

**Untersuchungen der Ursachen signifikanter Abweichungen von Messergebnissen aus unterschiedlichen, nach der europäischen Norm DIN EN ISO 140 normgerechten Prüfständen für die Schalldämmung**

**T 3033**

**T 3033**

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2004, ISBN 3-8167-6537-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.IRBbuch.de](http://www.IRBbuch.de)

## **Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben**

# **Untersuchung der Ursachen signifikanter Abweichungen von Messergebnissen aus unterschiedlichen, nach der europäischen Norm DIN EN ISO 140 normgerechten Prüfständen für die Schalldämmung**

**gefördert vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)**

**Az.: P 32-5-5.71-1033/02**

### **Kurztitel:**

Ursachen abweichender Messergebnisse aus normgerechten Schalldämm-  
Prüfständen

### **Autor:**

Dr. rer. nat. Wieland Weise

### **Forschende Stelle:**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Labor für Angewandte Akustik

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Braunschweig, Juni 2003

**Inhalt:**

<b>1. EINLEITUNG.....</b>	<b>3</b>
1.1 MOTIVATION.....	3
1.2 ZIELE DES FORSCHUNGSVORHABENS.....	4
1.3 DURCHFÜHRUNG DES PROJEKTS.....	5
<b>2. VERSUCHSAUFBAU UND MESSERGEBNISSE.....</b>	<b>5</b>
2.1. BESCHREIBUNG DER PRÜFWAND.....	5
2.2. BESCHREIBUNG DES PRÜFSTANDS.....	6
2.3. GEMESSENE SCHALLDÄMM-MAßE.....	6
2.4. UNTERSUCHUNG DES EINBRUCHS BEI 4000HZ.....	6
<b>3. NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN.....</b>	<b>7</b>
3.1. SIMULATION DER PRÜFRÄUME.....	7
3.2. EIGENMODEN DER PRÜFRÄUME.....	10
3.3. SIMULATION DER PRÜFWAND.....	12
3.4. SCHWINGUNGS-EIGENMODEN DER PRÜFWAND.....	13
3.5. SIMULATION DES GESAMTEN PRÜFSTANDS.....	16
3.6. MODALE BETRACHTUNG DER SCHALLDÄMMUNG.....	17
3.7. ANALYSE DER SCHALLDÄMMUNG.....	19
<b>4. ZUSÄTZLICHE MESSUNGEN.....</b>	<b>24</b>
4.1. SCHALLDÄMMUNG BEI VERÄNDERUNG DER RAUMMODEN.....	24
4.2. SCHALLDÄMMUNG BEI VERÄNDERUNG DER WANDMODEN.....	25
<b>5. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND VORSCHLÄGE.....</b>	<b>27</b>
5.1. SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	27
5.2. VORSCHLÄGE.....	29
<b>LITERATUR.....</b>	<b>29</b>
<b>ABBILDUNGEN.....</b>	<b>31</b>

## 1. Einleitung

### 1.1 Motivation

In den Jahren 1998-2000 wurde von der PTB ein Ringversuch an schweren Wänden zwischen Prüfstellen mit bauakustischen Wandprüfständen organisiert [Schmitz, 1999, Meier, 1999]. Aus den gewonnenen Daten können Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Abweichungen der Schalldämmung zu dem Mittelwert des Ringversuchs bestimmt werden. Es zeigt sich, dass manche Prüfstände, obwohl sie normgerecht nach ISO 140-1 gebaut wurden, erhebliche Abweichungen zu den Ringversuchsergebnissen aufweisen. Die Abweichungen lassen sich nicht als statistische Schwankungen erklären.

Seitens der Norm werden einige Anforderungen an Prüfstände gestellt, die allerdings größtenteils recht vage formuliert sind. Als Erstes sind beim Bau Kriterien einzuhalten. Für den fertig ausgestalteten Prüfstand ist dann zu überprüfen, dass sich das Schalldämm-Maß nicht ändert, wenn durch Hinzufügen von Absorbern bzw. Diffusoren die Raumnachhallzeit bzw. die Raummoden verändert werden. Desweiteren wird die Einhaltung einer unteren Grenze für den Gesamtverlustfaktor bei schweren Wänden gefordert d. h., dass die Energieableitung aus der Wand nicht zu gering sein darf. Der Überprüfung des auf unerwünschten Nebenwegen übertragenen Anteils der Schall-Leistung dient die Messung der Maximalschalldämmung des Prüfstands.

Ziel muss allerdings eine ausreichende Vergleichbarkeit der Messergebnisse aus verschiedenen Prüfständen sein. Diese ist jedoch nicht durch die Erfüllung obiger Anforderung gesichert. Nach derzeitiger Praxis müssen Prüfstellen, die beim DIBt die Anerkennung eines Prüfstands beantragen, deshalb zusätzlich die schwere Testwand entsprechend den Vorgaben aus dem erwähnten Ringversuch in ihrem Prüfstand aufbauen und neben den nach Norm ISO 140-1 geforderten Messungen der Maximalschalldämmung nach Anbringen von Vorsatzschalen auch die im Ringversuch geforderten Schalldämmung-Messungen durchführen. Sollte das Ergebnis nicht im Rahmen der statistisch zu erwartenden Abweichungen vom Ringversuchsergebnis liegen, stellt dies ein gravierendes Hindernis für die Anerkennung von Prüfständen seitens des DIBT dar. Dies war insbesondere beim hier diskutierten Wandprüfstand der Fall. Dieser zeigte eine starke Überhöhung des

Schalldämm-Maßes bei 80Hz und 100Hz sowie einen Einbruch bei 4000Hz, während bei den ursprünglichen Ringversuchsteilnehmern ein Einbruch erst bei 5000Hz auftrat. Hierdurch liegt eine starke Abweichung der Schalldämmung in der 4000Hz-Terz gegenüber Ringversuchsergebnissen vor, die nicht im Rahmen von statistischen Schwankungen erklärbar ist.

Um die Vorschriften in der Norm dahingehend anpassen zu können, dass in Zukunft bei Prüfstandsneubauten oder bei der Durchführung der Messung selbst eine bessere Vergleichbarkeit erwartet werden kann, wurden die Ursachen für diese Unterschiede der Prüfstandsergebnisse erforscht. Hierfür wurde die Testwand entsprechend den Vorgaben des Ringversuchs ein weiteres Mal aufgebaut und mit gezielten Körperschallmessungen das Schwingungsverhalten der Wand bestimmt. Darüber hinaus wurde das Schalldämm-Maß schmalbandig in 1/24-Oktaven gemessen, und die gewonnenen Daten wurden mit Simulationsrechnungen verglichen. Die Ergebnisse werden im folgenden vorgestellt.

## **1.2 Ziele des Forschungsvorhabens**

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Ursachen für die oben genannten Abweichungen ausfindig zu machen. Darauf aufbauend sollten Vorschläge für die Ergänzung der Vorschriften der DIN EN ISO 140-1 zur Konstruktion von Prüfständen gemacht werden, durch die die identifizierten Abweichungen vermieden werden.

Stufe 1:

Erhebung von Messdaten in einem Prüfstand mit signifikanten Abweichungen der Schalldämmwerte.

Stufe 2:

Auswertung der Messdaten und Erarbeitung von Vorschlägen für DIN EN ISO 140-1.

### 1.3 Durchführung des Projekts

Folgende Arbeitsschritte sollten durchgeführt werden:

Stufe 1:

Wiederaufbau der Untersuchungswand des Ringversuchs in einer Prüfstelle mit signifikanten Abweichungen. Umfangreiche rasterförmige Körperschallmessungen zur Aufnahme des Schwingungsbildes der Prüfwand sowie rasterförmige Luftschallmessungen zur Bestimmung der Modenkopplung zwischen den Prüfräumen und der Prüfwand. Visualisierung der Messdaten, d.h. der Raum- und Wandmoden.

Stufe 2:

Vergleich der Moden sowie der Schalltransmission mit Rechenmodellen. Analyse der Ursachen für die Abweichungen der Schalldämm-Messung. Erarbeiten von Baukriterien für Prüfstände aus den gewonnenen Erkenntnissen, die in die DIN EN ISO 140-1 aufgenommen werden sollen.

Die Prüfstelle war bereit, auf ihre Kosten den Wandaufbau und die Schalldämm-Messung durchzuführen.

## 2. Versuchsaufbau und Messergebnisse

### 2.1. Beschreibung der Prüfwand

Die Wand besteht aus Kalksandsteinen mit einer Rohdichte von etwa  $1720\text{kg/m}^3$ , die seitlich mit einem Nut- und Federsystem ausgestattet sind. Die seitlichen Stoßfugen der Steine sind unvermörtelt, es wird lediglich auf jede Steinlage waagrecht eine Schicht Dünnbettmörtel aufgetragen. Die zur akustischen Abdichtung beidseitig dünn mit Gipshaftputz verputzte Wand hat eine Gesamtdicke von 25 cm und ein Flächengewicht von  $440\text{kg/m}^2$ . Die Wand wird erst freistehend mit einem Spalt zum Einbaurahmen hin aufgebaut. Dieser wird anschließend mit einem Quellschutt verstopft.

## **2.2. Beschreibung des Prüfstands**

Sende- bzw. Empfangsraum sind in Abbildung 1 mit den Positionen der Absorber und der Türen zu sehen. Der Senderaum befindet sich rechts vorne, die Prüfwand sitzt zwischen den beiden Räumen. Sowohl Sende- als auch Empfangsraum haben einen schiefwinkligen Grundriss, insbesondere werden beide Räume zur Trennwand hin schmaler. Die Prüfwand wird in einen Betonrahmen eingebaut, der elastisch gelagert ist. Dieser Rahmen ist vollständig von den Seitenwänden, der Decke und dem Boden des Prüfstands getrennt, die Trennfugen sind weich verstopft. In Abbildung 2 ist der Rahmen samt Prüfwand zu sehen. Die sichtbare Wandseite gehört zum Senderaum. Die unterschiedlichen Materialien sind durch Graustufen gekennzeichnet. Die vorderen und hinteren Rahmenflächen werden durch das Stopfmaterial begrenzt. Die Bereiche, die in Empfangs- und Senderaum hineinragen, sind durch vertikale Linien begrenzt.

## **2.3. Gemessene Schalldämm-Maße**

In Abbildung 3 sind die an den beiden nacheinander in dem untersuchten Prüfstand aufgebauten Prüfwänden gemessenen Schalldämm-Maße zu sehen. An der am zweiten Aufbau aufgenommenen Kurve ist eine Verringerung der Schalldämmung bei 160Hz und eine Erhöhung bei 200Hz im Vergleich zum ersten Aufbau zu sehen. Derartige Variationen können durch leichte Variationen der Verhältnisse wie das Verschieben der Frequenzen der Raummoden durch eine veränderte Position der Prüfwand verursacht sein und sollen nicht weiter betrachtet werden. Ein Einbruch der Schalldämmung bei 4000Hz bei dem ersten Aufbau ist beim zweiten Aufbau über mehrere Terzen verschmiert.

## **2.4. Untersuchung des Einbruchs bei 4000Hz**

Nach [Gösele, 1990] ist bekannt, dass Wände Dickenschwingungen bei der Frequenz ausführen können, bei der ihre Dicke gerade eine halbe Longitudinalwellenlänge beträgt. Die sich ausbildende stehende Welle hat einen Auslenkungsknoten in der Wandmitte. Die Schallgeschwindigkeit von Longitudinalwellen in Kalksandstein liegt bei 2500m/s, so dass bei der Prüfwand gerade bei der Frequenz von 5000Hz Dickenschwingungen zu erwarten sind. In Abbildung 4 sind die im Ringversuch gemessenen Schalldämm-Maße als graue Linien zu sehen. In der Tat liegt bei allen Teilnehmern ein deutlicher Einbruch in der

5000Hz-Terz vor. Das in dem untersuchten Prüfstand in Terzbandbreite gemessene Schalldämm-Maß ist in der gleichen Abbildung als dickere Linie zu sehen. Bei diesem Aufbau scheint der Einbruch quasi eine Terz nach unten gerutscht zu sein. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass eine andere Charge der Steine als beim Ringversuch verwendet wurde. Diese Charge war während der Lagerung Frost ausgesetzt. Es zeigten sich bei einem großen Teil der Steine Risse, die vom Griffloch zum Rand liefen. Dies führt dazu, dass die Steine in Richtung senkrecht zur Wandoberfläche weicher sind als diejenigen aus dem Ringversuch. Der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit  $c_L$  von Longitudinalwellen und dem Elastizitätsmodul  $E$  ist:

$$c_L^2 = \frac{2E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho} \quad (1)$$

Eine Verschiebung der Dickenresonanz von 5000Hz auf 4000Hz entspricht somit einer Verringerung von  $E$  um 36%. Für die Steine der neuen Charge wurden in drei weiteren Prüfständen die Schalldämmung gemessen. Auch hier zeigte sich, wie in Abbildung 5 zu sehen ist, die Verschiebung des Einbruchs zu niedrigeren Frequenzen. Diese ist also nicht auf Eigenschaften des Prüfstands zurückzuführen. Teilweise ist bei den in Abbildung 5 dargestellten Schalldämm-Maßen der Einbruch verbreitert, was auf Unterschiede zwischen den verwendeten Steinen hindeutet.

Durch ein geringeres Elastizitätsmodul wird auch die Biegesteife der Wand herabgesetzt, was zu einer Verschiebung des Koinzidenzeinbruchs zu höheren Frequenzen führt. Hierdurch können im Vergleich zum Ringversuch Abweichungen in den Terzen bei 200Hz und bei 250Hz auftreten.

### 3. Numerische Untersuchungen

#### 3.1. Simulation der Prüfräume

Die schiefwinklige Geometrie der Prüfräume wurde aus einem Bauplan übernommen. Es waren jedoch nicht alle Raumecken über Koordinaten vorgegeben, teilweise mussten die Positionen aus Winkelangaben bestimmt werden. Es ist anzunehmen, dass die so bestimmten Eckpositionen mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet sind.

Die Simulationen sind sehr empfindlich gegenüber Änderungen der Raumgeometrie. Bei einer Nachhallzeit von  $T_{60}=1\text{s}$  ist die Halbwertsbreite der Resonanzkurve einer Raummode lediglich  $\text{FWHM}=2.2\text{Hz}$ . Entsprechend führt die Änderung einer Raumlänge um 2.2 % bei einer Axialmode mit Resonanzfrequenz 100Hz, die in Richtung der veränderten Raumkante schwingt, zu einer Resonanzverschiebung um eine Halbwertsbreite. Hierdurch kann der Frequenzüberlapp von Moden des Senderraums mit Moden des Empfangsraums stark verändert werden, was zu deutlichen Änderungen der Schalldämmung führen kann.

Die Nachhallzeit der Räume bei tiefen Frequenzen wird durch Platten-Resonanzabsorber auf das notwendige Maß verringert. Im einfachsten Modell lassen sich diese Absorber beschreiben durch eine lokal reagierende, über die Absorberfläche konstante Impedanz:

$$Z = j\omega m + Z_a(\omega) \cdot \coth(\Gamma(\omega) \cdot d_a) \quad (2)$$

wobei  $\omega$  die Kreisfrequenz ist.  $m$  ist das Flächengewicht der Platte,  $d_a$  ist die Dicke des Materials mit Impedanz  $Z_a$  und Ausbreitungskonstante  $\Gamma$ , auf dem die Platte lagert. Der Imaginärteil von  $\Gamma$  ist  $\omega/c_a = 2\pi/\lambda_a$ . Für schwache Dämpfung und  $d_a \ll \lambda_a$  verhält sich die Absorberimpedanz wie

$$Z = j\omega m + \frac{s}{j\omega} + R \quad (3)$$

mit der Federsteifigkeit  $s$  und der Federdämpfung  $R$ . Unterhalb der Resonanzfrequenz ist die Impedanz federartig, darüber massenartig. Ist ein poröses Federmaterial nicht vollständig von der Platte abgedeckt, so kann die Masse  $m$  der Platte durch eine komplexe reduzierte Masse, die frequenzabhängig ist, ersetzt werden. Diese wird nach [Mechel II] berechnet.

Im Modell befinden sich die Absorberimpedanzen direkt auf den Prüfstandswänden, sind also um  $d_a$  zurückverschoben. Im Vergleich zum realen Absorber ergibt sich dadurch bei Reflexion von Schallwellen ein Phasenversatz  $\varphi$ , der bei senkrechtem Schalleinfall am größten ist. Somit ist die Wandimpedanz im Modell, wenn senkrechter Schalleinfall zugrunde gelegt wird:

$$Z_{\text{model}} = Z_0 \cdot \frac{1 + r \cdot e^{j\varphi}}{1 - r \cdot e^{j\varphi}}, \quad (4)$$

mit der Luftimpedanz  $Z_0$ , dem Phasenversatz  $\varphi = 2d_a\omega/c_0$  und dem Reflexionsgrad  $r = (Z - Z_0)/(Z + Z_0)$  mit  $Z$  aus obiger Gleichung. In Abbildung 6 sind Real- und Imaginärteil der auf die Admittanz der Luft normierten Admittanz für einen Absorber aufgetragen, bei dem das poröse Federmaterial nicht vollständig von der Platte abgedeckt wird. Die Resonanzfrequenz liegt bei ca. 80Hz. Zusätzlich sind Real- und Imaginärteil der Admittanz des um 10cm vor die Wand versetzten Absorbers dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die Realteile kaum unterscheiden. Die Imaginärteile unterscheiden sich näherungsweise um den Imaginärteil der Admittanz einer entsprechend verschobenen schallharten Wand.

Als weitere Absorber wurden die Türen der beiden Prüfstände angenommen. Bei tiefen Frequenzen kann deren Absorptionsgrad Werte von 0.15 erreichen.

Die individuellen Eigenschaften der Absorber, d.h. die jeweiligen frequenzabhängigen Impedanzen, sind nicht bekannt. Es zeigt sich jedoch, dass die Lagen der Raumfrequenzen hierdurch beträchtlich beeinflusst werden können. Die Resonanzen der Absorber liegen im interessierenden Frequenzbereich um 80Hz. Im Modell wurde mit komplexen frequenzabhängigen Impedanzen mit Resonanzfrequenzen von 75Hz, 80Hz und 130Hz gerechnet. Es muss aber mit durch Fehlanpassung bedingten Abweichungen zwischen Simulation und Messung gerechnet werden. Der diffuse Absorptionsgrad einer endlichen, rechteckigen und lokal reagierenden Impedanz lässt sich nach [Mechel I] S.264f und S.385 berechnen. Sind die Absorbermaße nicht groß gegen die Schallwellenlänge, so können durch den sogenannten Kanteneffekt [Lauriks 1990] Absorptionsgrade deutlich größer als eins auftreten. Es ergibt sich beispielsweise mit auf die Impedanz der Luft normierten Impedanzen:

Tabelle 1: Diffusfeld Absorberwerte:

Breite x Höhe	normierte Impedanz	Absorptionsgrad bei 80Hz
1.5m x 1.0m	2.4	2.4
1.25m x 0.63m	2.4	2.7
1.2m x 0.9m	2.4	2.55

### 3.2. Eigenmoden der Prüfräume

Die Eigenmoden des Schalldruckfeldes der Prüfräume wurden mit finiten Elementen berechnet. Das Koordinatensystem ist so gewählt, dass die  $x$ - bzw. die  $y$ -Richtung die horizontale bzw. die vertikale Richtung der Prüfwandebene sind, und die  $z$ -Richtung vom Sende- zum Empfangsraum zeigt. Das verwendete FE-Netz ist für den Senderraum in den Abbildung 7 bis Abbildung 26 zu erkennen, für den Empfangsraum in Abbildung 27 bis Abbildung 46. Die Modendichte pro Frequenzintervall nimmt mit der Frequenz zu. Die unterste Mode ist jeweils eine in  $z$ -Richtung schwingende Axialmode, die mit Z bezeichnet wird. Die 2. Mode ist jeweils eine in  $x$ -Richtung schwingende Axialmode, die mit X bezeichnet wird. In der Modenbezeichnung gibt die Anzahl der Buchstaben jeweils die Anzahl der Knoten entlang der entsprechenden Richtung an. Die 3. und 4. Mode liegen sehr dicht beieinander. Der Charakter der in einem rechtwinkligen Raum vergleichbarer Ausmaße gegebenen Moden XZ und Y bleibt nicht erhalten, es kommt vielmehr zu einem Mischen der Charakteristika beider Moden. Insbesondere im stärker schiefwinkligen Empfangsraum ist der Modencharakter gegenüber den in einem rechtwinkligen Raum vergleichbarer Ausmaße gegebenen Moden relativ stark verändert. Ursache für das Mischen der Charakteristika ist, dass ein schiefwinkliger Raum nicht in die Raumrichtungen separabel ist. Dieses Mischen ist bei im Frequenzraum eng benachbarten Moden besonders stark, ebenso nimmt es zu kürzeren Wellenlängen, also zu höheren Frequenzen hin zu. Auch in  $y$ -Richtung sind die Räume durch die inhomogene Verteilung der Absorber nicht separabel.

In nachfolgender Tabelle sind für beide Prüfräume die untersten 20 Moden charakterisiert. Es ist jeweils auch der Frequenzabstand zwischen aufeinanderfolgenden Moden angegeben.

Tabelle 2: Frequenzlage der Eigenmoden (Schalldruck) und Abstände zwischen Eigenfrequenzen

	Senderraum		Abstand	Empfangsraum		Abstand
1.	Z	29.8 Hz	17.2	Z	33.6Hz	10.0
2.	X	47.0 Hz	9.3	X	43.6 Hz	13.4
3.	XZ	56.3 Hz	0.6	Y	57.0 Hz	0.3
4.	Y	56.9 Hz	2.6	XZ	57.3 Hz	9.0
5.	ZZ	59.5 Hz	4.7	YZ	66.3 Hz	0.5
6.	YZ	64.2 Hz	9.8	ZZ	66.8 Hz	5.2
7.	XY	74.0 Hz	2.2	XY	72.0 Hz	8.8
8.	XZZ	76.2 Hz	3.8	XZZ	80.8 Hz	0.2
9.	XYZ	80.0 Hz	2.0	XYZ	81.0 Hz	3.3
10.	YZZ	82.0 Hz	7.3	XX R	84.3 Hz	3.6
11.	ZZZ	89.3 Hz	3.7	YZZ	87.9 Hz	11.1
12.	XX R	93.0 Hz	2.2	XXZ	99.0 Hz	0.3
13.	XYZZ	95.2 Hz	5.2	XYZZ	99.3 Hz	0.7
14.	XXZ	100.4 Hz	1.5	ZZZ	100.0 Hz	1.9
15.	XZZZ	101.9 Hz	4.0	XXY R	101.9 Hz	8.7
16.	YZZZ	105.9 Hz	3.3	XZZZ	110.6 Hz	2.6
17.	XXY R	109.2 Hz	3.1	XXZZ	113.2 Hz	1.1
18.	XXZZ	112.3 Hz	2.0	YY	114.3 Hz	0.2
19.	YY	114.3 Hz	1.1	XXYZ	114.5 Hz	0.6
20.	XXYZ	115.4 Hz		YZZZ	115.1 Hz	

Die Moden des Empfangsraums sind relativ ungleichmäßig verteilt. So ergibt sich oberhalb der Mode bei 87.9Hz eine Lücke von 11.1Hz. Um 100Hz liegen hingegen vier Moden sehr dicht, darüber ist wieder eine breite Lücke von 8.7Hz. Im Senderraum liegen die Moden gleichmäßig verteilt.

Durch die sich zur Prüfwand hin verjüngende Bauform der Räume treten einzelne Raummoden auf (Nr. 12 und 17, Senderraum, Nr. 10 und 15, Empfangsraum), die entlang der Prüfwand nur geringe Schalldruckpegel erreichen. Diese Moden sind mit R gekennzeichnet. Die Bereiche hohen Schalldrucks liegen bei diesen Moden ausschließlich im rückwärtigen Raumbereich.

### 3.3. Simulation der Prüfwand

Die Eigenschwingungen der Prüfwand im Einbaurahmen wurden mit finiten Elementen berechnet. Die Geometrie des gerechneten Objekts mit dem Finite-Elemente-Netz ist in Abbildung 47 und Abbildung 48 zu sehen. Die x-Achse zeigt in horizontaler Richtung entlang der Wand, die y-Achse in vertikaler Richtung und die z-Achse senkrecht zur Wand. Der Rahmen ragt im Senderraum um 15cm über die Prüfwand hinaus, im Empfangsraum 20cm. Die finiten Elemente sind quaderförmig und haben keine Knoten in den Seitenmitten. Allerdings wurde jedes Element intern quadratisch gerechnet, damit BiegeWellen wiedergegeben werden können. Über die Wanddicke liegen fünf Elemente. Der Rahmen ist elastisch gelagert. Er steht frei, die Schlitze zum Prüfstand hin sind schalldicht verstopft. Diese Stopfung führt zu einer zusätzlichen elastischen Lagerung in z-Richtung, die sich bei Schwingungen unter 20Hz auswirkt. Die elastische Lagerung, auf der der Rahmen steht, sowie das Fugenmaterial sind in Grautönen abgesetzt.

Da die Eigenmoden und -frequenzen gemessen worden waren, konnte eine sehr genaue Angleichung der Ergebnisse vorgenommen werden. Die Fitparameter waren die elastischen Konstanten der Prüfwand sowie diejenigen der Lagerung und seitlichen Stopfung des Rahmens. Der Rahmen besteht aus Beton, für dessen Eigenschaften Literaturangaben verwendet wurden. Die Prüfwand wurde als orthotrop angenommen. Die elastischen Konstanten sind:  $\nu_{XY}$ ,  $\nu_{ZY}$ ,  $\nu_{ZX}$ ,  $E_X$ ,  $E_Y$ ,  $E_Z$ ,  $G_{XY}$ ,  $G_{YZ}$ ,  $G_{XZ}$ . Die Rohdichte der Steine wurde zu  $1720\text{kg/m}^3$  bestimmt. Es wurde angenommen, dass bei Kompression der Wanddicke die freie Ausdehnung in beide Querrichtungen gleich ist:  $\nu_{ZX} = \nu_{ZY}$ .  $E_Z$  folgt bei zusätzlicher Vorgabe der Frequenz der Dickenresonanz:

$$E_Z = \frac{1}{2}c_l^2 \cdot \rho + \sqrt{\frac{1}{4}c_l^2 \cdot \rho^2 - \frac{c_l^2 \cdot \rho \cdot [(\nu_{ZY}^2 + 2 \cdot \nu_{XY} \cdot \nu_{ZY} \cdot \nu_{ZX}) \cdot E_Y + \nu_{ZX}^2 \cdot E_X]}{1 - \nu_{XY}^2 \cdot \frac{E_Y}{E_X}}} \quad (5)$$

$$G_{XY} = \frac{\sqrt{E_X \cdot E_Y}}{2(1 + \nu_{XY} \sqrt{E_Y/E_X})} \quad (6)$$

$$G_{YZ} = \frac{\sqrt{E_Y \cdot E_Z}}{2(1 + \nu_{YZ} \sqrt{E_Z/E_Y})} \quad (7)$$

$$G_{XZ} = \frac{\sqrt{E_X \cdot E_Z}}{2(1 + \nu_{XZ} \sqrt{E_Z/E_X})} \quad (8)$$

Interessanterweise wurden die besten Simulationsergebnisse bei größerer Steifigkeit in horizontaler Richtung erreicht. Intuitiv wäre zu erwarten, dass die Steifigkeit horizontal geringer als vertikal ist, da die unvermörtelten vertikalen Fugen einer Biegebeanspruchung keinen Widerstand entgegensetzen, so dass die gesamte Biegekraft durch Scherungen der oberen und unteren Steinflächen aufgebracht werden muss. Messungen [Meier, Dissertation] ergaben, dass bei Frequenzen oberhalb 200Hz in der Tat die horizontale Steifigkeit höher als die vertikale ist. Für tiefere Frequenzen gilt dies aber offenbar nicht.

### 3.4. Schwingungs-Eigenmoden der Prüfwand

Da die Modendichte für BiegeWellen auf dünnen Platten unabhängig von der Frequenz ist, gilt dies für tiefe Frequenzen auch näherungsweise für die Prüfwand. Zur Schalltransmission kann nur die oberflächensenkrechte Komponente der Modenschwingung beitragen, für die Wand ist dies die z-Komponente. Der Rahmen tritt hingegen bei Bewegung in x- oder y-Richtung in Wechselwirkung mit dem Schallfeld.

Die unterste Mode bei 12Hz besteht in einem seitlichen Schwimmen in der Wandebene auf der Lagerung. Diese Mode ist durch die in der Simulation geringen Schersteifigkeiten der elastischen Lagerung bestimmt. Ihre Auslenkung in z-Richtung ist gering.

Die 2. Mode ist eine Kippschwingung auf der elastischen Lagerung in z-Richtung bei ebenfalls ca. 12Hz. Die Frequenz der Mode hängt stark vom Elastizitätsmodul der

Lagerungen ab. Da die betrachteten akustischen Frequenzen deutlich höher liegen, ist eine genaue Simulation der Modenfrequenz der untersten Moden aber nicht erforderlich.

Die 3. Mode bei 17Hz zeigt sich in einer gegenphasigen Schwingung der oberen Wandecken in z-Richtung.

Die 4. Mode bei 25Hz ist eine gegenphasige Schwingung der oberen und unteren Wandkante in z-Richtung.

Die 5. Mode bei 31Hz ist eine vertikale Schwingung auf der Lagerung. Ihre Frequenz wurde durch Abstimmen der Lagerung angepasst. Die Auslenkung in z-Richtung ist gering.

Die 6. Mode bei 31Hz ist eine Rotationsschwingung in der Wandebene, die ebenfalls durch die Lagerung bestimmt wird. Die Auslenkung in z-Richtung ist gering.

Die 7. Mode bei 39Hz ist eine Schwingung der vier Wandecken in z-Richtung, wobei benachbarte Ecken gegenphasig schwingen.

Die 8. Mode bei 52Hz ist eine Schwingung der Wandmitte in z-Richtung.

Die 9. Mode bei 71Hz ist eine Biegeschwingung der Rahmenstücke, wobei gegenüberliegende Rahmenstücke jeweils gleichphasig in z-Richtung schwingen. Hierdurch erfährt die Wand eine Biegeschwingung.

Die 10. Mode bei 89Hz ist eine Biegeschwingung der Wand, wobei in vertikaler Richtung eine Biegewellenlänge auf die Wand passt und der obere und der untere Wandbereich gegenphasig schwingen.

Die 11. Mode bei 95Hz ist eine Biegeschwingung der Wand, wobei in horizontaler Richtung eine Biegewellenlänge auf die Wand passt und der linke und der rechte Wandbereich gegenphasig schwingen.

Die 12. Mode bei 126Hz ist eine Biegeschwingung des Rahmens. Hierdurch erfährt allerdings auch die Wand eine Biegeschwingung, wobei in vertikaler Richtung 1.5 Biegewellenlängen auf die Wand passen.

Die 13. Mode bei 135Hz ist ebenfalls eine Biegeschwingung des Rahmens. Allerdings sind im Vergleich zur vorherigen Mode die Rollen von x und y vertauscht.

Die 14. Mode bei 144Hz ist eine Biegeschwingung der Wand mit jeweils einer Wellenlänge in x- und y-Richtung.

Außer den Moden 1, 5 und 6, die näherungsweise starre Bewegungen in der Wandebene darstellen, wurden alle Moden bei Untersuchungen mit dem Laservibrometer nachgewiesen. In Abbildung 49 ist die Prüfwand vom Empfangsraum aus mit den reflektierenden Messpunkten zu sehen. Die Moden 5 und 6 konnten durch Messungen mit einem Beschleunigungsaufnehmer außen am Rahmen nachgewiesen werden. In Abbildung 50 sind die Befestigungspunkte für die Aufnehmer an einer äußeren Flanke des Rahmens zu sehen.

Die mit einem Laservibrometer gemessenen Eigenschwingungen der Wand sind in den Abbildung 51 bis Abbildung 62 zu sehen, die berechneten in den Abbildung 63 bis Abbildung 81. Die mit Beschleunigungsaufnehmer erfassten Bewegungen des Rahmens sind in Abbildung 82 beispielhaft für die 10. Mode zusammen mit der Wandbewegung abgebildet.

Die über mehrere Anregungspunkte und alle Messpositionen des Laservibrometers energetisch gemittelte Wandschnelle ist in Abbildung 83 dargestellt, die entsprechende gerechnete Schnelle an einer Wandposition mit einer Anregungsposition in Abbildung 84.

### 3.5. Simulation des gesamten Prüfstands

Zur Simulation des gesamten Prüfstands müssen beide Räume an die Prüfwand gekoppelt werden. Die Impedanzsprünge zwischen Luft und Prüfwand sind sehr hoch, was eine hohe Schalldämmung zur Folge hat. Deshalb reicht es aus, die Anregung der Prüfwand nur seitens des Senderraums zu berücksichtigen. Der Pegel im Empfangsraum ist hierfür bei ausreichender Raumdämpfung irrelevant. Ebenso kann die Rückwirkung der Prüfwand auf den Senderraum vernachlässigt werden. Die vorliegende Rechnung wurde allerdings mit einem vollständig gekoppelten Modell durchgeführt, bei dem alle Rückwirkungen enthalten sind. Die beiden Räume wurden mit der Methode der Randelemente simuliert.

Die Eigenschaften der Wand gehen über die zuvor mit finiten Elementen berechneten 40 Moden und deren Anregungsimpedanz ein. Die beiden Räume wurden als ein Gesamtmodell aus zwei nicht zusammenhängenden Randnetzen modelliert. Hierbei war es nicht möglich, die direkte Kopplung zwischen zu unterschiedlichen Räumen gehörenden Knoten auf Null zu setzen. In der nicht diskreten Mathematik verschwindet die gegenseitige Beeinflussung solcher getrennter Gebiete (Gaußscher Satz!). Im numerischen Fall ist dies aber nur mit endlicher Genauigkeit erfüllt. Da die Pegelunterschiede zwischen Sende- und Empfangsraum größer als die Rechengenauigkeit des Modells sind, kommt es so zu einer direkten "Flankenübertragung", die größer als die Übertragung über die Prüfwand ist. Deshalb wurde innerhalb der Randelementerechnung der Abstand zwischen den Räumen auf 1000m erhöht, was zu einer Ausbreitungsdämpfung führt, die die "Flankendämmung" im interessierenden Frequenzbereich auf mindestens 80dB erhöht.

Die Nachhallzeit der Prüfräume kann im Modell durch Änderung der Absorberimpedanzen angepasst werden. Nachhallzeit bzw. Absorption sind für jede Mode von deren räumlichem Muster abhängig. Dies ist leicht einzusehen, da für eine Fläche mit Impedanz  $Z$  die Absorptionsleistung pro Flächeneinheit  $P$  gegeben ist durch:

$$P = v_{\text{senkrecht}} \cdot p = \frac{p^2}{Z} \quad (9)$$

Somit hängt  $P$  vom Schalldruck  $p$  der Mode auf der Fläche ab. Durchschnittlich ist  $P$  zu hohen Frequenzen hin kleiner, da es mit zunehmendem Verhältnis von Absorber-Kantenlänge zu Schallwellenlänge zu einer Verminderung (Verdrängung) des Schalldrucks auf der Absorberfläche kommt. Dieses Phänomen ist eine Folge des Kanteneffekts.

Eine genaue Einhaltung der Nachhallzeit im Modell ist nicht erforderlich, ebenso nicht die genaue Korrektur der Schalldämmung, da sie zu einem Verständnis der prinzipiellen Verhältnisse keinen Aufschluss liefert. Die Nachhallzeit sollte lediglich keine sprunghaften Abweichungen von derjenigen der Messung aufweisen.

### **3.6. Modale Betrachtung der Schalldämmung**

Im Folgenden wollen wir uns ein modales Bild vom Zustandekommen der Schalldämmung bei einer bestimmten Frequenz machen (für eine geschlossene mathematische Formulierung, s. [Gagliardini 1991]). Hierfür müssen wir einige physikalische Sachverhalte berücksichtigen.

- 1.) Die Anregbarkeit einer Mode in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz ist durch die Resonanzkurve einer harmonischen Schwingung gegeben: Die Modenenergie ist proportional zum Quadrat der Amplitude der Resonanzkurve.
- 2.) Jede Mode im Senderaum regt unterschiedlich stark jede Mode im Empfangsraum an. Da bei der Schalldämm-Messung viele Lautsprecher- sowie Mikrofon-Positionen gemittelt werden, werden allerdings Interferenzen zwischen verschiedenen Wechselwirkungspaaren von je einer Sende- und einer Empfangsraummode eliminiert. Es kann somit jeweils energetisch über die Paarbeiträge summiert werden. Das gilt sowohl für die modalen Energien in den Räumen als auch für die von verschiedenen Senderaum-Moden in eine Empfangsraum-Mode übertragenen Energien.
- 3.) Die Energie wird von den Moden des Senderaums auf die Wandmoden übertragen und von diesen auf die Empfangsraum-Moden. Wir haben es also mit einer zweistufigen Übertragung zu tun. (Dies hat zur Folge, dass in Punkt 2 nicht

Wechselwirkungspaare energetisch gemittelt werden, sondern beliebige Dreierkombinationen von einer Senderraum- einer Wand- und einer Empfangsraum-Mode.)

4.) Die Energie, die eine Mode in einem System (Raum oder Wand) in eine Mode in einem anderen System (Wand oder Raum) überträgt ist proportional zum Quadrat des modalen Überlappintegrals. Betrachten wir hierfür die Übertragung vom Senderraum auf die Wand: Das Druckmuster, das die Raummode auf der Wand erzeugt, wird mit dem Auslenkungsmuster der Wandmode multipliziert und über die Wandfläche integriert. Dies ergibt das Überlappintegral. Wenn nun beispielsweise die Wandmode genau eine vertikale Knotenlinie aufweist, aber die Raummode vertikal spiegelsymmetrisch ist, verschwindet das Überlappintegral. Aus Reziprozitätsgründen ist für die Übertragung von der Wand in den Empfangsraum ebenfalls das Überlappintegral von dem Auslenkungsmuster der Wandmode und dem Druckmuster der Raummode auf der Wand verantwortlich.

In Abbildung 85 sind für die Resonanzkurven die Schnellepegel der einzelnen Eigenresonanzen der Prüfwand bei festem anregenden Druck eingezeichnet. Die modalen Dämpfungen entsprechen Verlustfaktoren von 2%. Zusätzlich ist der energetisch gemittelte Schnellepegel für festen anregenden Druck eingezeichnet. Die Dämpfungen entsprechen ebenfalls Verlustfaktoren von 2%. Die Kurven sind auf den Schalltransmissionsgrad unter der Annahme senkrechten Schalleinfalls und vollständigen modalen Überlapps normiert.

Der Abfall bei hohen Frequenzen beträgt 6dB pro Oktave. Hierin zeigt sich das Verhalten des Massengesetzes. Nehmen wir nun an, eine Anzahl von Wandmoden liege bei Frequenzen weit unterhalb einer bestimmten Anregungsfrequenz des Lautsprechers im Senderraum. Unterschiede der Überlappintegrale seien vernachlässigt. Offenbar können dann alle Wandmoden bei dieser Frequenz gleichermaßen zur Schalltransmission beitragen. (Die Resonanzkurven in Abbildung 85 laufen zu hohen Frequenzen hin zusammen.) Liegen die Wandmoden hingegen weit oberhalb der betrachteten Raummode, so kann eine Wandmode um so stärker zur Transmission beitragen, je näher sie bei der Raummode liegt. (Die Resonanzkurven Abbildung 85 laufen zu niedrigen Frequenzen hin nicht zusammen.)

Eine bestimmte Wandmode kann allerdings gleich gut bei im logarithmischen Maßstab gleich weit von ihrer Resonanzfrequenz entfernten Frequenzen angeregt werden und zur Transmission beitragen. (Jede einzelne Resonanzkurve ist symmetrisch.) Bei einer vorgegebenen Frequenz kann also der Einfluss von Wandmoden, die eine deutlich höhere Eigenfrequenz haben, vernachlässigt werden, nicht hingegen der Einfluss von tiefer liegenden Moden. In der Rechnung wurden die 40 untersten Wandmoden, d.h. Moden bis zu einer Frequenz von 365Hz, berücksichtigt.

Die Schalltransmission über Moden, die im Bereich ihrer Resonanzfrequenz stattfindet, wird als resonante Übertragung bezeichnet. Ihre Stärke ist von der Modendämpfung der Wand abhängig. Die Übertragung weit oberhalb der Resonanzfrequenz, wo die Dämpfung keine Rolle mehr spielt, wird als nicht resonante Übertragung bezeichnet.

Die Rechnung erfolgte bei Einzelfrequenzen, die Messung jedoch in Frequenzbändern. Dies führt dazu, dass erwartungsgemäß die gerechnete Schalldämmkurve im Mittel höher als die gemessene liegt, was zum Einen durch den logarithmischen Maßstab der y-Achse bedingt ist. Aber selbst bei energetischem Auftragen führt die Mittelung der Bänder zu kleineren Schalldämmwerten, wenn näherungsweise gemeinsame Resonanzfrequenzen von Sende- und Empfangsraum auftreten [Heckl, 1958].

### **3.7. Analyse der Schalldämmung**

Als nächstes soll der Verlauf des Schalldämm-Maßes qualitativ erklärt werden. Dazu untersuchen wir bei einer bestimmten Frequenz die Schallübertragung in den Empfangsraum über verschiedene Pfade von gekoppelten Moden und schätzen die durch sie bedingte Pegelstärke ab. Diese vergleichen wir mit dem gemessenen Pegel im Senderraum. Für die Transmission sind nur diejenigen Moden im Senderraum relevant, die bei der betrachteten Frequenz an die Wand koppeln. Zum Senderraumpegel tragen aber im Allgemeinen noch weitere Moden bei.

Die räumliche Verteilung der Luftschallmoden wurde nicht gemessen. Im Senderraum wurde allerdings mit einem Referenzmikrofon das Spektrum bei

Lautsprecheranregung gemessen. Das Mikrofon befand sich annähernd in der rückwärtigen Knotenfläche der Moden mit zwei Knotenflächen in z-Richtung. Deshalb sind die Moden 5, 8, 10, 13 im Spektrum unterdrückt, was die angenommenen räumliche Muster belegt.

Die gemessene Schalldämmung ist in Abbildung 86 in 1/24-Oktaven und in Terzen dargestellt. Es wurde an zwei Lautsprecher-Positionen und mit je zwei Mikrofonbahnen gemessen. Die simulierten Spektren sind in Abbildung 87 bis Abbildung 89 als durchgezogene Linien dargestellt. Im oberen Diagrammbereich ist jeweils der Senderaumpegel zu sehen, darunter das Schalldämm-Maß. Die gestrichelten Linien geben die entsprechenden Messungen mit nur einer Lautsprecher-Position und je einer Mikrofonbahn in 1/24-Oktaven wieder. Zusätzlich zu der Rechnung bei Einzelfrequenzen sind die Ergebnisse des simulierten und des gemessenen Schalldämm-Maßes in Terzen dargestellt. Die nahezu gerade durchgezogene Linie im unteren Diagrammbereich gibt zum Vergleich die Schalldämmung einer unendlich ausgedehnten biegeweichen Wand gleicher Masse wieder. Die Abbildung 87 bis Abbildung 89 unterscheiden sich lediglich aufgrund der Absorptionseigenschaften der Räume. Alle drei Abbildungen sind mit einer geringen, rein reellen Admittanz von  $0.008/\rho c$  gerechnet, die über die Prüfstandswände (ausgenommen den Bereich der Prüfwand) homogen verteilt ist. Zusätzlich wurden wie in der Prüfstandsskizze Abbildung 1 lokal verteilt Resonanzabsorber mit frequenzabhängiger Admittanz auf den Wänden angesetzt. In Abbildung 87 ist deren Resonanz mit einer wie in Abbildung 6 dargestellten komplexen Admittanz angesetzt. In Abbildung 88 ist der Imaginärteil der Admittanzen auf Null gesetzt. In Abbildung 89 ist das Vorzeichen des Imaginärteils der Admittanzen umgedreht. Offensichtlich wird das Prüfstandsverhalten insbesondere oberhalb der Resonanzen der Absorber (75Hz, 80Hz und 100Hz) stark beeinflusst.

Es wurde versucht, die Mikrofonpfade in der Simulation denjenigen bei den Messungen nachzubilden. Da die genauen Verhältnisse bei der Messung nicht rekonstruierbar sind, lassen sich Unterschiede zwischen gerechneten und gemessenen Pegeln bzw. Schalldämm-Maßen erwarten. Der Pegelverlauf im Senderaum wird durch die Simulation sehr genau nachgebildet. Die von der anregenden Punktquelle in der Simulation erzeugte Volumenschnelle wurde zu

höheren Frequenzen hin stetig erhöht. Dies hat keinen Einfluss auf die Schalldämmung, verhindert aber, dass der berechnete und der gemessene Senderaumpegel auseinanderlaufen. So wird der Vergleich von gemessenen und gerechneten Senderaumpegeln erleichtert. Durch die Mittelung über 1/24-Oktaven verschmieren die Resonanzspitzen dicht nebeneinander liegender Moden bei der Messung.

Der modale Überlapp zwischen Wandmoden und Raummoden ähnlicher Resonanzfrequenz ist im vorliegenden Fall hoch, da die betrachteten Frequenzen nicht weit unterhalb der Koinzidenzfrequenz liegen, und die Wandmaße kaum eine Wellenlänge übersteigen. Deshalb ist die resonante Übertragung, d.h. die Übertragung einer Wandmode bei ungefähr ihrer Eigenfrequenz, für diesen Wandtyp in Prüfständen sehr bedeutsam. Die Schalldämmung hängt somit stark von den Eigenmoden und -frequenzen der Wand ab. Hierdurch können Unterschiede im Einbau der Prüfwand zu starken Unterschieden der tieffrequenten Schalldämmung führen. Bei geringer Dämpfung der Prüfwand wie im vorliegenden Fall wird dieser Einfluss noch verstärkt (vgl. [Takahashi 1995]).

Die Überhöhung der Schalldämmung zwischen 72 und 78Hz ist einerseits durch die schlechte resonante Anregbarkeit der Wand verursacht. Zwischen 52Hz und 89Hz liegt nur die Mode bei 71Hz, die nur zu geringen Auslenkungen der Prüfwand führt. Hinzu kommt, dass bei dieser Mode die obere und untere Wandkante gegenphasig zur Wandmitte schwingen und somit lediglich ein nennenswerter Überlapp mit Moden besteht, die zwei horizontale Knotenlinien haben. Solche Moden treten allerdings erst ab 114Hz auf. Andererseits befindet sich zwischen 72 und 78Hz aber auch keine Empfangsraummode, wodurch die Überhöhung der Schalldämmung verstärkt wird.

Die Empfangsraummode bei 84.3Hz hat auf der Prüfwandfläche nur niedrige Amplitudenwerte, sie ist vorwiegend in den rückwärtigen Raumbereichen ausgeprägt. Deshalb ist ihre Anregbarkeit durch die Prüfwand gering. Gleiches gilt für die Mode bei 101.9Hz. Es ist eine typische Eigenart von schiefwinkligen Räumen mit der Form eines Trapezes, Moden auszubilden, die in verjüngten Raumbereichen keine ausgeprägten Maxima haben. Dies kann sich bei Prüfstandsbauförmern, die zur Prüfwand hin schmaler werden, bei tiefen Frequenzen ungünstig auswirken.

Zwischen ca. 82Hz und 95Hz ist die Schalldämmung ebenfalls sehr hoch. In diesem Bereich liegt außer der Empfangsraummode mit der Eigenfrequenz 84.3Hz, die kaum zur Transmission beitragen kann, jedoch noch eine weitere Mode bei 87.9Hz. Diese besitzt auf der Prüfwandsfläche genau eine Knotenlinie, und zwar in horizontaler Richtung, und sollte stark durch die 10. Wandmode anregbar sein. Diese wiederum wird bei 84.3Hz durch die Senderaummode mit der Eigenfrequenz 82.0Hz und passender Symmetrie angeregt. Die hohe Schalldämmung ist so erst einmal nicht erklärbar.

Die Ursache ist in den gewählten Abtastpfaden bzw. Positionen von Mikrofonen und Lautsprechern zu suchen. Wird beispielsweise eine Lautsprecherschiene verwendet, die den Lautsprecher auf einer Bahn mit geringen Abweichungen von der halben Raumhöhe führt, so wird der beschriebene Übertragungspfad wegen der Knotenfläche der beteiligten Raummoden auf halber Raumhöhe kaum angeregt. Im vorliegenden Fall wurde durch die Wahl der Mikrofonbahnen im Bereich der halben Raumhöhe verhindert, dass dieser Übertragungspfad gemessen wurde. Hierdurch wird ein ähnlicher Effekt erzielt, allerdings können hier die im Senderaum zwar angeregten aber nicht gemessenen Moden durchaus an Moden anderer Geometrie im Empfangsraum koppeln und so zur Verminderung des gemessenen Schalldämmmaßes beitragen. Im Senderaum werden auch bei der Wahl der Mikrofonbahnen im Bereich der halben Raumhöhe noch andere Moden erfasst, insbesondere die Mode mit der Eigenfrequenz 89.3Hz. Deshalb ist der gemessene Senderaumpegel trotzdem hoch und die Schalldämmung scheinbar ebenfalls. In der Simulation wurde im Senderaum eine Neigung der Mikrofonbahn von  $26.6^\circ$  gewählt, im Empfangsraum von  $14^\circ$ , jeweils mit Bahnradius 1.1m. Die Bahnen verlaufen derart im Raum, dass ihre Bereiche maximaler Abweichung von der halben Raumhöhe nahe bei den vertikalen Knotenflächen der Mode YZZ verlaufen, was zu einer weiteren Verminderung der Detektion führt. Die punktförmige Quelle befindet sich in Bodennähe vor der hinteren rechten Raumecke. Bei 89Hz ist im Unterschied zur Messung ein geringer Einbruch zu erkennen. Dies kann an nicht genau getroffenen Modenfrequenzen liegen, wodurch die Übertragungen Raum-Wand-Raum über die einzelnen Kombinationen in ihrer Stärke verändert würden. Es ist zu vermuten, dass im realen Prüfstand die Übereinstimmung der Frequenzen zwischen der

Empfangsraummode YZZ und der 10. Wandmode nicht derart hoch wie in der Simulation ist. Es kann auch daran liegen, dass die Absorber an den Empfangsraumwänden die Raummoden - und damit die Knotenflächen - stärker deformieren als im realen Prüfstand. Dann wirkt sich die Lage der Mikrofonbahn im Empfangsraum weniger gravierend aus. Dieser Effekt, dass Moden mit einer horizontalen Knotenlinie ausgeblendet werden, beeinflusst auch die Schalldämmung bei 72Hz, wo die Mode XY keinen deutlichen Einbruch erzeugt.

