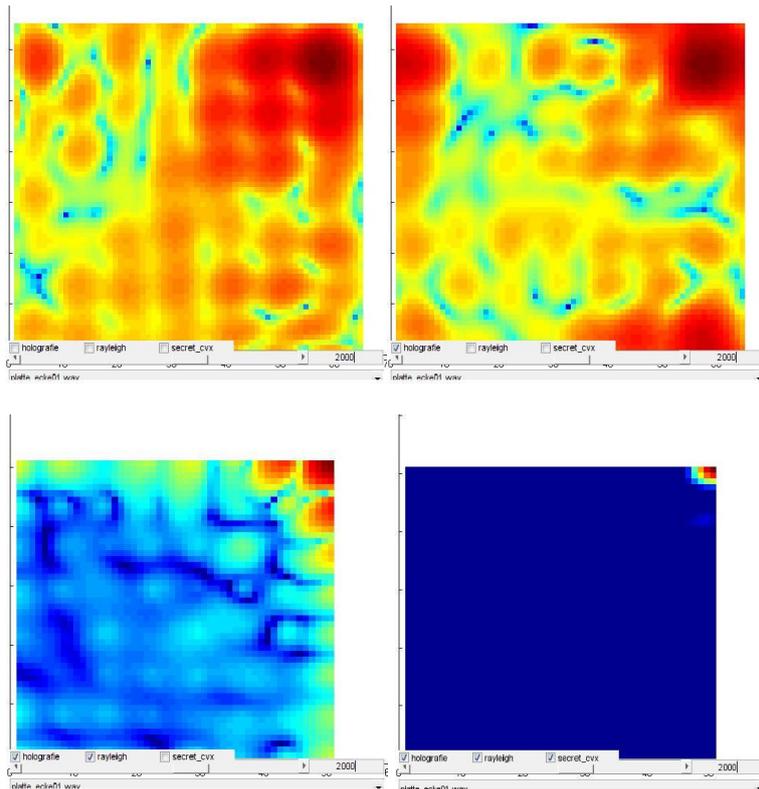
<sup>1</sup> Eine ausführliche Erläuterung der Messungen vom SS 12 kann in [4] nachgelesen werden



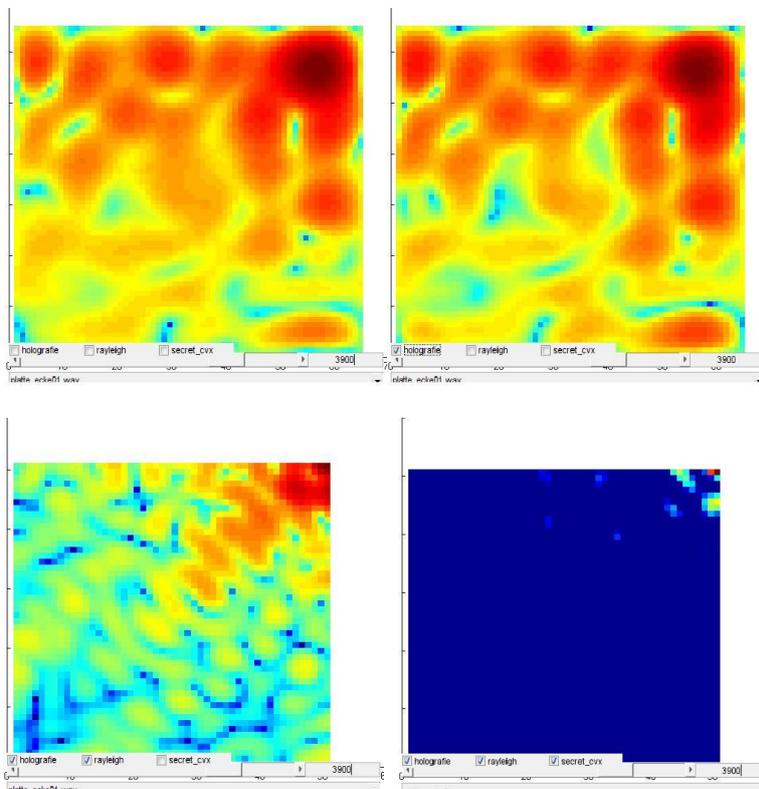
**Abbildung 13: Schallquellenposition bei 500 Hz**  
oben links: Schalldruckverteilung auf dem Array, oben rechts: Schallfeld auf der Platte (Fourier-basierte Holografie),  
unten links: Auswertung mit Rayleigh-Integral, unten rechts: Auswertung mit cvx (L2-Norm)