In der gesamten 80Hz-Terz trägt lediglich die Mode XYZ in bedeutendem Maße zum Empfangsraumpegel bei. Sie kann über die Senderaummode bei fast der gleichen Frequenz in Verbindung mit der 3. und 7. Wandmode angeregt werden. Im Senderaum tragen hingegen ca. zwei Moden deutlich und zwei weitere in geringerem Maße zum Pegel bei.

Oberhalb von 87.9Hz ist im Empfangsraum wiederum eine große Lücke bis zur nächsten Mode bei 99Hz. Insgesamt ergibt sich, dass über eine Breite von 18Hz, nämlich von 81Hz bis 99Hz keine Mode einen deutlichen Beitrag zum Empfangsraumpegel liefert. Bei ca. 100Hz bricht die Schalldämmung ein, da in diesem Bereich im Empfangsraum vier Moden sehr dicht liegen. Eine davon ist allerdings wiederum auf den rückwärtigen Raumbereich beschränkt. Im Senderaum befinden sich nahe 100Hz zwei Moden. Direkte Übereinstimmung der Modenverteilungen besteht zwischen den XXZ Moden in Sende- und Empfangsraum, sie werden vor allem über die 8. Wandmode aufgrund eines großen Überlappintegrals nichtresonant gekoppelt.

Von den beiden übrigen Empfangsraummoden bei 100Hz koppelt die Mode ZZZ an die 2., die 8. und in geringem Maße die 9. Wandmode, die wiederum über die Senderaummoden ZZZ bei 89.3Hz und YZZZ bei 105,9Hz angeregt werden. Durch die hohen Frequenzabweichungen dieser Moden ist die Anregung aber gering. Die Detektion der Empfangsraummode XYZZ wird wiederum durch die Lage der Mikrofonbahn unterdrückt. Prinzipiell koppelt sie über die 3. und die 7. Wandmode an die Senderaummode XYZZ bei 95.2Hz und über die 3. Wandmode auch an die Senderaummode XZZZ, allerdings mit geringerem Überlapp. Diese Kopplungen sind ebenfalls nichtresonant. die Empfangsraummode bei 110.6Hz koppelt über die 11.

Wandmode mit hohem Überlapp an die Senderaummode bei 101.9Hz. Allerdings sind die Frequenzabweichungen hoch.

Im Senderaum befinden sich in der 100Hz-Terz ca. vier Moden, im Empfangsraum wird hingegen der gemessene Pegel nur von ca. drei Moden bestimmt, von denen keine stark angeregt wird. Insbesondere findet eine stärkere resonante Übertragung über die 11. Wandmode nicht statt.

Die Schallübertragung über die in den Räumen sichtbaren Rahmenstücke ist bei tiefen Frequenzen gering. Bei den Moden, die einer starren Bewegung der Wand entsprechen, ist die transmittierte Leistung proportional zur abstrahlenden Fläche und zum Quadrat der angeregten Fläche. Somit ist die Transmission bei Moden mit Bewegung in der Wandebene deutlich geringer als bei Moden mit Bewegung senkrecht zur Wandoberfläche. Bei den Moden, die keinen starren Bewegungen entsprechen, ist im Falle niedriger Eigenfrequenzen (bis zur 11. Mode) die Oberflächenauslenkung der Rahmen deutlich kleiner als diejenige der Wandoberfläche. Bei höheren Frequenzen treten allerdings Drehschwingungen und Biegeschwingungen in x- bzw. y-Richtung der Rahmenelemente auf.

Ab ca. der 125Hz-Terz ist zu erwarten, dass deshalb der Beitrag der seitlichen Rahmenstücke zur Schalltransmission entsprechend der Größe der sichtbaren Rahmenfläche im Vergleich zur Prüfandsfläche ist.

## **4. Zusätzliche Messungen**

### **4.1. Schalldämmung bei Veränderung der Raummoden**

Zur Untersuchung der Auswirkung veränderter Raummoden auf die Schalldämmung im tieffrequenten Bereich wurden Gipskartonplatten in die Raumkanten seitlich der Prüfand gestellt. Diese 2cm dicken Platten hatten einen Winkel von ca. 45 Grad zu den Seitenwänden und reichten vom Boden zur Decke. Sowohl im Senderaum als auch im Empfangsraum standen zwei solche Platten, die aus je zwei gegeneinander versetzten 2cm dicken Platten aufgebaut waren. Die gemessene Schalldämmung der Versuchswand mit diesen Platten in 1/24-Oktaven und in Terzen ist in Abbildung 90 dargestellt.

Die stärkste Änderung der Schalldämmung ergibt sich in der 100Hz-Terz, wo die zuvor auftretende Überhöhung bei 90Hz verschwindet, und das Minimum bei 100Hz noch deutlicher wird. Dies zeigt, wie empfindlich der Wert des Schalldämm-Maßes in diesem Bereich auf Veränderungen der Raummoden reagiert.

Die Überhöhung bei 75Hz bleibt hingegen erhalten, da sie größtenteils durch die Eigenschaften der Wand bestimmt ist.

#### **4.2. Schalldämmung bei Veränderung der Wandmoden**

Die Wandmoden wurden durch Fixieren des Rahmens mithilfe zweier Stahlwinkel verändert (siehe Abbildung 91). Die Winkel saßen außen an den seitlichen Rahmenflächen und verringerten die Rahmenschwingung auf der elastischen Lagerung. Der wichtigste Effekt hierdurch ist das Verschwinden der 9. Wandmode und Auftreten einer Mode bei 78.5Hz, die stark an horizontal schwingende Tangentialmoden mit einer Knotenfläche in x-Richtung ankoppelt. Eine solche liegt im Empfangsraum bei 80.8Hz. Angeregt wird die Wandmode durch eine Senderraummode, die bei 76.2Hz liegt. Durch den geringen Modenabstand ergibt sich eine starke Schalltransmission bei 80Hz, die einem Einbruch der Schalldämmung um ca. 25dB in der 1/24-Oktave entspricht. Dies ist in Abbildung 92 zu sehen, wo die gemessenen Schalldämm-Maße dargestellt sind. Die Mode bei 78.5Hz ist stark unsymmetrisch bezüglich der horizontalen Achse. Dies deutet auf unterschiedlich starke Fixierung durch die Winkel hin.

Für die Simulation der Wand wurden die beiden unteren seitlichen Kanten des Rahmens fixiert. Durch diese Einschränkung der Bewegungsfreiheit der Wand verringert sich die Anzahl der Moden (Modendichte) bei niedrigen Frequenzen.

Tabelle 3: Eigenmoden der Wand mit und ohne Winkel

ohne Winkel		mit Winkel		
Nr.	f/Hz	Nr.	f/Hz	
1	12.1	1	16.0	entspricht 2
2	12.4	2	24.6	entspricht 3
3	17.5	3	44.1	entspricht 8
4	25.5	4	55.1	
5	30.8	5	73.2	
6	31.2	6	79.5	
7	38.7	7	84.9	
8	51.8	8	89.0	
9	71.3	9	114.3	
10	89.2	10	115.0	
11	95.0	11	125.9	
12	125.9	12	135.1	
13	134.8	13	149.5	
14	144.0	14	156.4	
15	145.5	15	169.1	
16	153.5	16	189.4	
17	156.1	17	197.6	
18	168.3	18	198.0	
19	193.9	19	220.6	
20	207.8	20	223.2	
21	216.4	21	239.4	
22	224.1	22	240.2	

Die aufgrund ihrer Schwingung in z-Richtung gemessenen Moden sind in Abbildung 93 bis Abbildung 97 dargestellt, die gerechneten Moden in Abbildung 98 bis Abbildung 111. Es ergibt sich eine Mode, die der zuvor bei 52Hz liegenden entspricht. Gemessen wurde sie bei 40Hz, in der Simulation liegt sie bei 44Hz. Zur gemessenen Mode bei 78.5Hz korrespondieren in der Simulation eine bei 73Hz sowie eine bei 79Hz, die allerdings jeweils eine deutlich andere Form aufweisen, zumal sie erwartungsgemäß bezüglich der vertikalen Achse symmetrisch sind. Bei der Mode bei 73Hz führt die obere Wandhälfte eine Biegeschwingung aus, die gegenphasig ist zu einer Biegeschwingung der seitlichen Rahmenstücke, ebenfalls konzentriert auf den oberen Bereich. Bei der Mode bei 79Hz führen das obere und das untere Rahmenstück eine Biegeschwingung gegenphasig zu einer

Biegeschwingung der Wandmitte aus. Gute Übereinstimmung der Bewegungsmuster ergibt sich zwischen einer gemessenen Mode bei 131Hz und der bei 135Hz in der Simulation. Auch hier führen Wand und Rahmen jeweils Biegeschwingungen in z-Richtung aus. Ebenfalls gute Übereinstimmung ergibt sich zwischen der Mode bei 147Hz (gemessen) und der bei 149Hz (gerechnet). Diese sind allerdings kaum durch die zusätzlichen Randbedingungen beeinflusst, sie entsprechen der zuvor bei 144Hz gefundenen Mode. Insgesamt können die bei tiefen Frequenzen gemessenen Moden durch die Simulation allerdings nicht gut reproduziert werden. Es ist anzunehmen, dass sich die Randbedingungen, die durch die Winkel aufgezwungen werden, zu stark von denen in der Simulation unterscheiden.

## **5. Schlussfolgerungen und Vorschläge**

### **5.1. Schlussfolgerungen**

Die Ursachen für den Verlauf der Schalldämmung im vorliegenden Fall konnten erklärt werden. Sie sind auf Eigenschaften der Räume, die Einbauweise des Rahmens und den Verlauf der Anregungs- bzw. Abtastpfade zurückzuführen. Der Einfluß der Raumgeometrie auf die Schalldämmung kann beträchtlich sein. In [Osipov, 1997] wurde in einer Parameterstudie ein Einfluss durch die Änderung der Raumgeometrie auf die Schalldämmung in Terzen einer einschaligen Wand von bis zu 15dB festgestellt

Das Befolgen der Normvorschrift, in den Prüfräumen so lange Diffusoren hinzuzufügen, bis sich das Schalldämm-Maß nicht mehr verändert, hätte im vorliegenden Fall gezeigt, das der Prüfstand noch nicht in einem stabilen Zustand ist. Durch das Hinzufügen der Gipskartonplatten wurden Diffusoren hinzugefügt, wodurch sich die Schalldämmung zwischen 80Hz und 100Hz änderte. Allerdings ist fraglich, inwieweit dort ein stabiler Zustand überhaupt erreicht werden kann. Dies sollte in einem zukünftigen Forschungsprojekt untersucht werden.

Bei einer sich zur Prüfwand hin verjüngenden Bauform der Räume treten bei tiefen Frequenzen einzelne Raummoden auf, die kaum zur Schalltransmission beitragen können, da sie auf rückwärtige Raumbereiche beschränkt sind. Es ist zu vermuten, dass durch großflächige Diffusoren dieses Modenverhalten verändert werden könnte.

Der Nachteil von Diffusoren ist allerdings, dass sie den Schwenkbereich der Mikrophonegalgen reduzieren.

Schiefwinklige Räume können in ihrem Verhalten bei tiefen Frequenzen schlecht vorhergesagt werden, da die Eigenfrequenzen der Moden vorab nur numerisch berechnet werden könnten, was mit großem Aufwand verbunden wäre. Für rechteckige Räume können die Eigenfrequenzen hingegen leicht algebraisch ermittelt werden:

$$\sqrt{\frac{l^2}{x^2} + \frac{m^2}{y^2} + \frac{n^2}{z^2}} = \frac{2f}{c} \quad (10)$$

mit  $l, m, n$  ganzzahlig.

Eine Lautsprecherschiene sollte für tiefe Frequenzen möglichst lang sein und so verlaufen, dass der Lautsprecher nicht entlang der Knotenflächen einzelner Raummoden bewegt wird. D.h. insbesondere, der Lautsprecher soll nicht auf ungefähr halber Raumhöhe geführt werden. Vielmehr ist eine möglichst diagonale Führung des Lautsprechers anzustreben.

Für die Mikrofonbahnen gilt ebenfalls, dass sie sehr diagonal verlaufen sollten, beispielsweise ca.  $45^\circ$  geneigt. Ein relativ flacher Winkel (die Norm ISO 140-3 gibt eine Mindestneigung von lediglich  $10^\circ$  vor) auf halber Raumhöhe, der sich ja auch bei Umstellen des Stativs nicht verändert, ist ungünstig. Der Bahnradius sollte bei tiefen Frequenzen möglichst groß sein, z.B. 1.5m. Im diffusen Feld entspricht eine Mikrofonbahn mit Kreisumfang  $L$  einer äquivalenten Anzahl von  $N = 2L/\lambda$  statistisch unabhängigen Messpunkten, wenn für die Wellenlänge  $\lambda < 2L$  gilt (siehe [Lubmann 1973]). Bei einem Bahnradius von einem Meter entspricht die Bahn bei 80Hz also lediglich drei Messpunkten, was nicht ausreichend ist.

Durch das Anbringen von Winkeln außen seitlich am Prüfstandsrahmen konnte die Schalldämmung zwischen 60Hz und 80Hz stark verändert werden. Die Wirkung der Winkel besteht in einer Veränderung von den Eigenfrequenzen und der Form der Wandmoden, was im vorliegenden Fall zur Veränderung der Schalldämmung führt. Eine eventuelle Veränderung des Verlustfaktors ist nicht die Ursache. Die Schallableitung durch die Winkel dürfte ohnehin vernachlässigbar klein sein. Dies

zeigten auch Messungen der Körperschall-Nachhallzeit seitens der Prüfstelle. Trotzdem würde sich ein höherer Verlustfaktor günstig auswirken, da die Resonanzspitzen der Wandmoden dadurch reduziert werden. Dies könnte einen glättenden Einfluss auf das Schalldämm-Maß haben, (was allerdings noch zu untersuchen wäre, z.B. numerisch) und sollte mögliche Einbrüche der Schalldämmung durch zufällige Übereinstimmungen von Wand- und Raummoden verringern.

Bei höheren Frequenzen (ab ca. der 125Hz-Terz) ist die Schalltransmission über die seitlichen Rahmenstücke nicht mehr völlig zu vernachlässigen. Diese sollten deshalb möglichst wenig in die Räume hineinragen oder durch Vorsatzschalen abgedeckt werden.

Für einen gleichmäßigen Verlauf der Schalldämmkurve wären dicht liegende Eigenfrequenzen für die Prüfwand günstig. Hierfür müsste eine große Struktur unter Vermeidung eines Impedanzsprungs an den Rand der Prüfwand angekoppelt werden. Dies ließe sich prinzipiell durch die Einbettung der Prüfwand in eine größere freistehende Wand erreichen.

## **5.2. Vorschläge**

- möglichst keine schiefwinkligen Räume
- keinesfalls Verjüngung des Prüfstands zur Prüfwand hin
- Mikrofonbahn groß (Radius von 1,5m) und stark geneigt (nahe 45°)
- Lautsprecherbahn lang (2m) und ebenfalls stark geneigt (nahe 45°)
- Abdeckung des Wandeinbaurahmens zur Vermeidung (seitlicher) Flankenübertragung
- Bedämpfung des Prüfobjekts durch seitliche Energieableitung

## **Literatur**

L. Gagliardini, J. Roland. The use of a functional basis to calculate acoustic transmission between rooms. J. Sound Vib. 145, S. 457-478, 1991.

K. Gösele. Verringerung der Luftschalldämmung von Wänden durch Dickenresonanzen. Bauphysik, 12, 187-191, 1990

M. Heckl, K. Seifert, Untersuchungen über den Einfluss der Eigenresonanzen der Messräume auf die Ergebnisse von Schalldämmmessungen, *Acustica* 8, S. 212-220, 1958.

W. Lauriks, A. Cops, Ph. Belien, The influence of the Edge Effect on the Statistical Absorption Coefficient, *Acustica* 70, S. 155-159, 1990

D. Lubmann, R.V. Waterhouse, C.-S. Chien, Effectiveness of continuous spatial averaging in a diffuse sound field, *J. Acoust. Soc. Am.* 53, S. 650-659, 1973

F.P. Mechel, *Schallabsorber Band II*, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1995.

F.P. Mechel, *Schallabsorber Band I*, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1989.

A. Meier. Die Bedeutung des Verlustfaktors bei der Bestimmung der Schalldämmung im Prüfstand. Dissertation, Shaker – Verlag, 2000

A. Meier, A. Schmitz, G. Raabe Inter-Laboratory Test of Sound Insulation Measurements on Heavy Walls Part II – Results of Main Test, *Journal of Building Acoustics* Nr. 3 & 4, S.159-168, 1999

A. Osipov, P. Mees, G. Vermeir. Low frequency airborne sound transmission through single partitions in buildings. *Applied Acoustics*, 52, 278-288, 1997.

A. Schmitz, A. Meier, G. Raabe. Inter-Laboratory Test of Sound Insulation Measurements on Heavy Walls- Part I Preliminary Test, *Journal of Building Acoustics* Nr. 3 & 4, S.159-168, 1999

D. Takahashi, Effects of panel boundedness on sound transmission problems, *J. Acoust. Soc. Am.* 98, S. 2598-2606, 1995.

**Abbildungen**

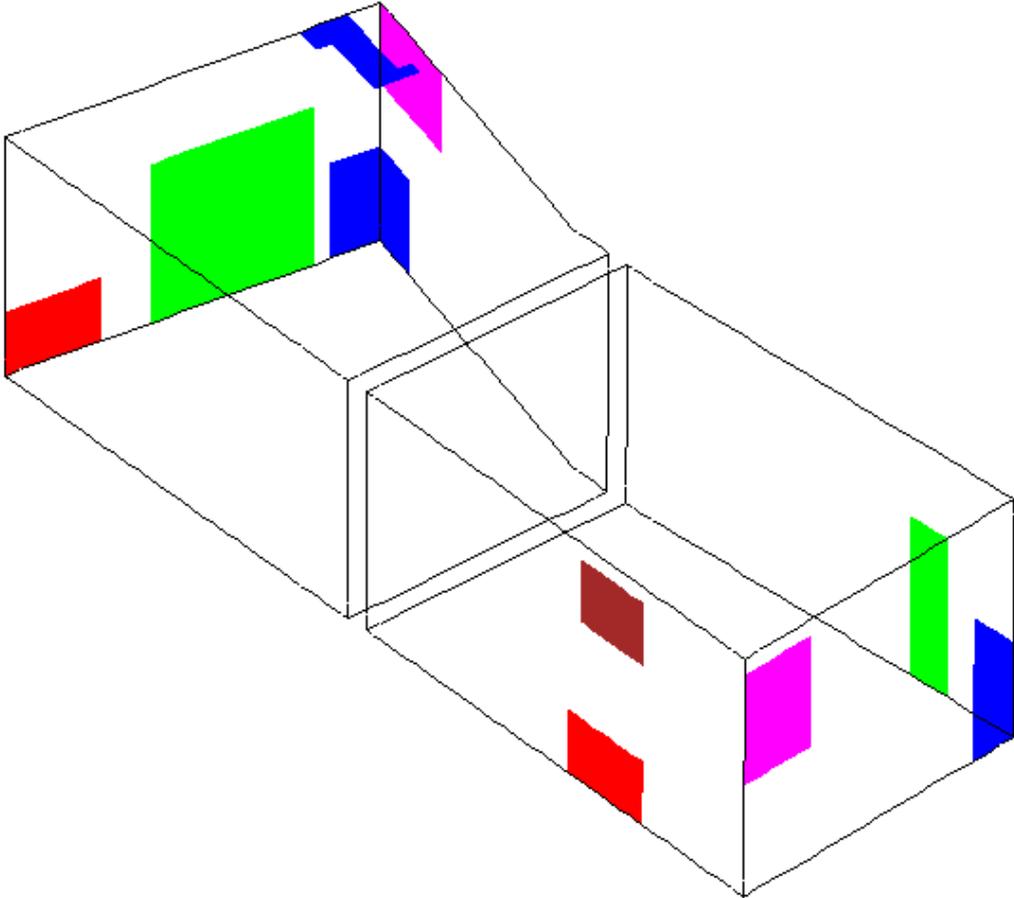


Abbildung 1 Prüfstandsräume mit Absorbern und Türen. Der Senderraum befindet sich rechts.

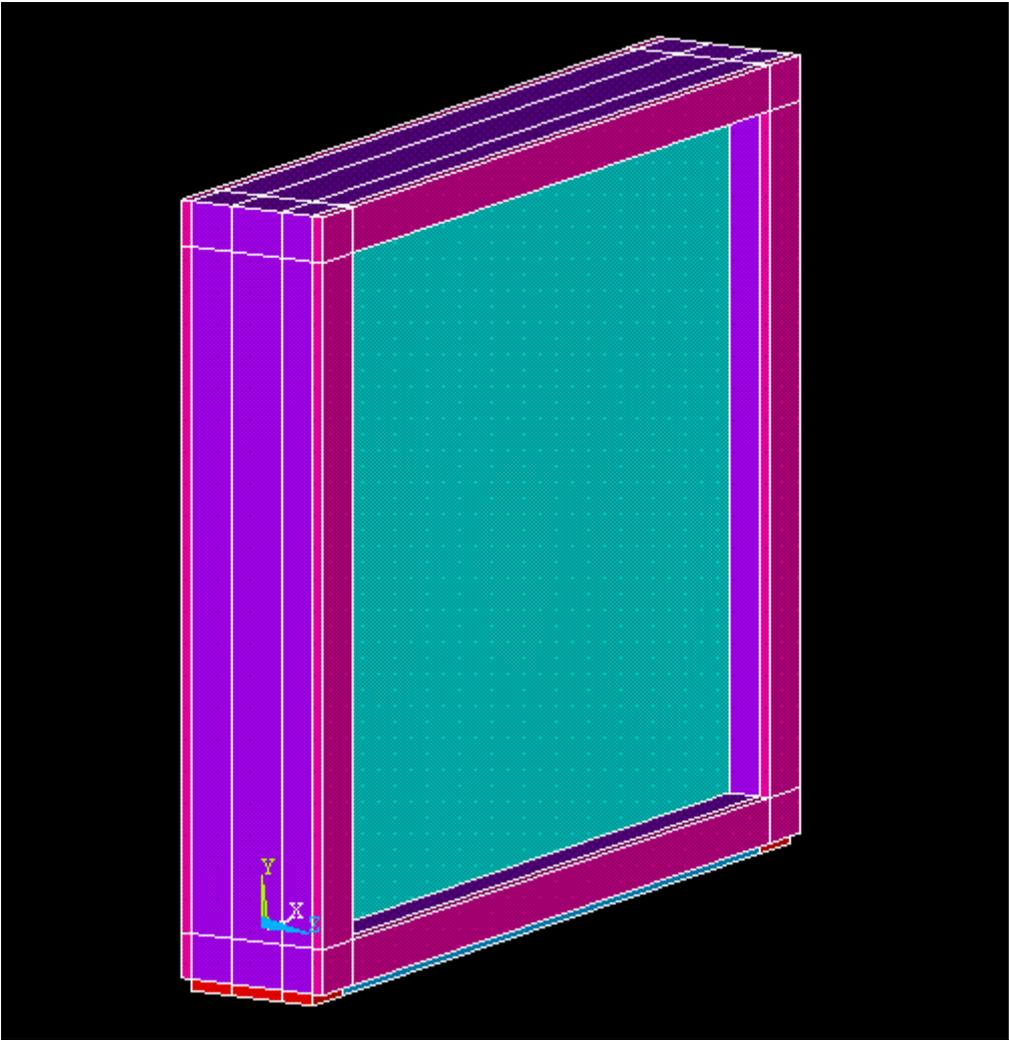


Abbildung 2 Prüfwand mit Rahmen. Der Senderraum befindet sich rechts.

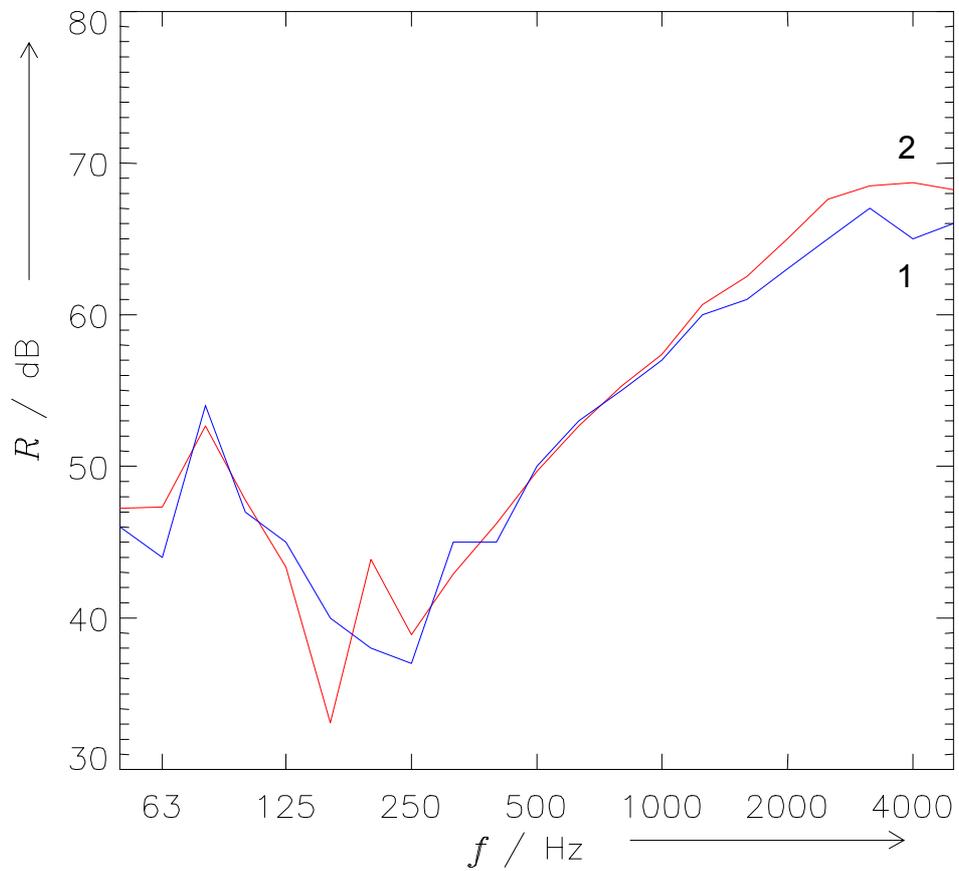


Abbildung 3 Nachträglich in einem weiteren Prüfstand ermittelte Schalldämm-Maße an zwei verschiedenen Wandaufbauten, 1 – erster Aufbau, 2 – zweiter Aufbau

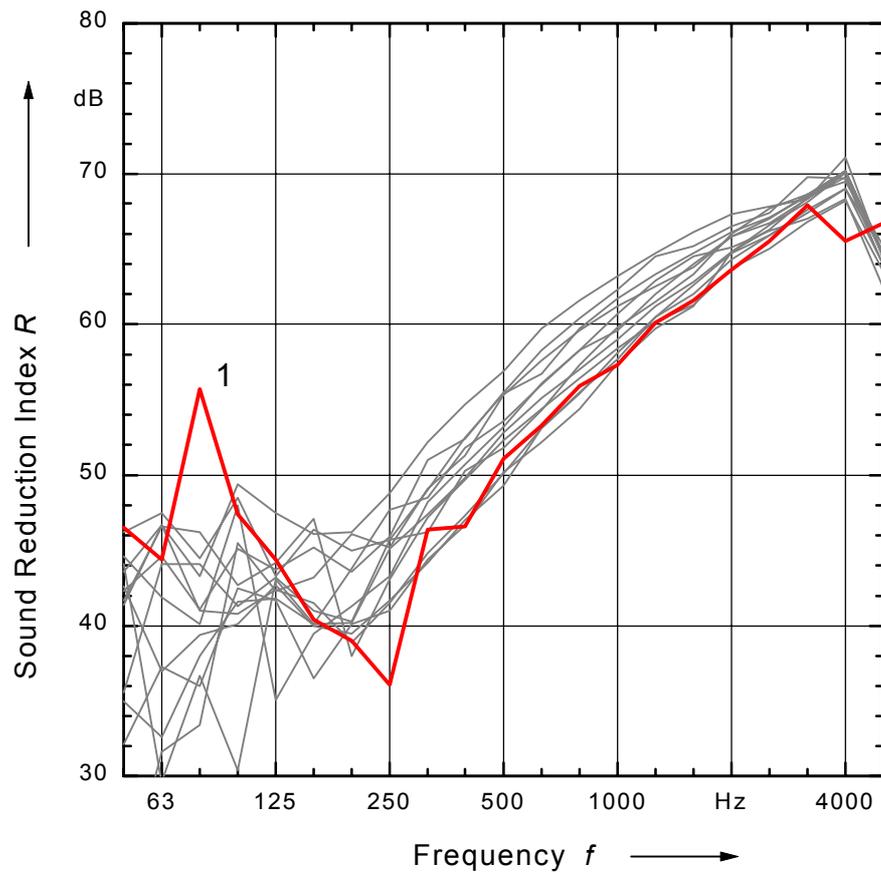


Abbildung 4 Schalldämm-Maße im Ringversuch und nachträglich im untersuchten Prüfstand ermittelter Wert (1)

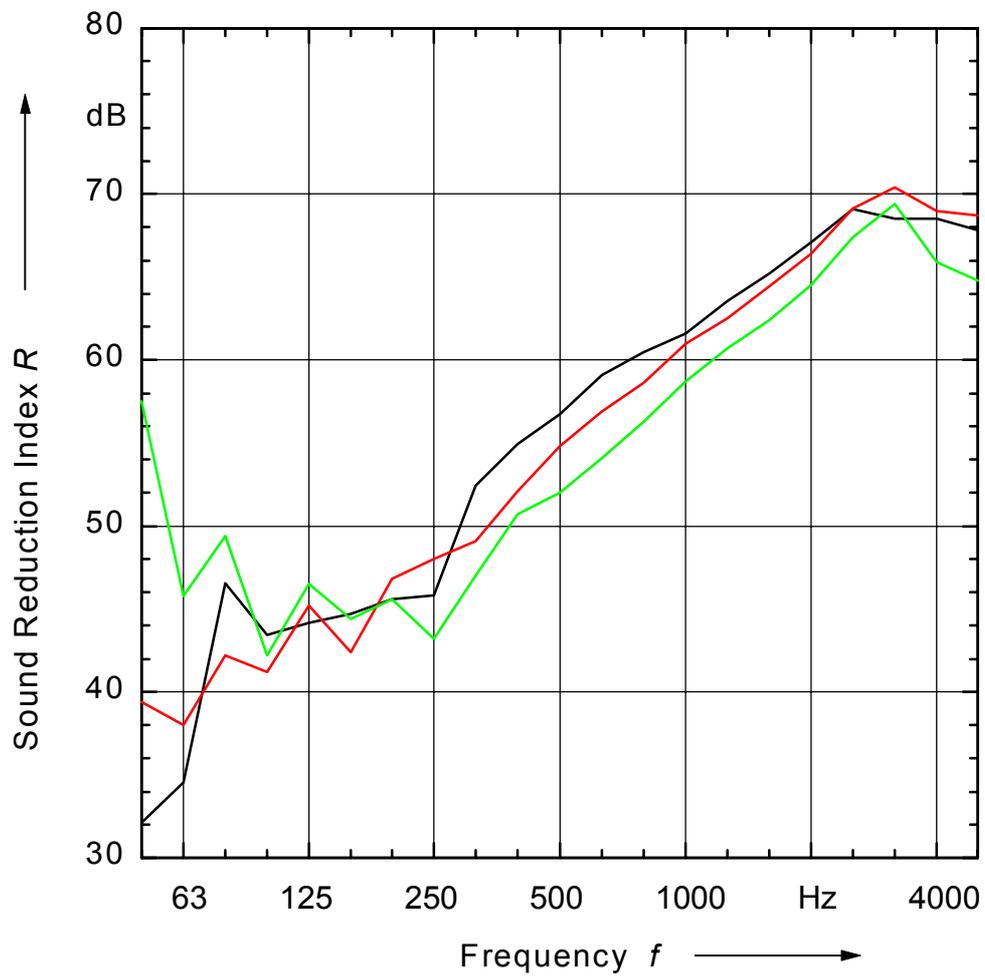


Abbildung 5 In drei weiteren Prüfständen nachträglich ermittelte Schalldämm-Maße.

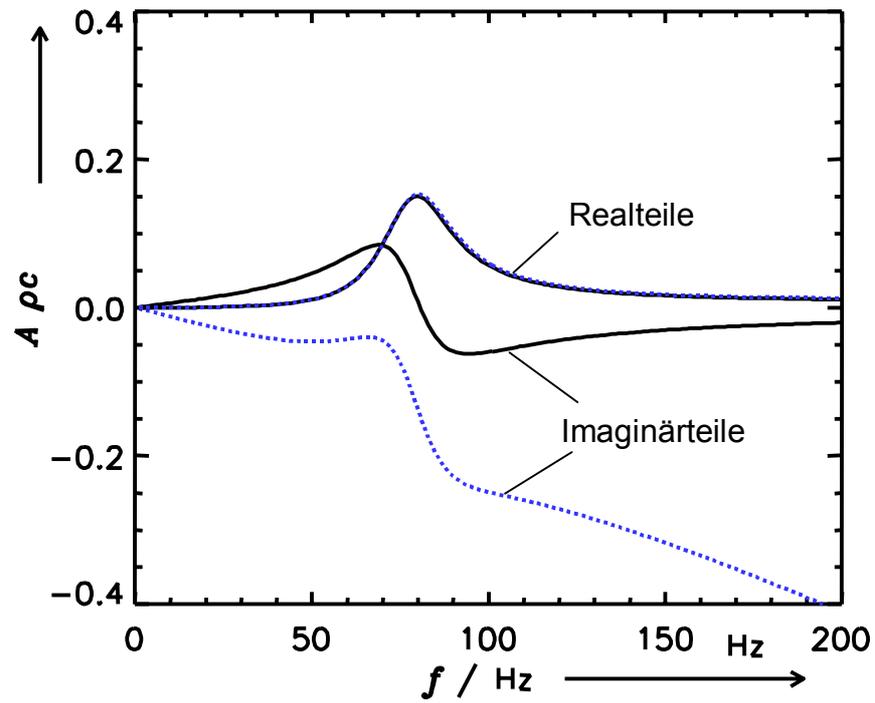


Abbildung 6 Real- und Imaginärteile der Admittanz von Plattenabsorbieren, auf der Wand (durchgezogen) und 10cm vor der Wand (gestrichelt)

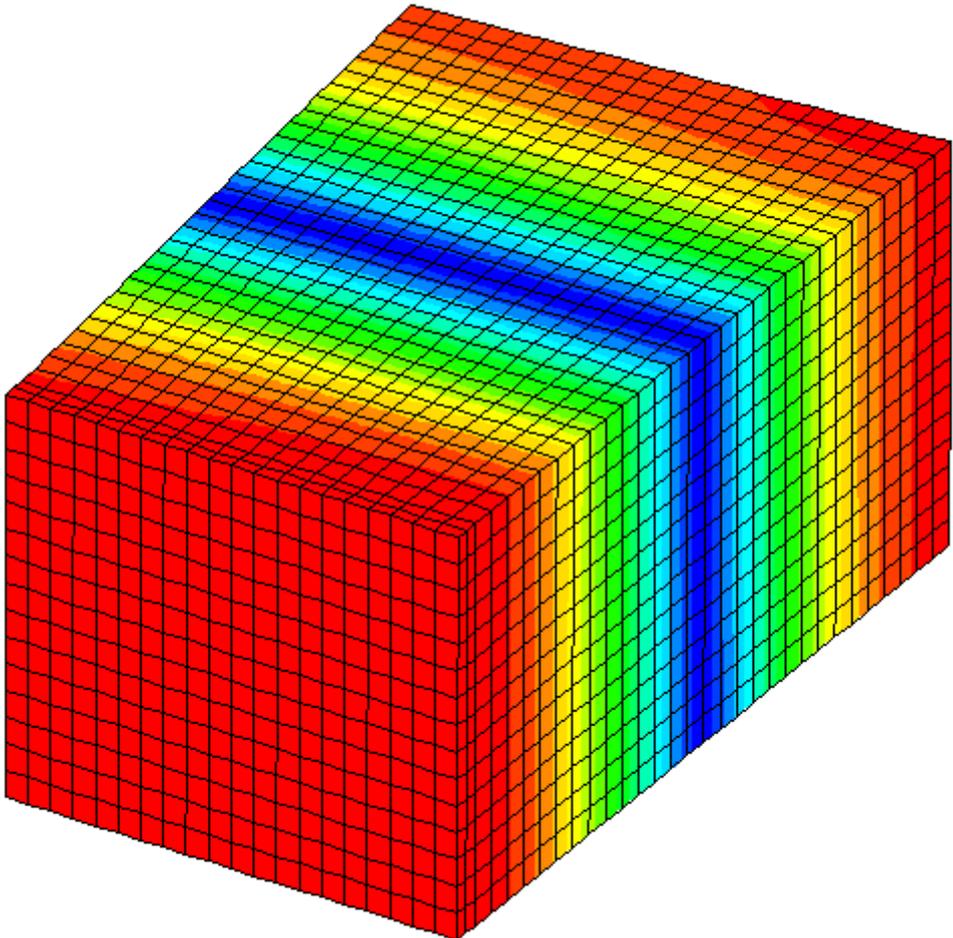


Abbildung 7 Senderaummode Nr. 1 (Schalldruck)

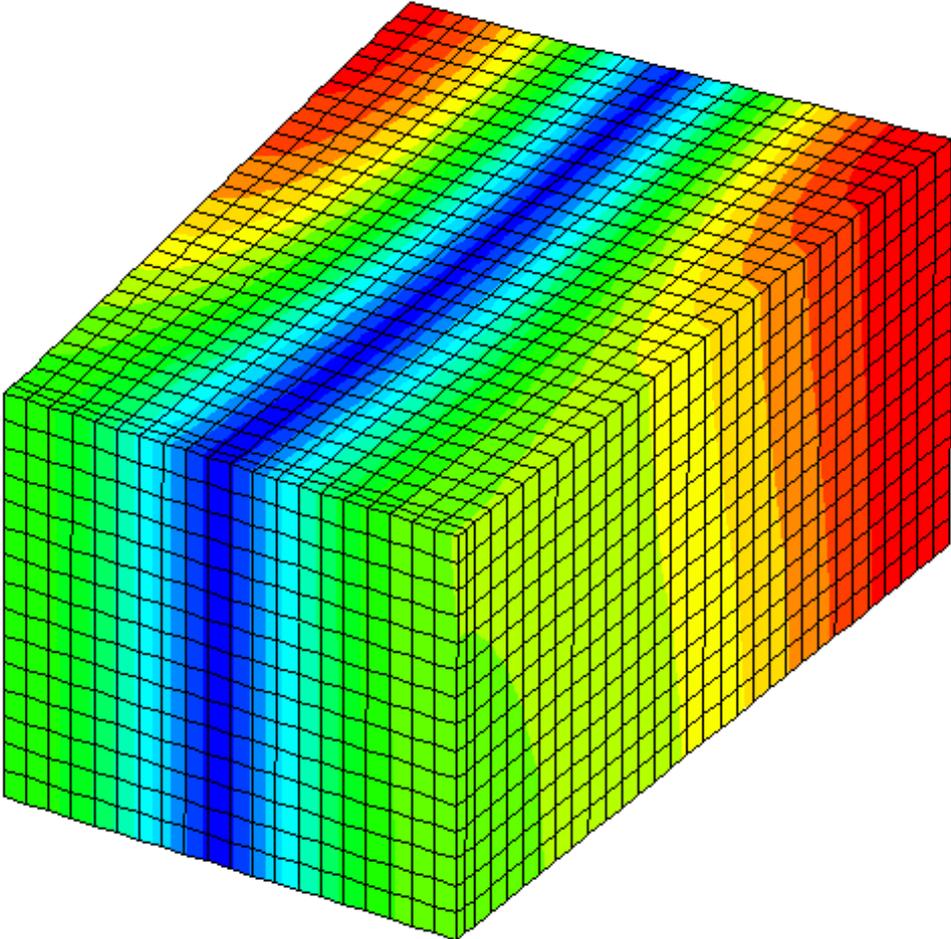


Abbildung 8 Senderraummode Nr. 2 (Schalldruck)

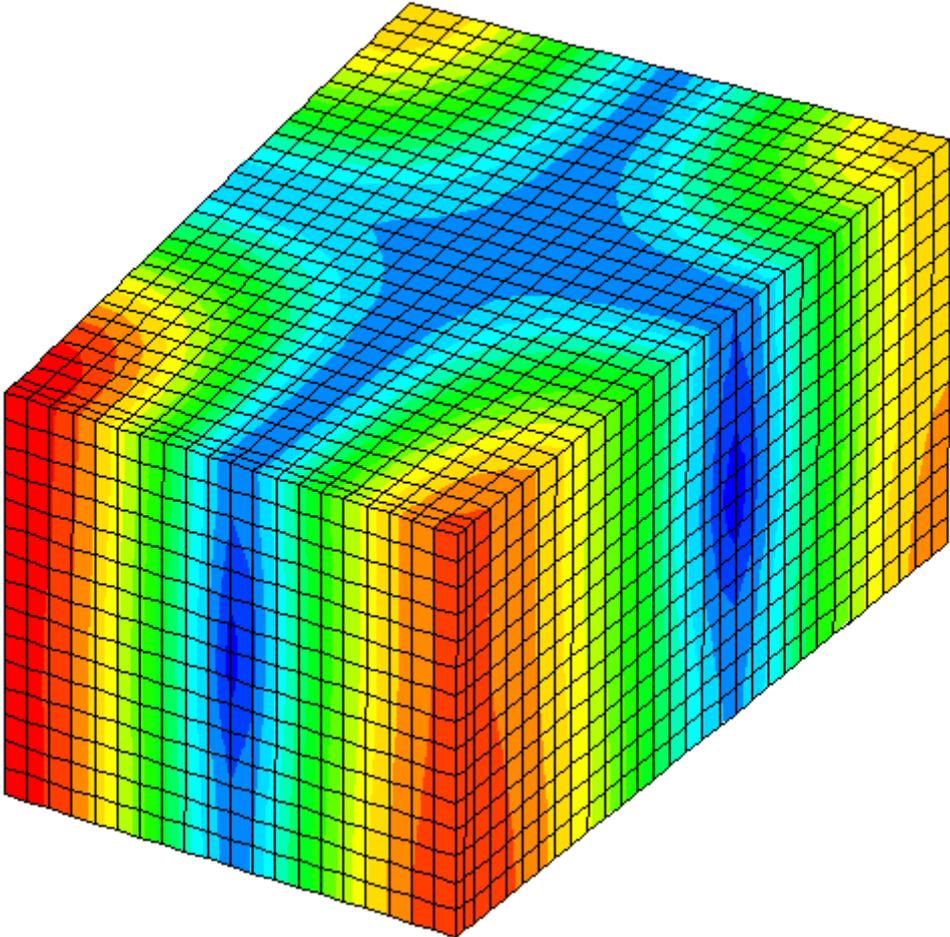


Abbildung 9 Senderraummode Nr. 3 (Schalldruck)

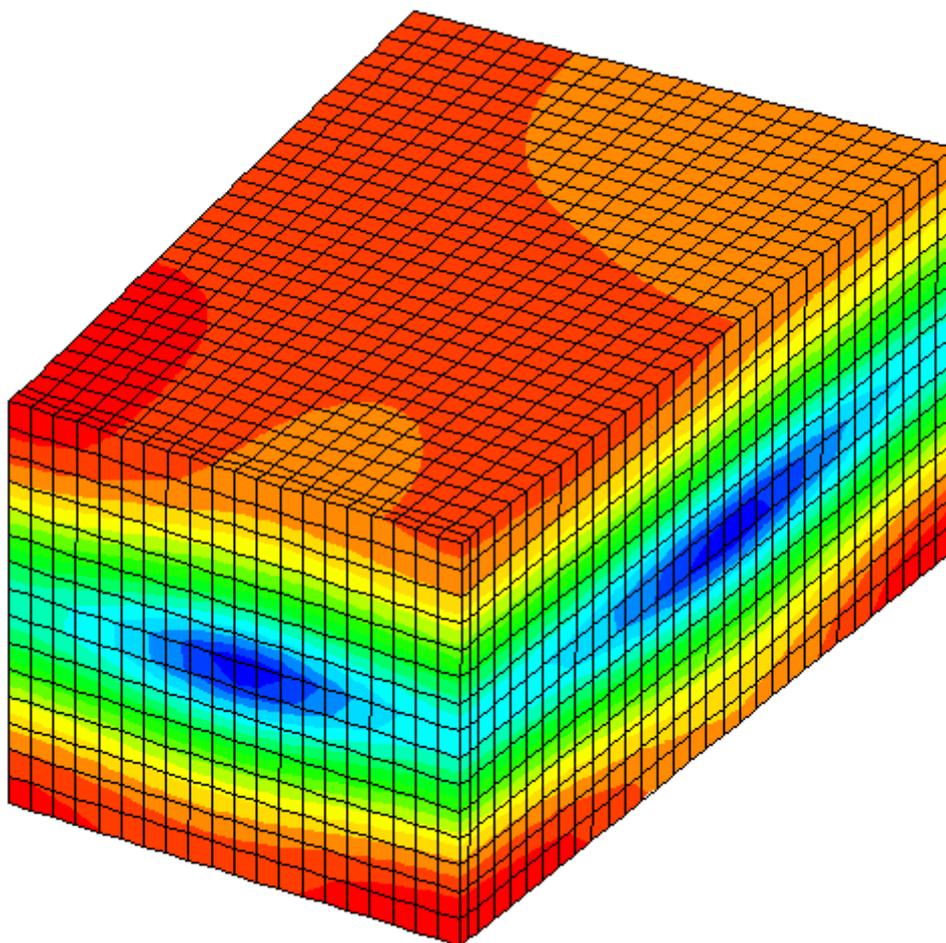


Abbildung 10 Senderraummode Nr. 4 (Schalldruck)

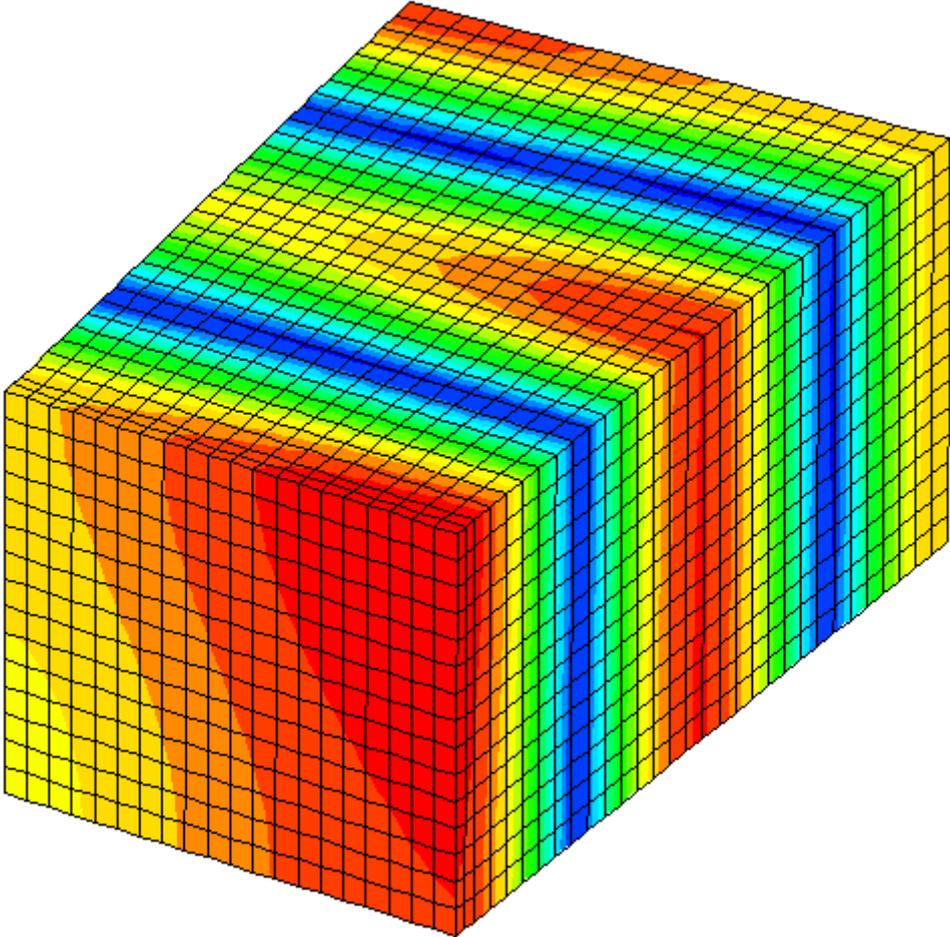


Abbildung 11 Senderaummode Nr. 5 (Schalldruck)

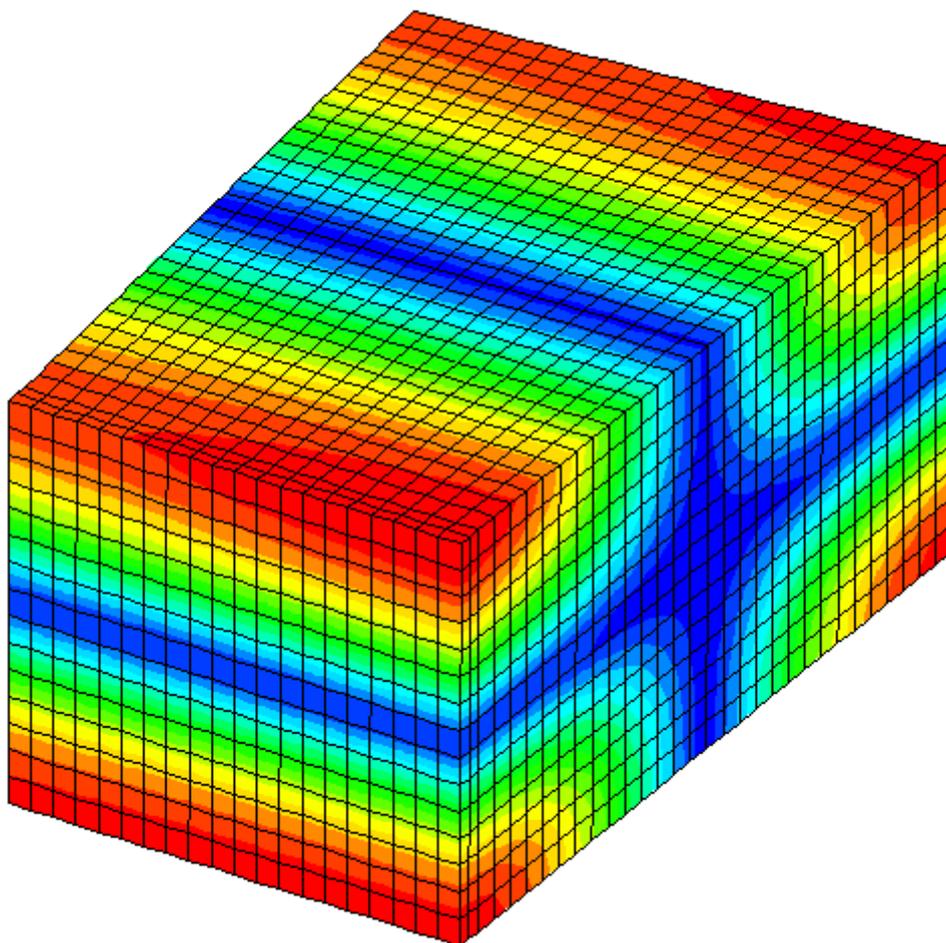


Abbildung 12 Senderraummode Nr. 6 (Schalldruck)

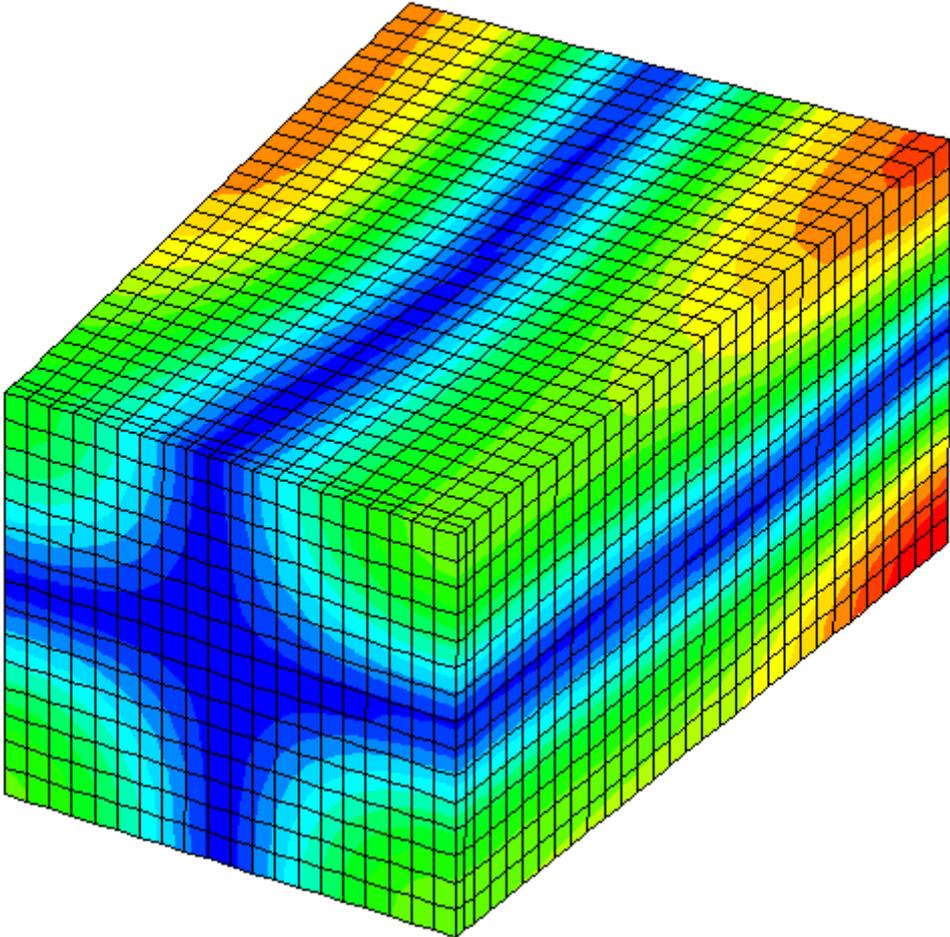


Abbildung 13 Senderaummode Nr. 7 (Schalldruck)

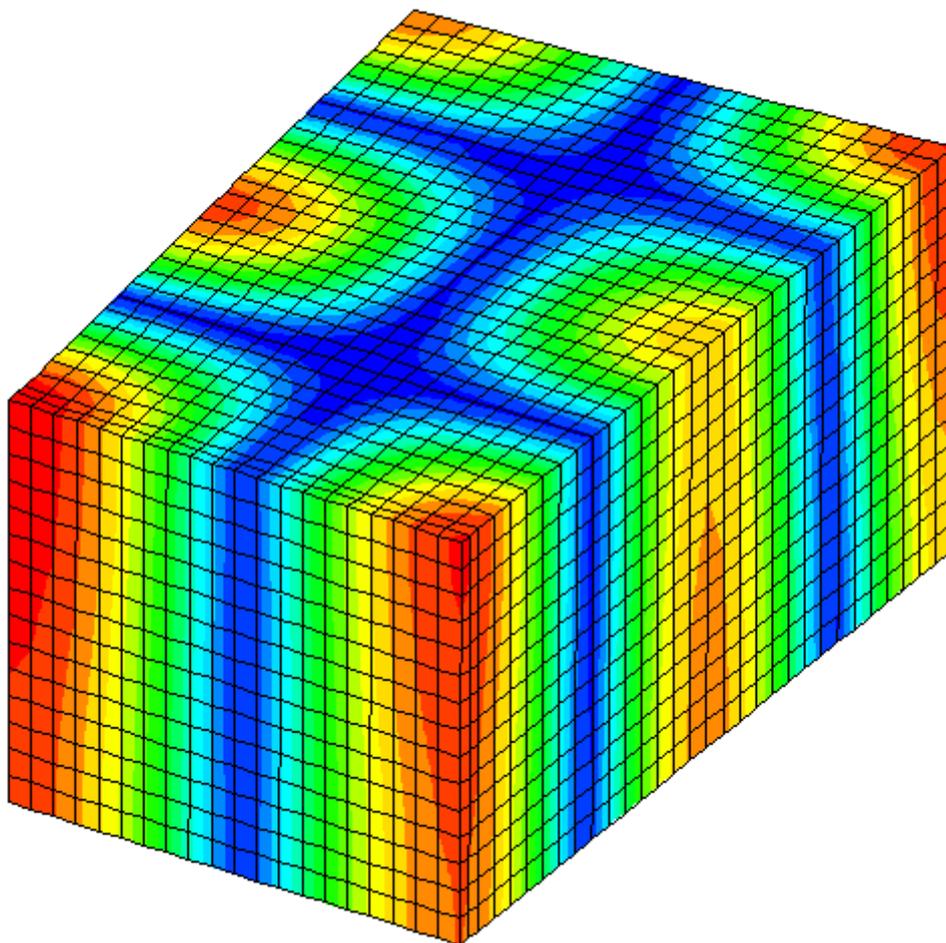


Abbildung 14 Senderraummode Nr. 8 (Schalldruck)

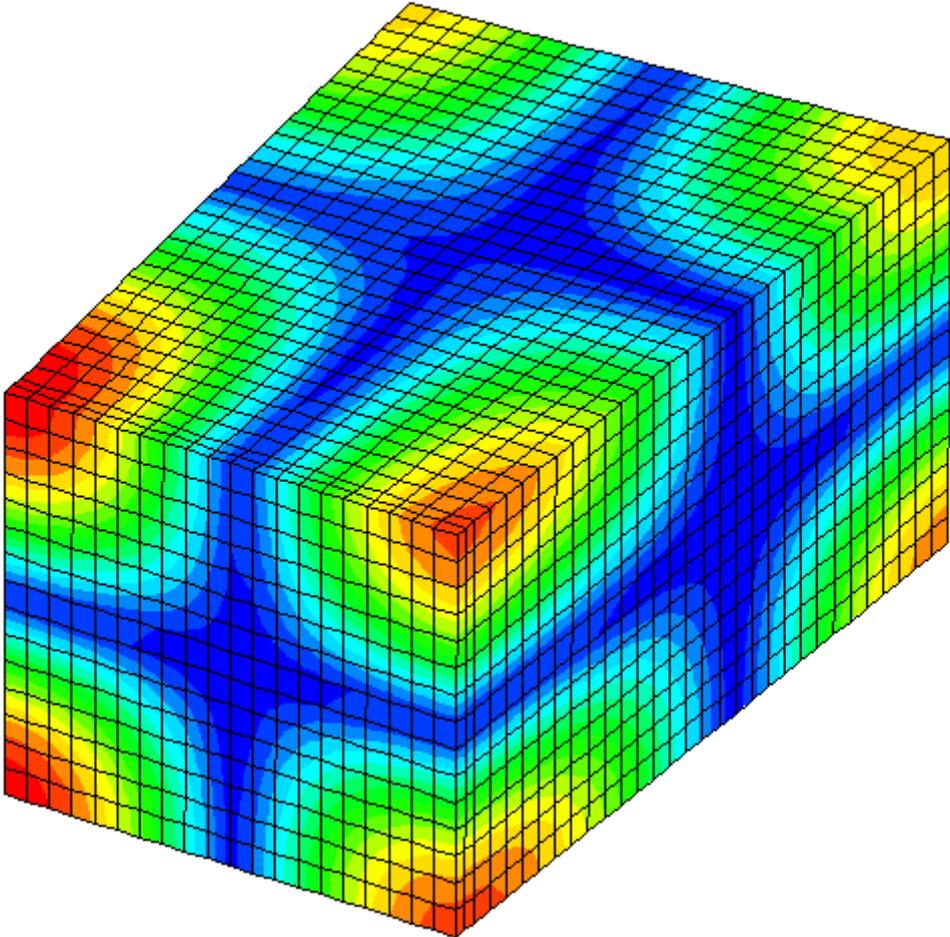


Abbildung 15 Senderraummode Nr. 9 (Schalldruck)

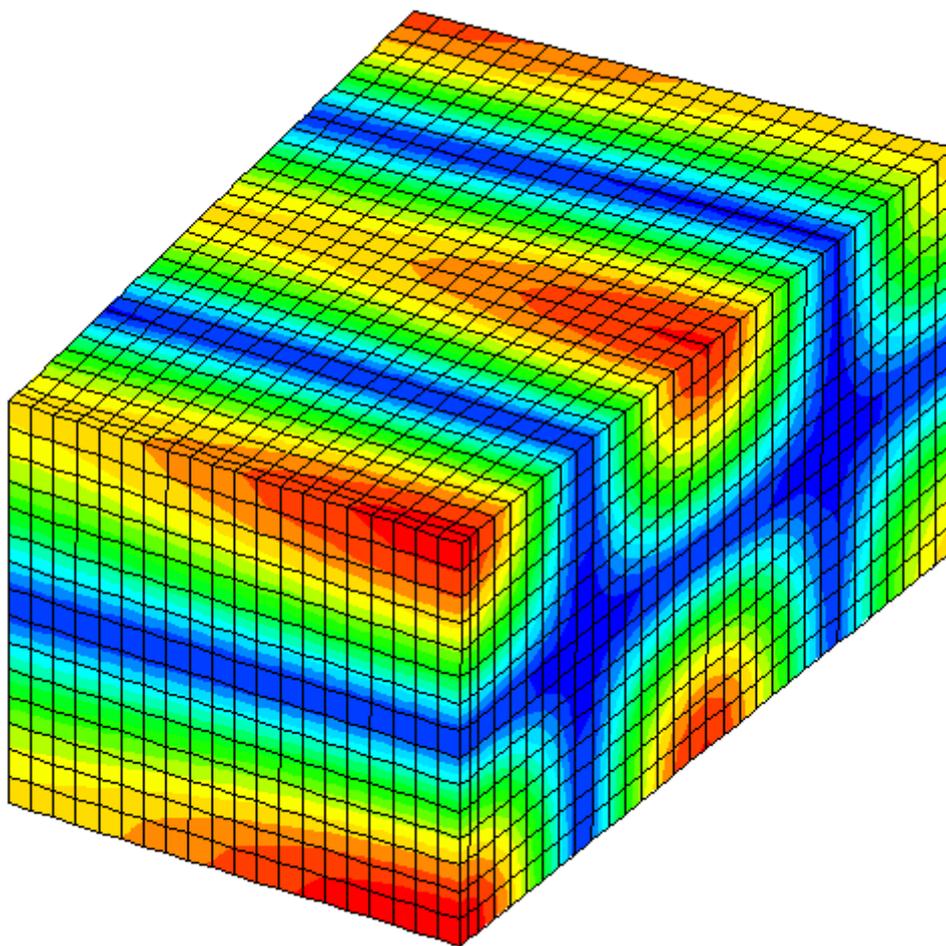


Abbildung 16 Senderraummode Nr. 10 (Schalldruck)

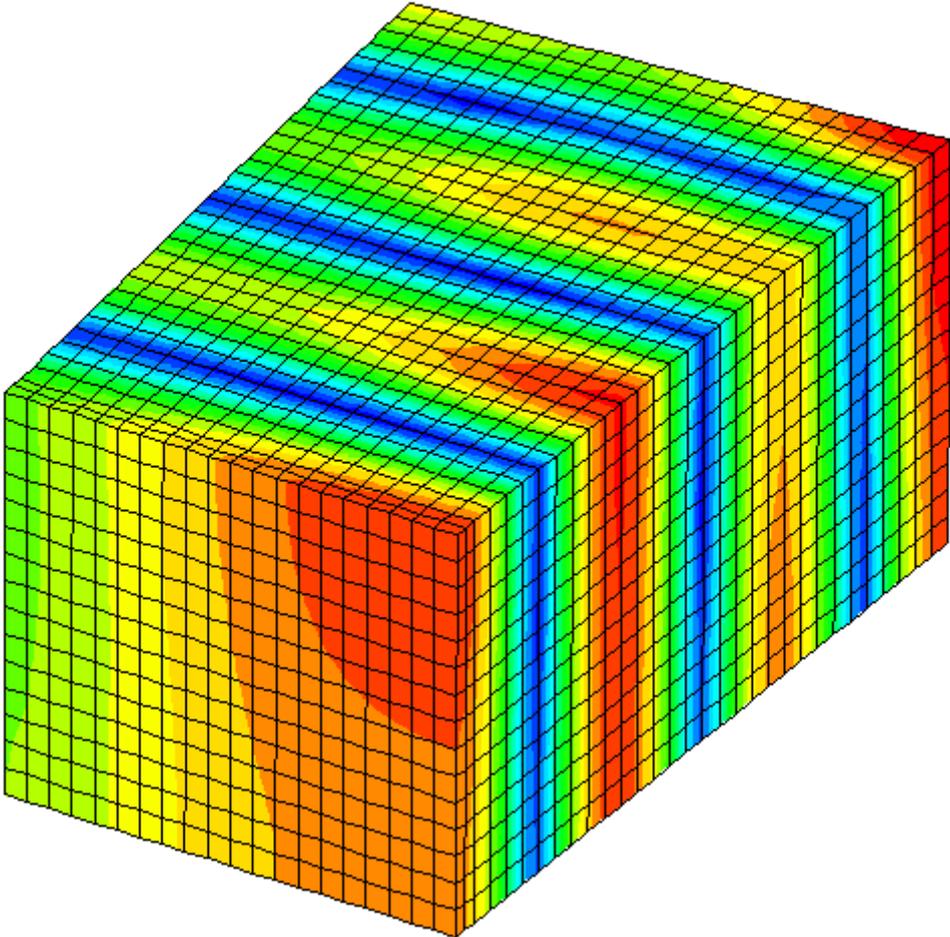


Abbildung 17 Senderraummode Nr. 11 (Schalldruck)

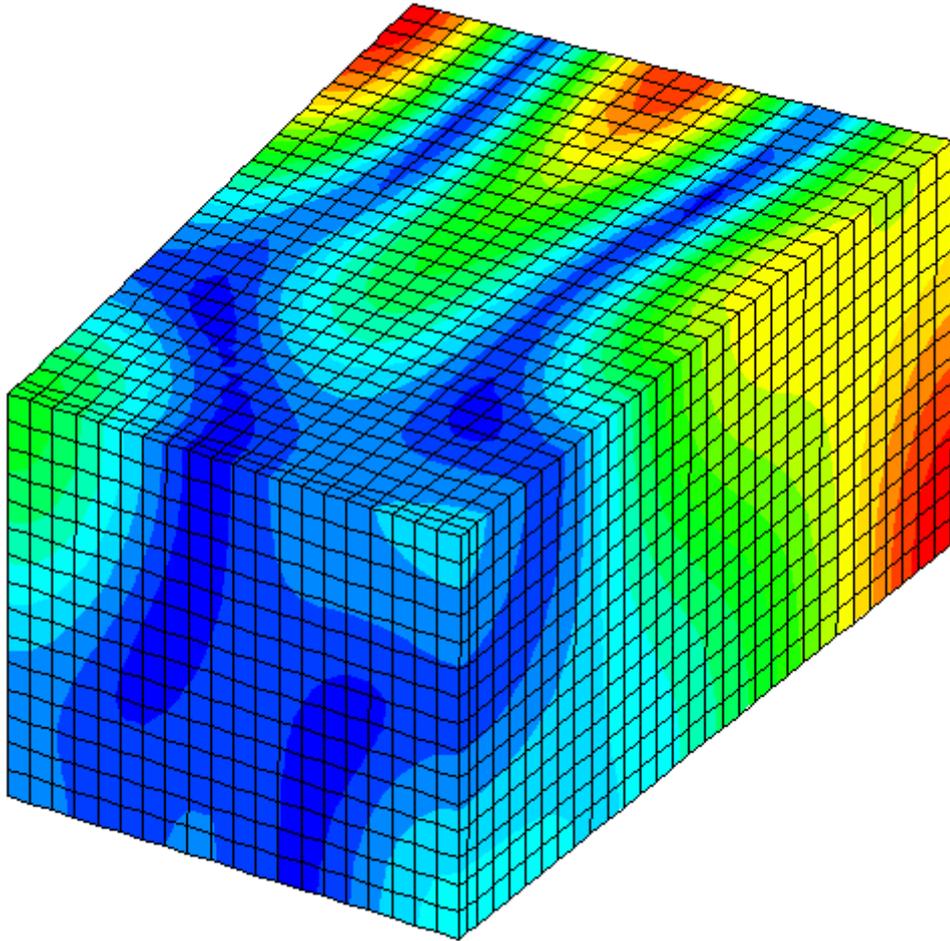


Abbildung 18 Senderraummode Nr. 12 (Schalldruck)

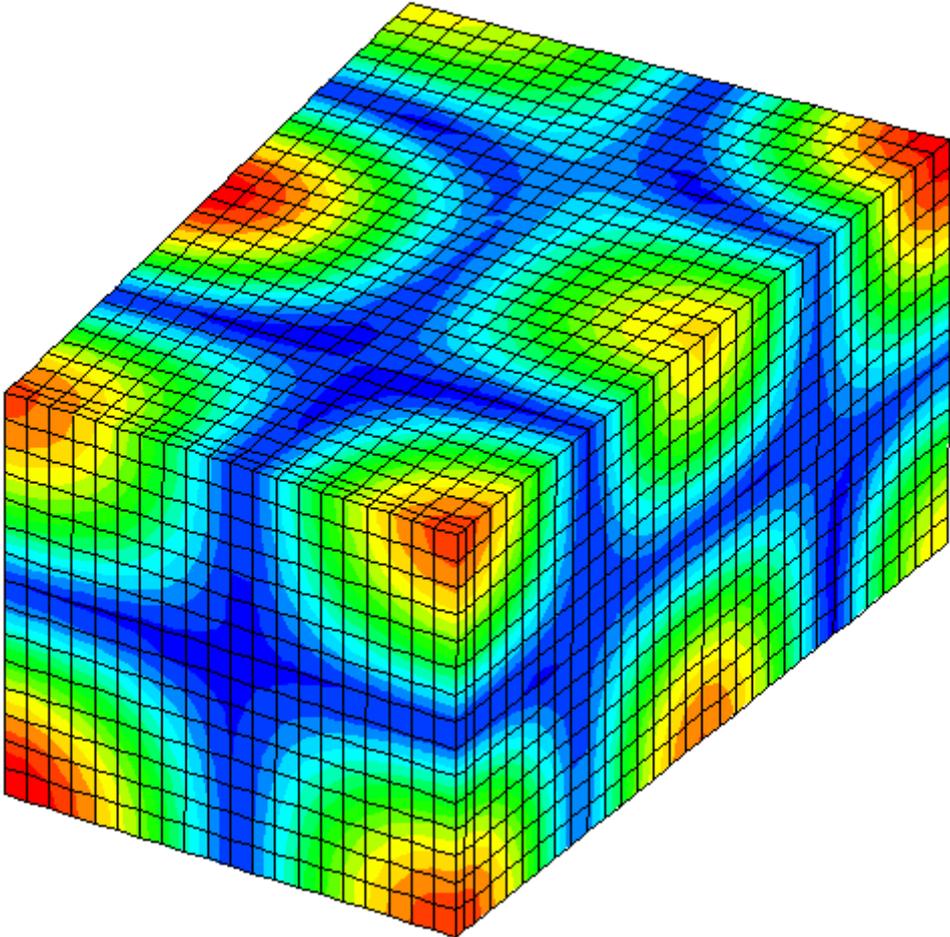


Abbildung 19 Senderraummode Nr. 13 (Schalldruck)

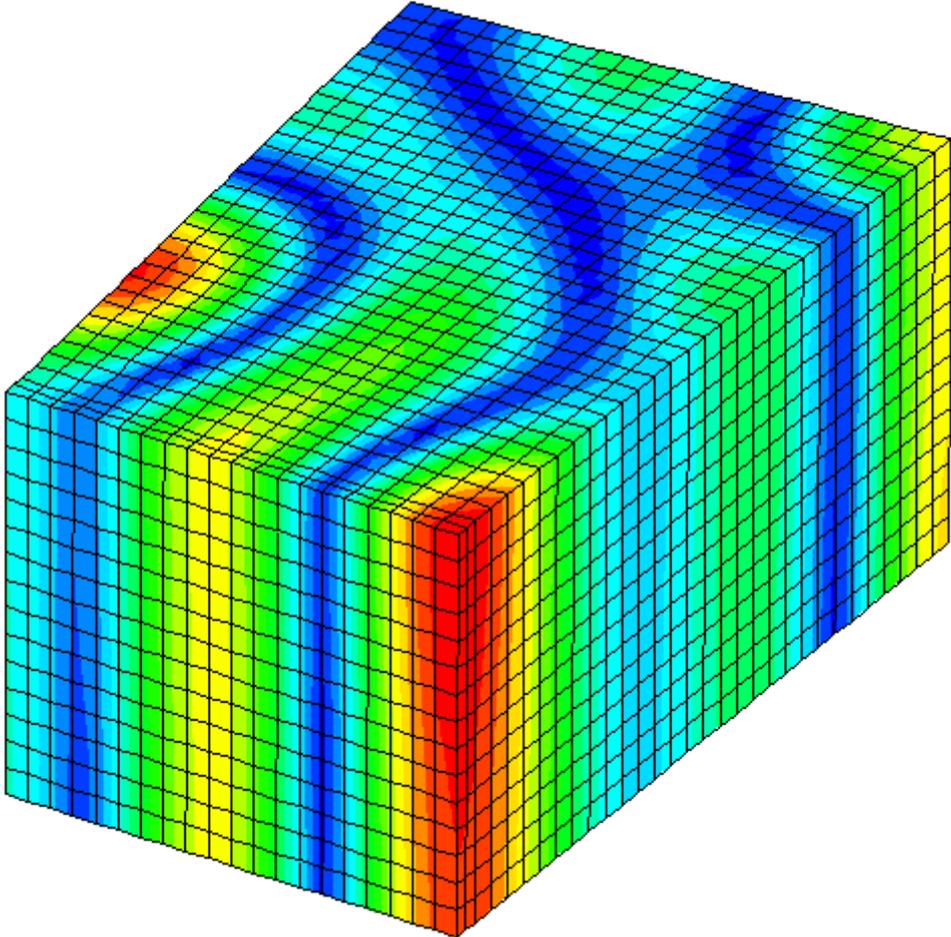


Abbildung 20 Senderraummode Nr. 14 (Schalldruck)

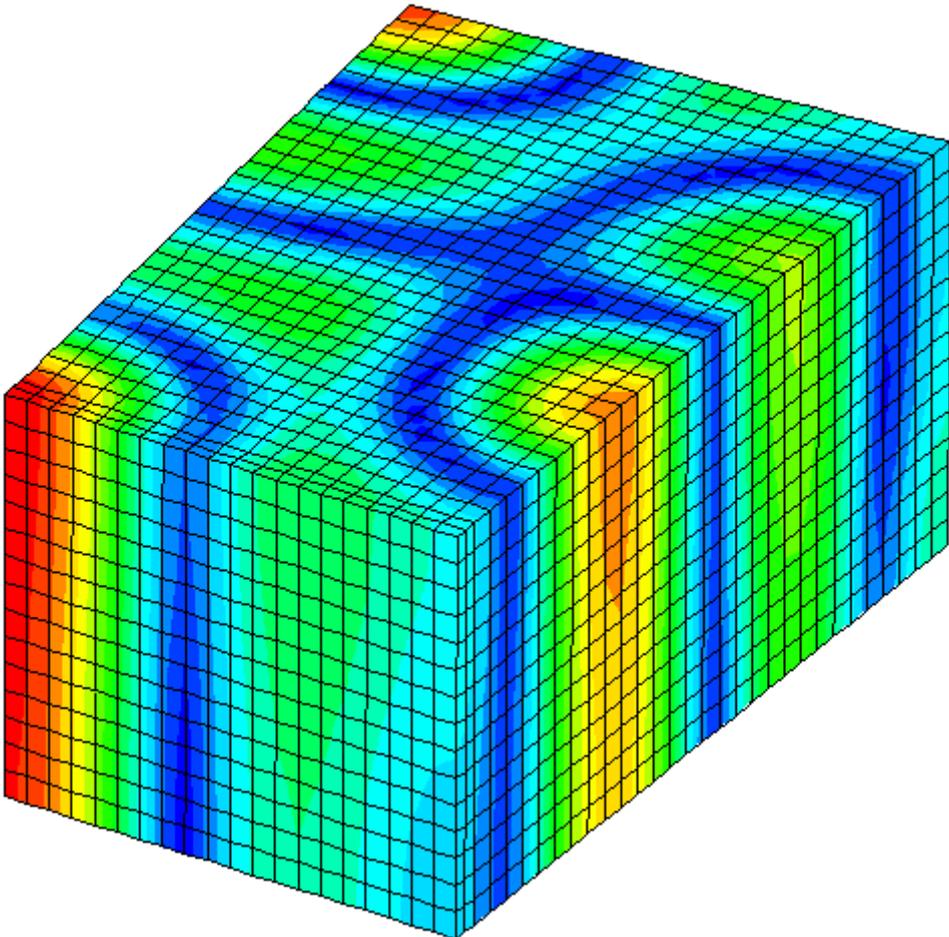


Abbildung 21 Senderraummode Nr. 15 (Schalldruck)

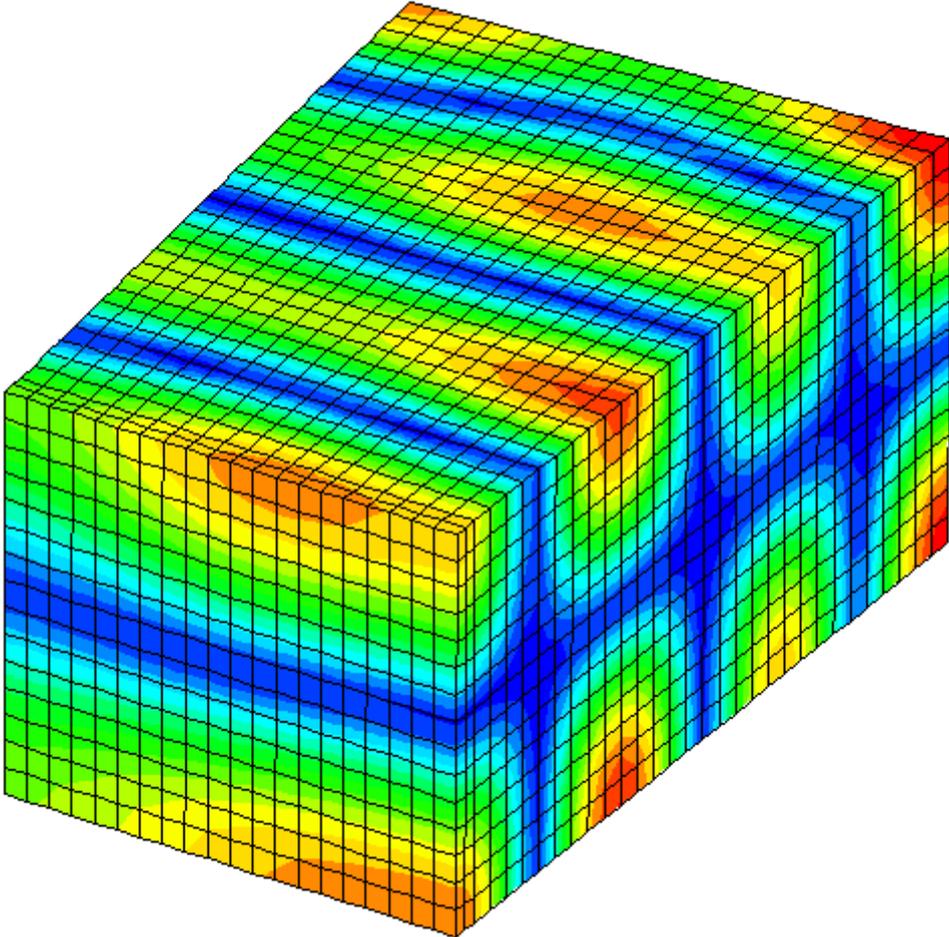


Abbildung 22 Senderraummode Nr. 16 (Schalldruck)

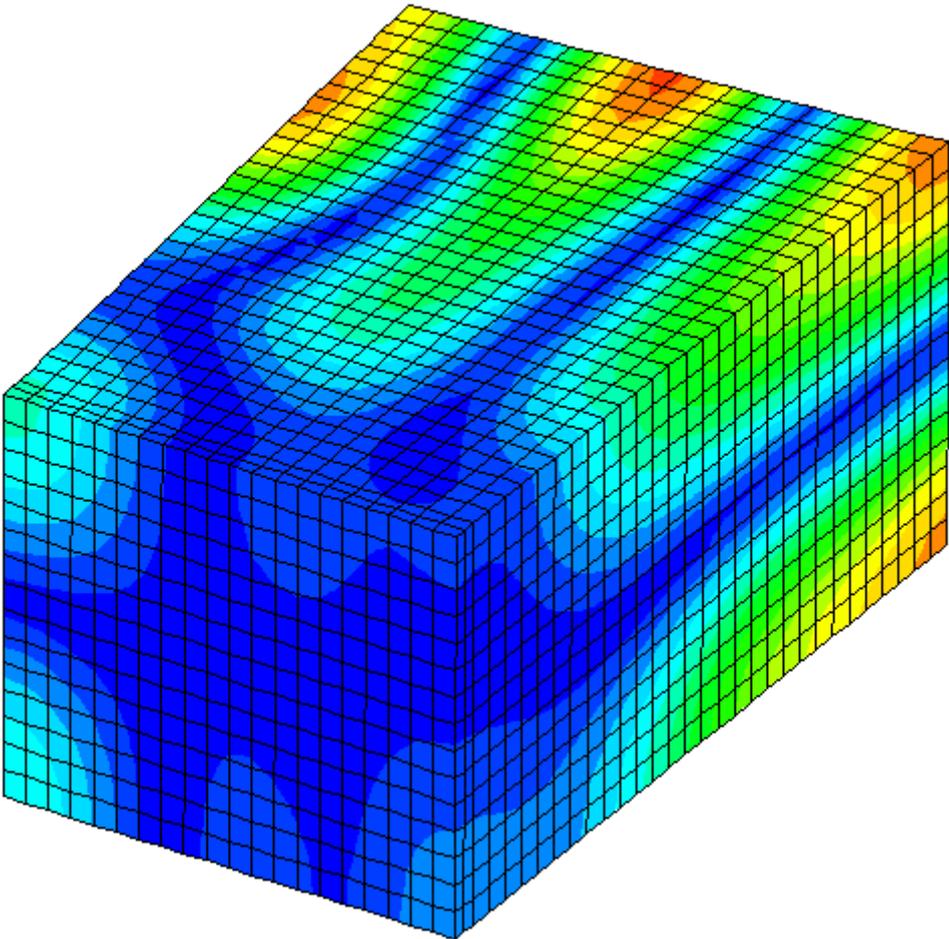


Abbildung 23 Senderaummode Nr. 17 (Schalldruck)

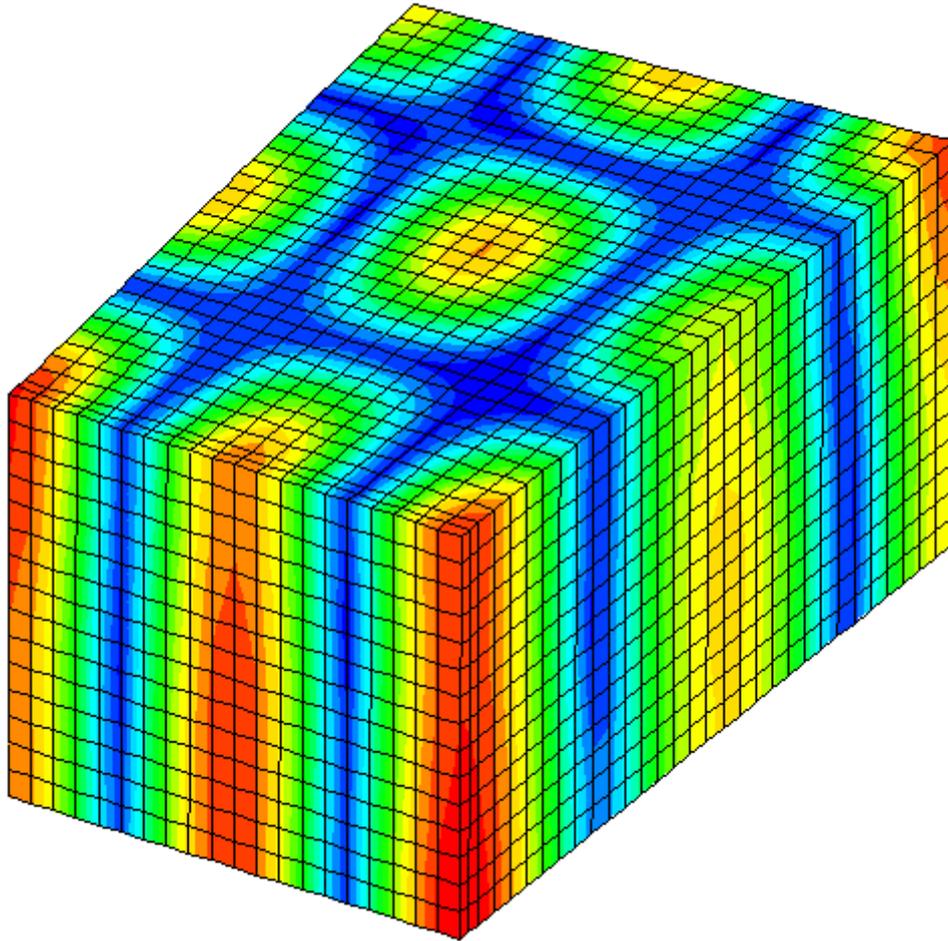


Abbildung 24 Senderraummode Nr. 18 (Schalldruck)

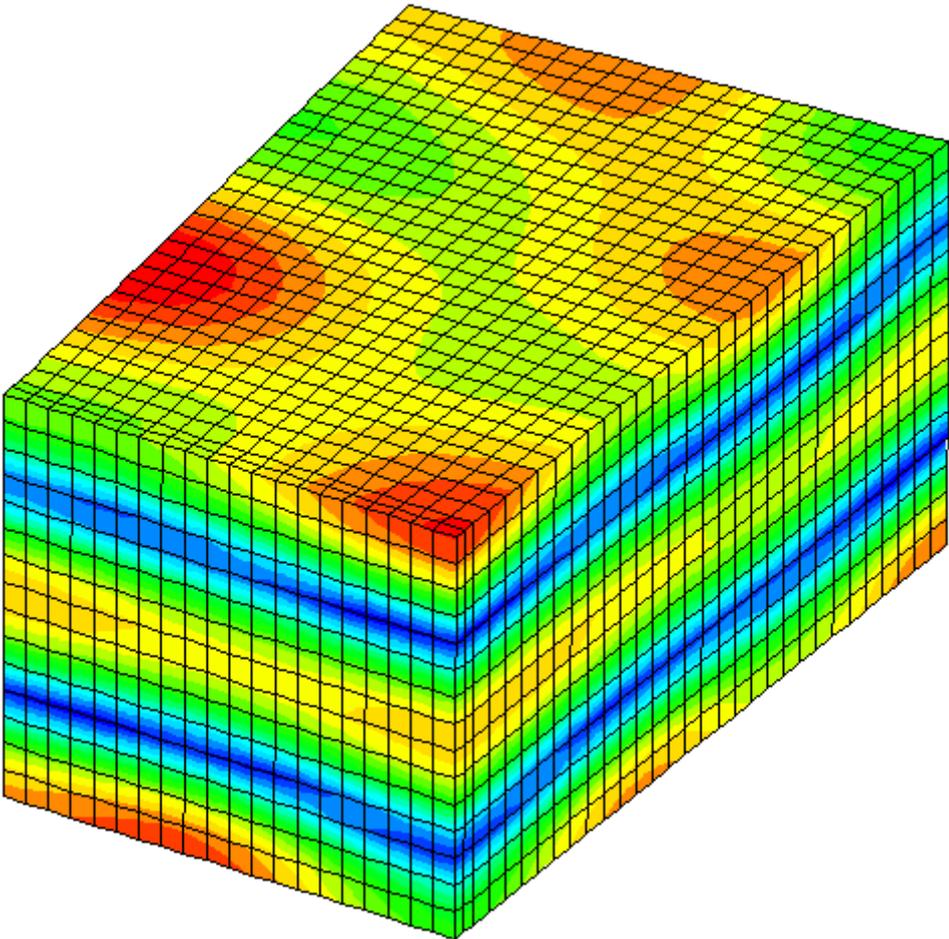


Abbildung 25 Senderaummode Nr. 19 (Schalldruck)

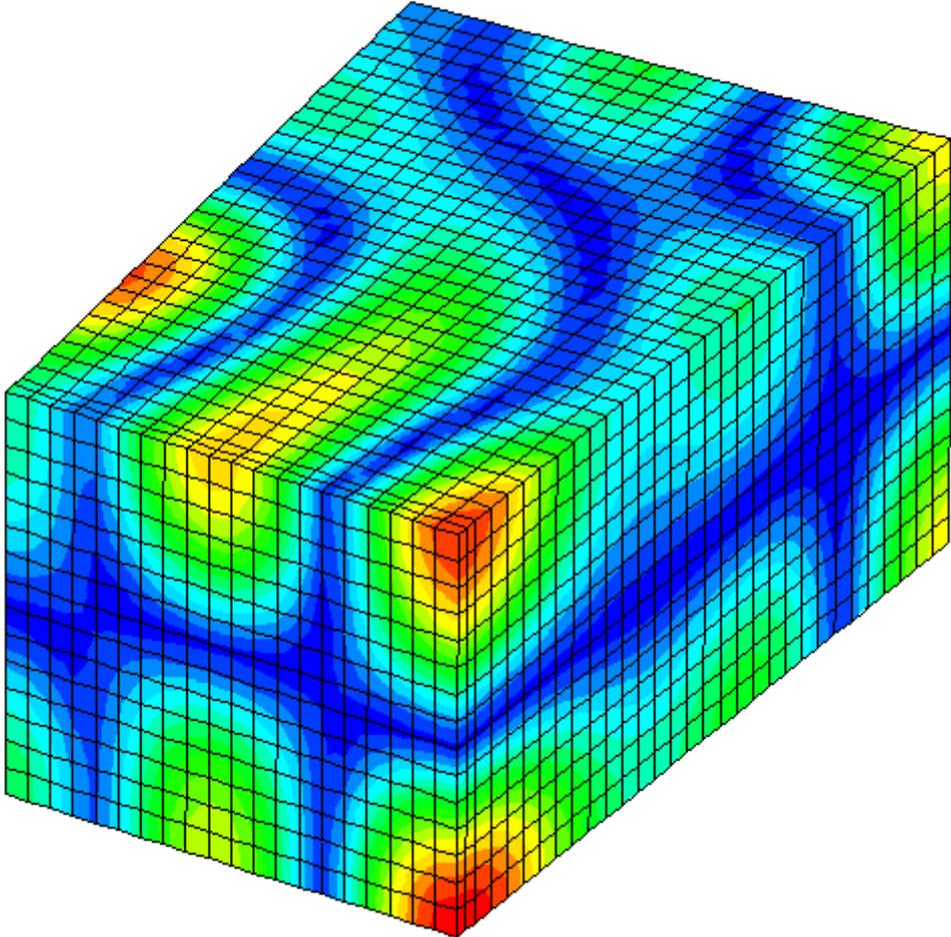


Abbildung 26 Senderraummode Nr. 20 (Schalldruck)

33.617 Hz (Amplitude)

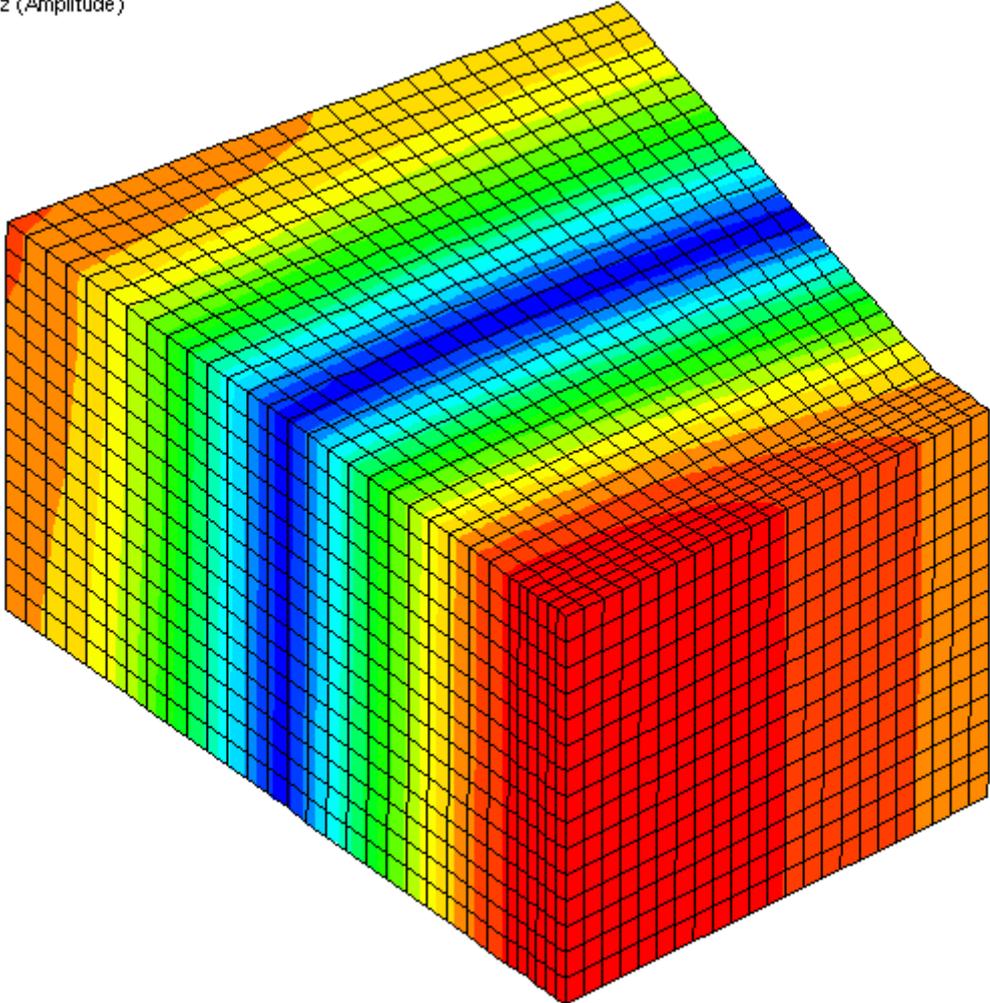


Abbildung 27 Empfangsraummode Nr. 1 (Schalldruck)

: 43.565 Hz (Amplitude)

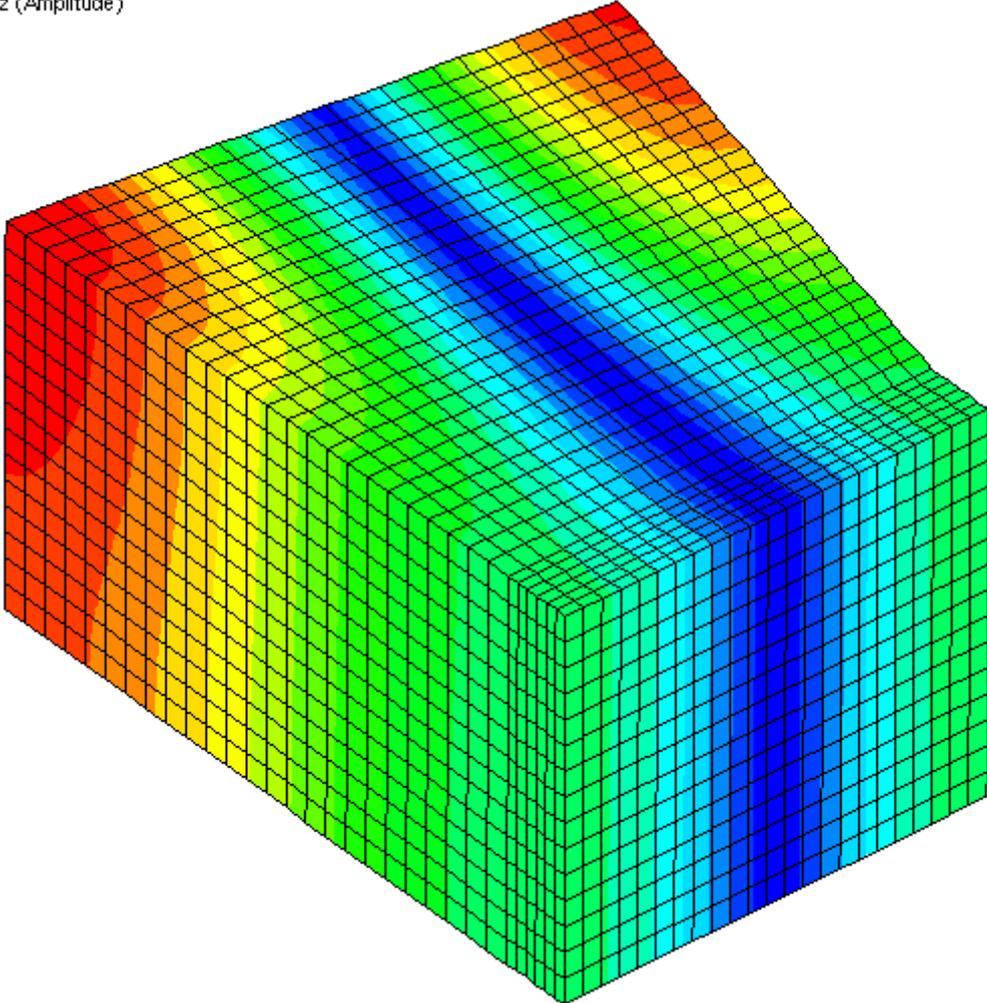


Abbildung 28 Empfangsraummode Nr. 2 (Schalldruck)

56.947 Hz (Amplitude)

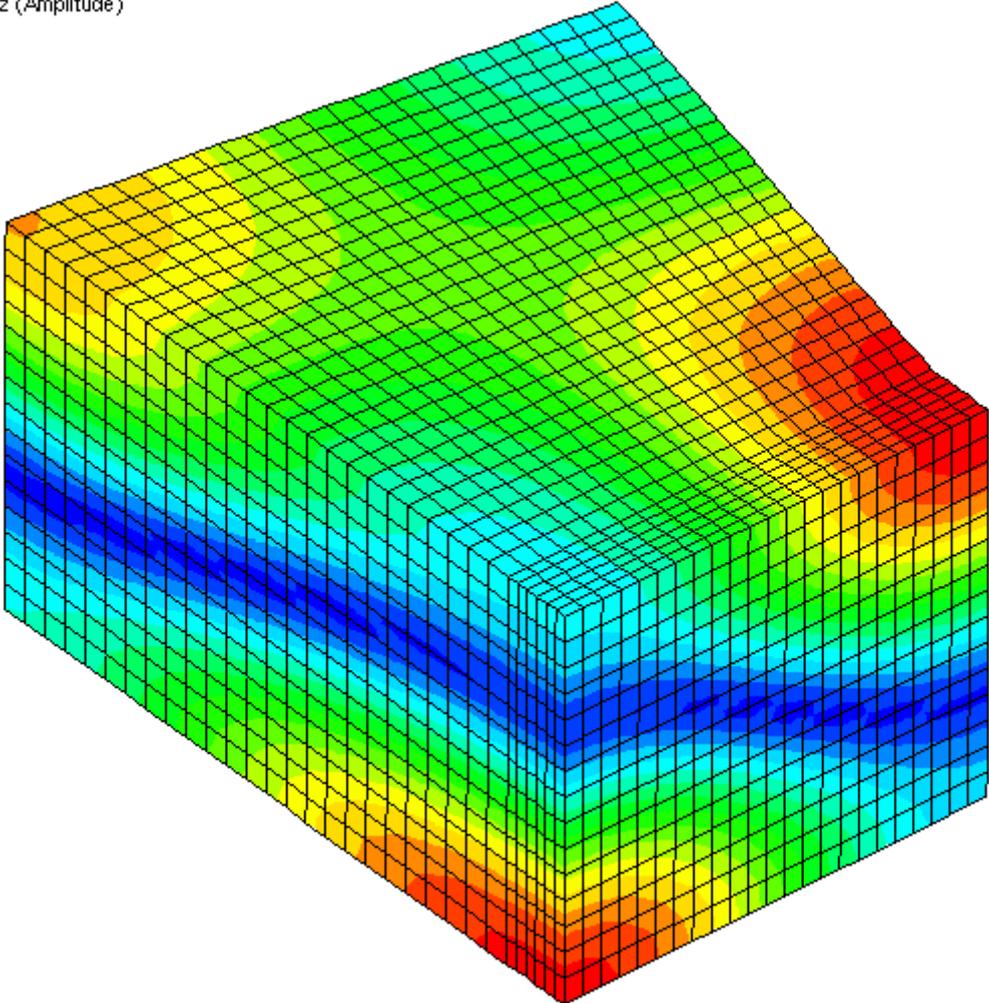


Abbildung 29 Empfangsraummode Nr. 3 (Schalldruck)