**Abbildung 14: Schallquellenposition bei 1000 Hz**  
oben links: Schalldruckverteilung auf dem Array, oben rechts: Schallfeld auf der Platte (Fourier-basierte Holografie),  
unten links: Auswertung mit Rayleigh-Integral, unten rechts: Auswertung mit cvx (L2-Norm)



**Abbildung 15: Schallquellenposition bei 2000 Hz**  
oben links: Schalldruckverteilung auf dem Array, oben rechts: Schallfeld auf der Platte (Fourier-basierte Holografie),  
unten links: Auswertung mit Rayleigh-Integral, unten rechts: Auswertung mit cvx (L2-Norm)



**Abbildung 16: Schallquellenposition bei 3900 Hz**  
oben links: Schalldruckverteilung auf dem Array, oben rechts: Schallfeld auf der Platte (Fourier-basierte Holografie),  
unten links: Auswertung mit Rayleigh-Integral, unten rechts: Auswertung mit cvx (L2-Norm)

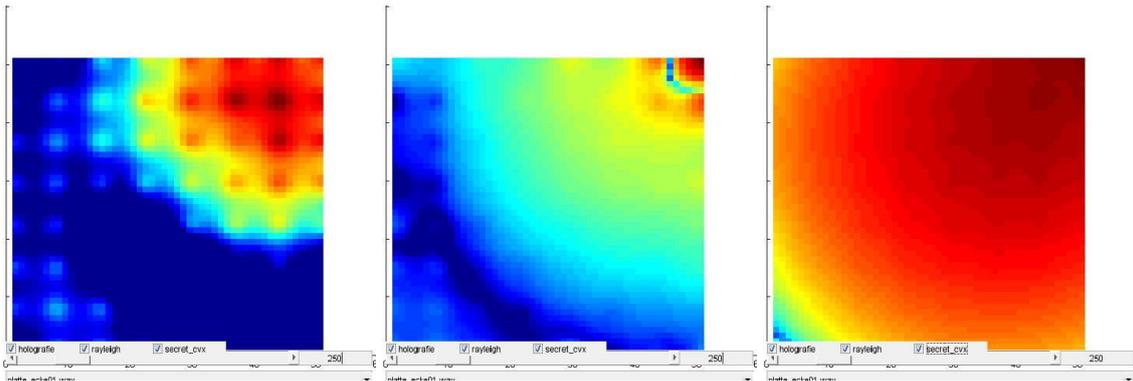
### 2.5.2 Interpretation der Ergebnisse:

Bei diesen Messergebnissen kann man bereits bei 250 Hz eindeutig erkennen, an welcher Stelle der Platte sich das Loch befindet. Bereits bei der Auswertung über die Schalldruckverteilung auf dem Array kann man eine deutliche Tendenz erkennen, wo sich das Loch befindet. Zwar treten hier mehrere Maxima auf, das stärkste allerdings an der Lochposition. Verwendet man den Fourier-basierten Holografieansatz, so treten dort bei 250 Hz schon die ersten Minima auf und das Bild verdeutlicht genauer, wo sich das Loch befindet. Die Auswertung über das Rayleigh-Integral liefert hier das genaueste Ergebnis der Auswertung, da sich auf der gesamten Fläche nur Minima befinden und lediglich an der Position des Lochs ein deutliches Maxima ausgeprägt ist. Das *cvx*-Verfahren zeigt zwar auch die genaue Position an, allerdings sind die Minima hier noch nicht so stark ausgeprägt, wie bei der Berechnung über das Rayleigh-Integral.