57.266 Hz (Amplitude)

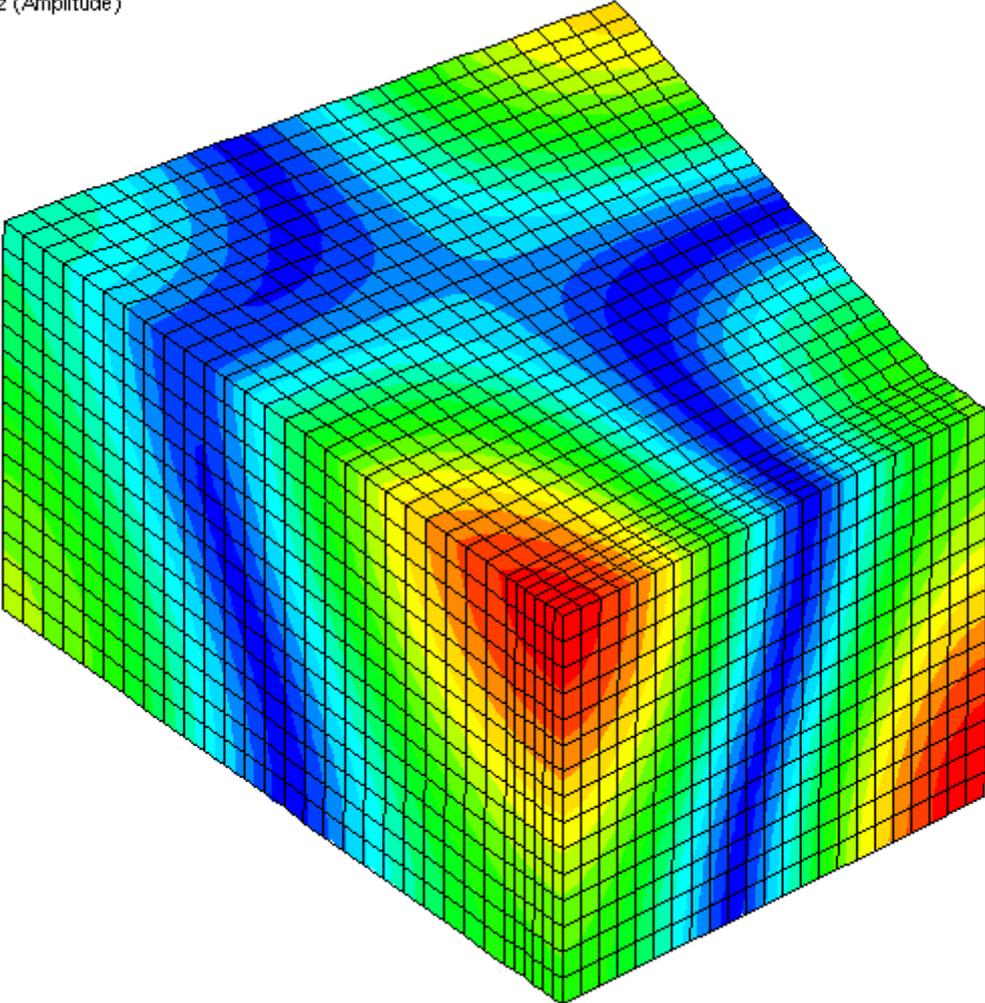


Abbildung 30 Empfangsraummode Nr. 4 (Schalldruck)

66.250 Hz (Amplitude)

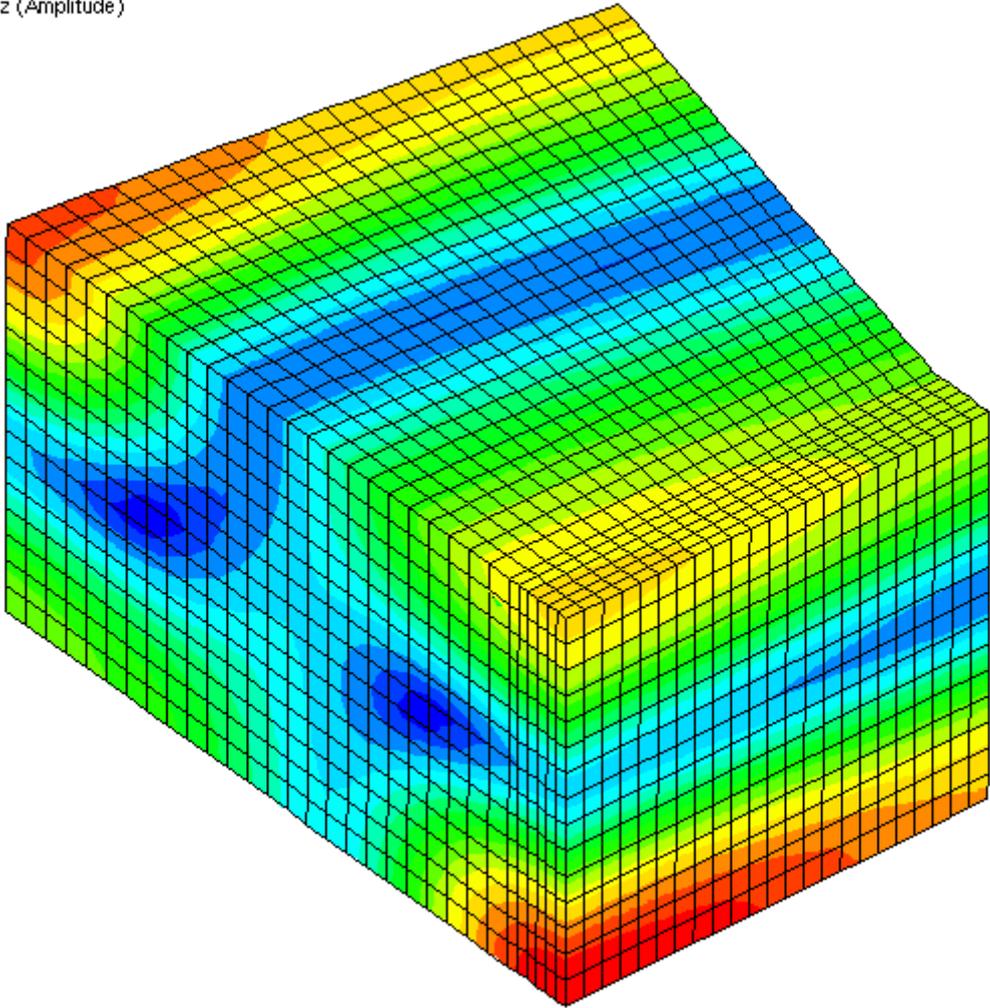


Abbildung 31 Empfangsraummode Nr. 5 (Schalldruck)

66.779 Hz (Amplitude)

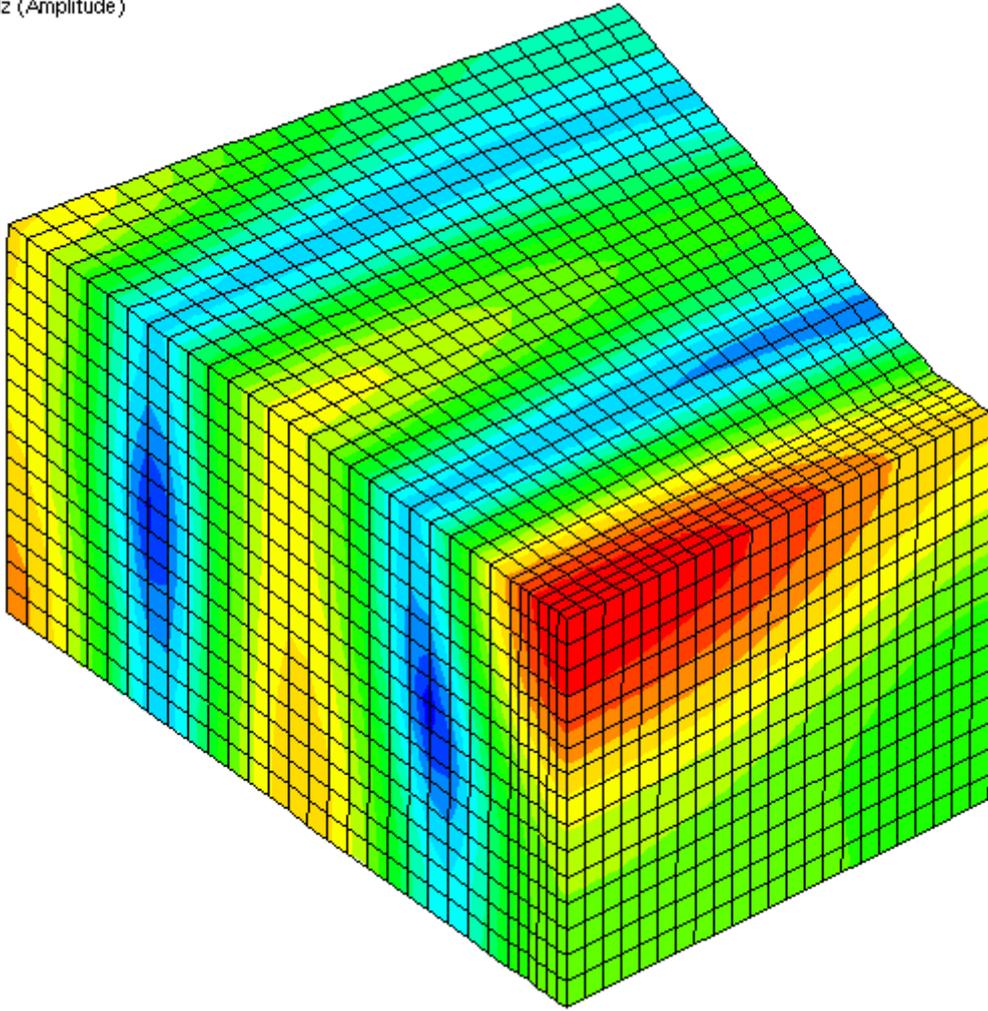


Abbildung 32 Empfangsraummode Nr. 6 (Schalldruck)

72.000 Hz (Amplitude)

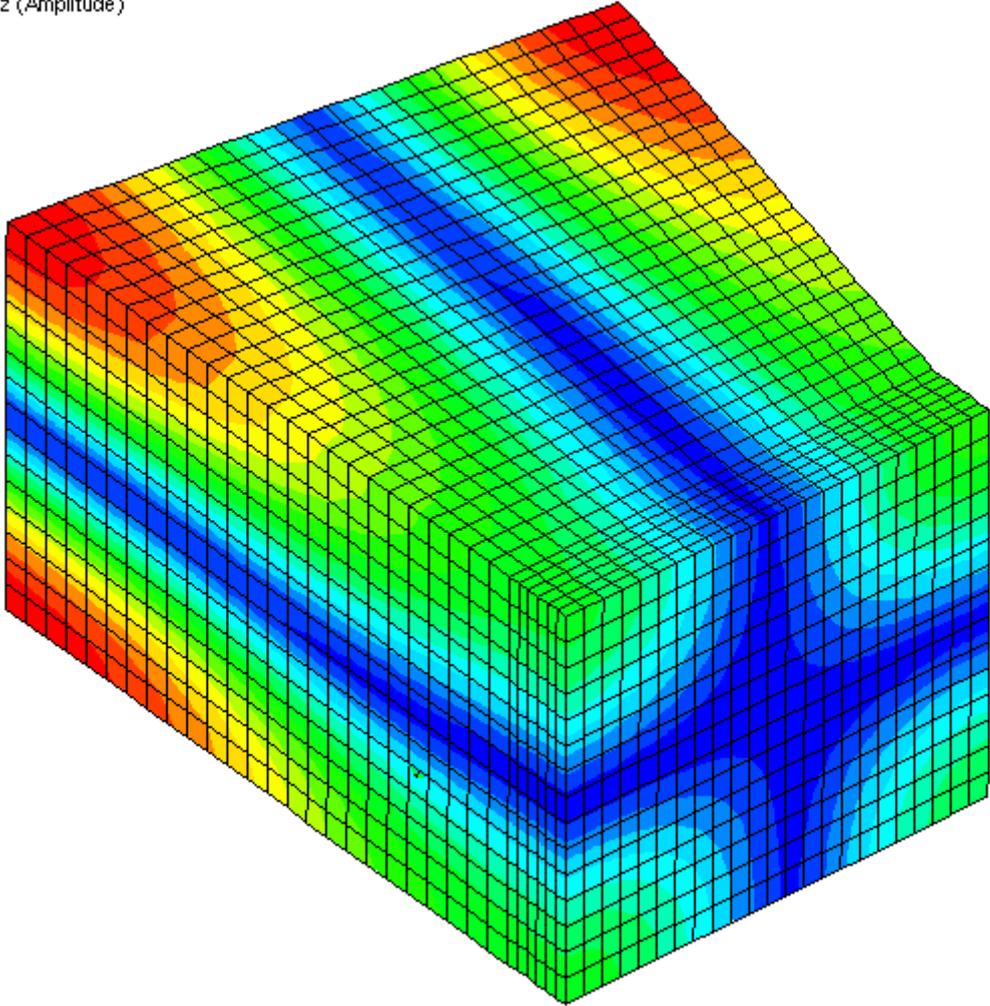


Abbildung 33 Empfangsraummode Nr. 7 (Schalldruck)

80.800 Hz (Amplitude)

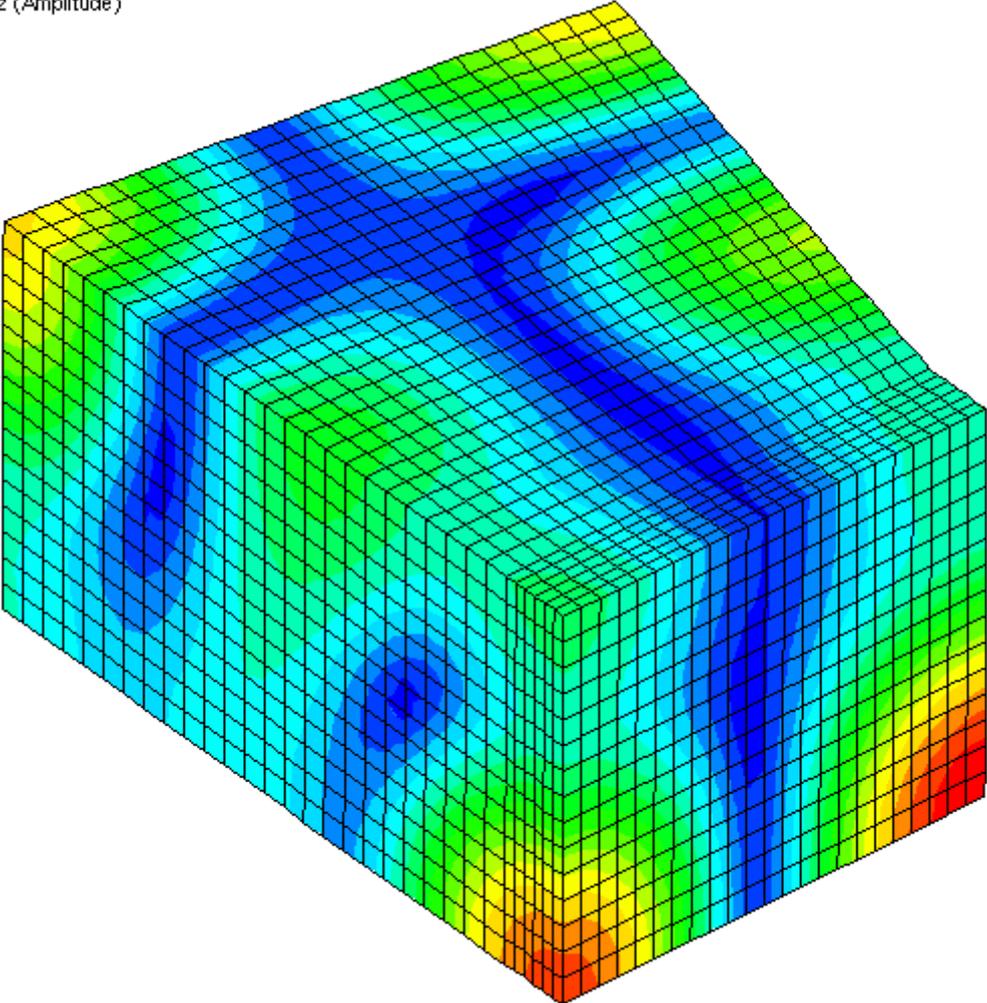


Abbildung 34 Empfangsraummode Nr. 8 (Schalldruck)

80.987 Hz (Amplitude)

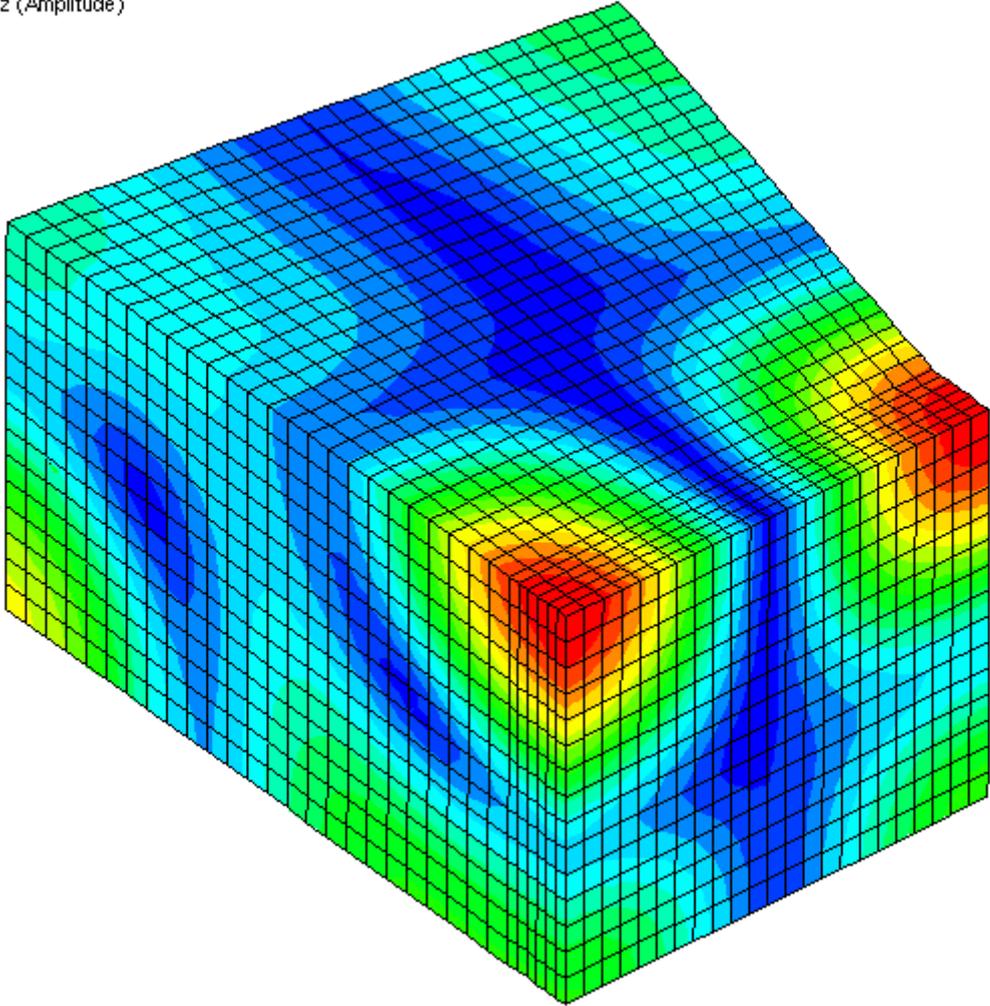


Abbildung 35 Empfangsraummode Nr. 9 (Schalldruck)

84.299 Hz (Amplitude)

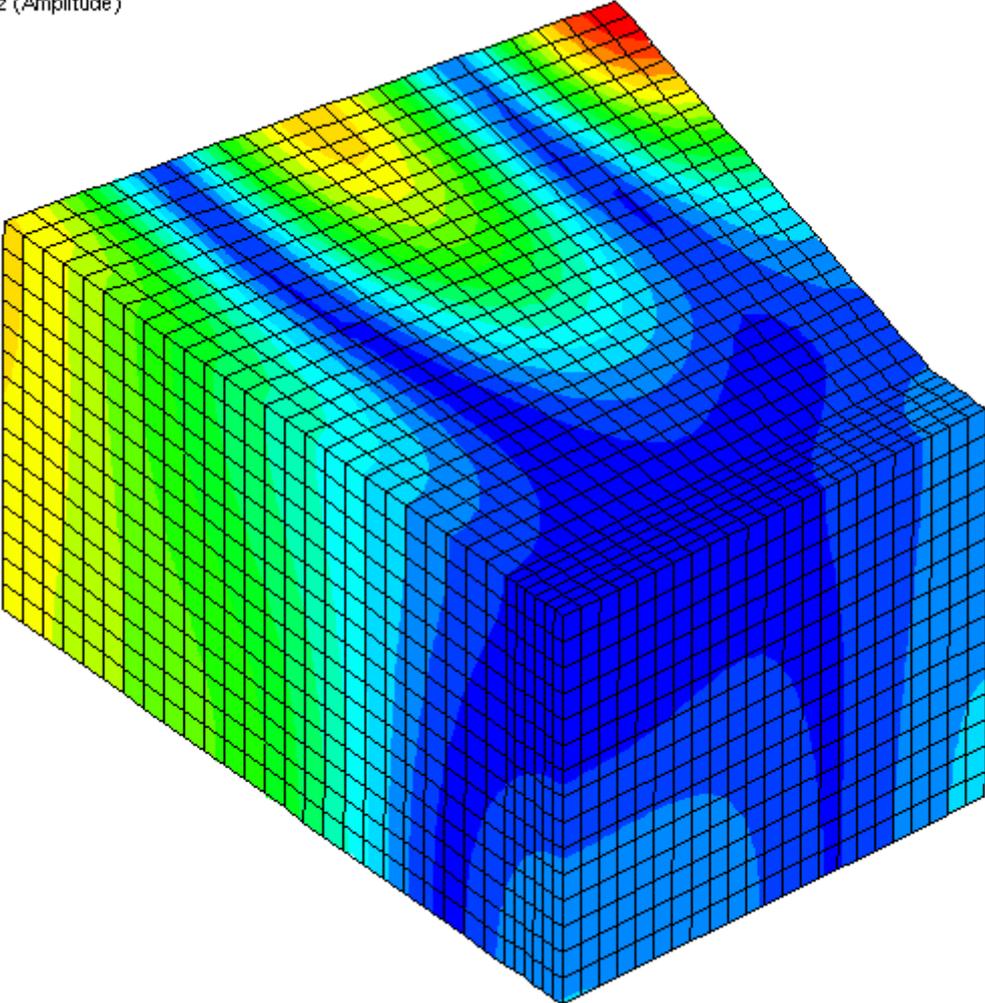


Abbildung 36 Empfangsraummode Nr. 10 (Schalldruck)

87.885 Hz (Amplitude)

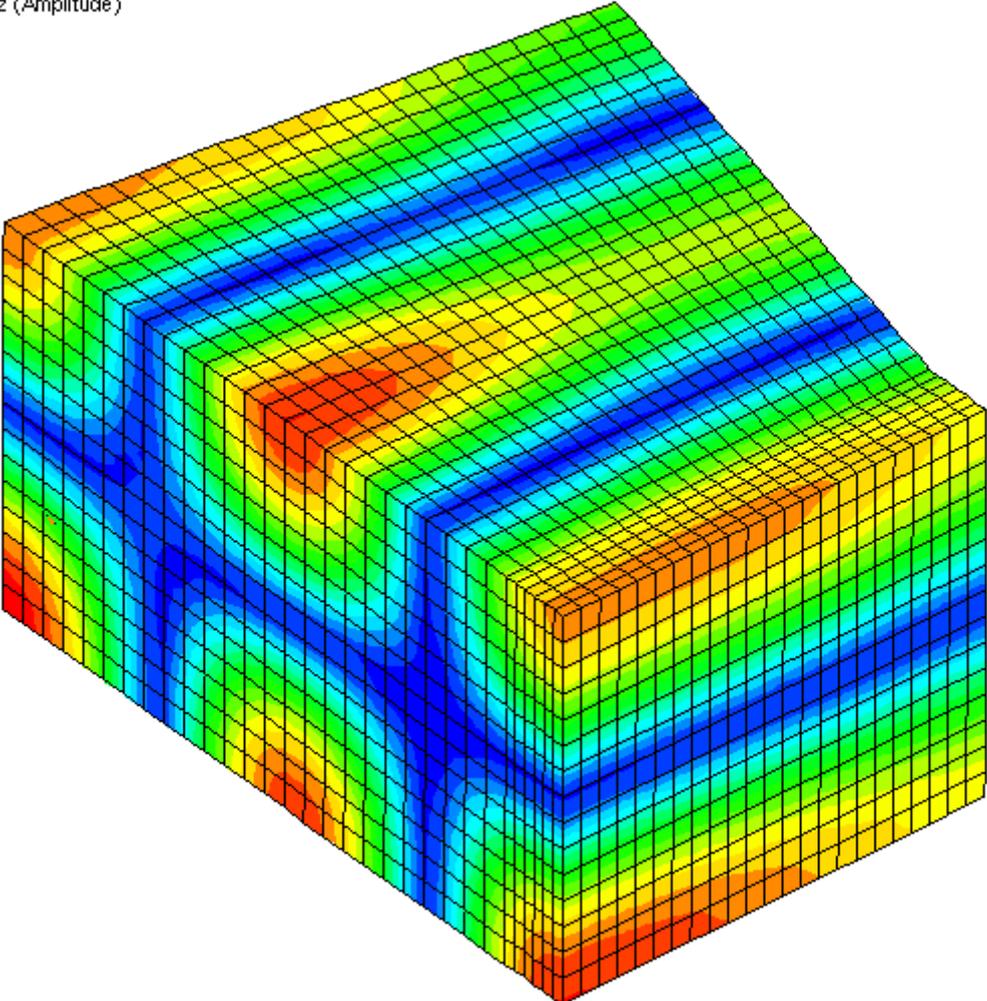


Abbildung 37 Empfangsraummode Nr. 11 (Schalldruck)

99.027 Hz (Amplitude)

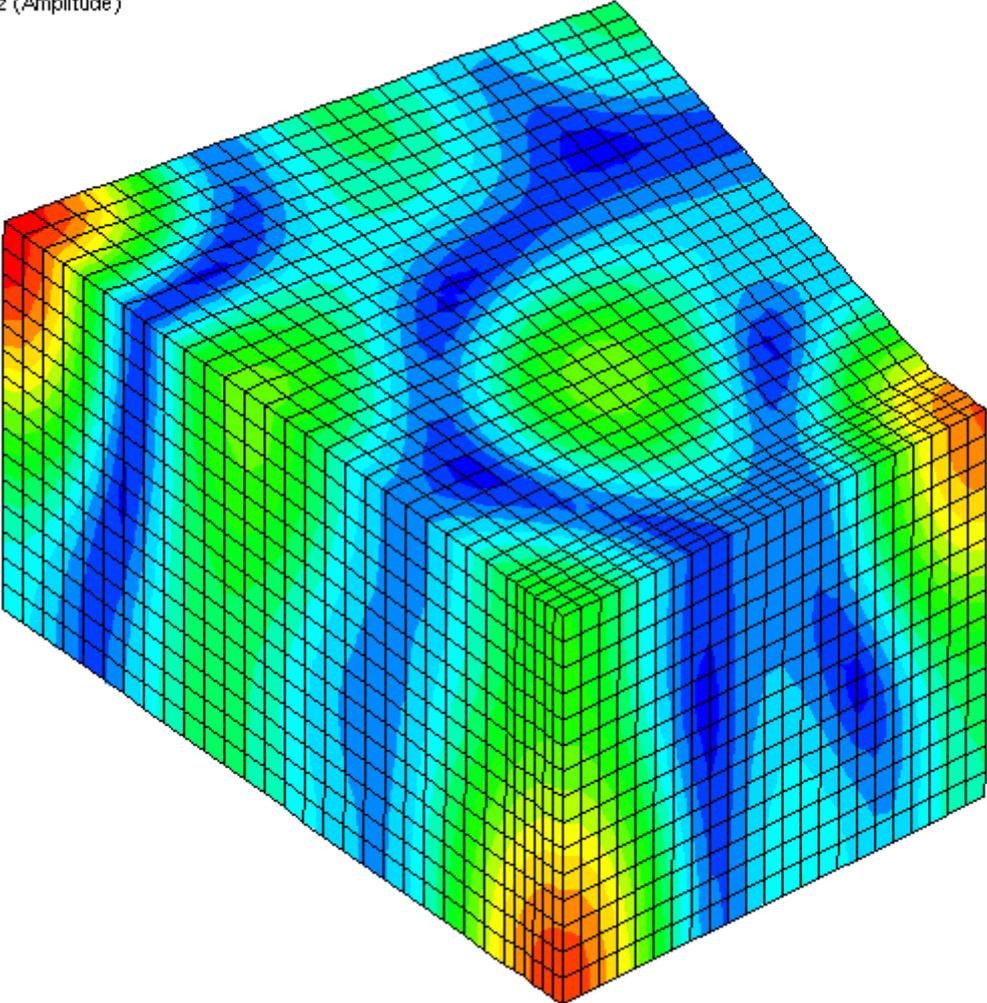


Abbildung 38 Empfangsraummode Nr. 12 (Schalldruck)

99.279 Hz (Amplitude)

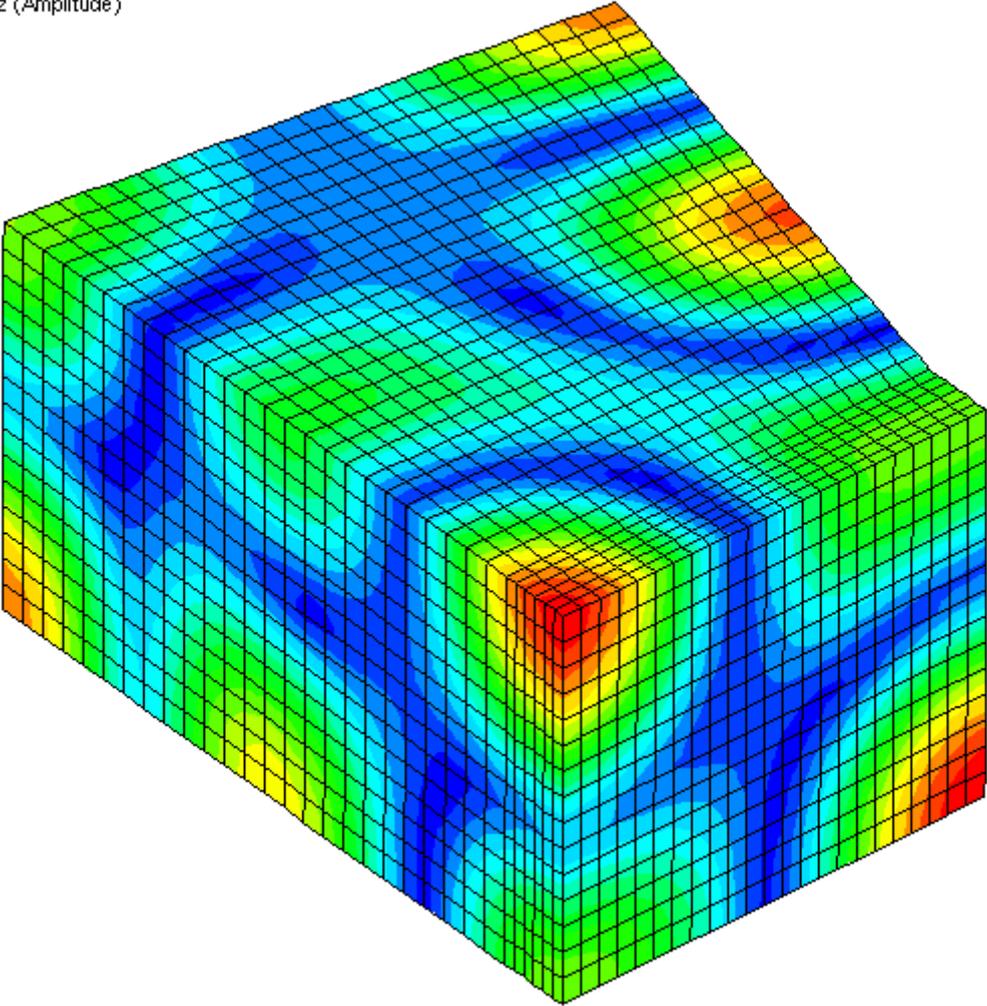


Abbildung 39 Empfangsraummode Nr. 13 (Schalldruck)

100.028 Hz (Amplitude)

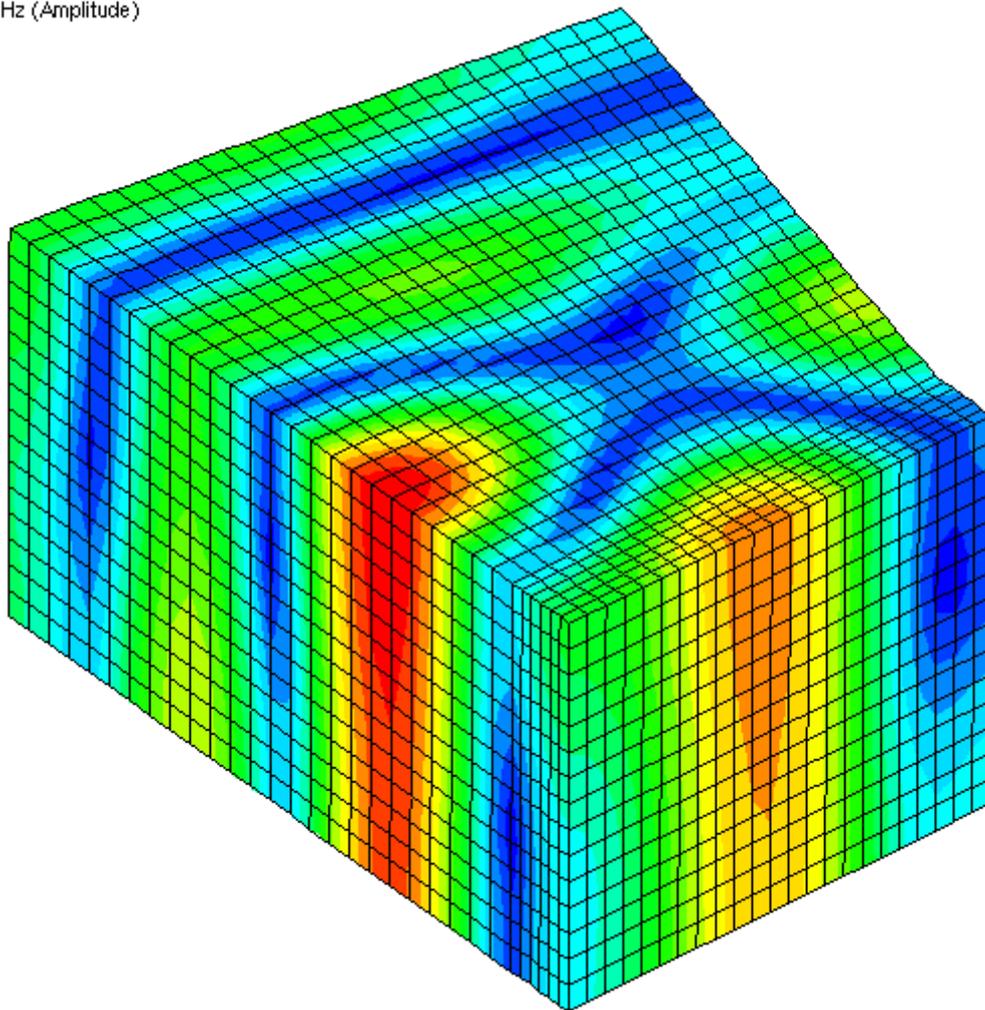


Abbildung 40 Empfangsraummode Nr. 14 (Schalldruck)

101.920 Hz (Amplitude)

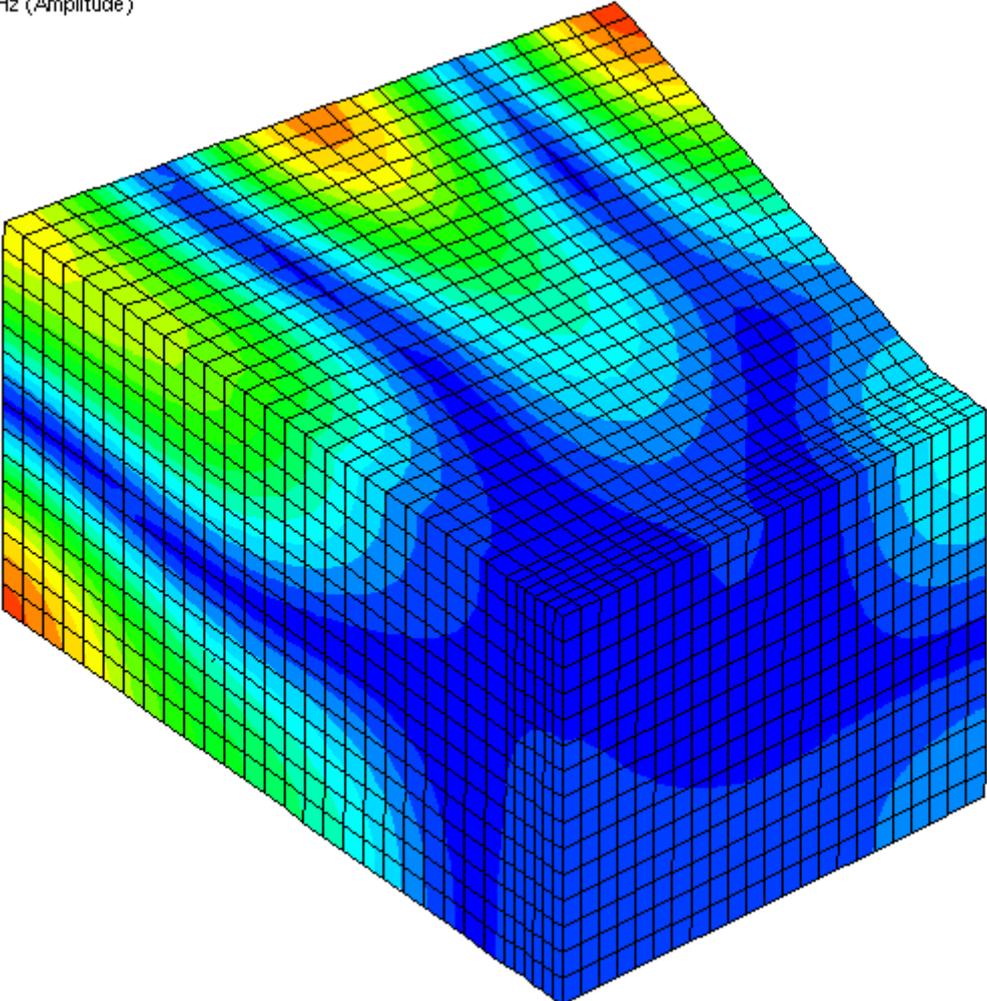


Abbildung 41 Empfangsraummode Nr. 15 (Schalldruck)

110.632 Hz (Amplitude)

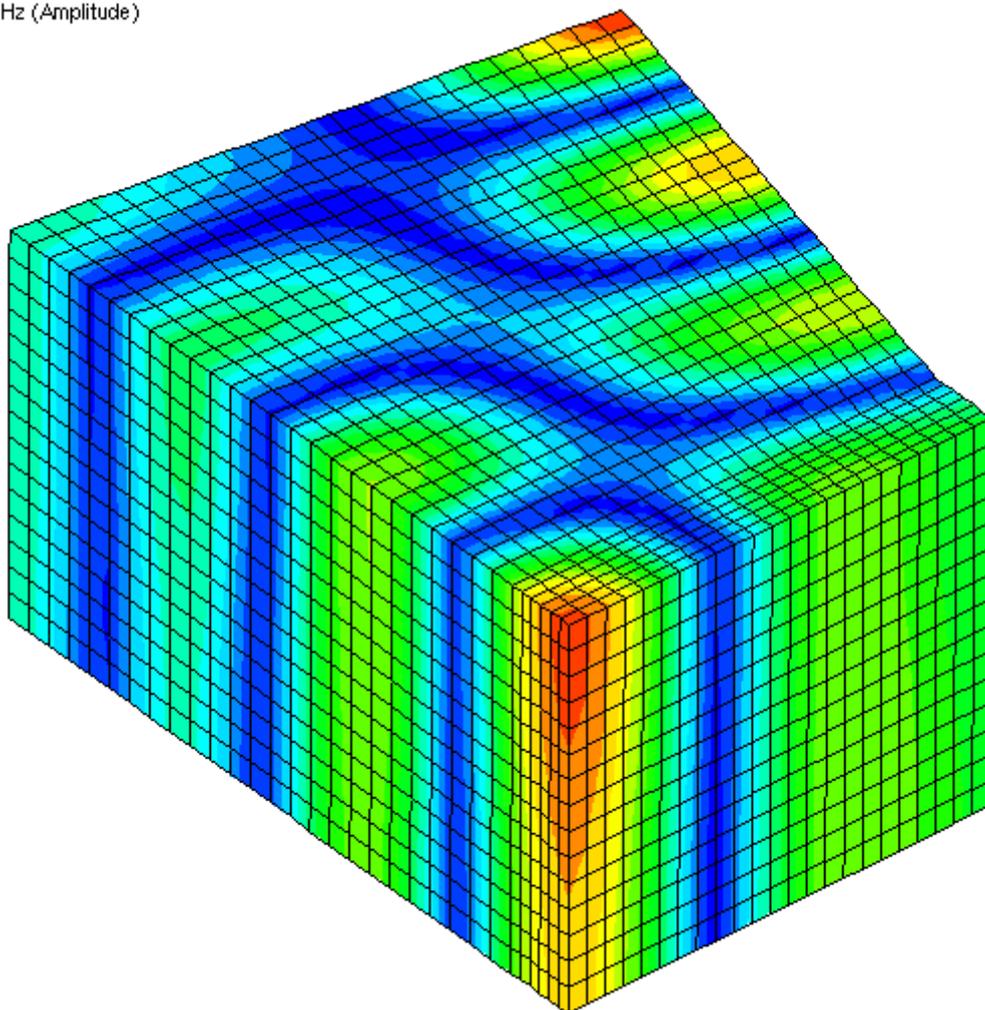


Abbildung 42 Empfangsraummode Nr. 16 (Schalldruck)

113.231 Hz (Amplitude)

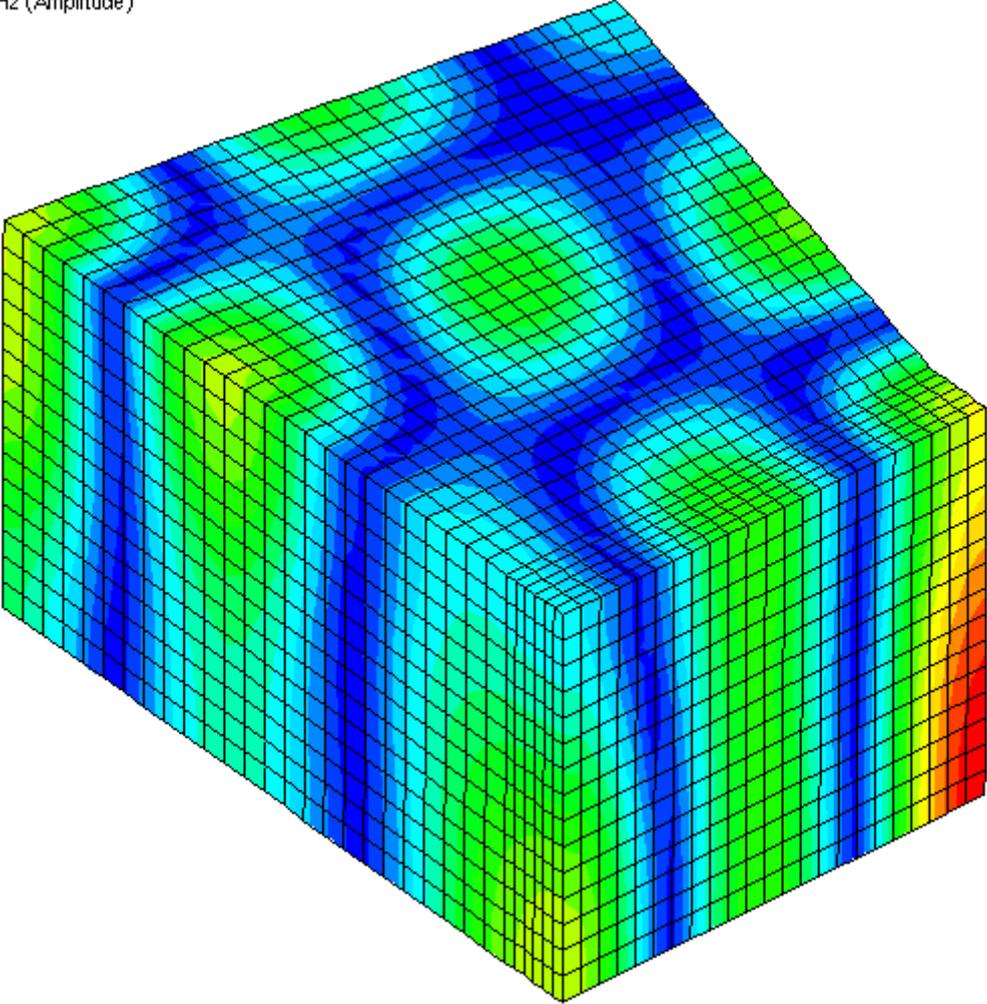


Abbildung 43 Empfangsraummode Nr. 17 (Schalldruck)

114.258 Hz (Amplitude)

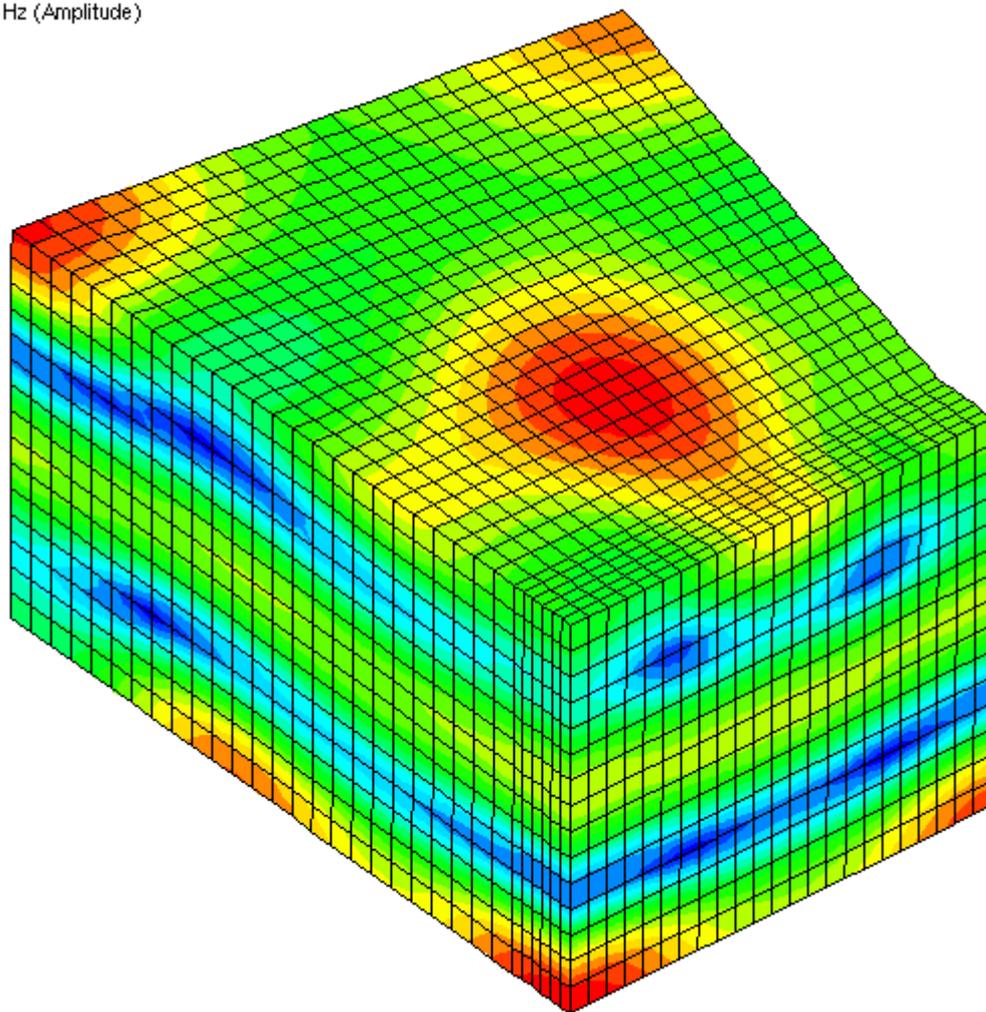


Abbildung 44 Empfangsraummode Nr. 18 (Schalldruck)

114.521 Hz (Amplitude)

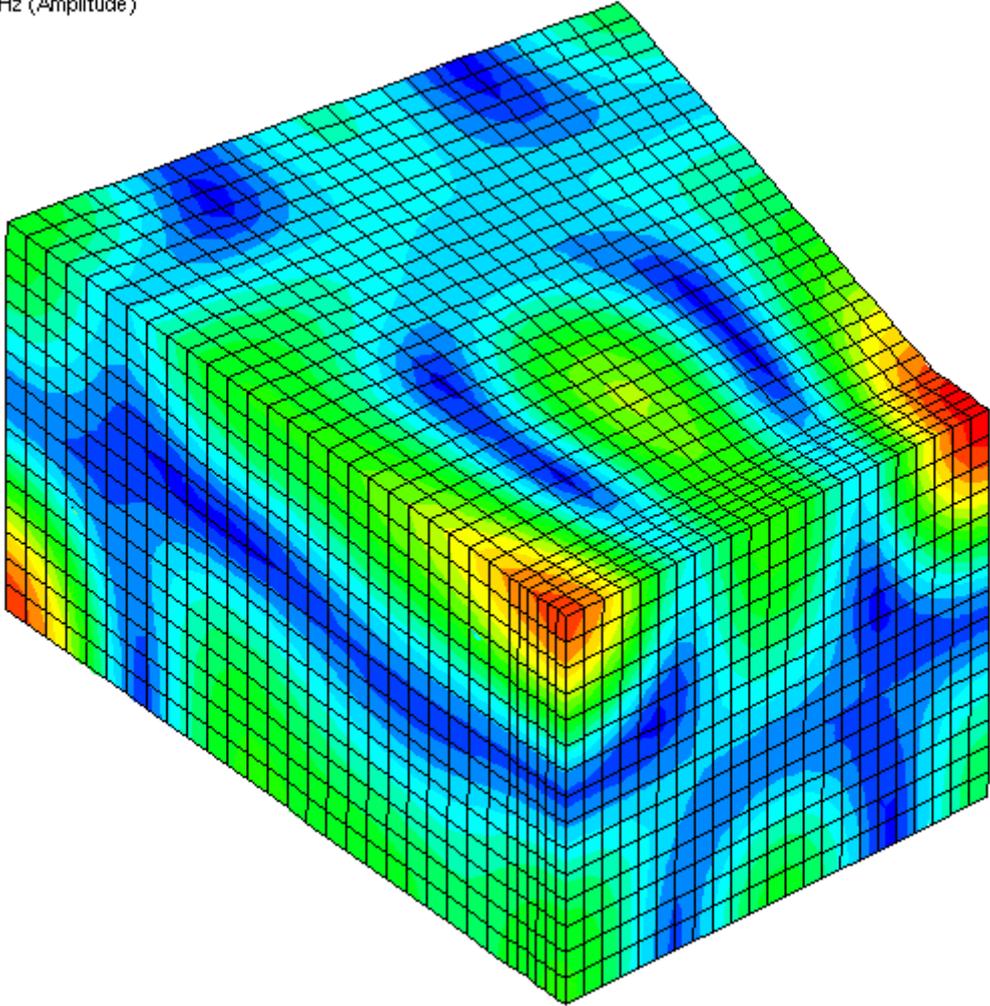


Abbildung 45 Empfangsraummode Nr. 19 (Schalldruck)

115.108 Hz (Amplitude)

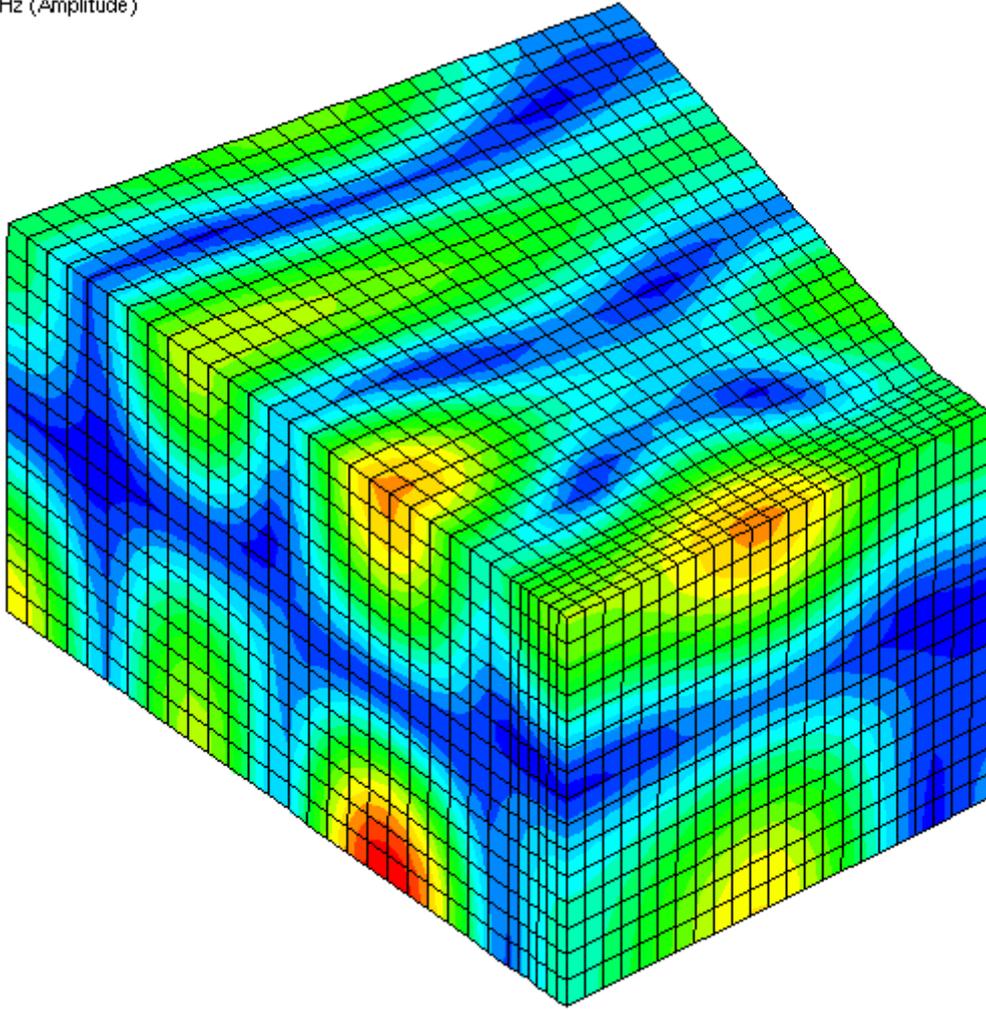


Abbildung 46 Empfangsraummode Nr. 20 (Schalldruck)

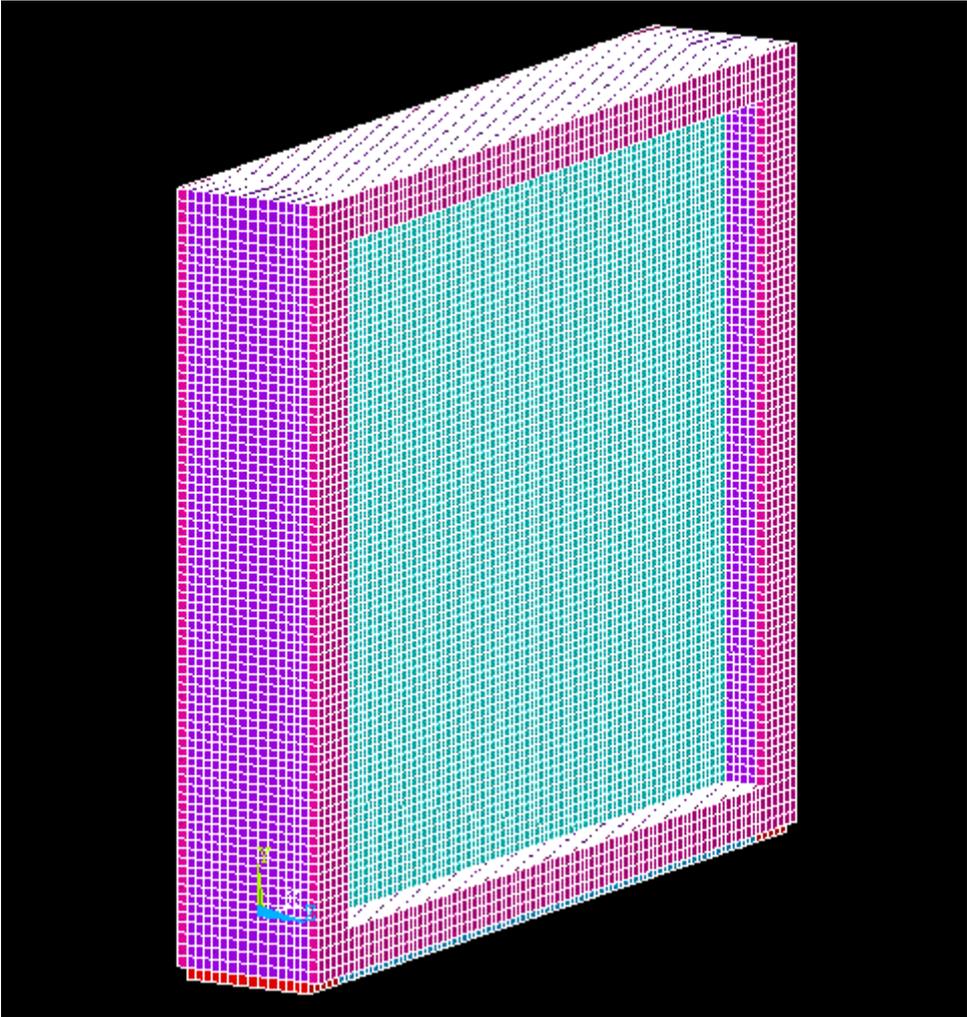


Abbildung 47 FEM-Gitter auf Prüfwand, Rahmen und elastischer Lagerung.

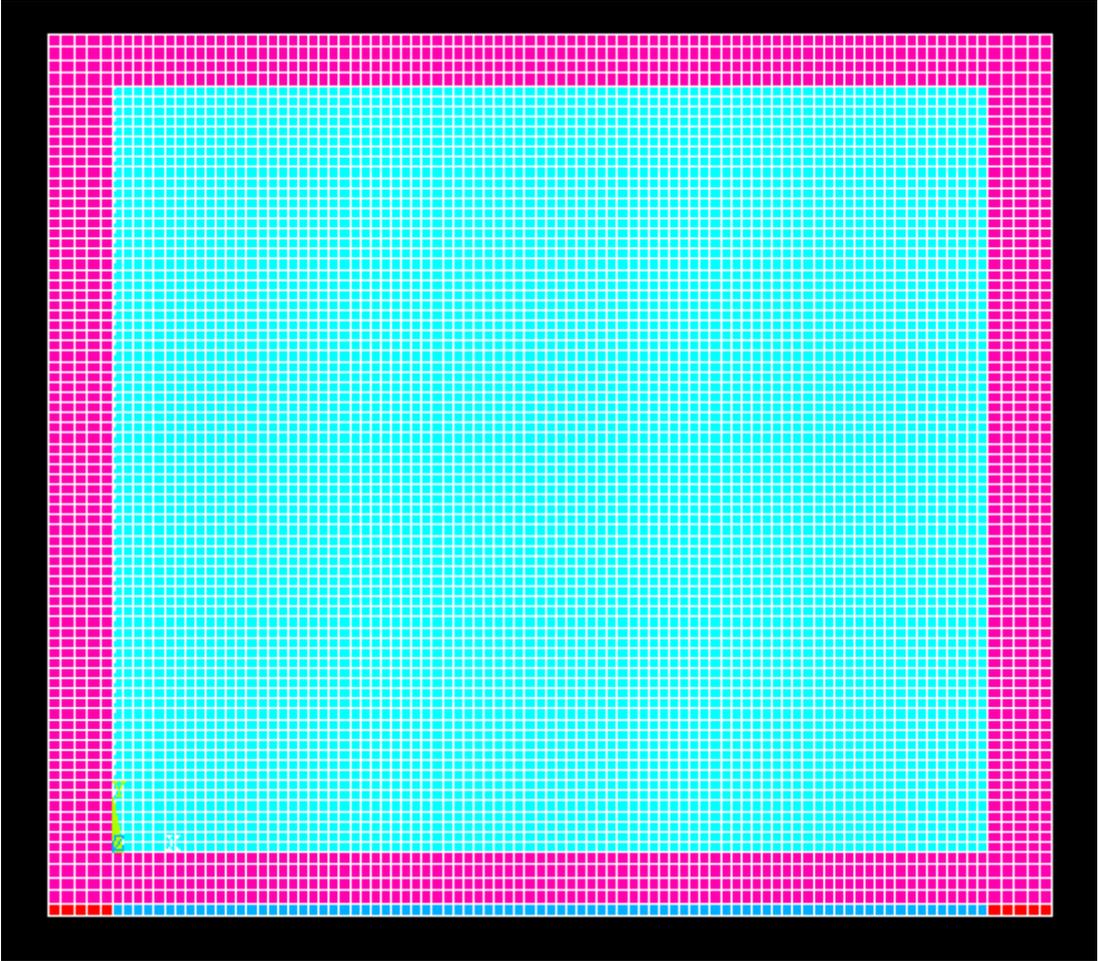


Abbildung 48 FEM-Gitter auf Prüfwand, Rahmen und elastische Lagerung



Abbildung 49 Messpunkte für das Laservibrometer auf der Prüfwand



Abbildung 50 Messpunkte für den Beschleunigungsaufnehmer auf dem Rahmen.