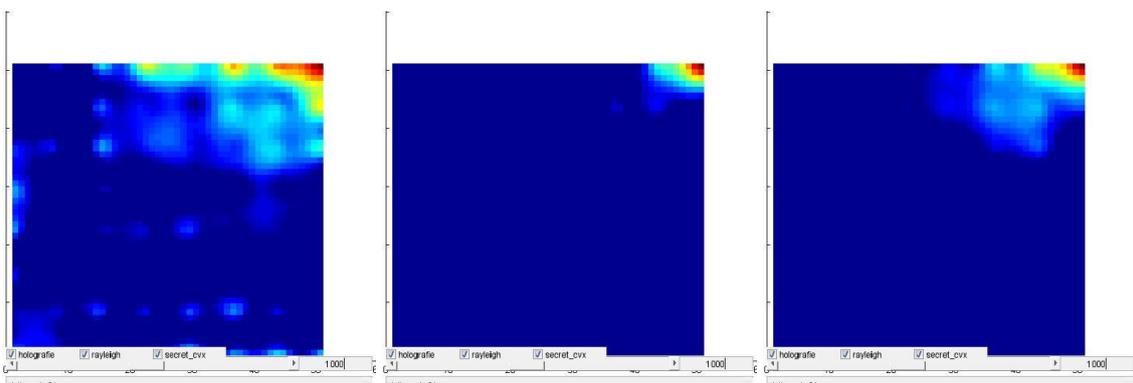
Betrachtet man die weiteren ausgewerteten Frequenzpunkte, so stellt man fest, dass mit steigender Frequenz alle Verfahren immer bessere und genauere Ergebnisse liefern und die *cvx*-Methode nun stets die genauesten Bilder liefert. Die Auswertung des Schalldrucks auf dem Array ist dabei immer am ungenauesten, da stets starke Maxima an verschiedenen Punkten ausgeprägt sind, allerdings ist das stärkste Maximum immer an der Lochposition. Bei 3900 Hz tritt wiederum aufgrund der Array-Abmessungen Aliasing auf, die Position des Lochs ist allerdings immer noch identifizierbar. Das *cvx*-Verfahren scheint hier an seinen Grenzen angelangt zu sein, da nur noch ein sehr kleines Maximum an der Lochposition zu sehen ist. Allerdings tritt hier auch fast kein Aliasing auf, das falsche Rückschlüsse zulassen könnte.

### 2.5.3 Vergleich verschiedener Ln-Normen bei der Verwendung von *cvx*:

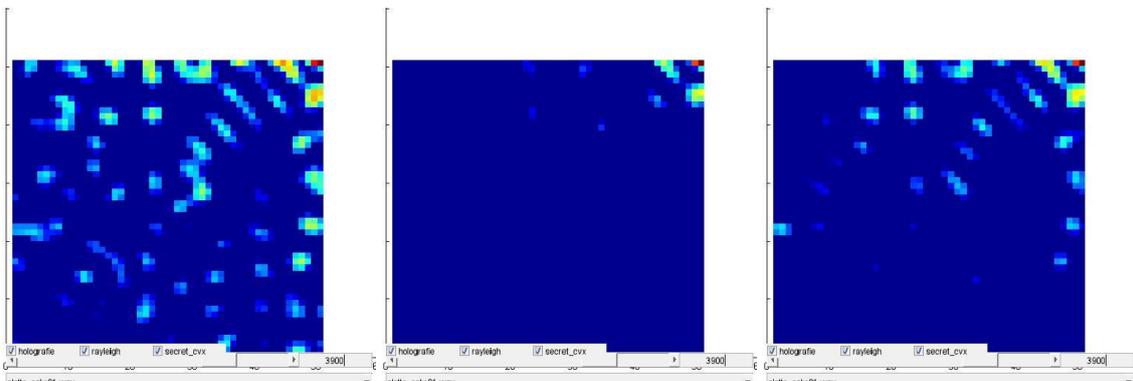
Wie oben erläutert, ist es möglich verschiedene Ln-Normen bei der Berechnung mit *cvx* heranzuziehen. Um dabei die Unterschiede darzustellen, wurden die Frequenzen 250 Hz, 1000 Hz und 3900 Hz mit einer L1-, L2-, und L1.5-Norm ausgewertet.



**Abbildung 17: Schallquellenlokalisierung mit cvx bei 250 Hz**  
links: L1-Norm, mitte: L2-Norm, rechts: L1.5-Norm



**Abbildung 18: Schallquellenlokalisierung mit cvx bei 1000 Hz**  
links: L1-Norm, mitte: L2-Norm, rechts: L1.5-Norm



**Abbildung 19: Schallquellenlokalisierung mit cvx bei 3900 Hz**  
links: L1-Norm, mitte: L2-Norm, rechts: L1.5-Norm

Bei 250 Hz lässt lediglich die L2-Norm Rückschlüsse zu, die L1-Norm weist an eine falsche Stelle und die L1.5-Norm liefert keine brauchbare Auswertung.