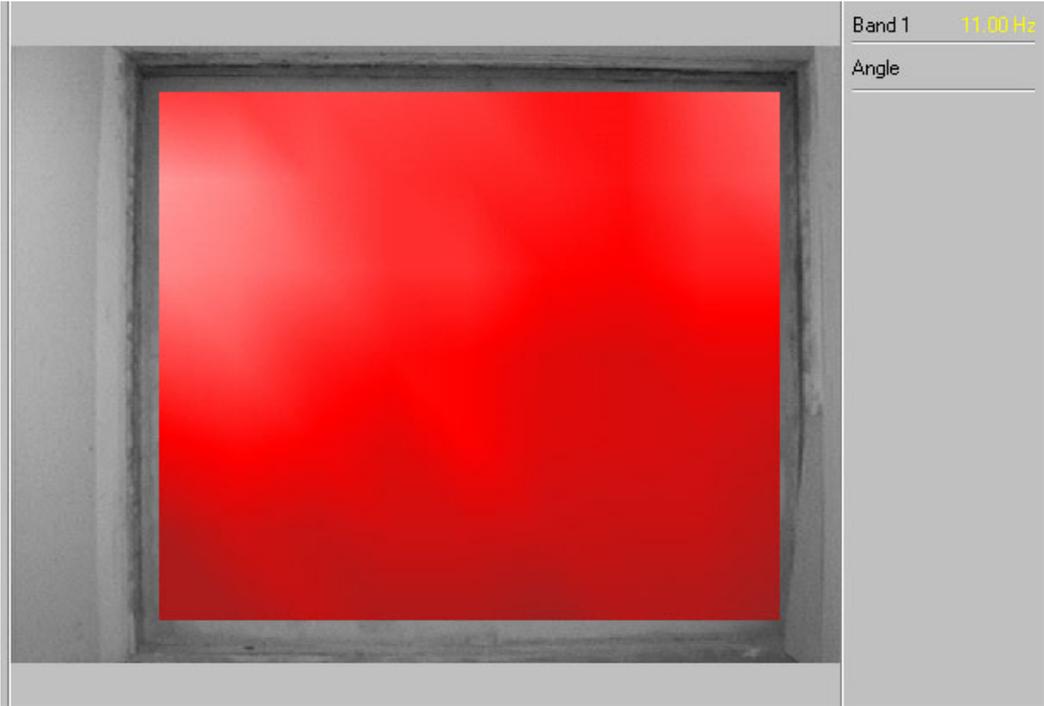


Abbildung 51 Prüfstandmode 11Hz

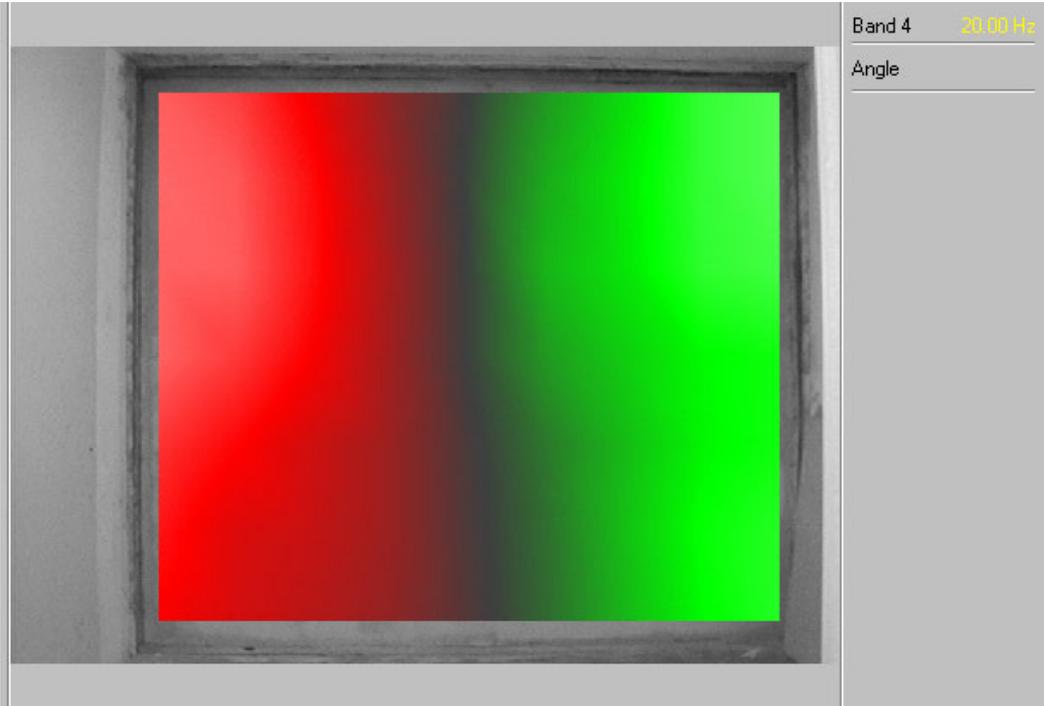


Abbildung 52 Prüfstandmode 20Hz

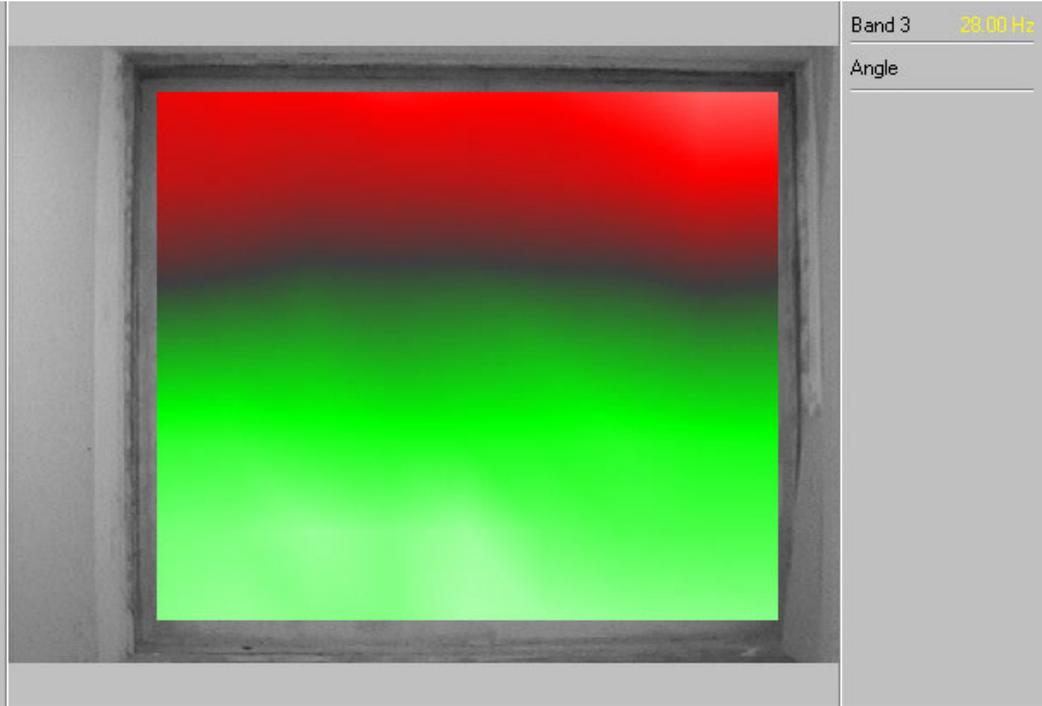


Abbildung 53 Prüfwanne mode 28Hz

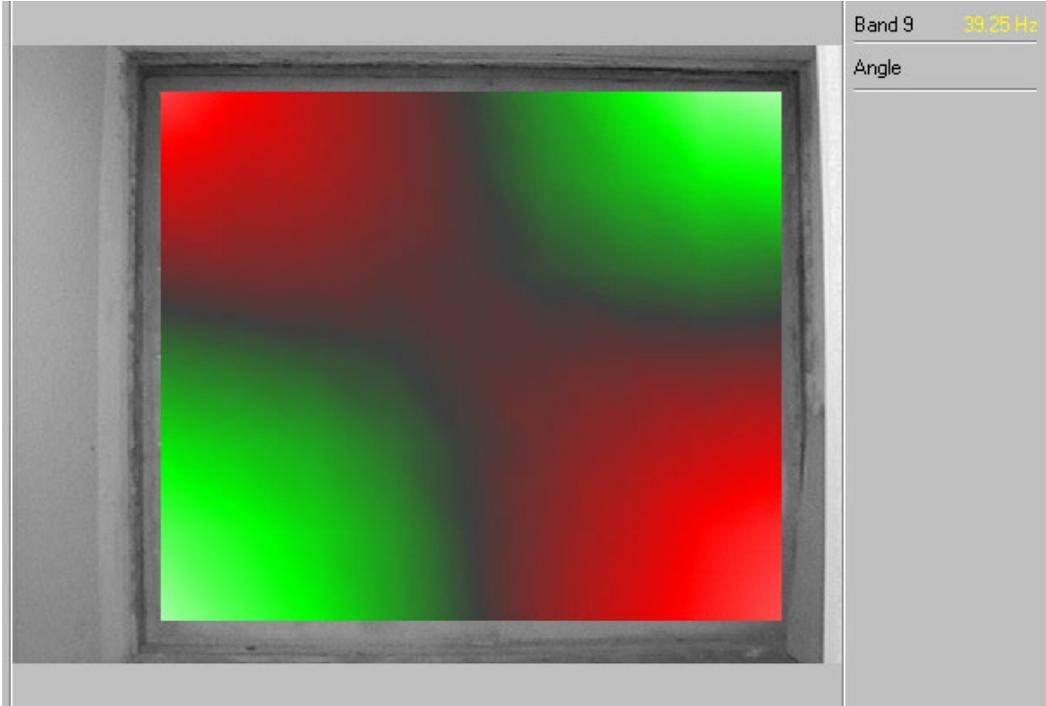


Abbildung 54 Prüfwanne mode 39Hz

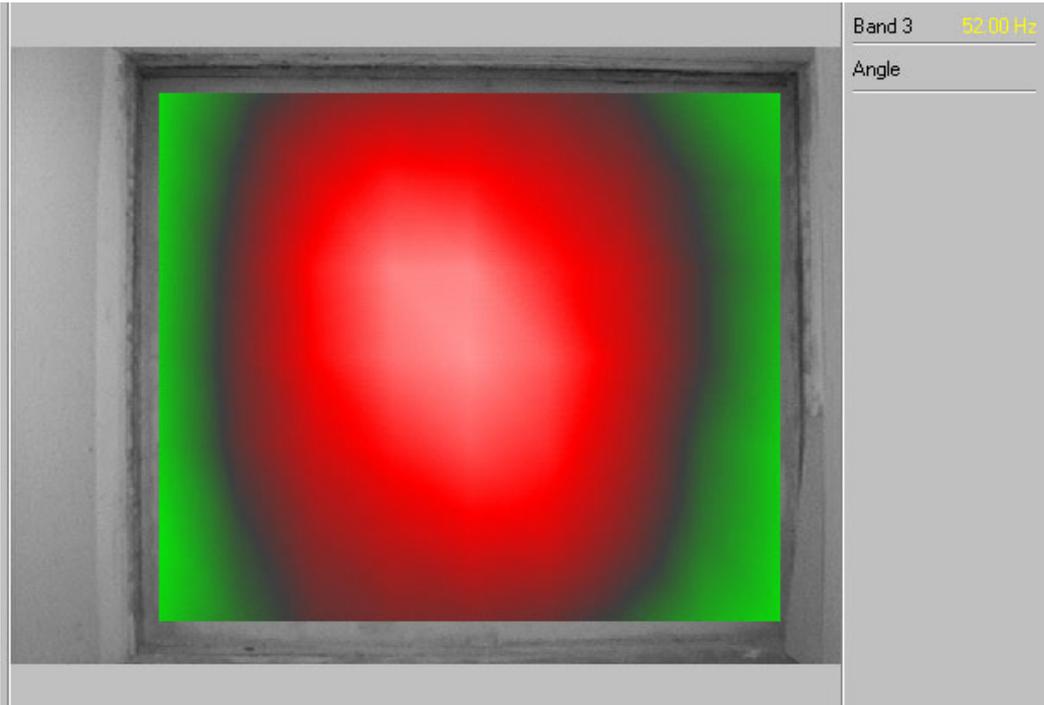


Abbildung 55 Prüfwandmode 52Hz

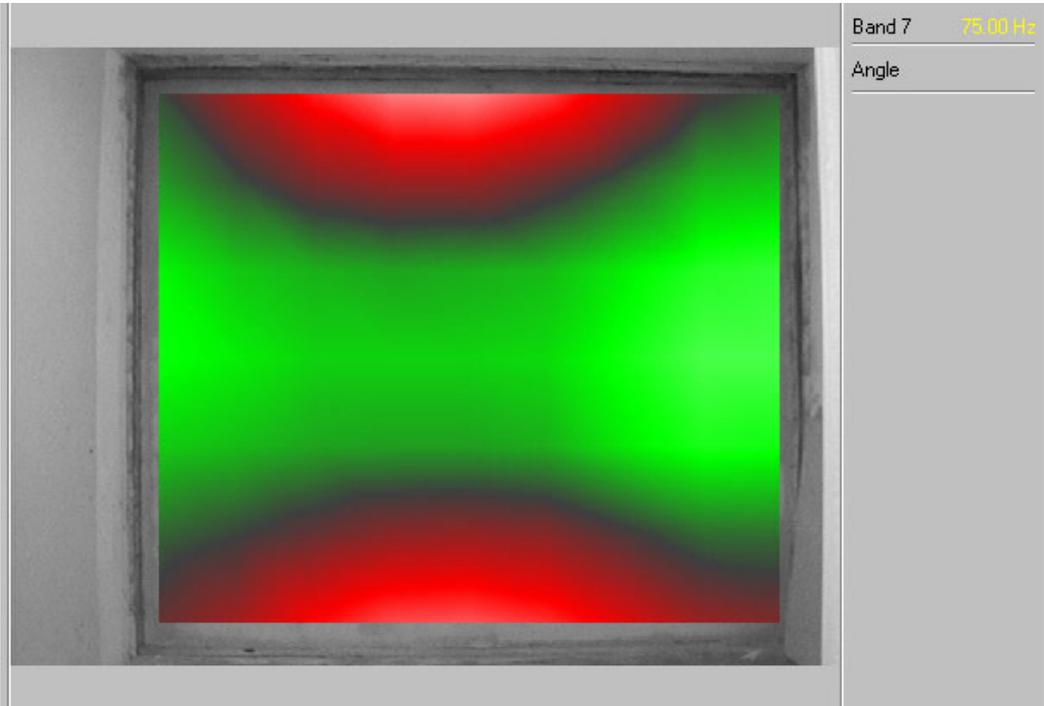


Abbildung 56 Prüfwandmode 75Hz

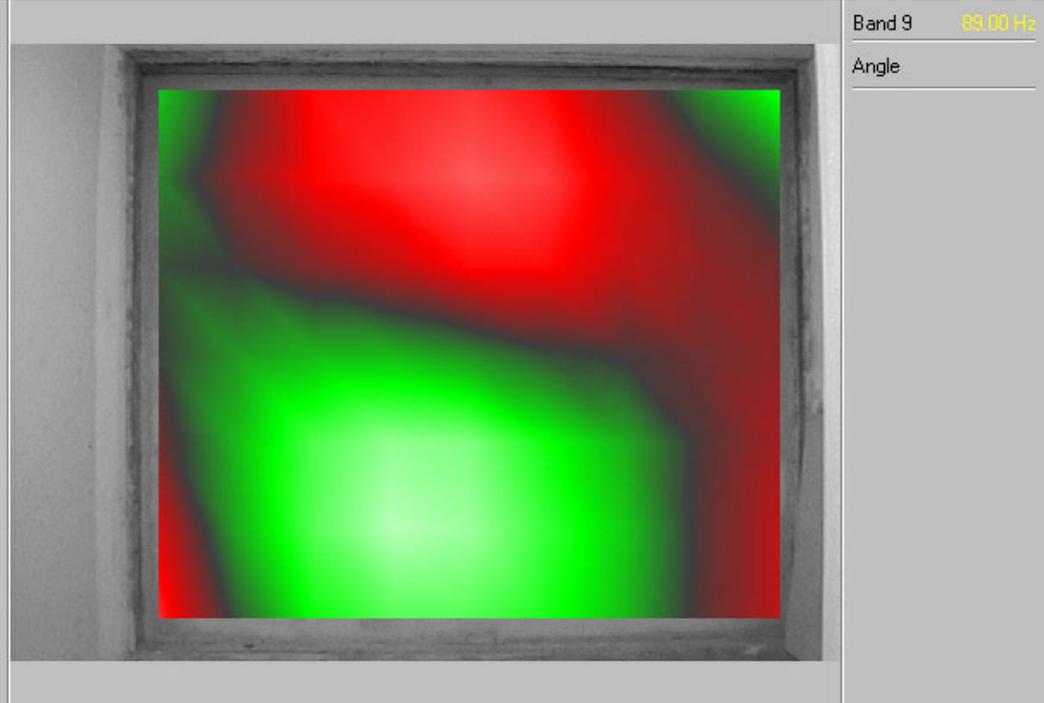


Abbildung 57 Prüfwandmode 89Hz

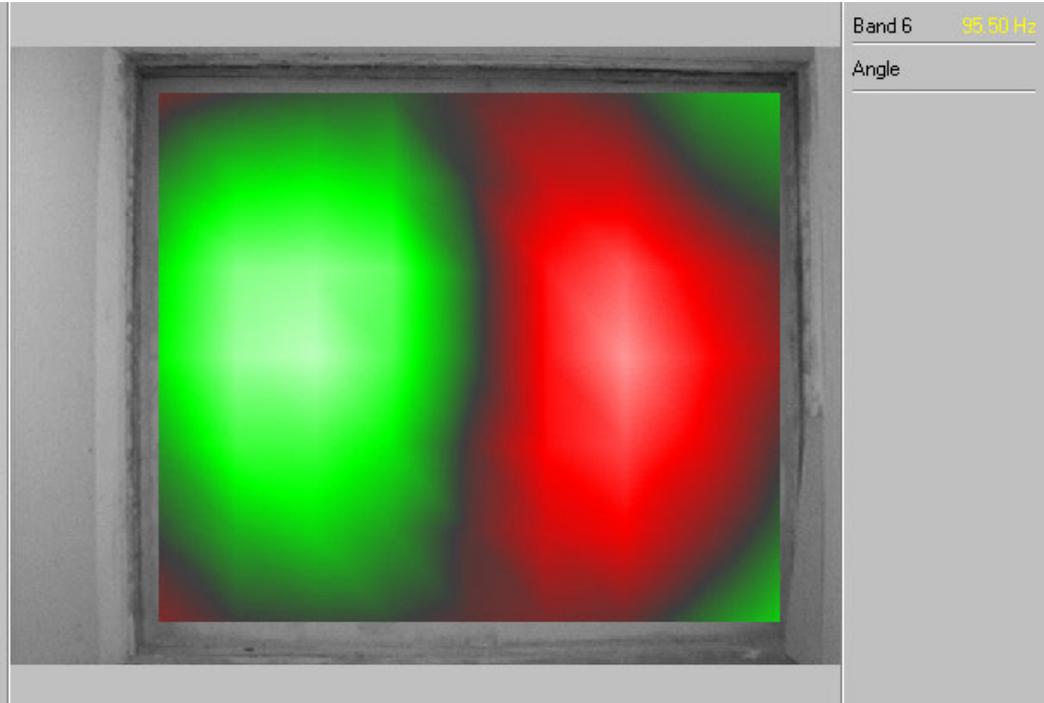


Abbildung 58 Prüfwandmode 95Hz

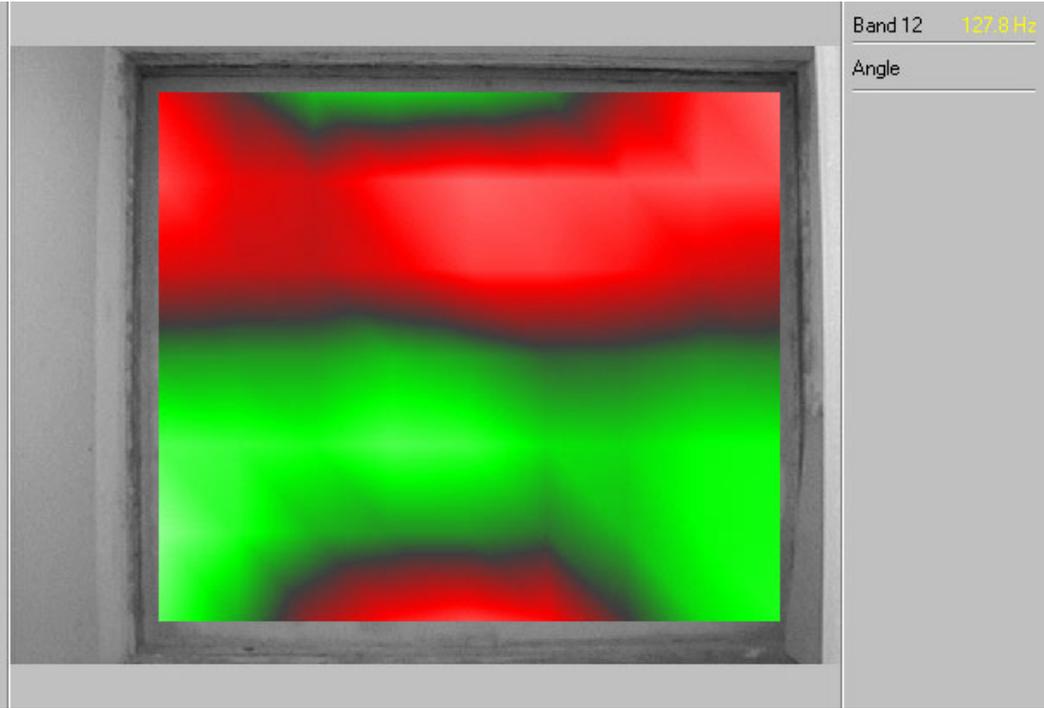


Abbildung 59 Prüfwandmode 128Hz

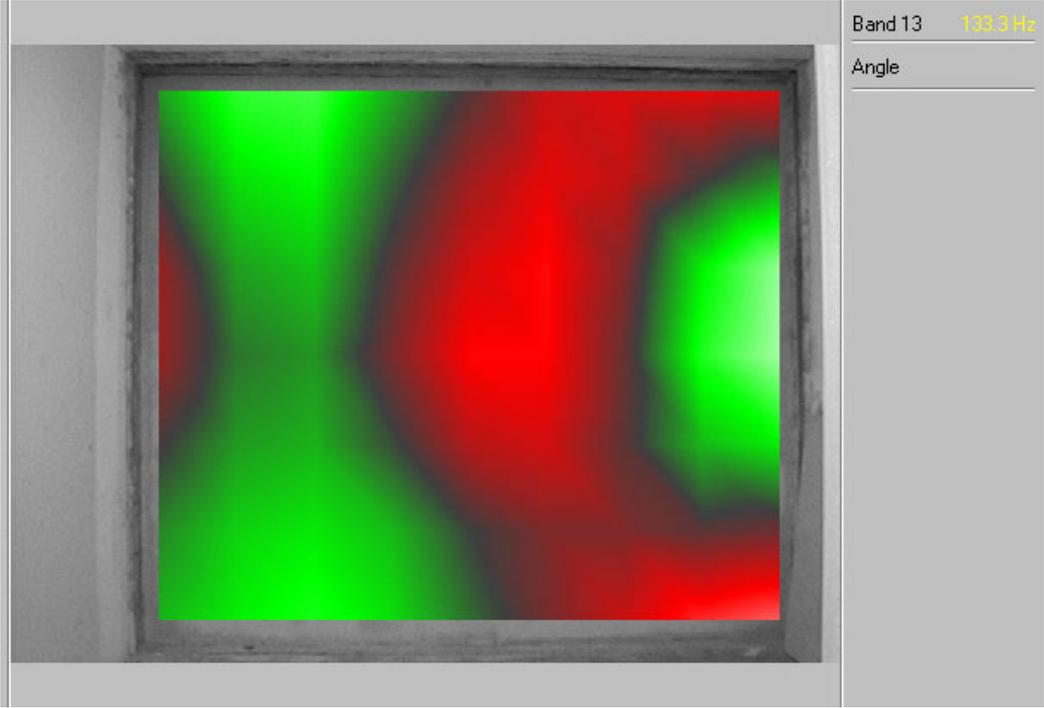


Abbildung 60 Prüfwandmode 133Hz

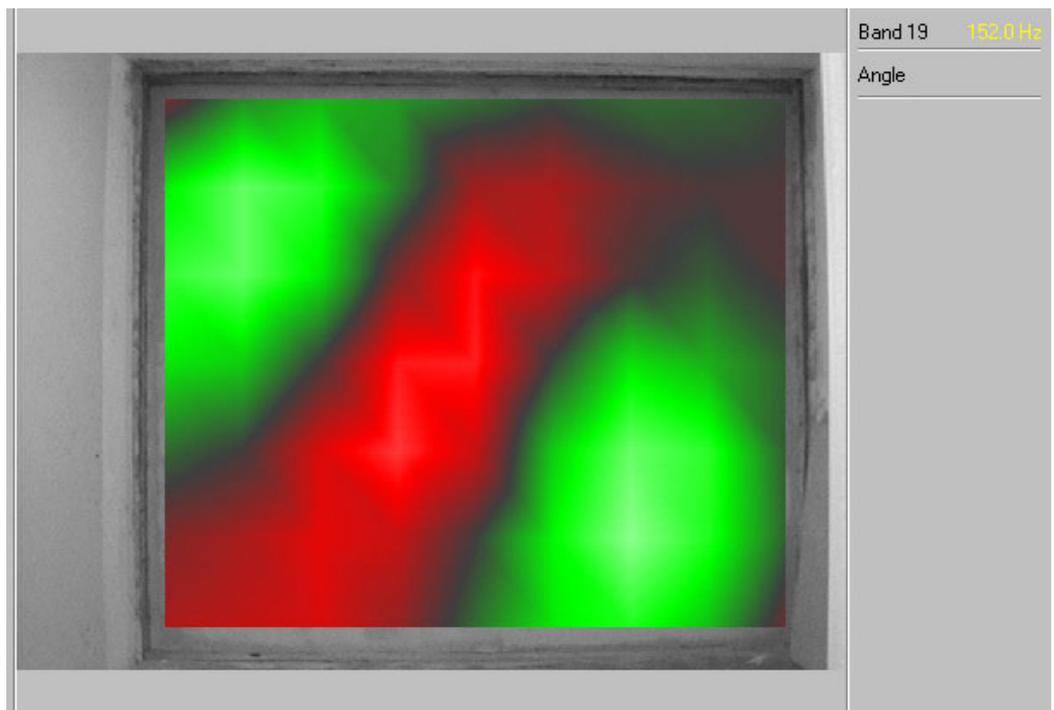


Abbildung 61 Prüfwandmode 152Hz

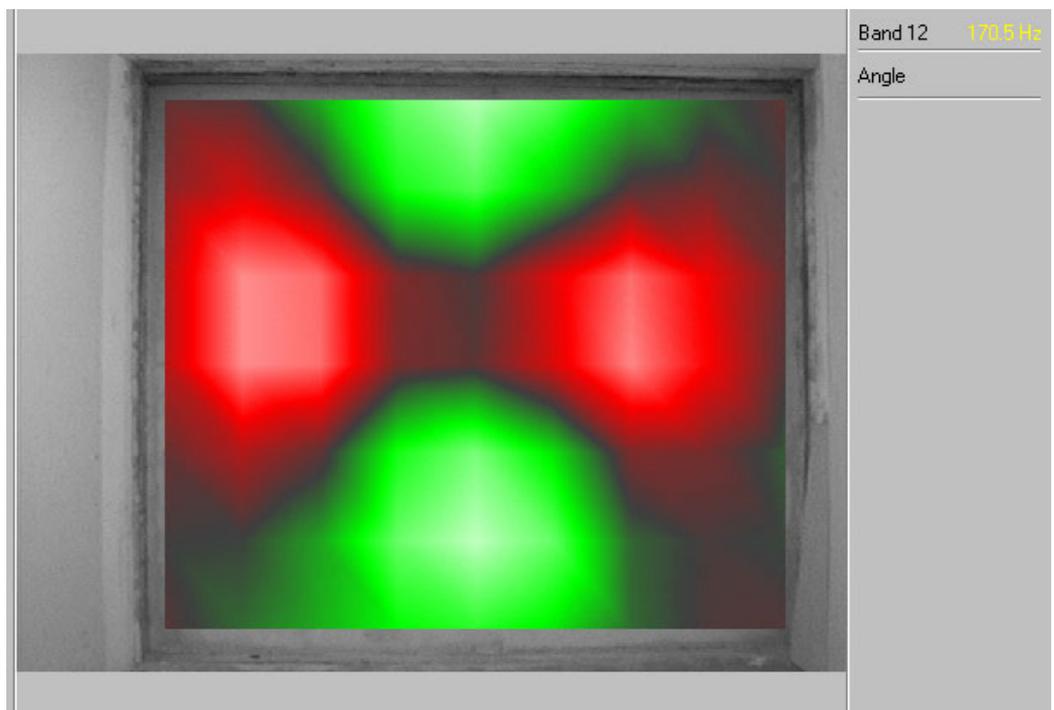


Abbildung 62 Prüfwandmode 170Hz

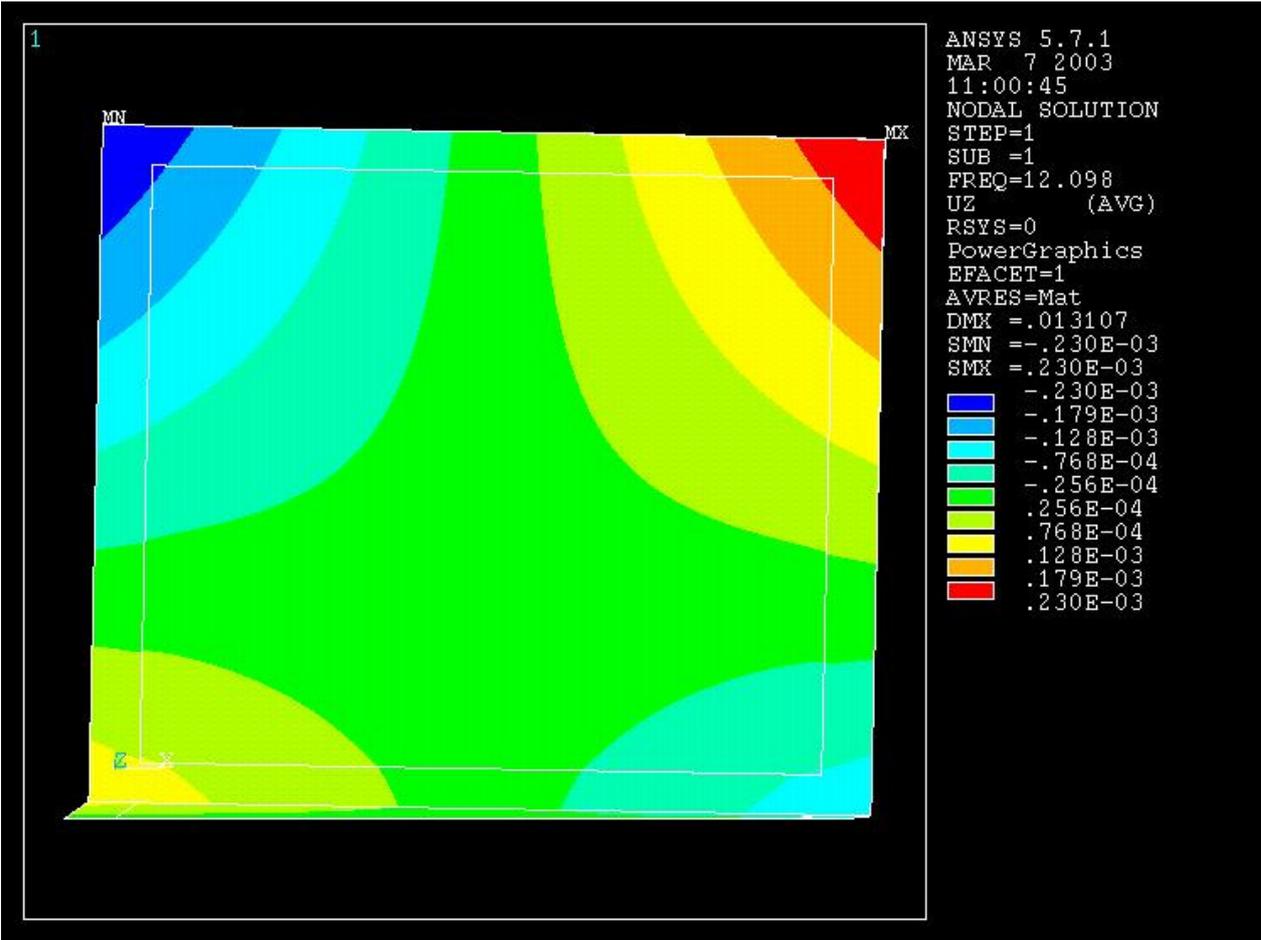


Abbildung 63 berechnete Prüfwandmode, 12Hz

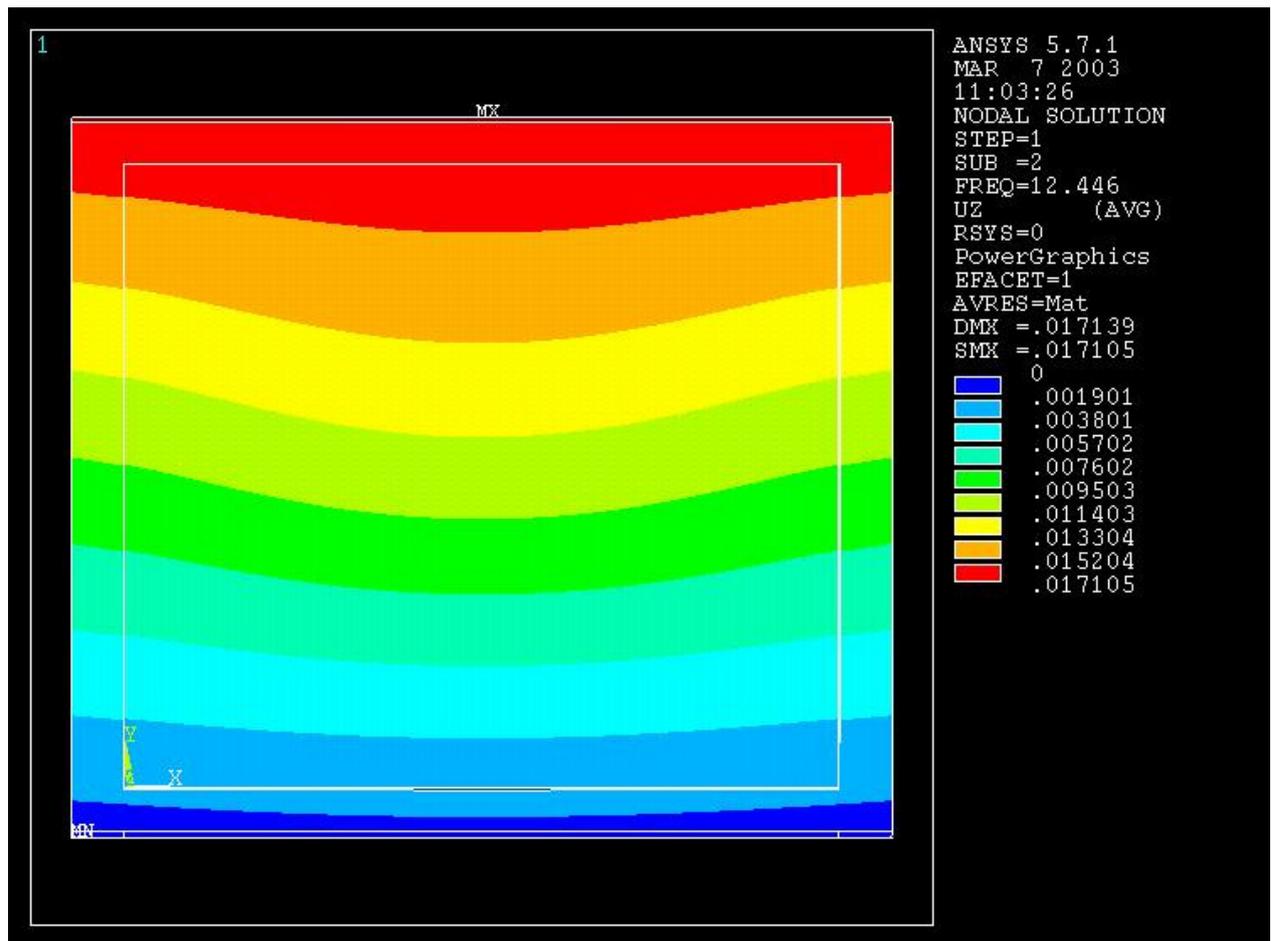


Abbildung 64 berechnete Prüfwandmode, 12,4Hz

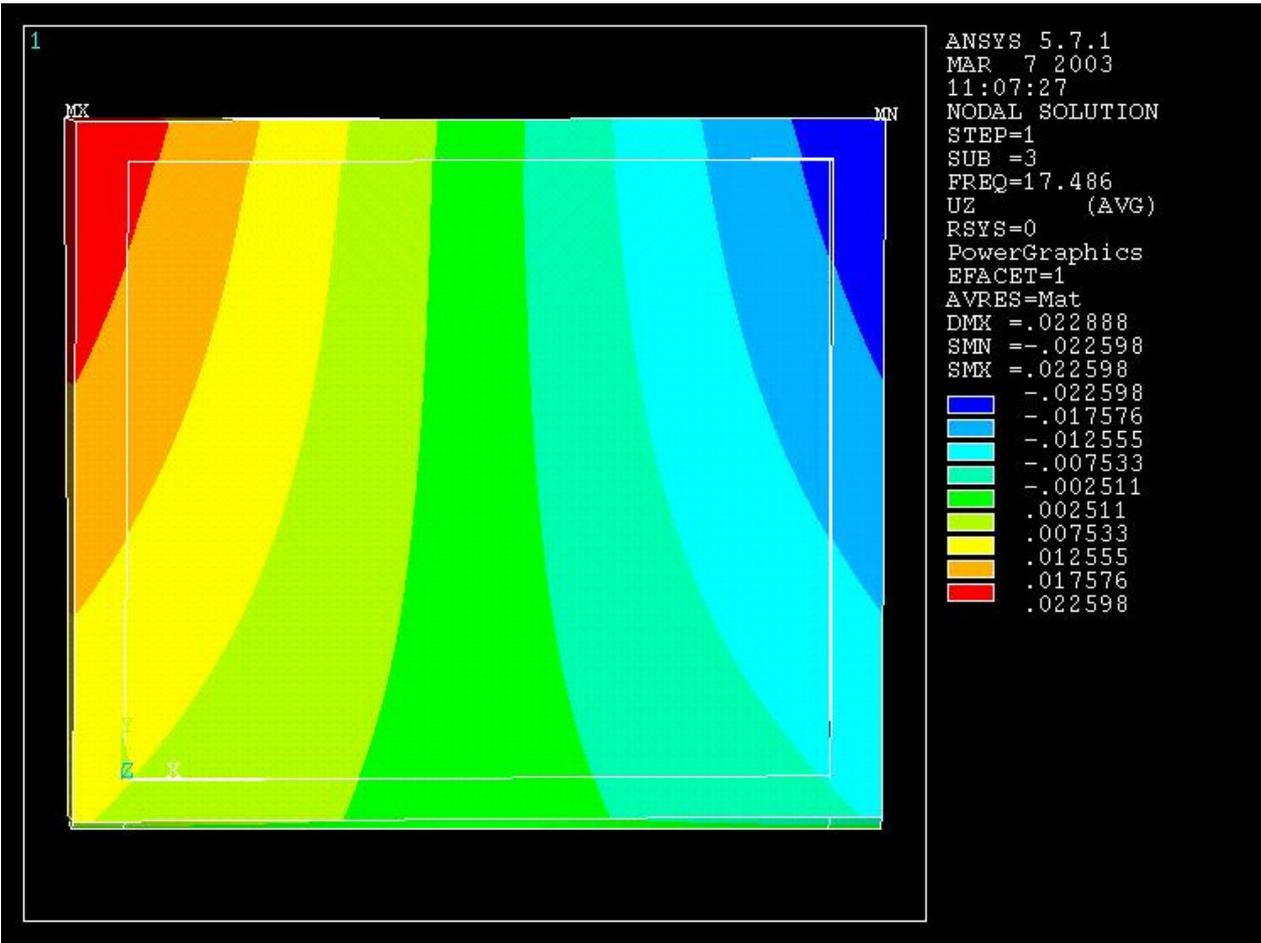


Abbildung 65 berechnete Prüfwandmode, 17,5Hz

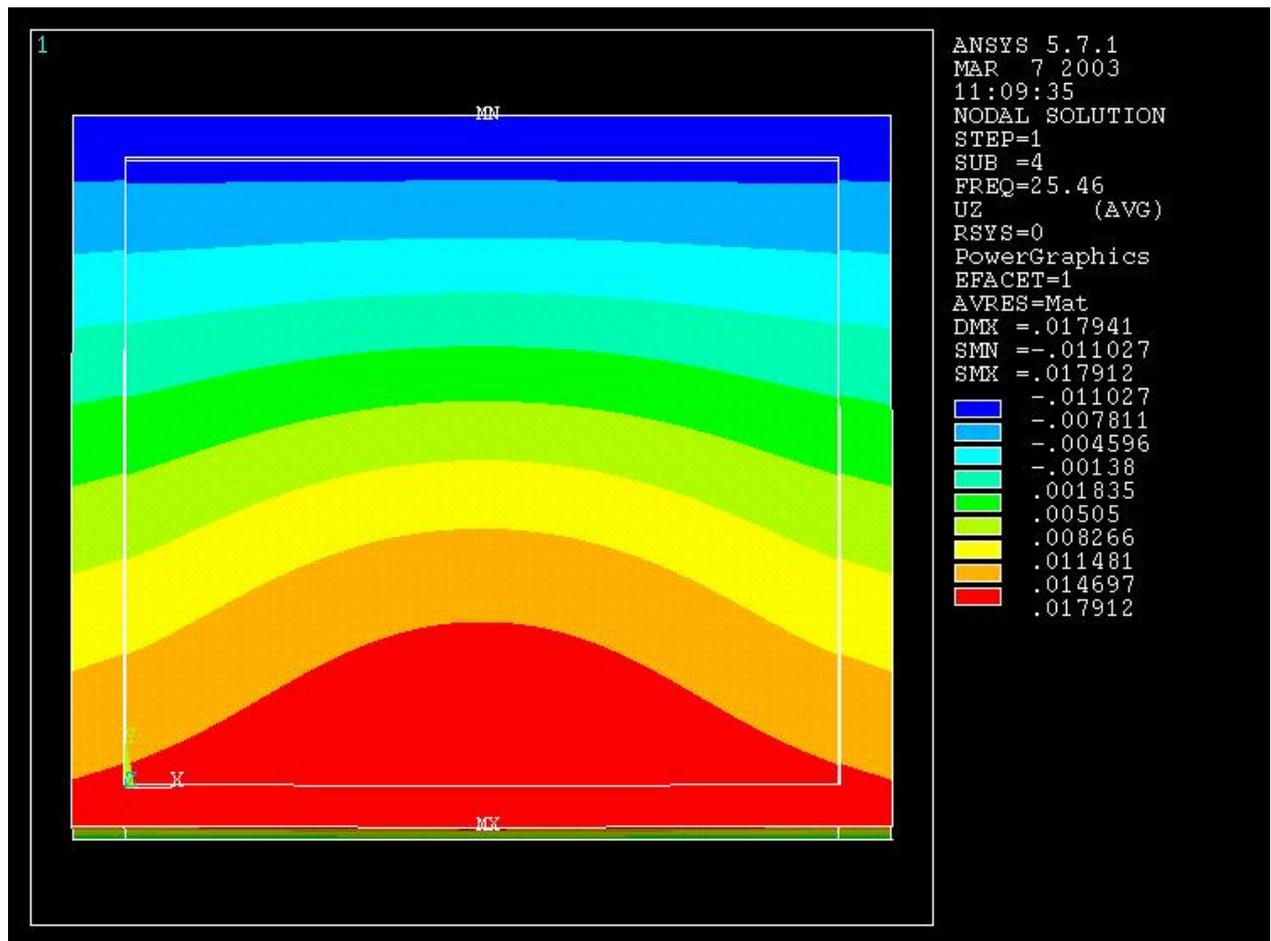


Abbildung 66 berechnete Prüfwandmode, 25,5Hz

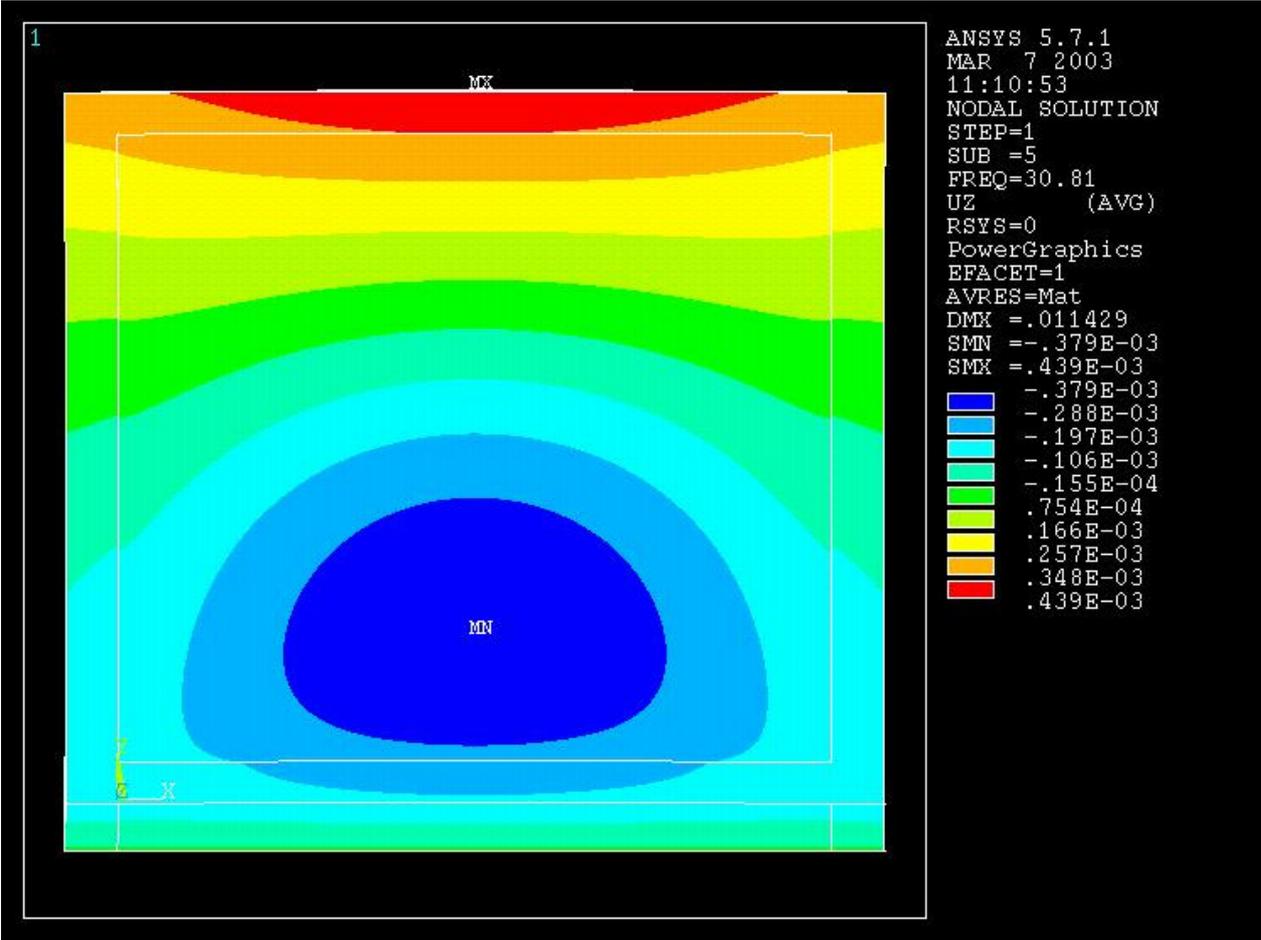


Abbildung 67 berechnete Prüfwandmode, 30,8Hz

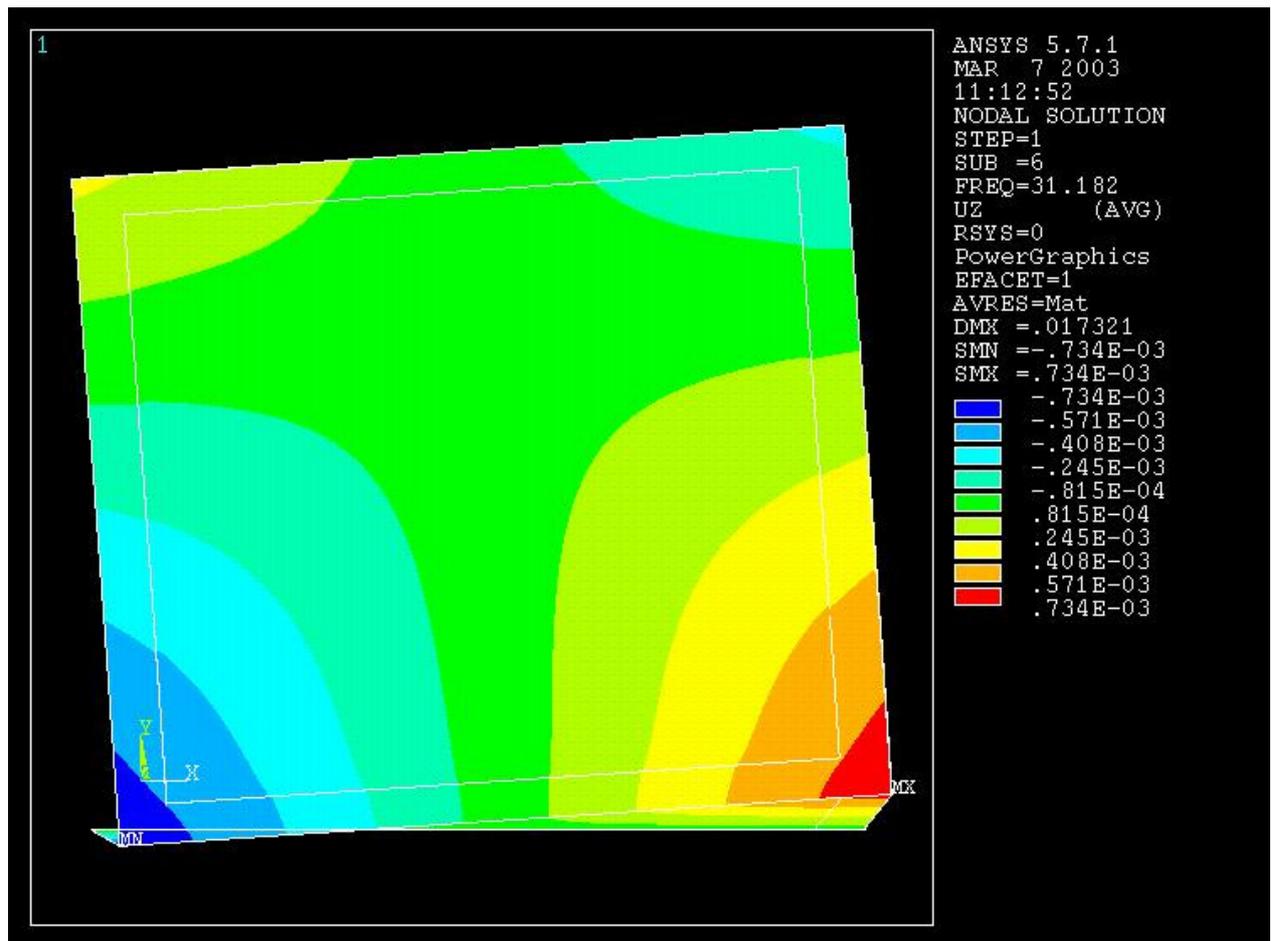


Abbildung 68 berechnete Prüfwandmode, 31,2Hz

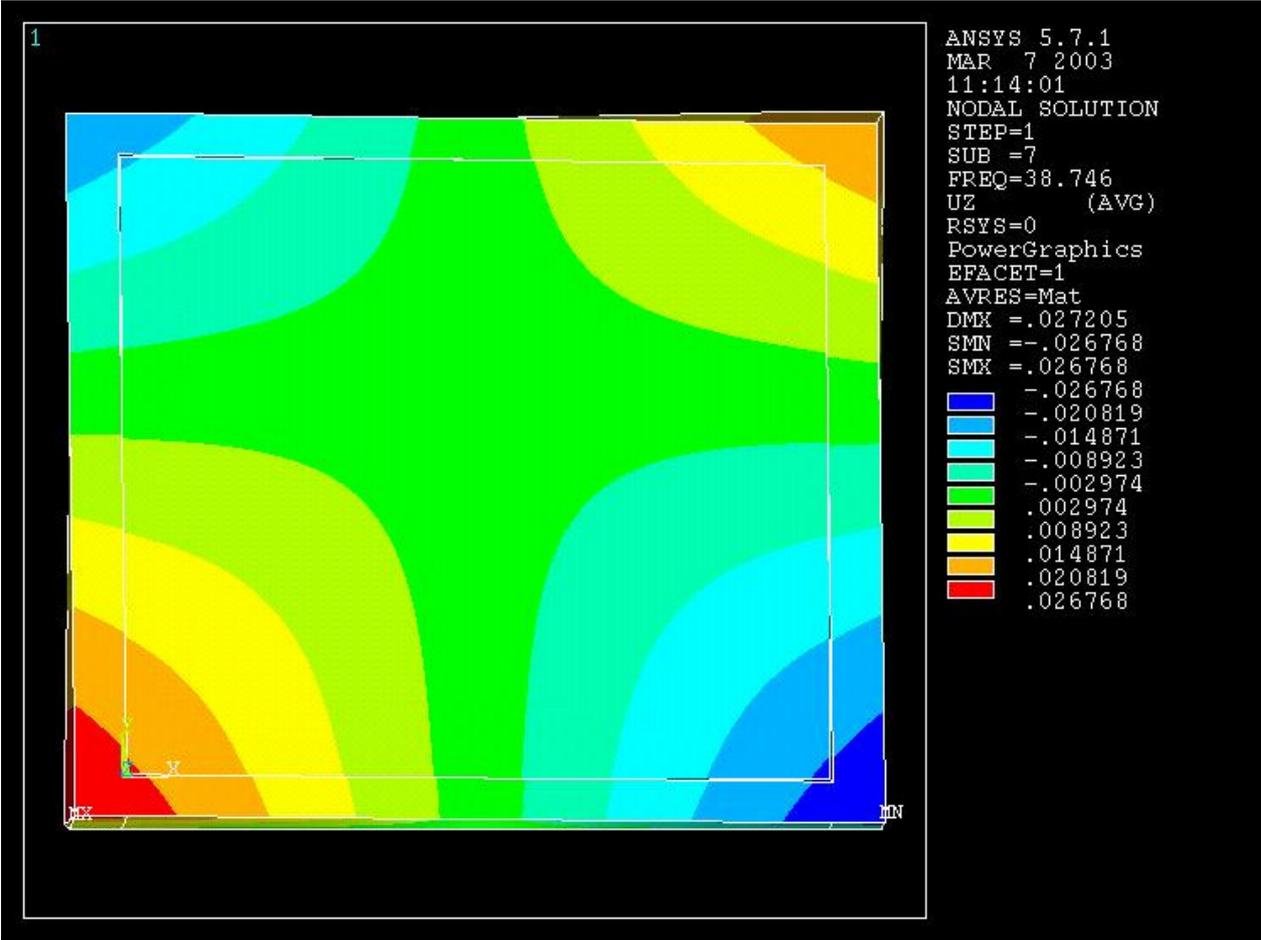


Abbildung 69 berechnete Prüfwandmode, 38,8Hz

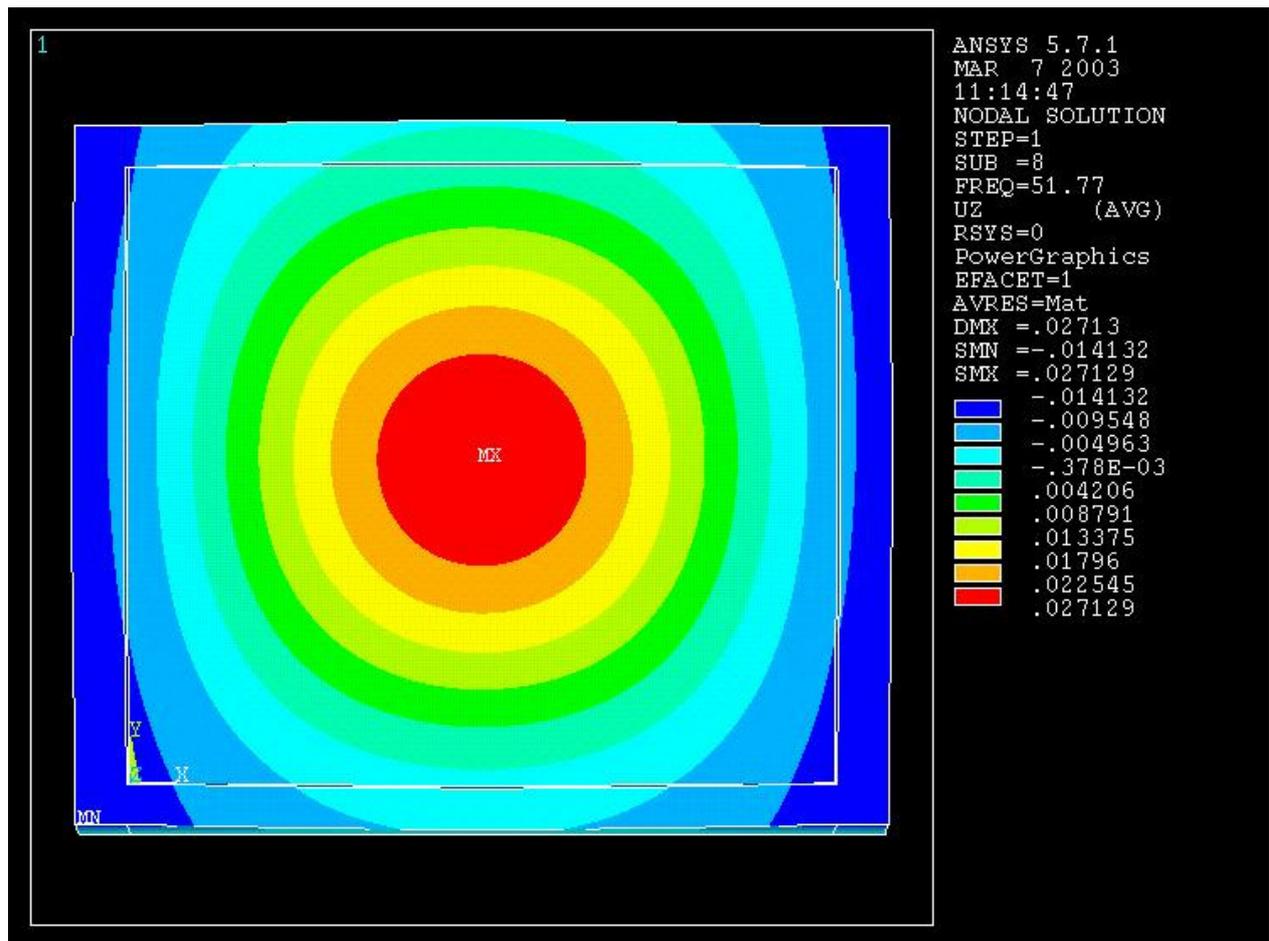


Abbildung 70 berechnete Prüfwandmode, 51,8Hz

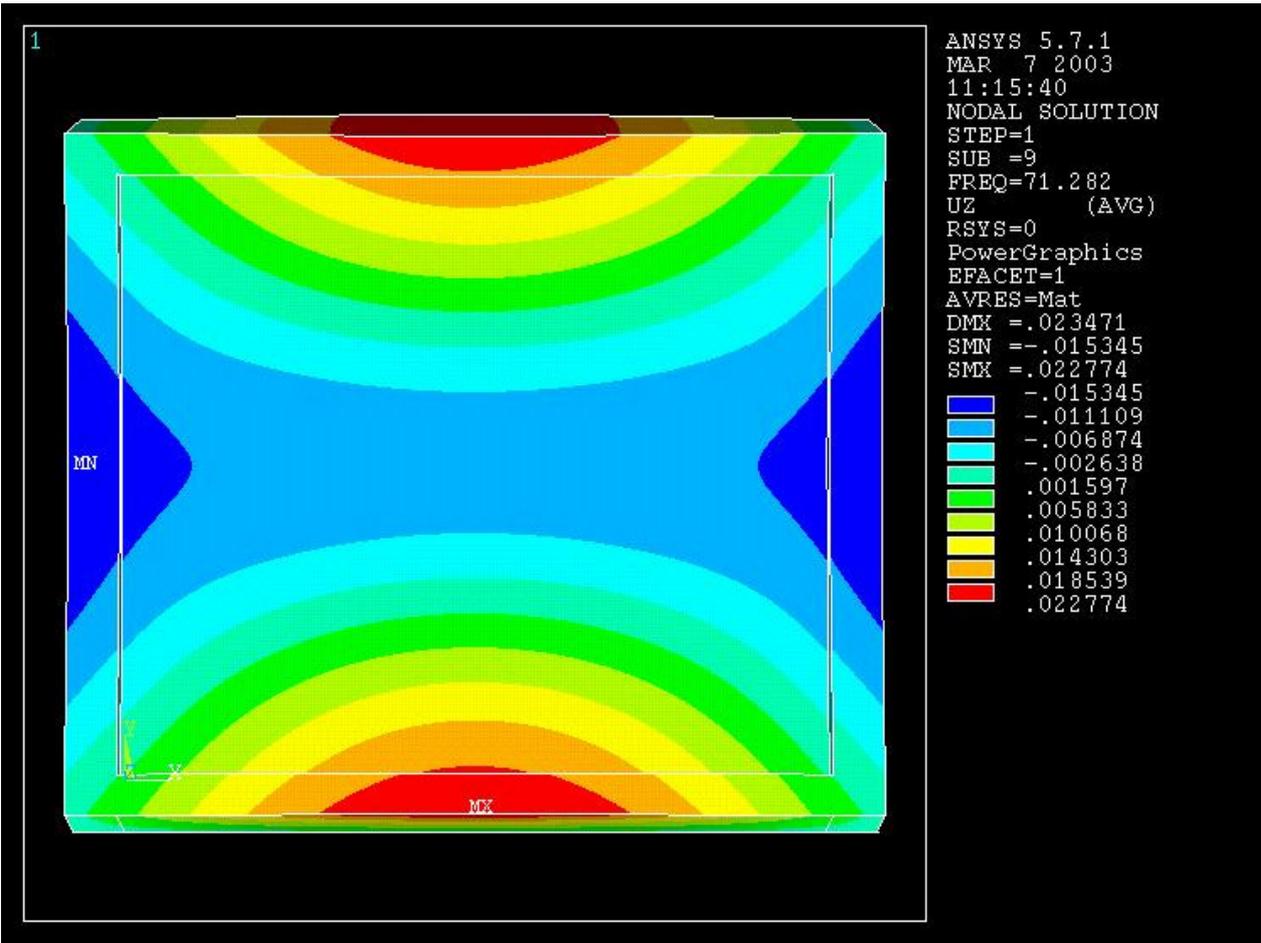


Abbildung 71 berechnete Prüfwandmode, 71,3Hz

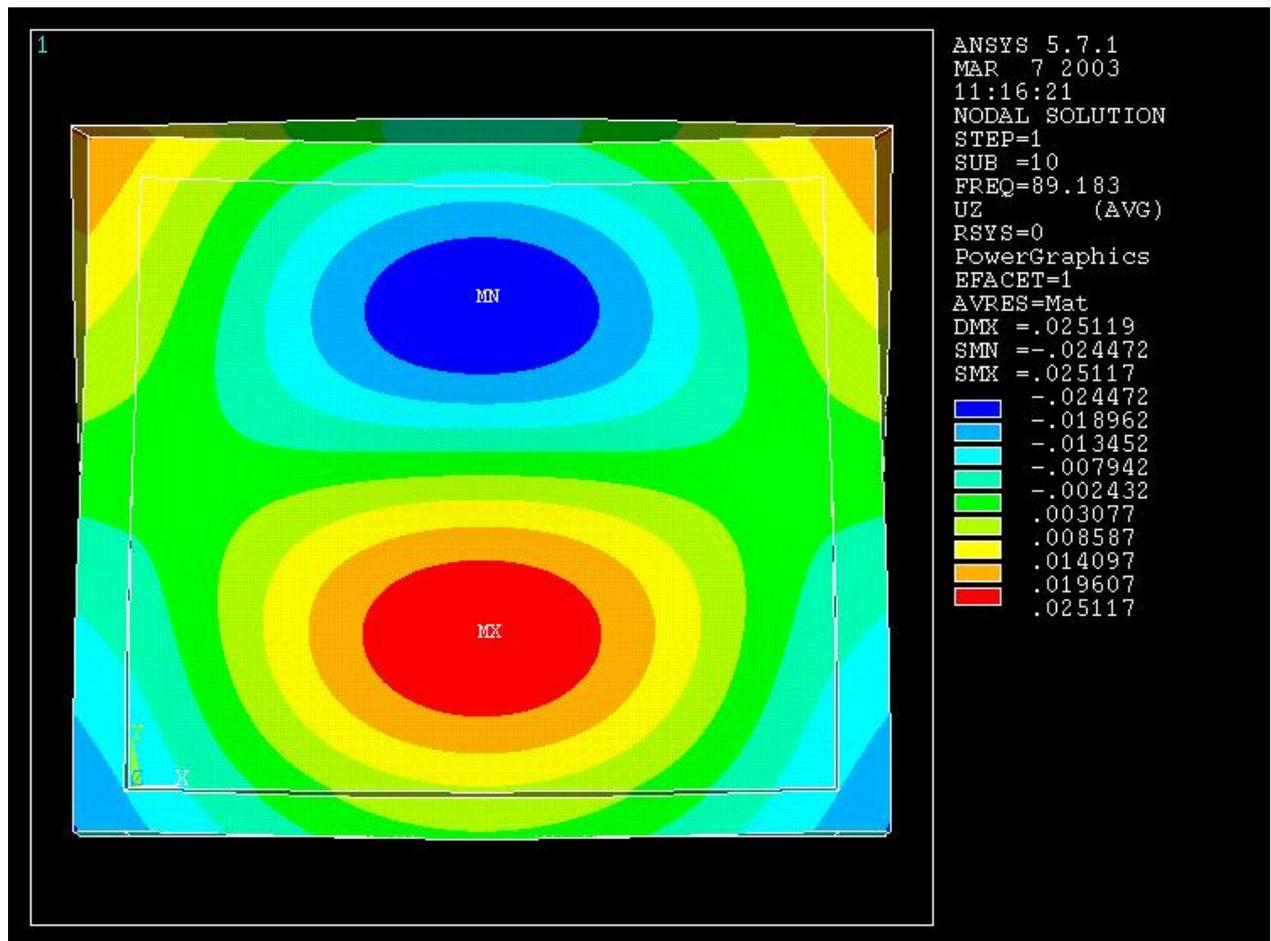


Abbildung 72 berechnete Prüfwandmode, 89,2Hz

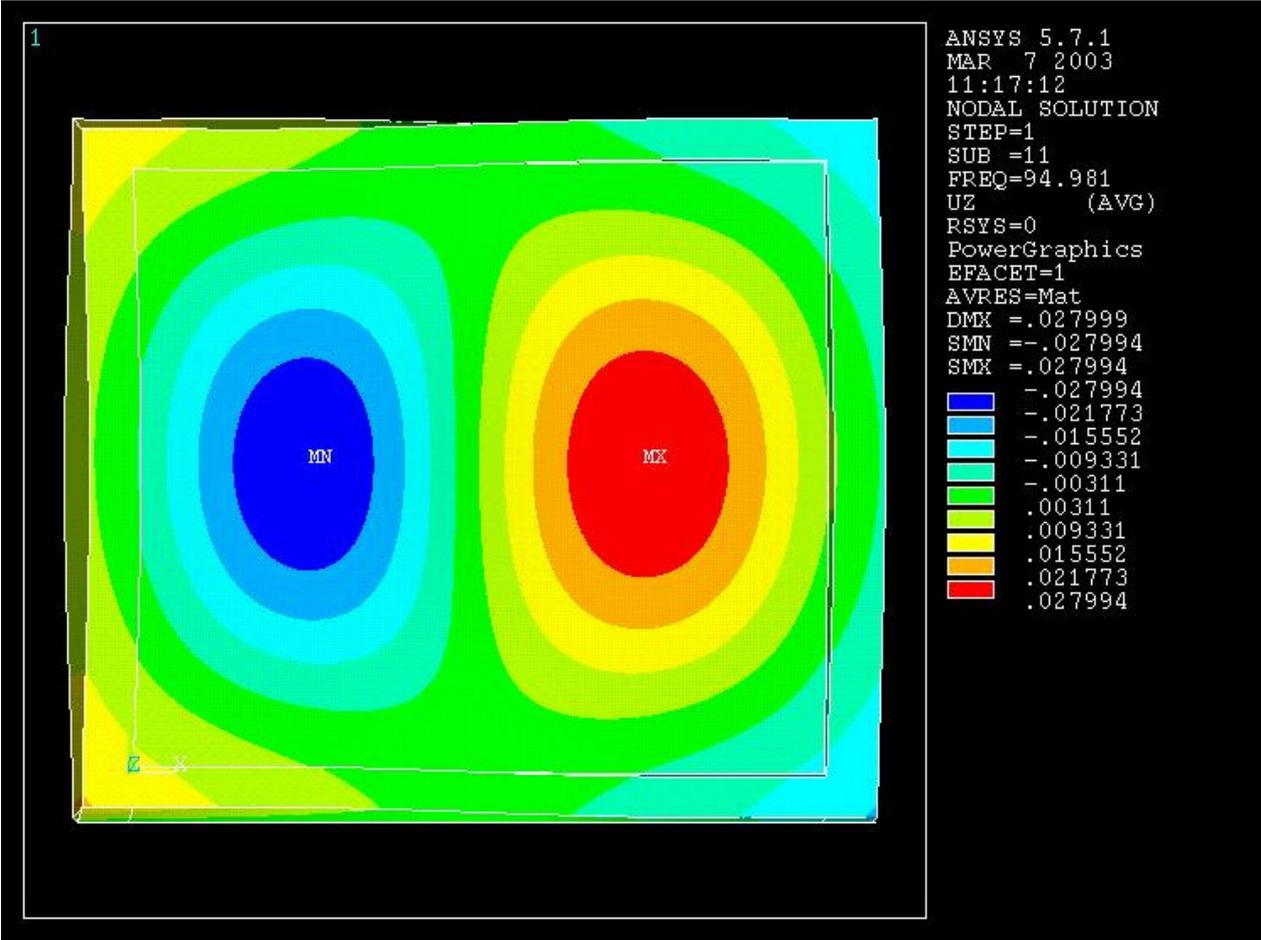


Abbildung 73 berechnete Prüfwandmode, 95,0 Hz

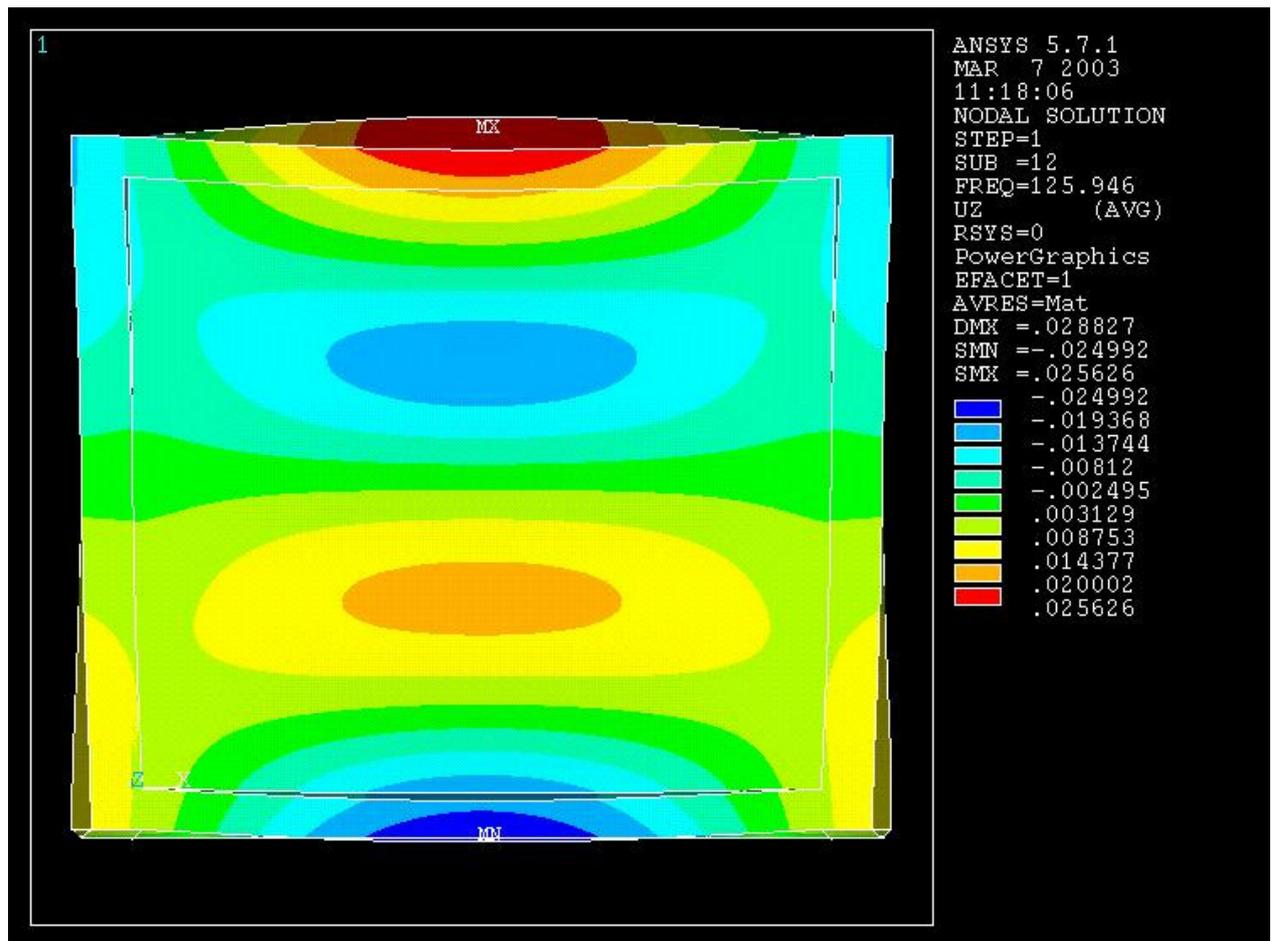


Abbildung 74 berechnete Prüfwandmode, 125,9Hz

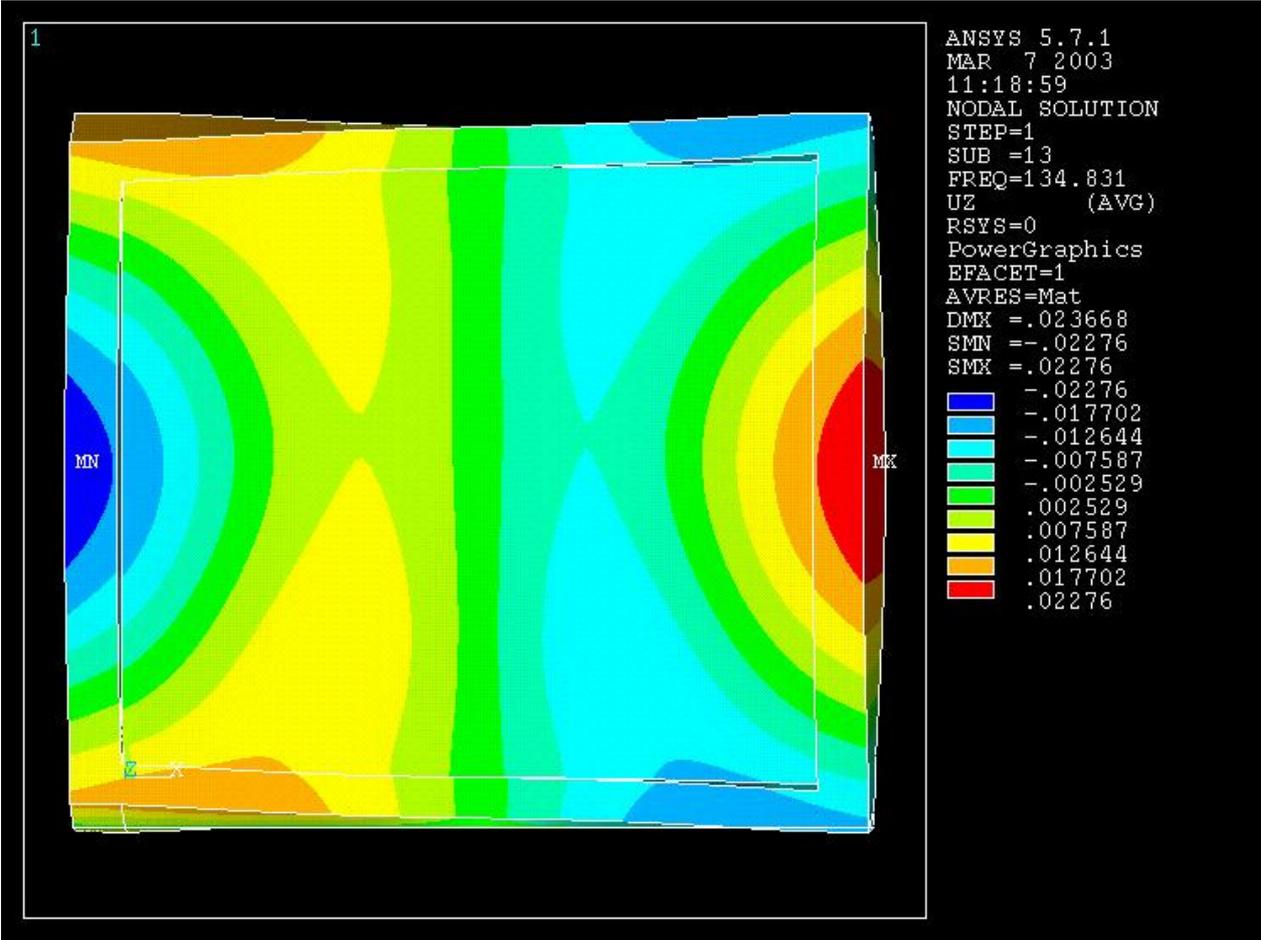


Abbildung 75 berechnete Prüfwandmode, 134,8Hz

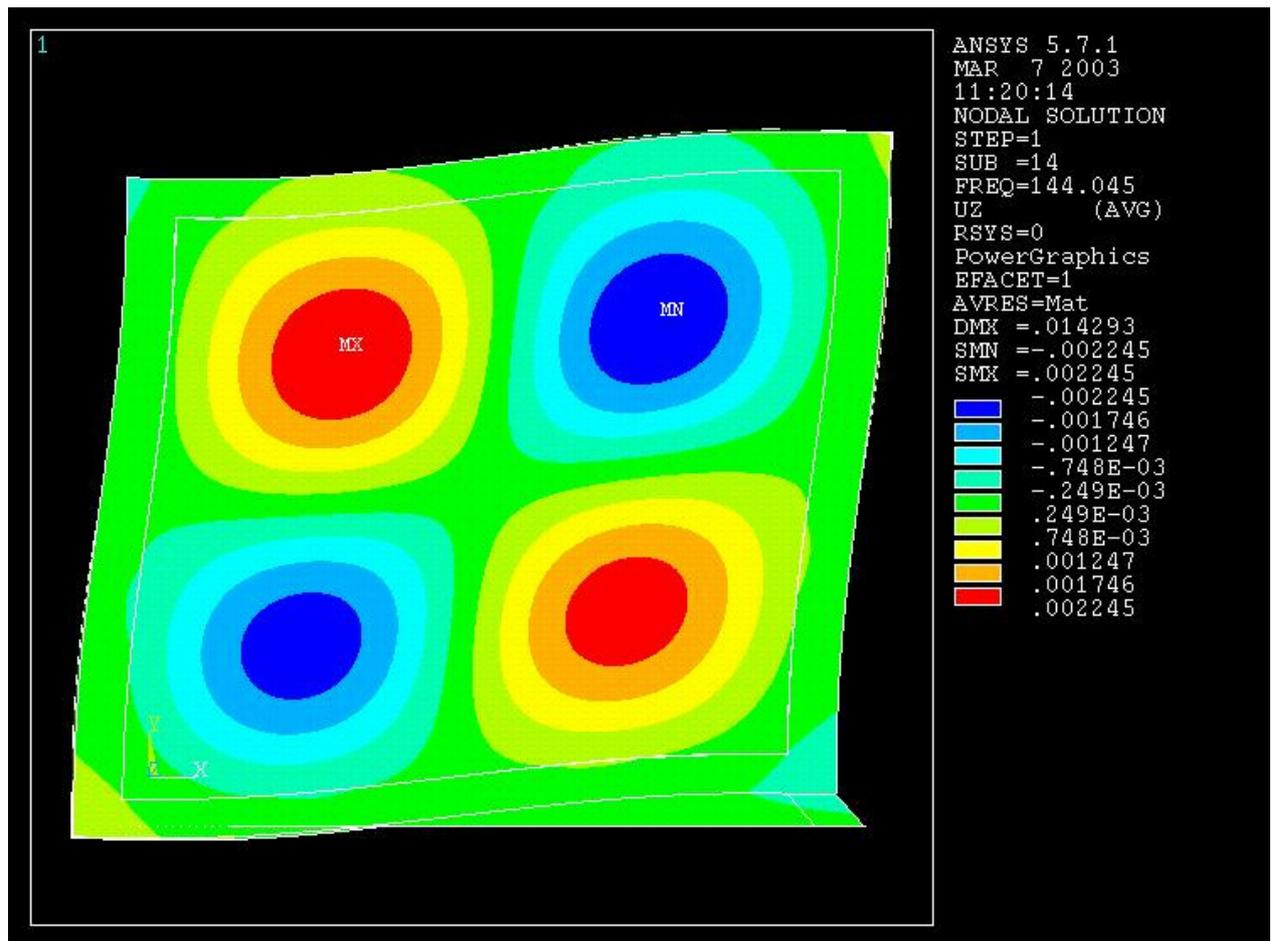


Abbildung 76 berechnete Prüfwandmode, 144,0Hz

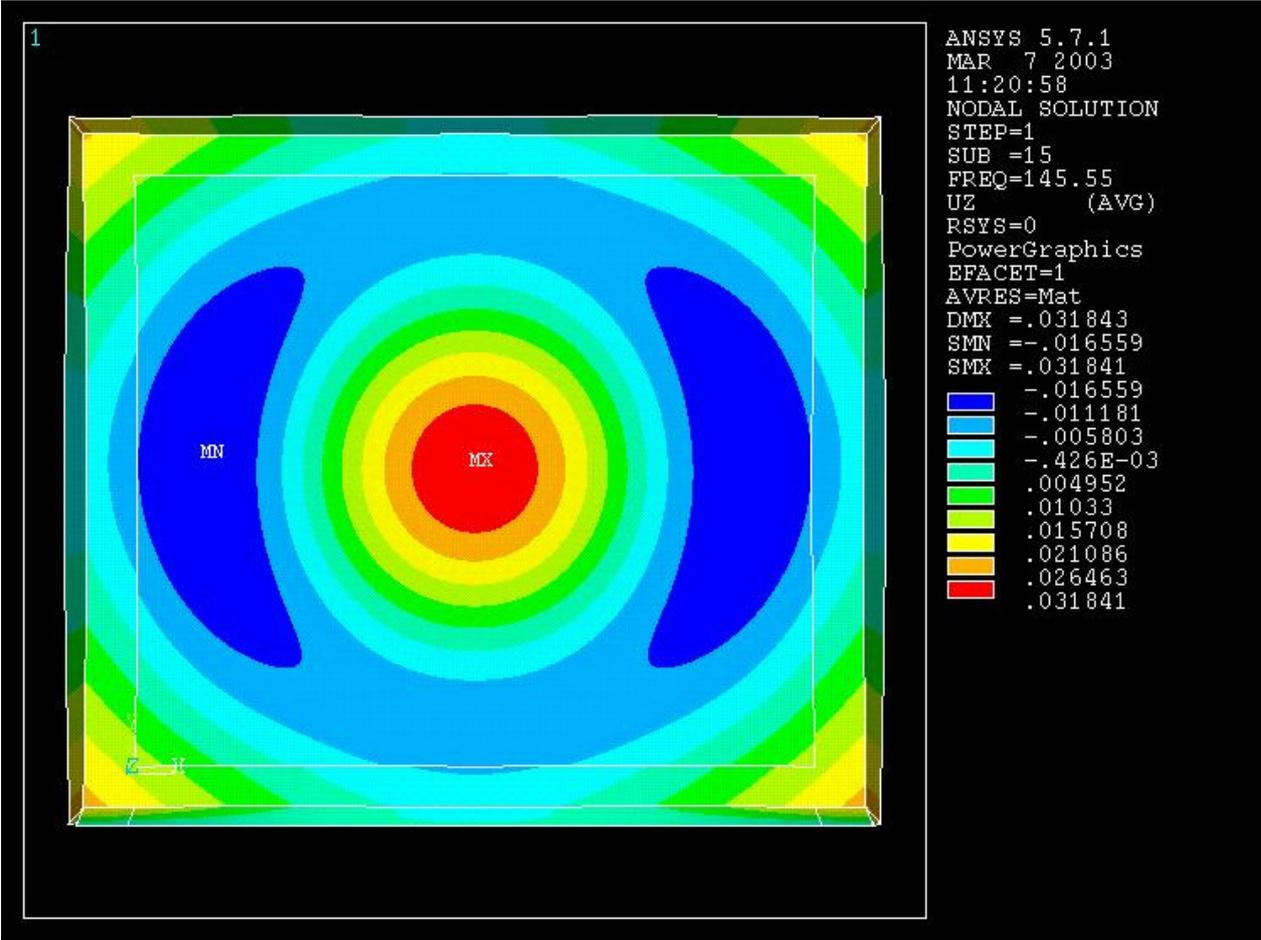


Abbildung 77 berechnete Prüfwandmode, 145,6Hz

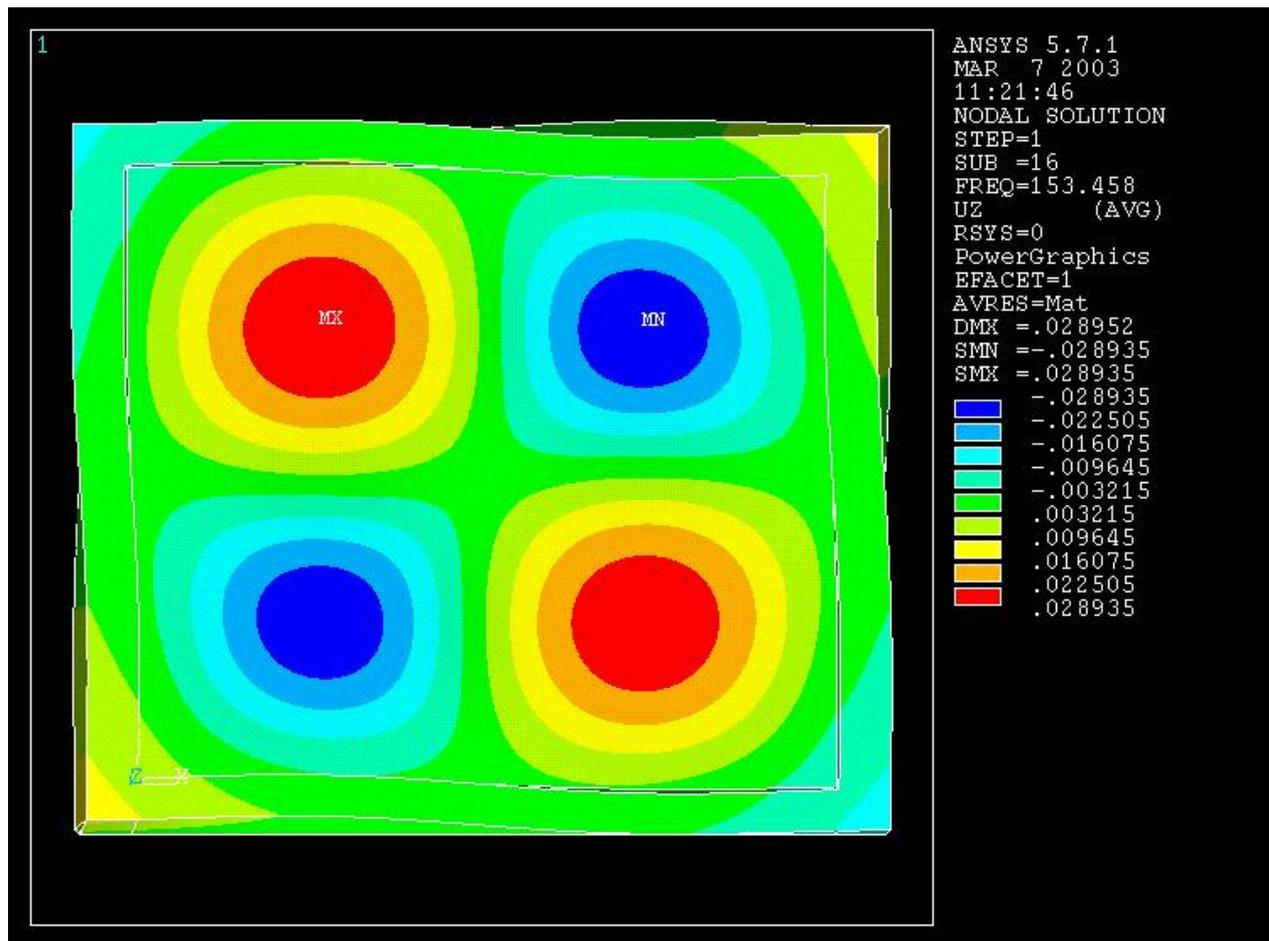


Abbildung 78 berechnete Prüfwandmode, 153,5Hz

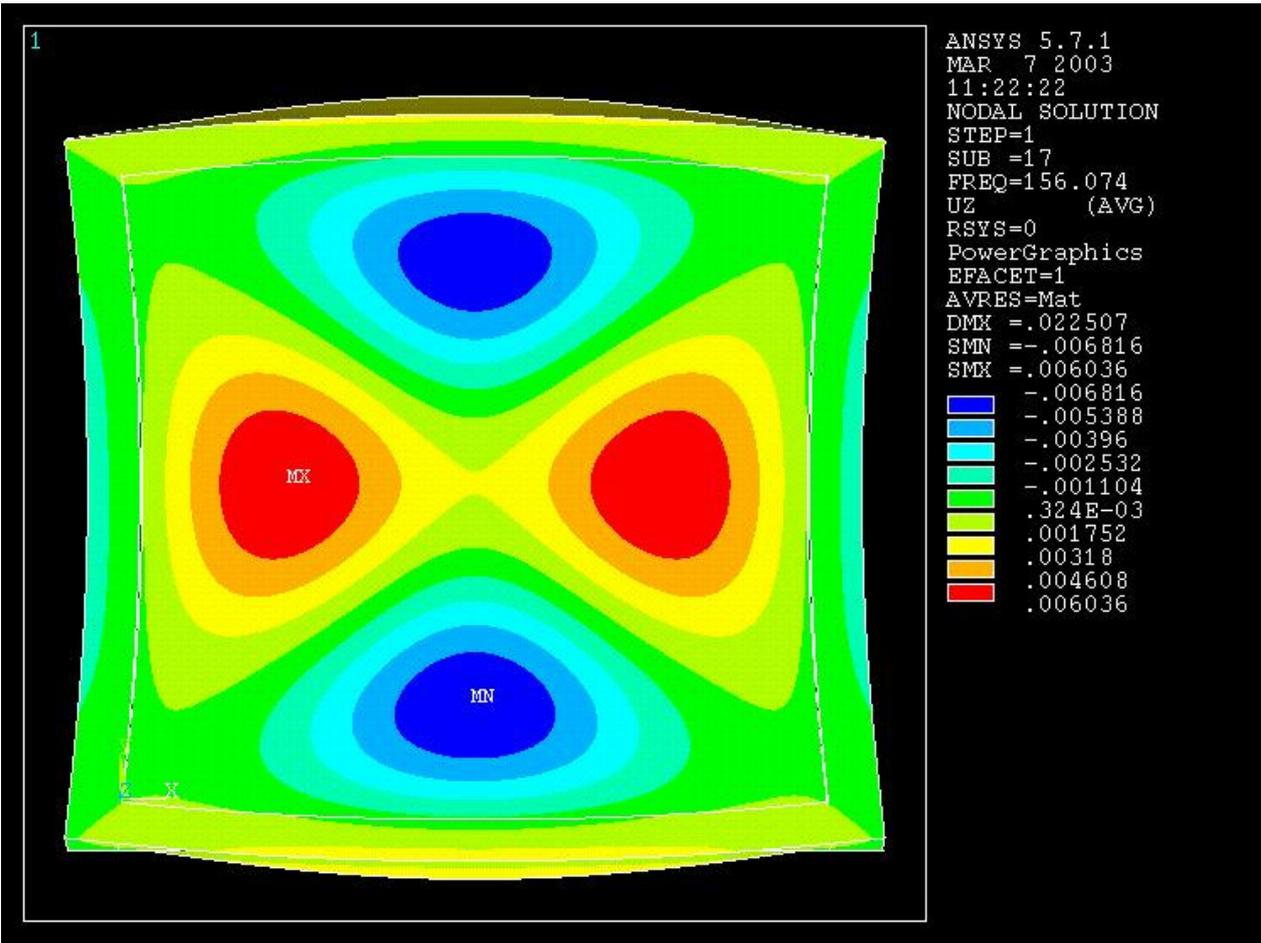


Abbildung 79 berechnete Prüfwandmode, 156,1Hz

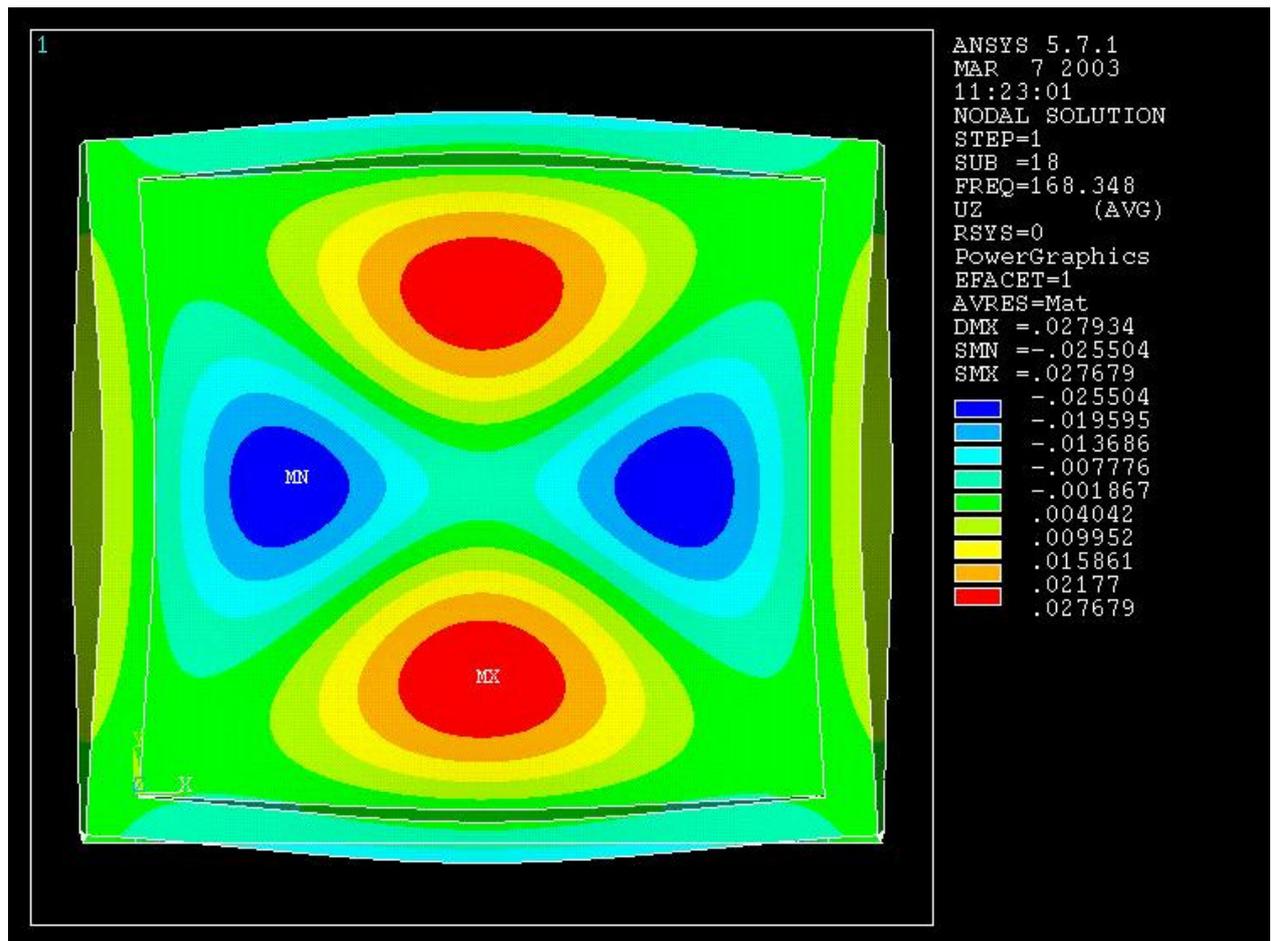


Abbildung 80 berechnete Prüfwandmode, 168,3Hz

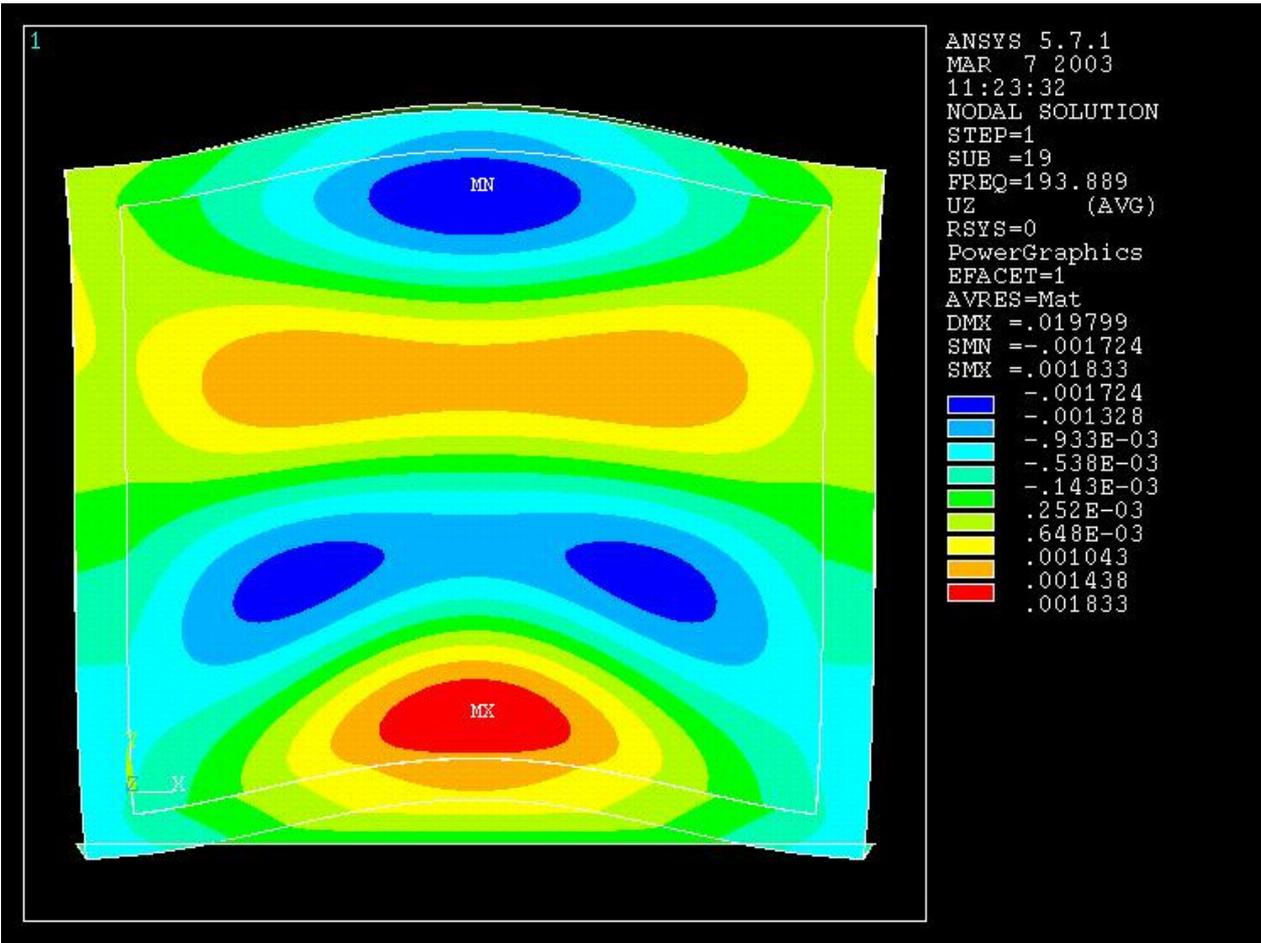


Abbildung 81 berechnete Prüfwandmode, 193,9Hz

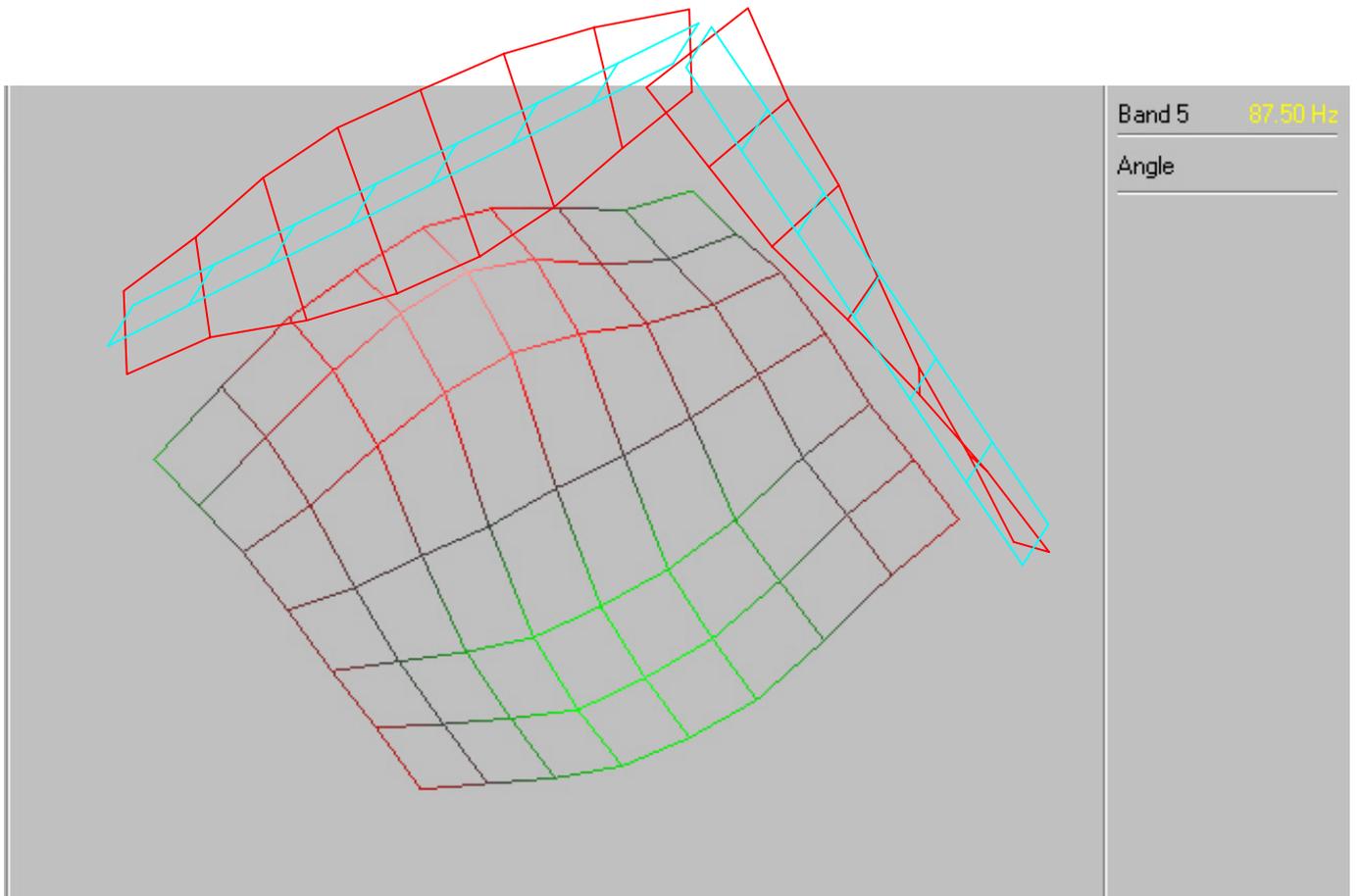


Abbildung 82 berechnete Prüfwandmode bei 89Hz mit Rahmenschwingung

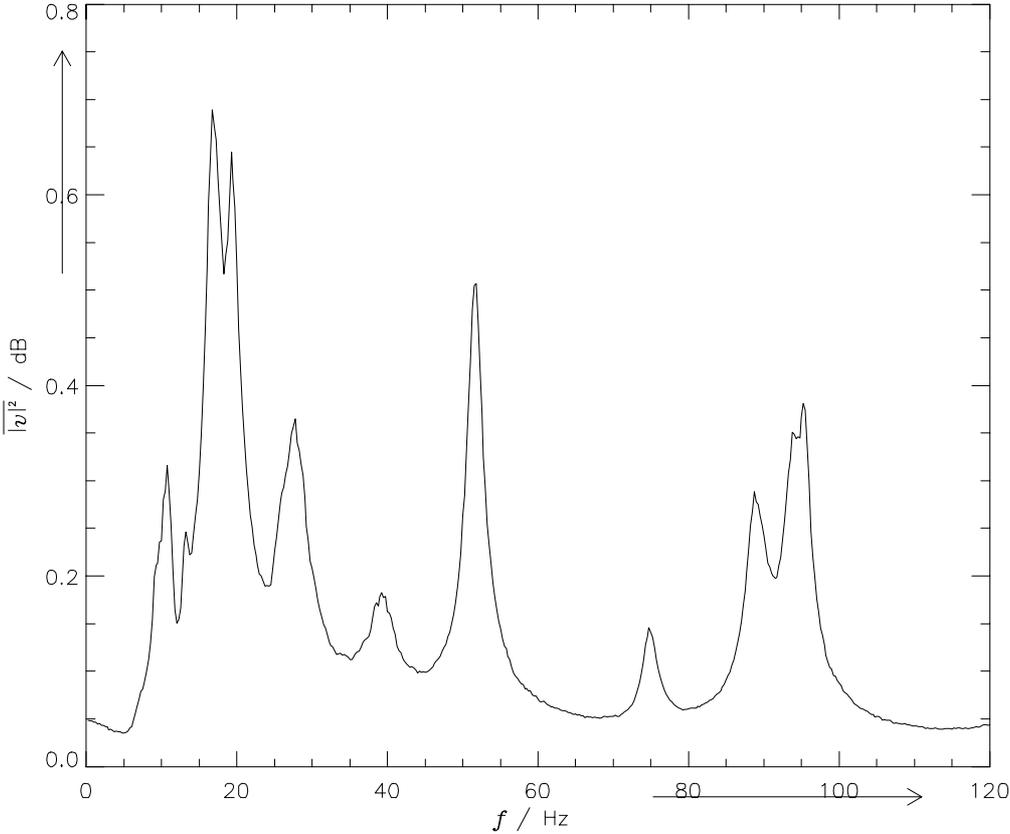


Abbildung 83 Gemessene mittlere Energie der Prüfwand

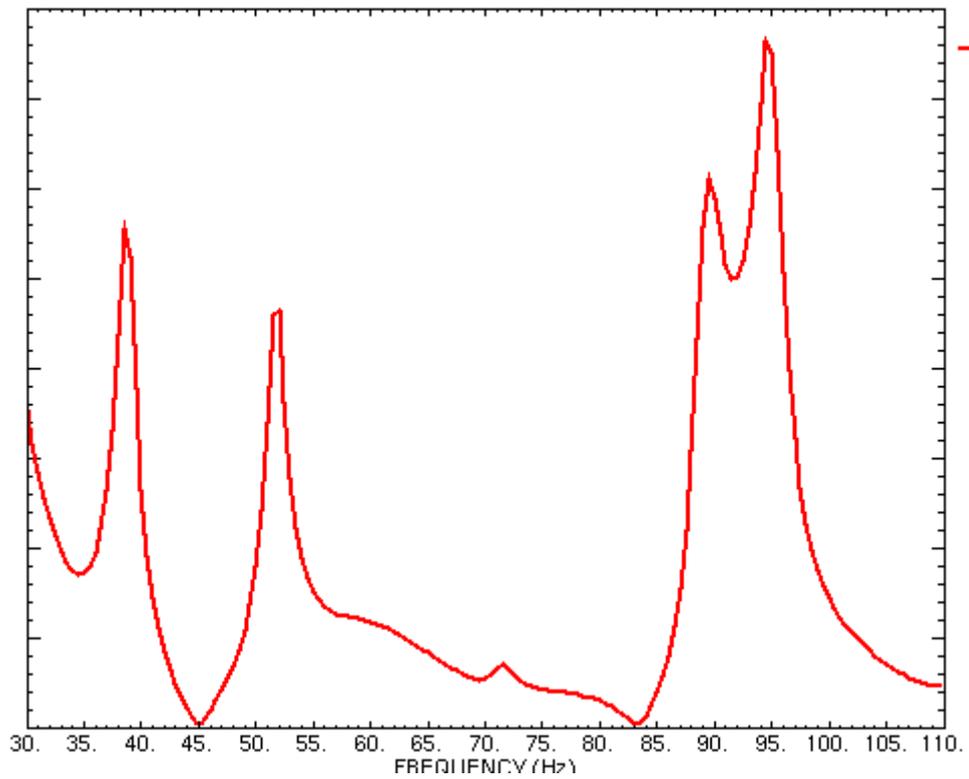


Abbildung 84 Berechnete Energie, ein Anregungs- und ein Aufnahmezeitpunkt

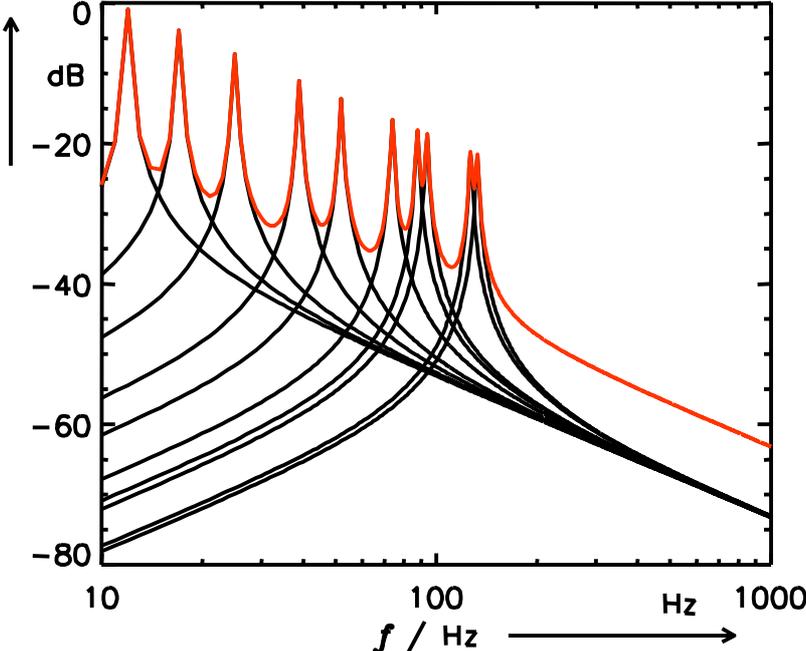


Abbildung 85 Resonatorkennlinien für Eigenfrequenzen der Wand

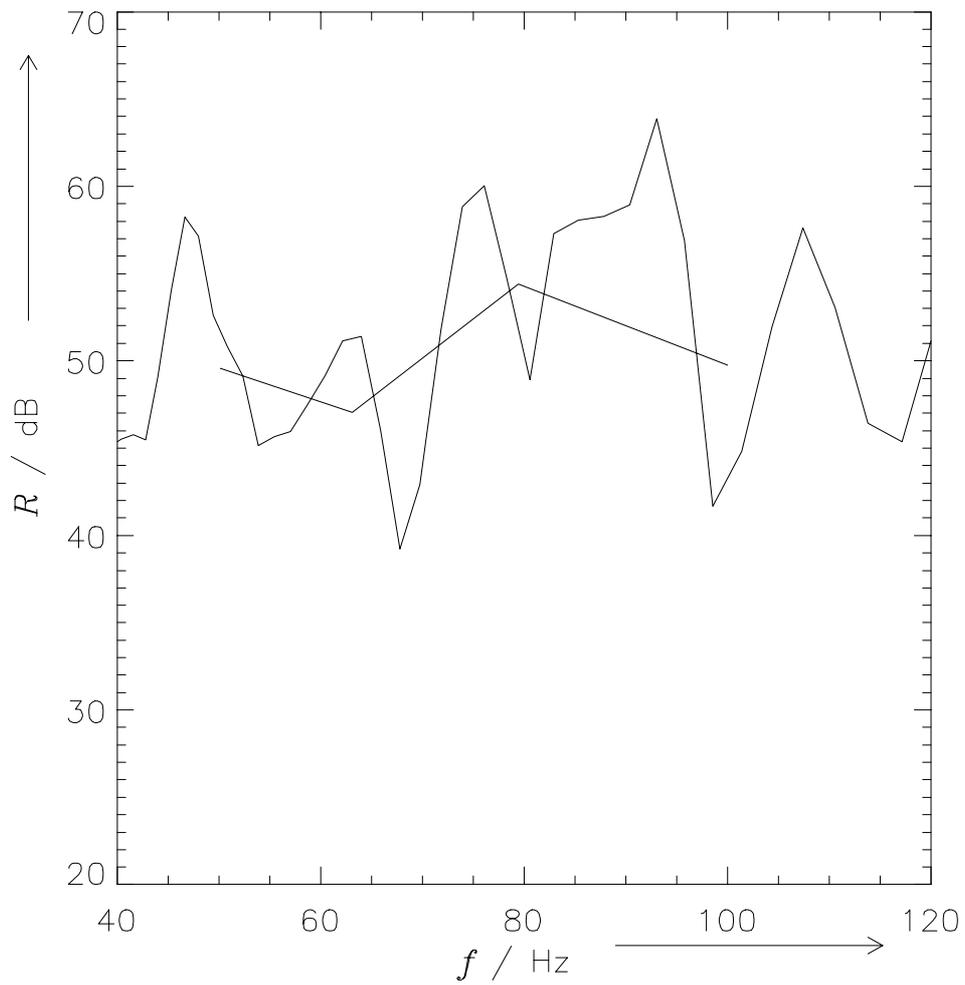


Abbildung 86 Gemessene Schalldämm-Maße in 1/24- bzw. 1/3-Oktav-Bändern

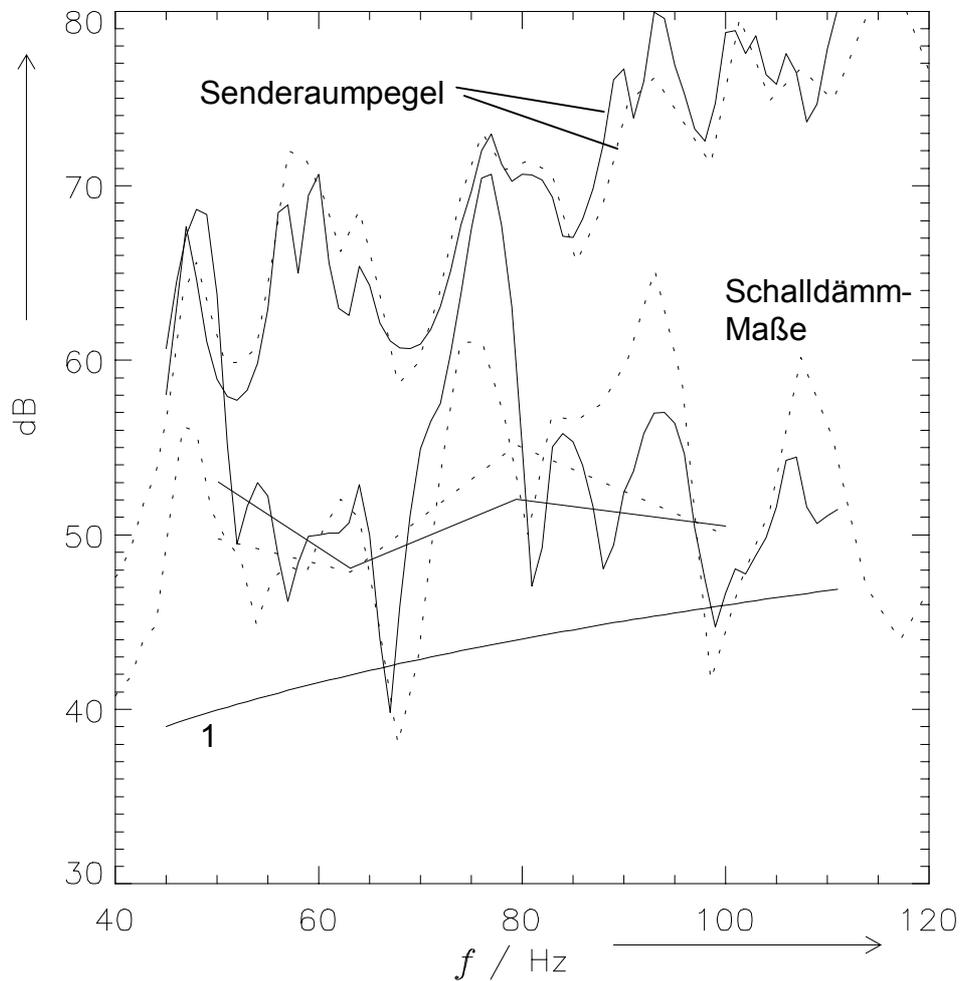


Abbildung 87 Gemessene (gestrichelt) und gerechnete (durchgezogen) Schalldämm-Maße, Senderaumpegel sowie Schalldämm-Maß einer unendlich großen, biegeweichen Wand gleicher flächenbezogener Masse (1), Einzelabsorber mit komplexer Admittanz wie in Abb. 6

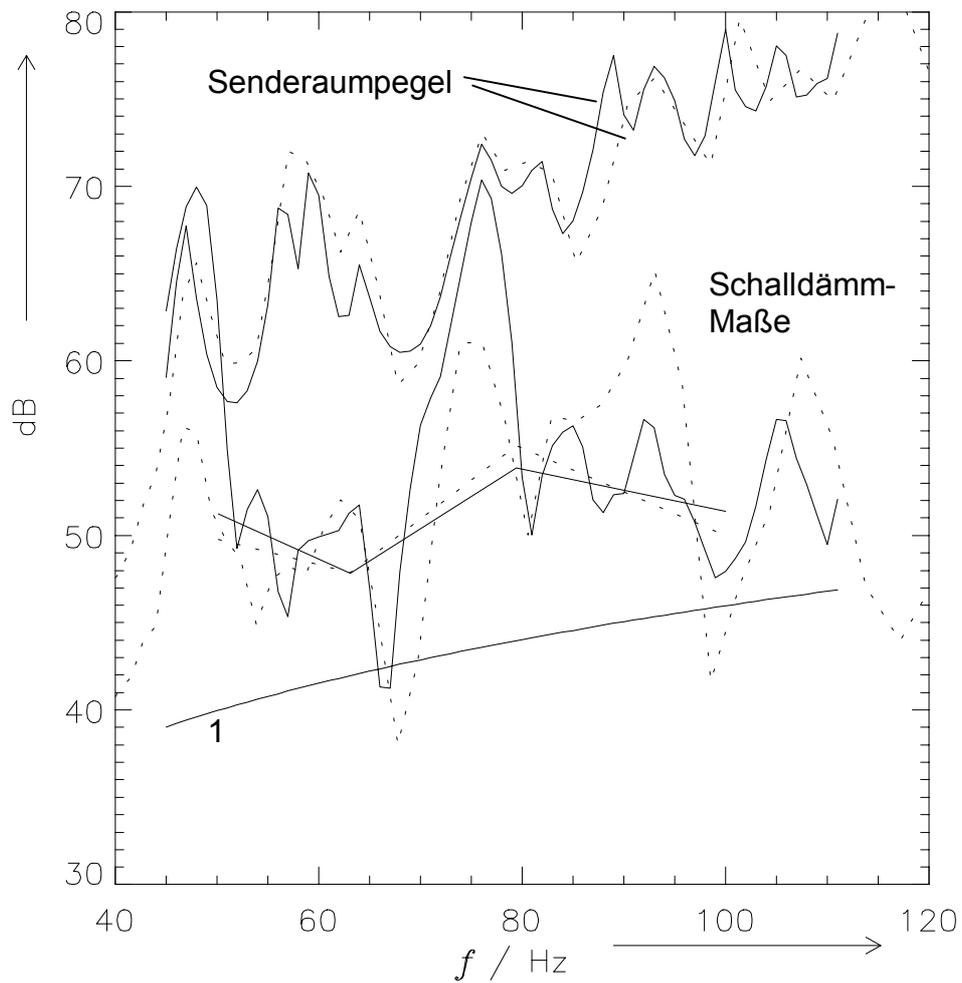


Abbildung 88 Gemessene (gestrichelt) und gerechnete (durchgezogen) Schalldämm-Maße, Senderaumpegel sowie Schalldämm-Maß einer unendlich großen, biegeweichen Wand gleicher flächenbezogener Masse (1), Einzelabsorber mit rein reeller Admittanz

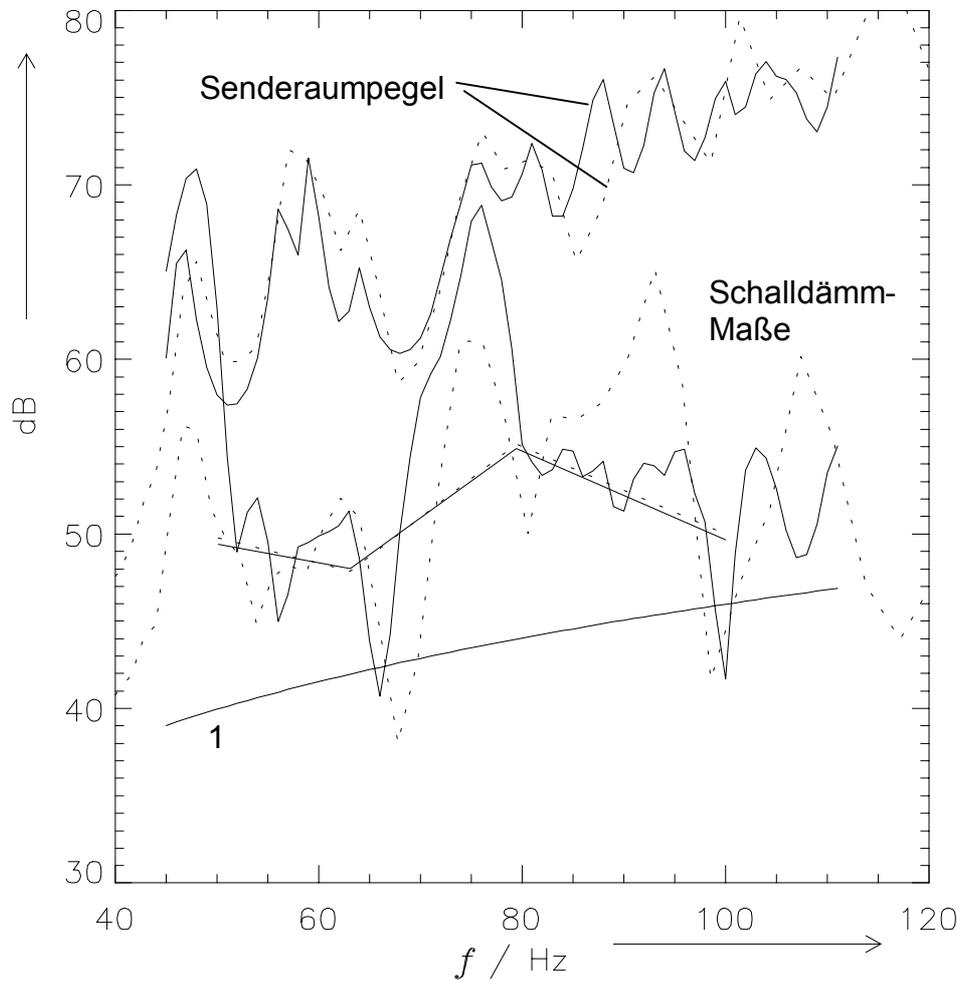


Abbildung 89 Gemessene (gestrichelt) und gerechnete (durchgezogen) Schalldämm-Maße, Senderraumpegel sowie Schalldämm-Maß einer unendlich großen, biegeweichen Wand gleicher flächenbezogener Masse (1), Einzelabsorber mit positivem Imaginärteil der Admittanz

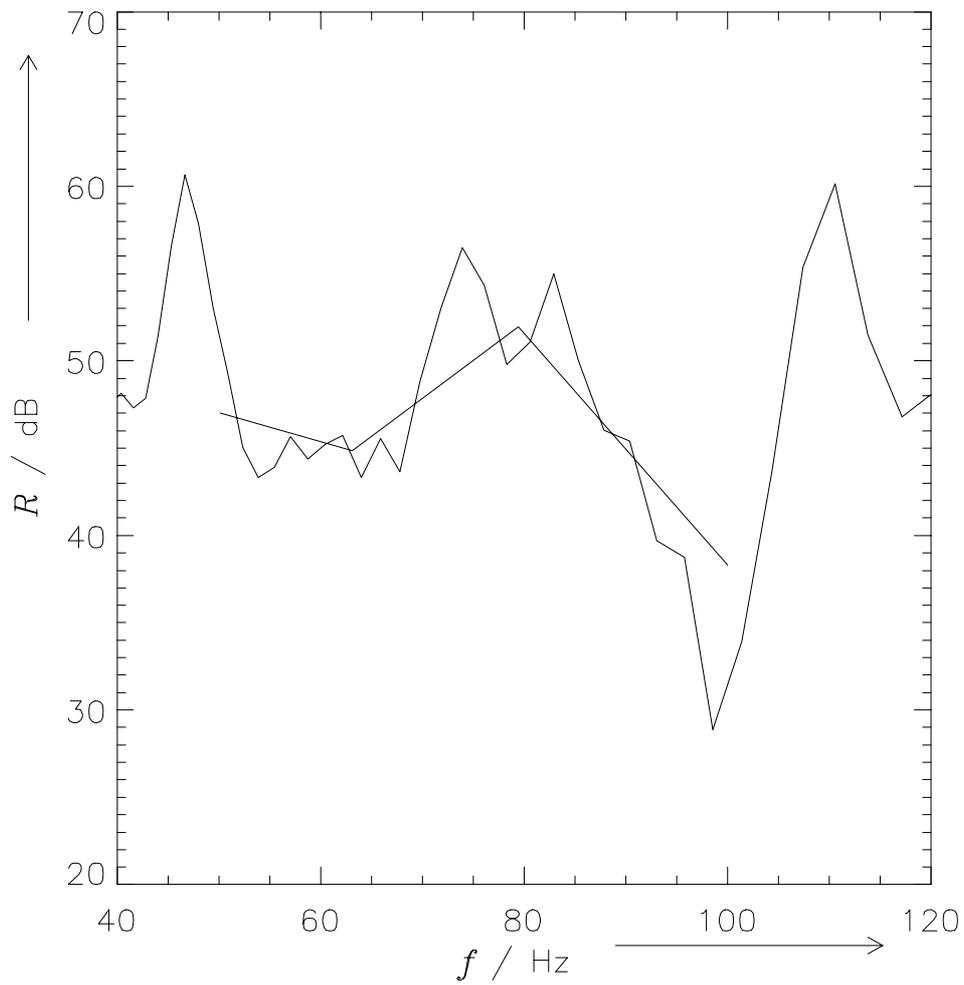


Abbildung 90 Gemessene Schalldämm-Maße der Prüfwand mit eingestellten Diffusorplatten