Bei 1000 Hz liefern alle drei Normen brauchbare Ergebnisse, wobei die L2-Norm wiederum die genauesten Ergebnisse liefert. Die anderen beiden Normen weisen ebenfalls auf die kor-

rekte Position, allerdings sind hier die Maxima nicht so stark von den Minima getrennt, wie bei der L2-Norm.

Bei 3900 Hz kommt es bei allen drei Normen zu Aliasing in der Auswertung. Am meisten Aliasing tritt bei der L2-Norm auf, allerdings zeigt diese Auswertung auch am genauesten auf die Lochposition. Die L1-Norm liefert am wenigsten Aliasing, allerdings ist die Lochposition hier auch nur mit einer begrenzten Genauigkeit zu erkennen. Die L1.5-Norm liefert ein Ergebnis, das von der Genauigkeit her betrachtet zwischen den vorherigen beiden liegt. Es tritt mehr Aliasing als bei der L1-Norm auf und die korrekte Position ist genauer zu erkennen, allerdings nicht so gut wie mit dem Ergebnis der L2-Norm, bei der aber auch mehr Aliasing hinzukommt.

### 3. Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich über diesen Versuch sagen, dass es prinzipiell möglich ist, mit einem Mikrofonarray ein Loch in einer Platte zu erkennen, hinter der sich eine Schallquelle befindet. Allerdings ist der Messaufbau, wie bei unserer Messung gesehen werden konnte, sehr störungsanfällig. Ein normaler Konuslautsprecher ist für die Schallfeldanregung wohl eher ungeeignet, da, wie oben erläutert, das Luftvolumen zwischen Membran und Platte eine Resonanz erzeugt. Eine Volumenschallquelle ist hier definitiv geeigneter. Außerdem konnte man sehen, dass es verschiedene geeignete Rechenmethoden gibt. Das einfachste und schnellste war die Berechnung der Wellenzahlspektren, mit denen die Schalldruckverteilung auf dem Array analysiert werden konnte. Dieses Verfahren lieferte stets eine akzeptable Genauigkeit. Zwar waren die Bereiche, in denen es das Loch vermutete bisweilen etwas groß, die Tendenzen stimmten allerdings stets. Das *cvx*-Verfahren lieferte stets brauchbare Ergebnisse, zwar dauerte die Berechnung aber auch am längsten. Bei der Auswahl einer geeigneten Norm fiel auf, dass die L2-Norm die genauesten Ergebnisse lieferte. Das Holografie-basierte Prinzip und die Berechnung nach dem Rayleigh-Integral bewegten sich bei den Punkten Genauigkeit und Rechendauer, wie oben gezeigt, immer im Mittelfeld. Abschließend kann man sagen, dass man die Messergebnisse stets direkt nach dem Versuch an Ort und Stelle auswerten sollte, damit sofort erkannt werden kann, ob Störfaktoren Einfluss auf die Messung genommen haben. Ist dies nämlich, wie bei unserer Messung geschehen, der

Fall, kann man so noch den Messaufbau verändern, um diese Störquellen zu minimieren. Nachträglich ist dies bei der Auswertung nämlich nicht mehr möglich.

## 4. Literaturverzeichnis

- [1] Zotter, Franz u.a.: Akustische Holografie und Holografie, Vorlesungsskriptum, Graz 2012  
<https://iaem.at/kurse/winter-12-13/akholo/akholo.pdf/view>
- [2] Zotter, Franz: Akustische Messtechnik 2, LU, Laborunterlagen, Graz 2010  
<https://iaem.at/kurse/sommer-12/amlu/AMTLU.pdf/view>
- [3] Schmidt, Philipp: Improvement in localization of planar acoustic holography, Masterarbeit, Graz 2012  
<http://iem.kug.ac.at/fileadmin/media/iem/projects/2011/schmidt.pdf>
- [4] Brosch, Richard u.a.: Akustische Messtechnik 2 Laborübung SS 2012, Laborprotokoll, Graz 2012  
[https://iaem.at/kurse/sommer-12/amlu/2012\\_BroschHalderMuellerZenke\\_Protokoll\\_AMTLU\\_korrigiert.pdf/view](https://iaem.at/kurse/sommer-12/amlu/2012_BroschHalderMuellerZenke_Protokoll_AMTLU_korrigiert.pdf/view)