Abbildung 91 Winkel zur Fixierung des Prüfwandrahmens

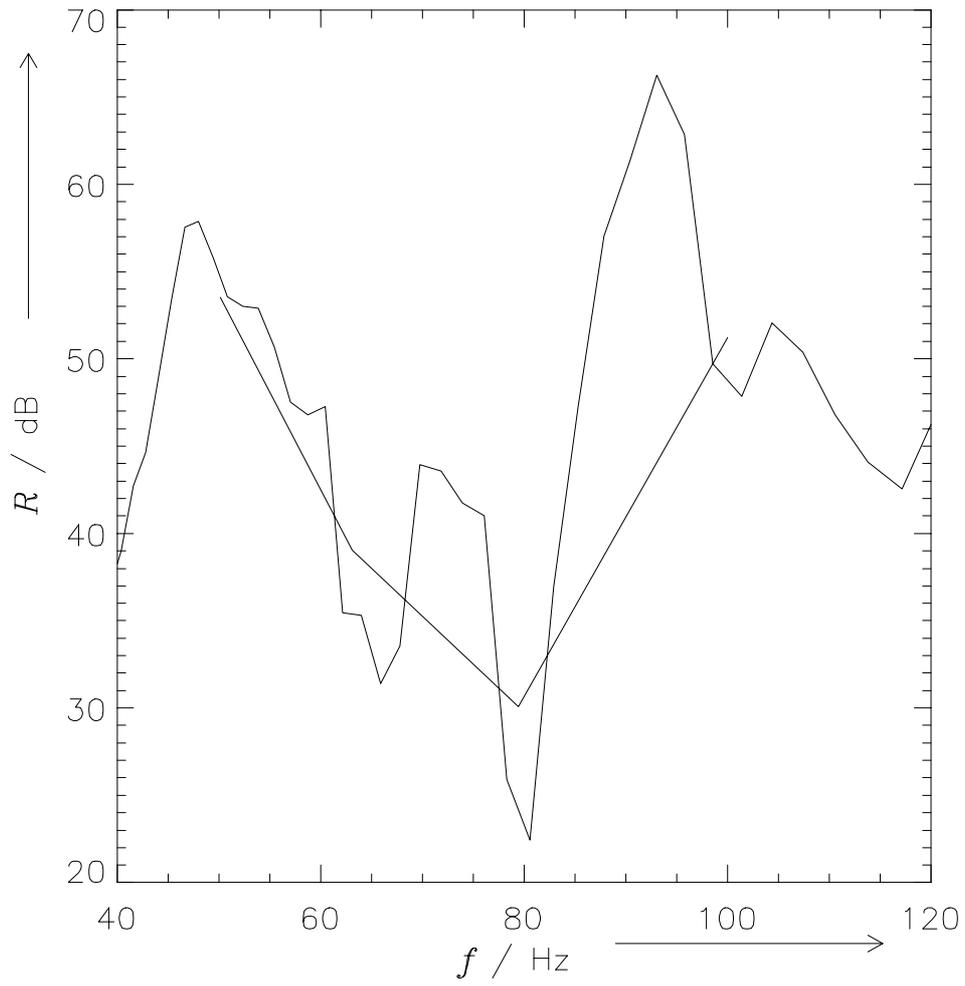


Abbildung 92 Gemessene Schalldämm-Maße mit fixiertem Rahmen

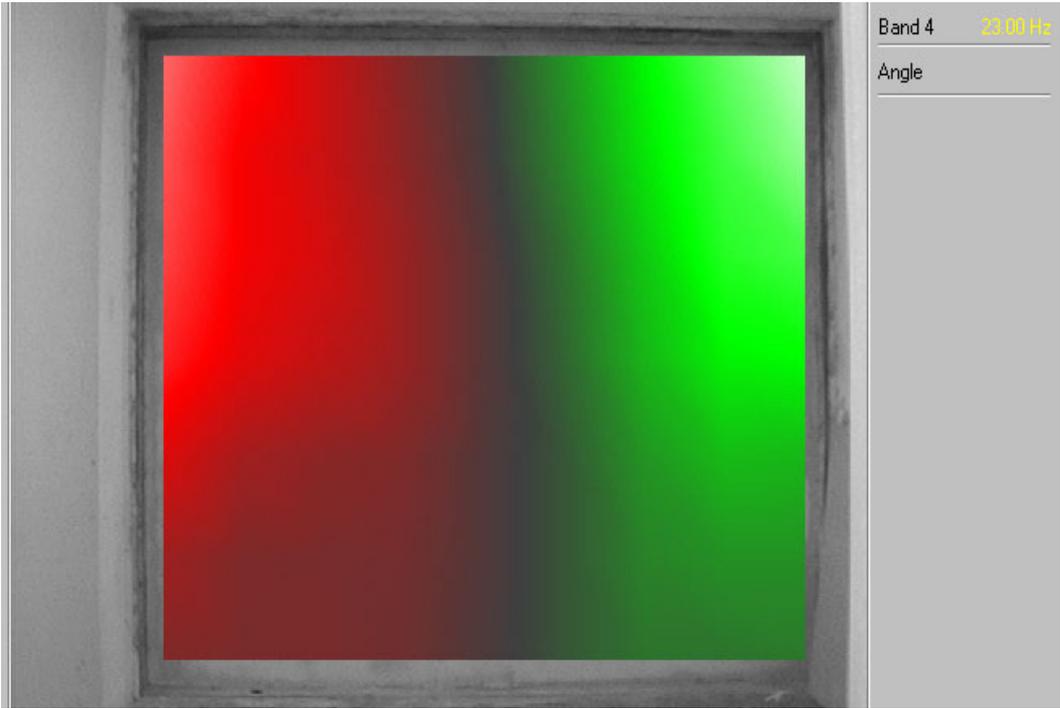


Abbildung 93 Prüfwandmode mit Winkel 23Hz

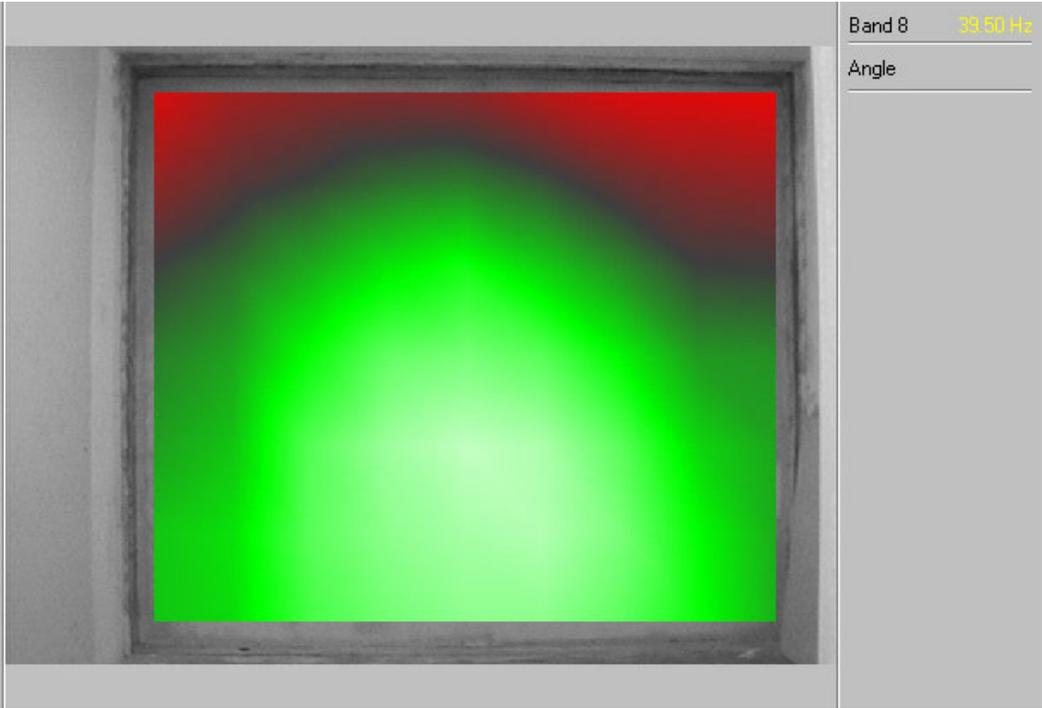


Abbildung 94 Prüfwandmode mit Winkeln 39Hz

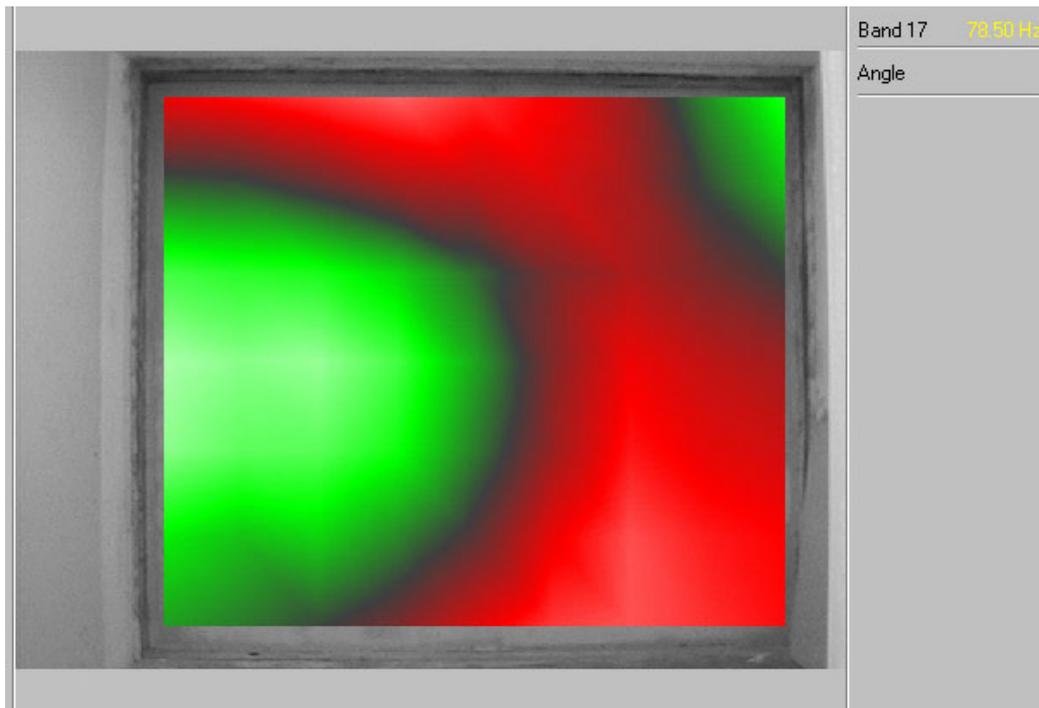


Abbildung 95 Prüfwandmode mit Winkel 78Hz

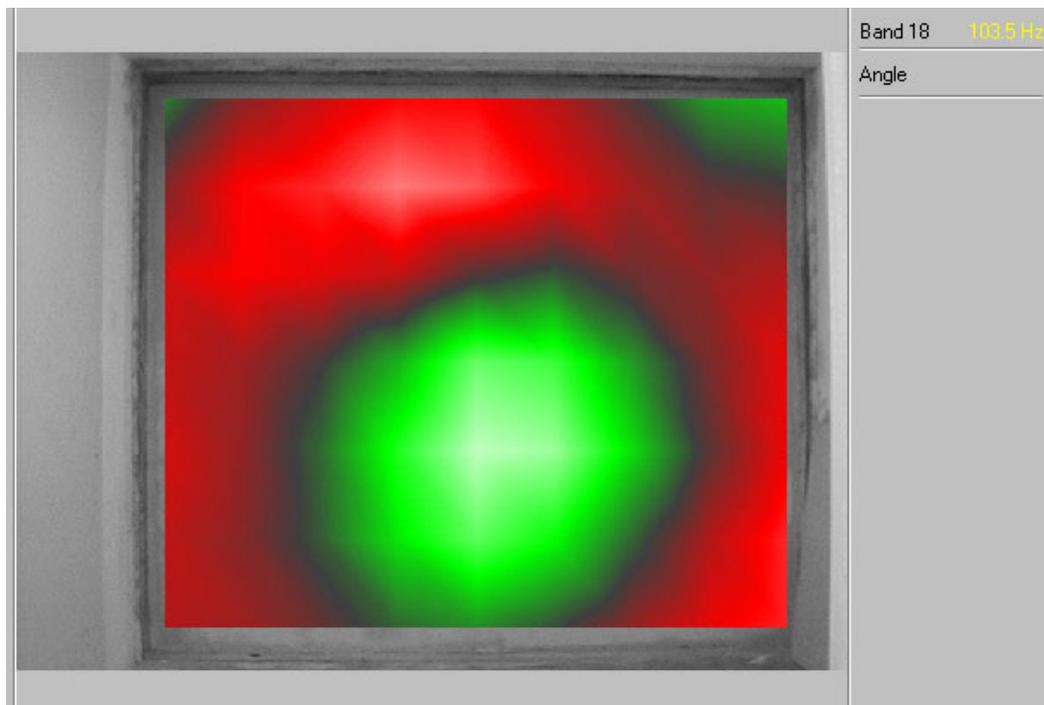


Abbildung 96 Prüfwandmode mit Winkel 103Hz

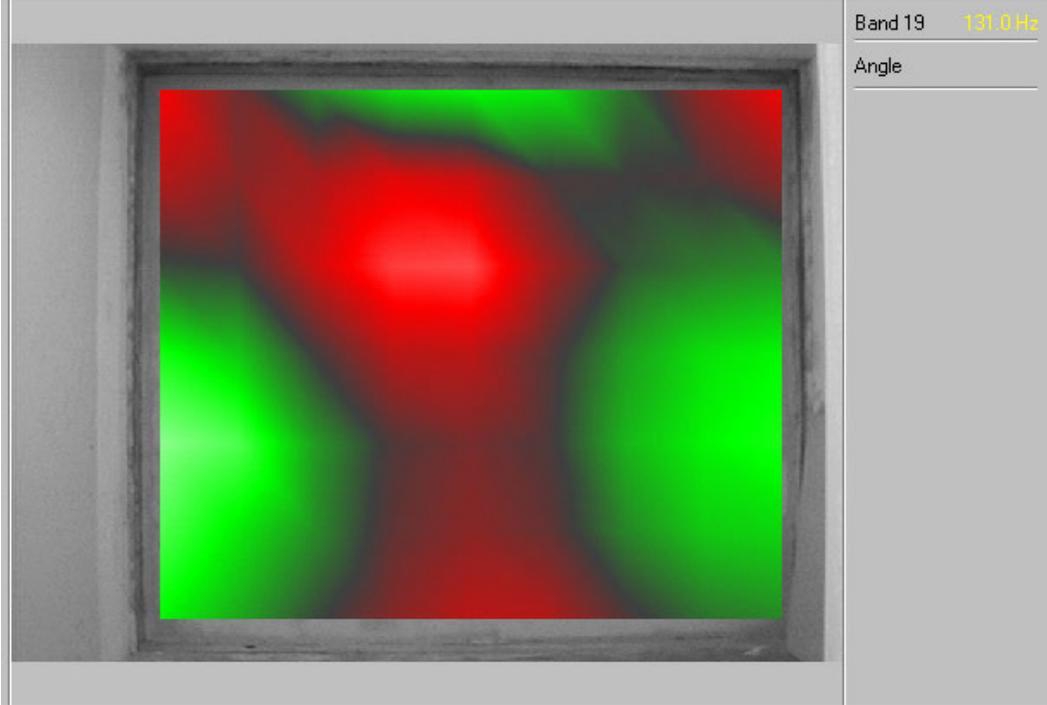


Abbildung 97 Prüfwandmode mit Winkel 131Hz



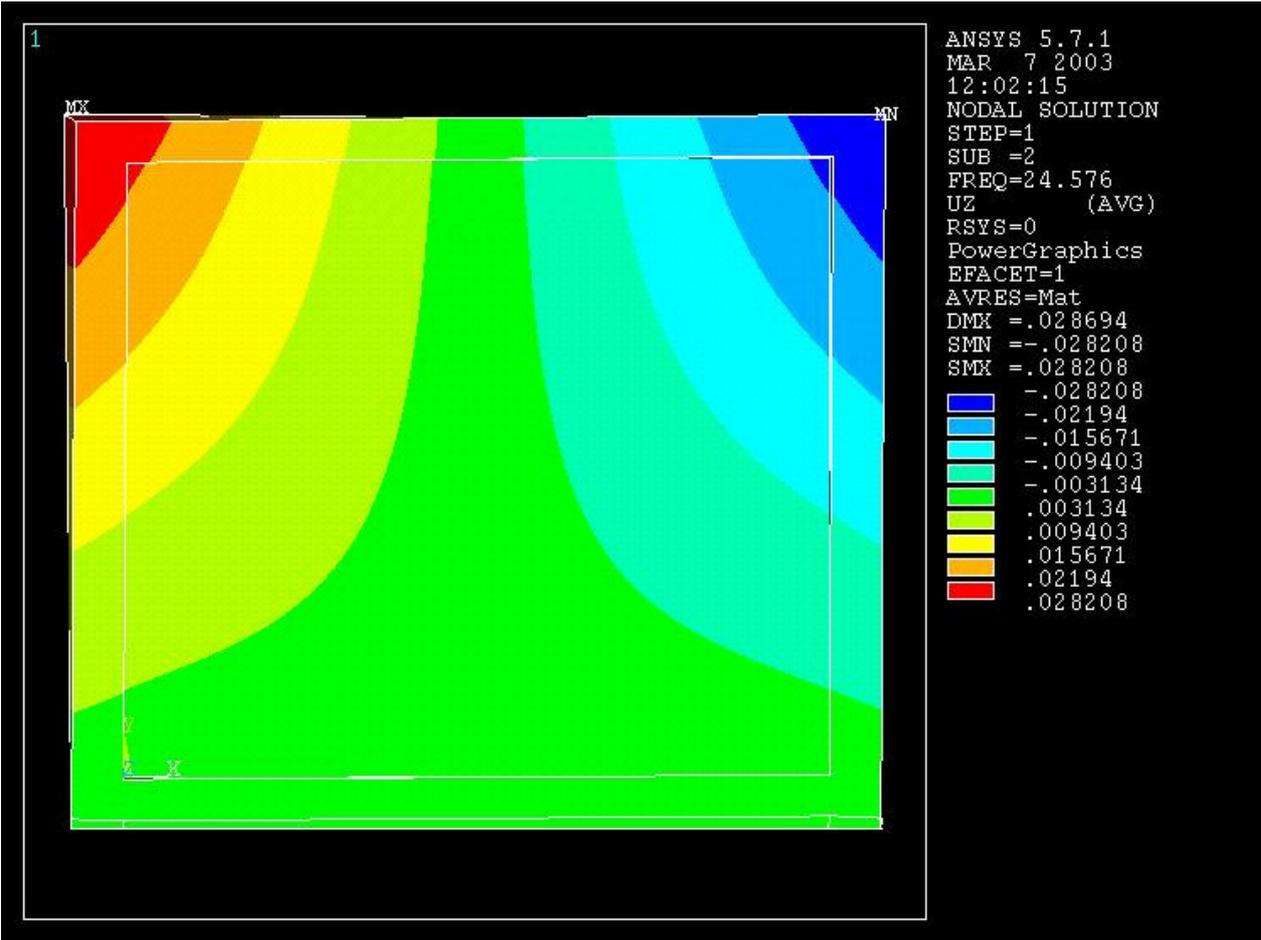


Abbildung 99 berechnete Prüfwandmode mit Winkeln

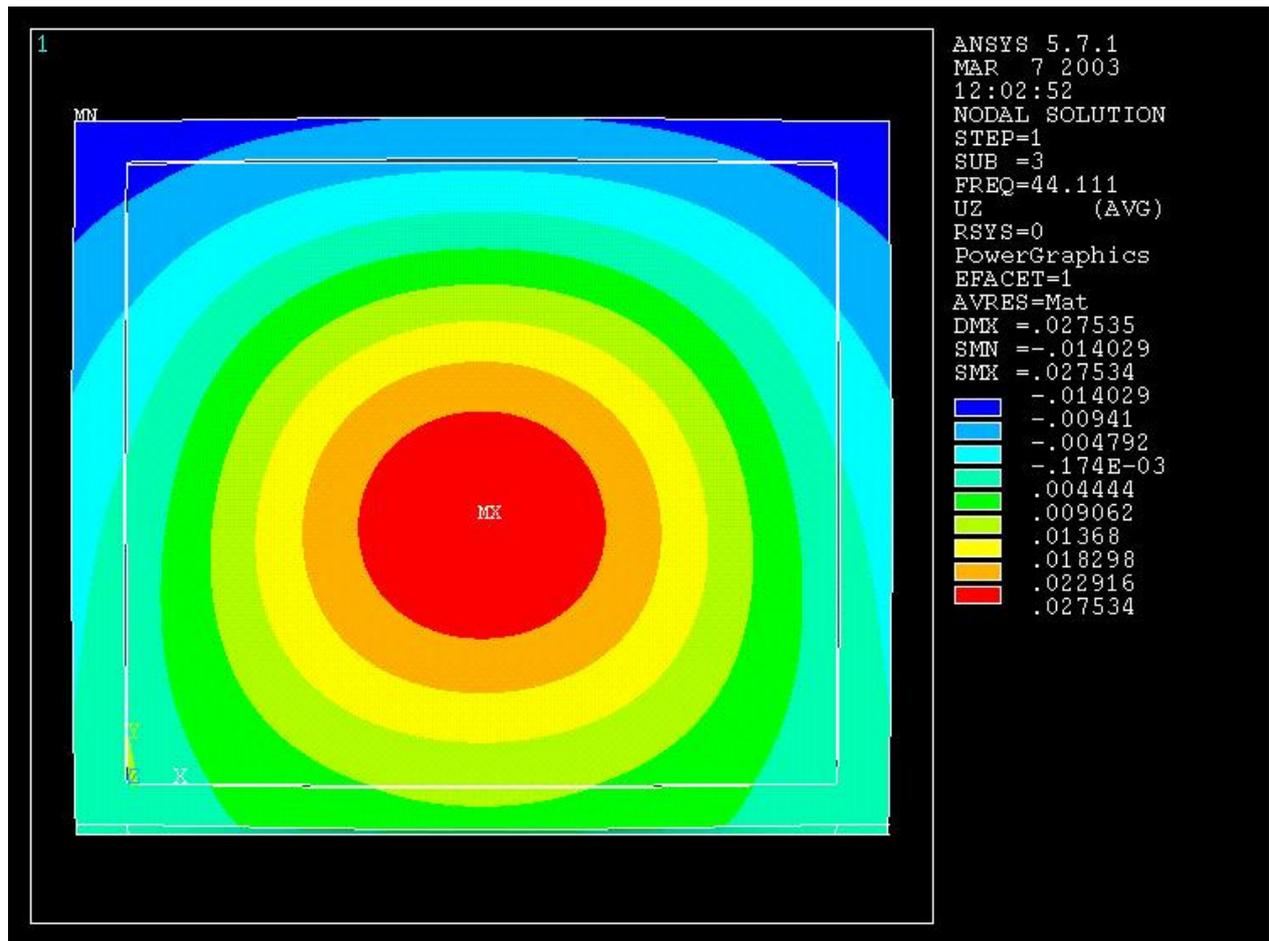


Abbildung 100 berechnete Prüfwandmode mit Winkeln

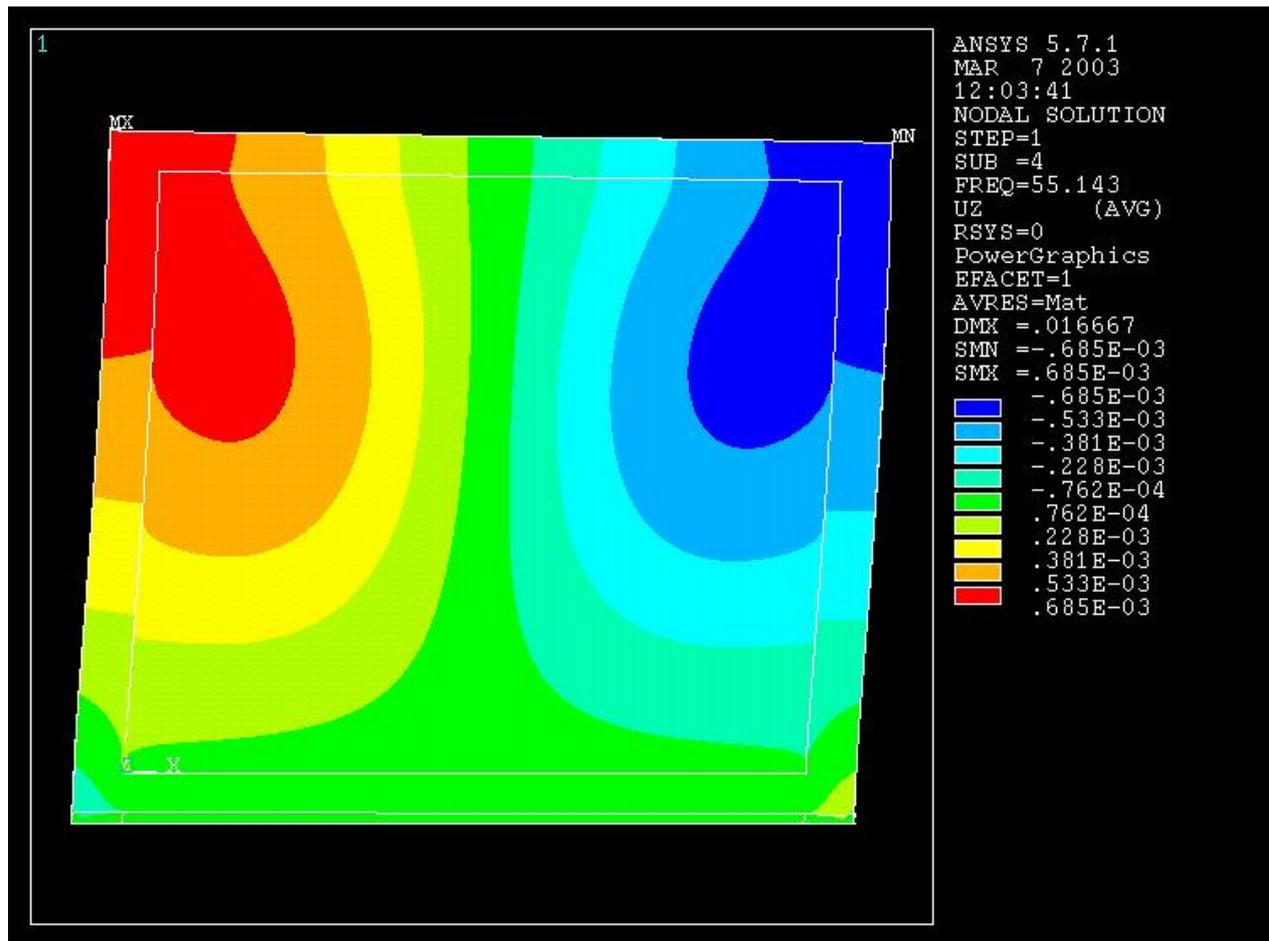


Abbildung 101 berechnete Prüfwandmode mit Winkeln

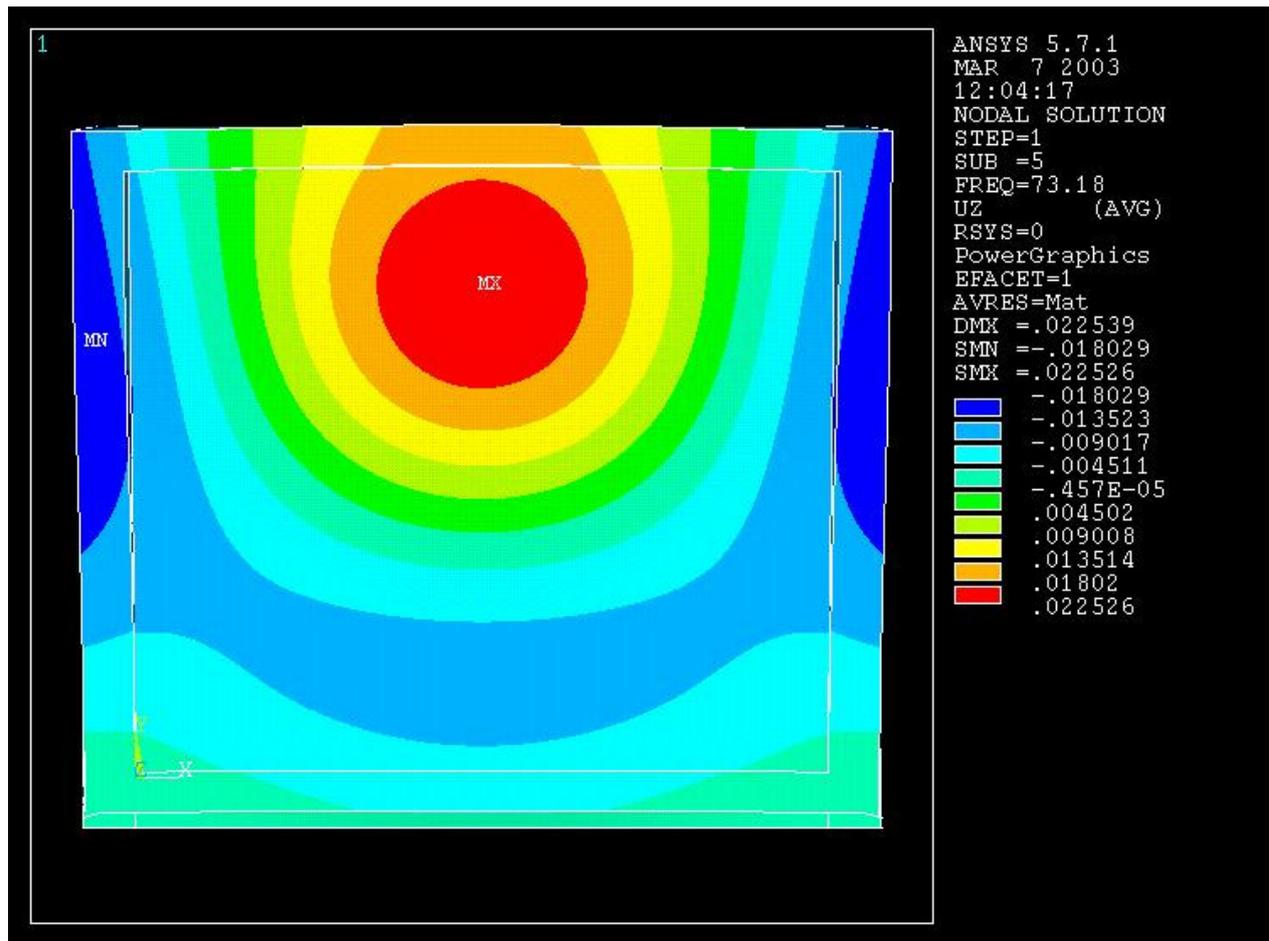


Abbildung 102 berechnete Prüfwandmode mit Winkeln

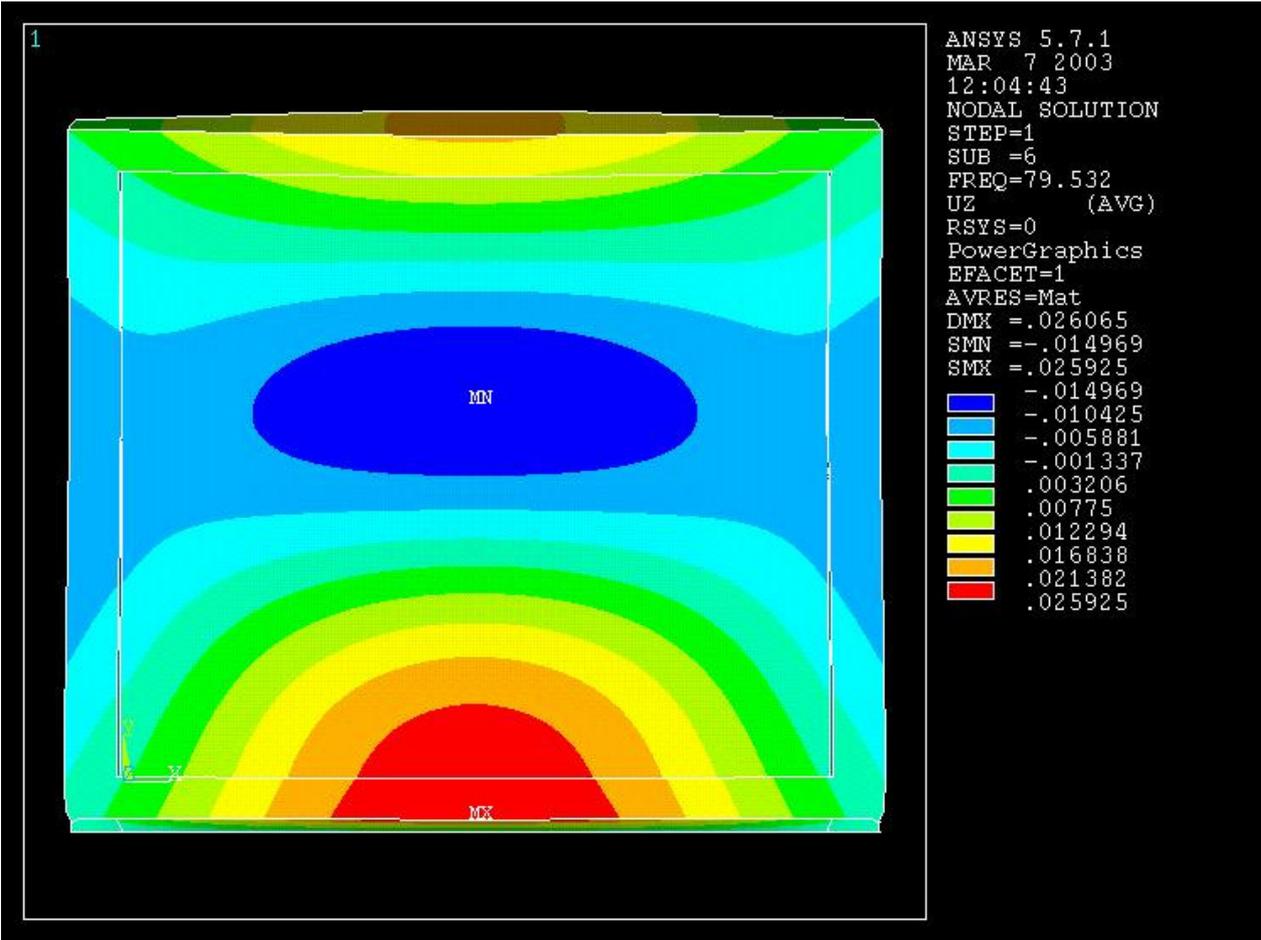


Abbildung 103 berechnete Prüfstandmode mit Winkeln

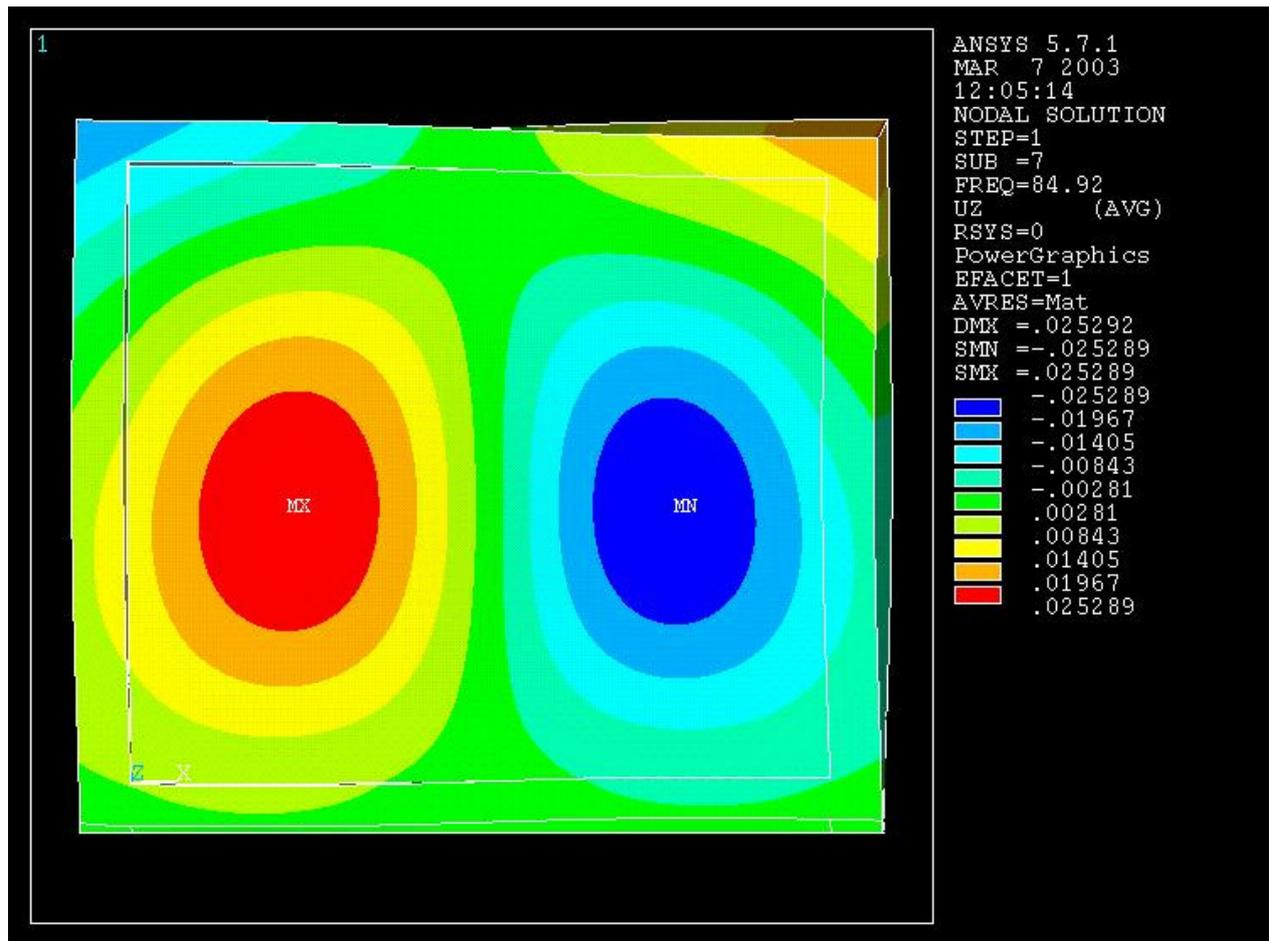


Abbildung 104 berechnete Prüfwandmode mit Winkeln

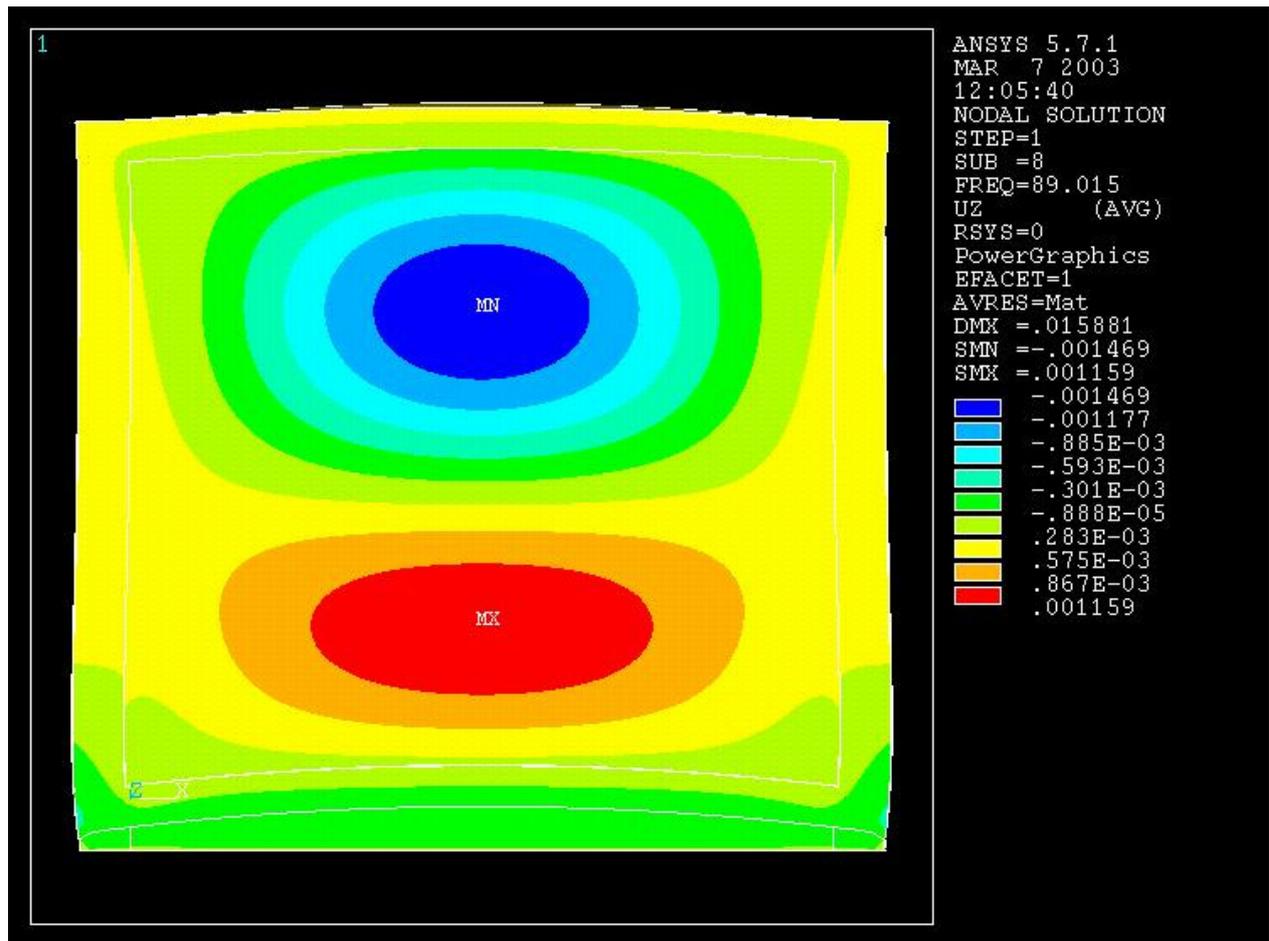


Abbildung 105 berechnete Prüfwandmode mit Winkeln

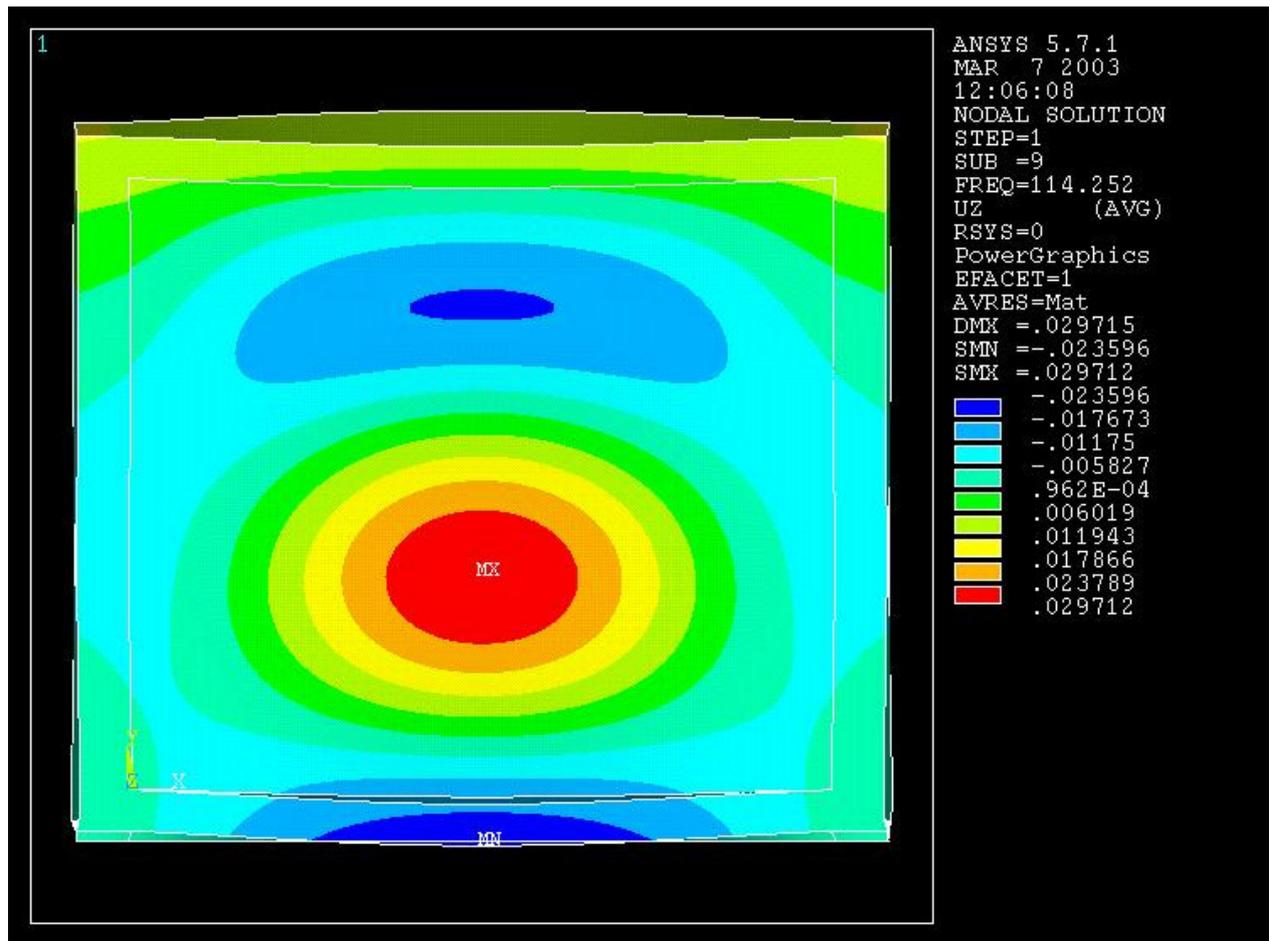


Abbildung 106 berechnete Prüfwandmode mit Winkeln

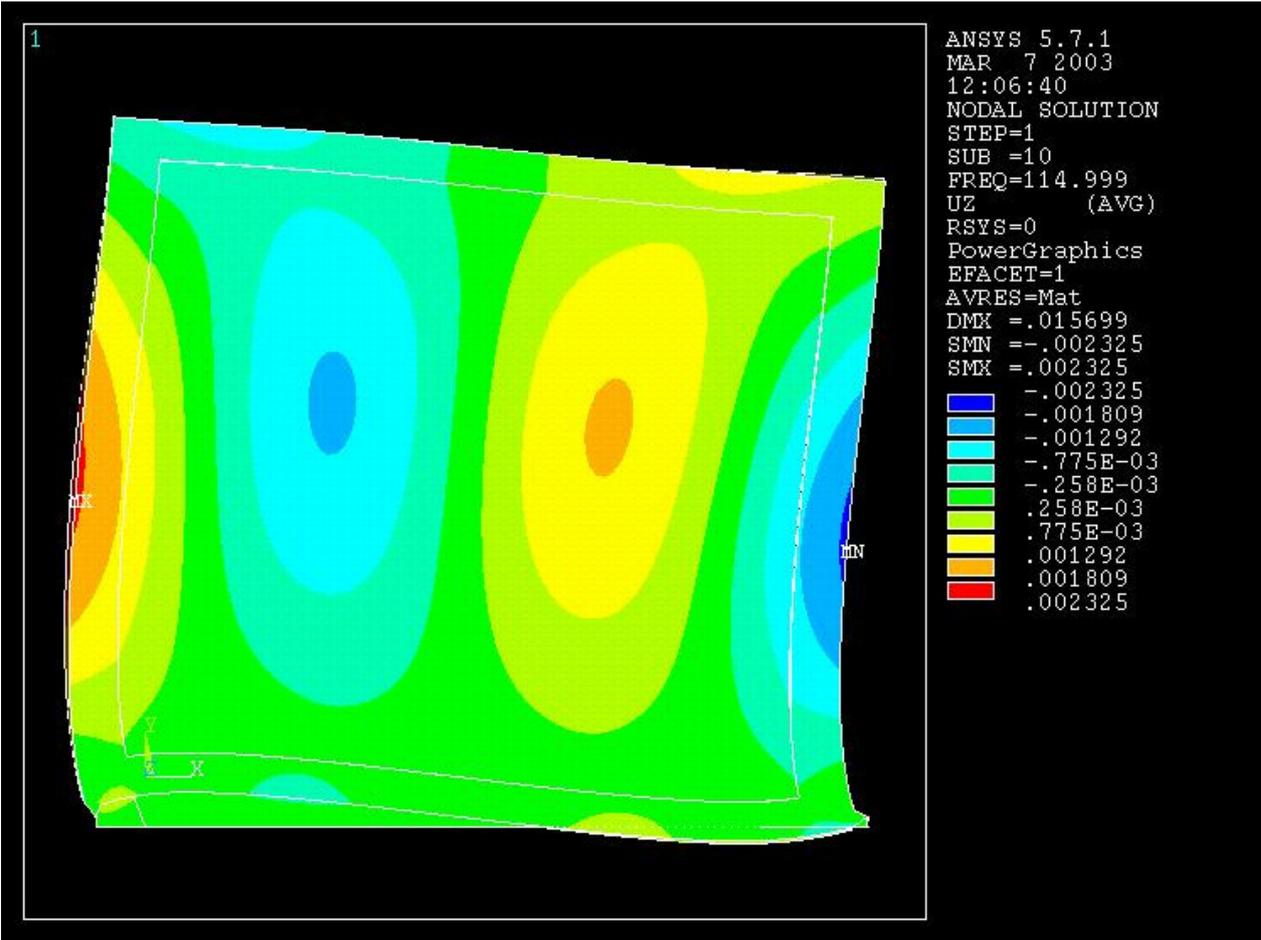


Abbildung 107 berechnete Prüfwandmode mit Winkeln

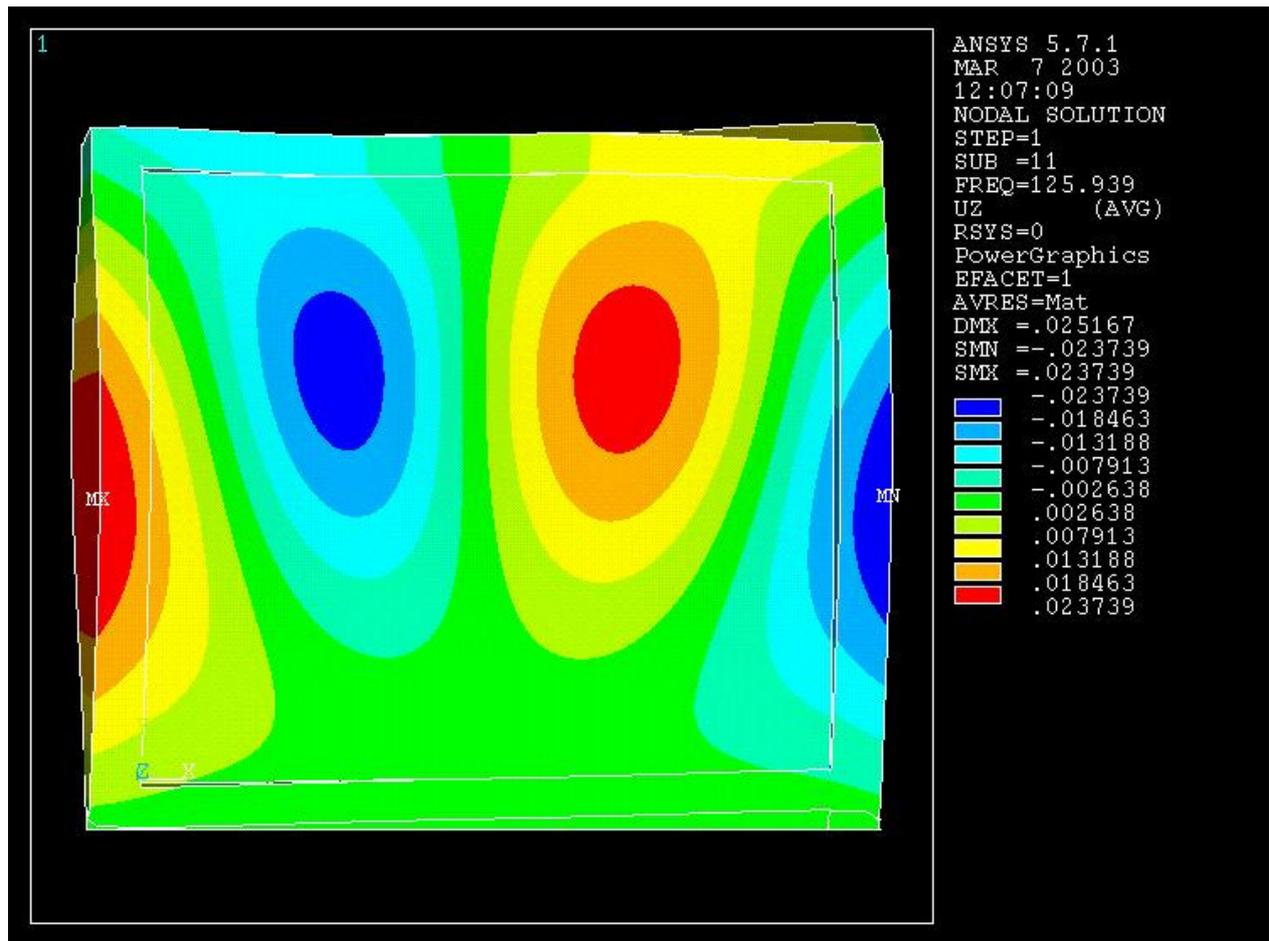


Abbildung 108 berechnete Prüfwandmode mit Winkeln

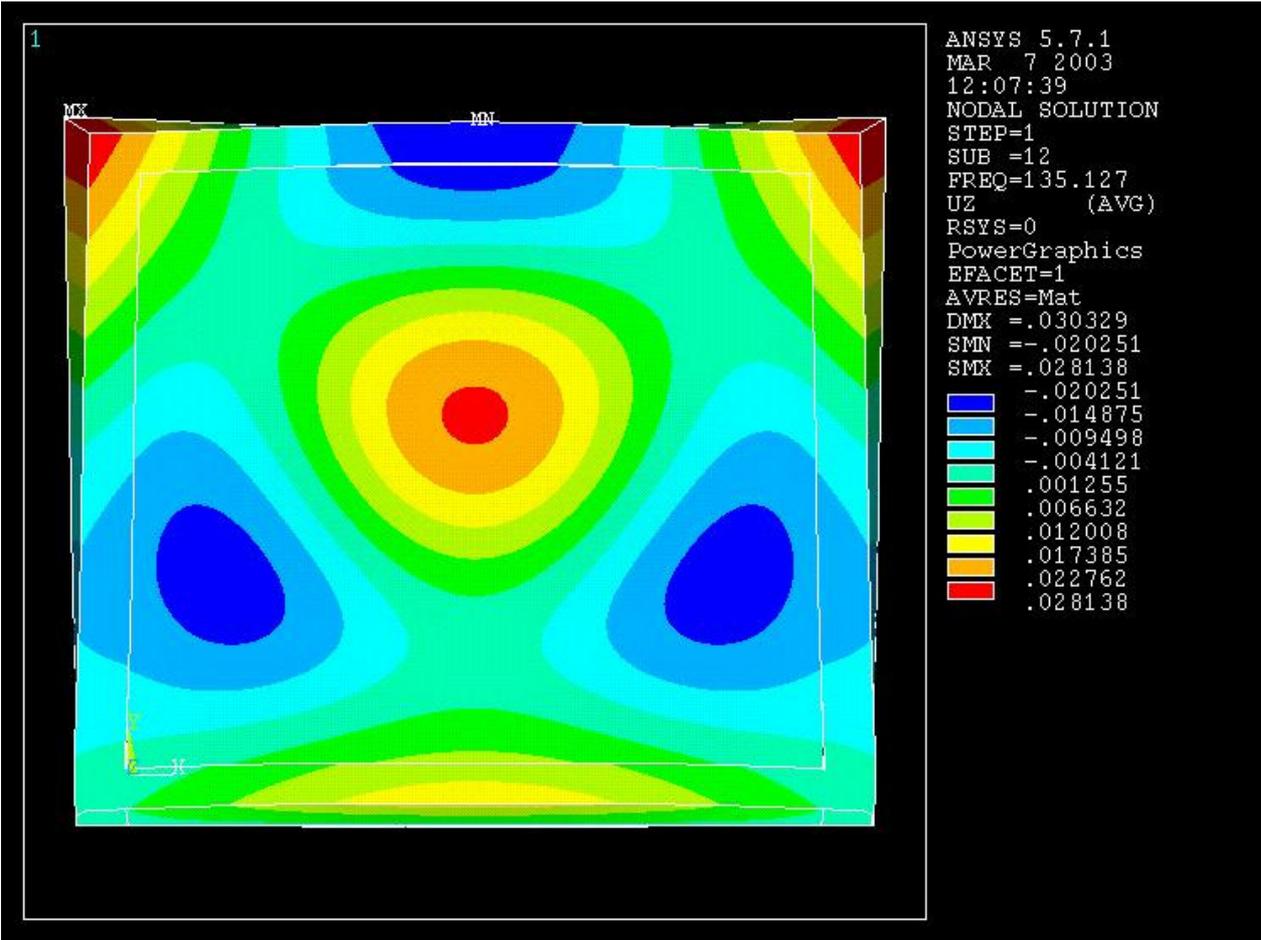


Abbildung 109 berechnete Prüfwandmode mit Winkeln

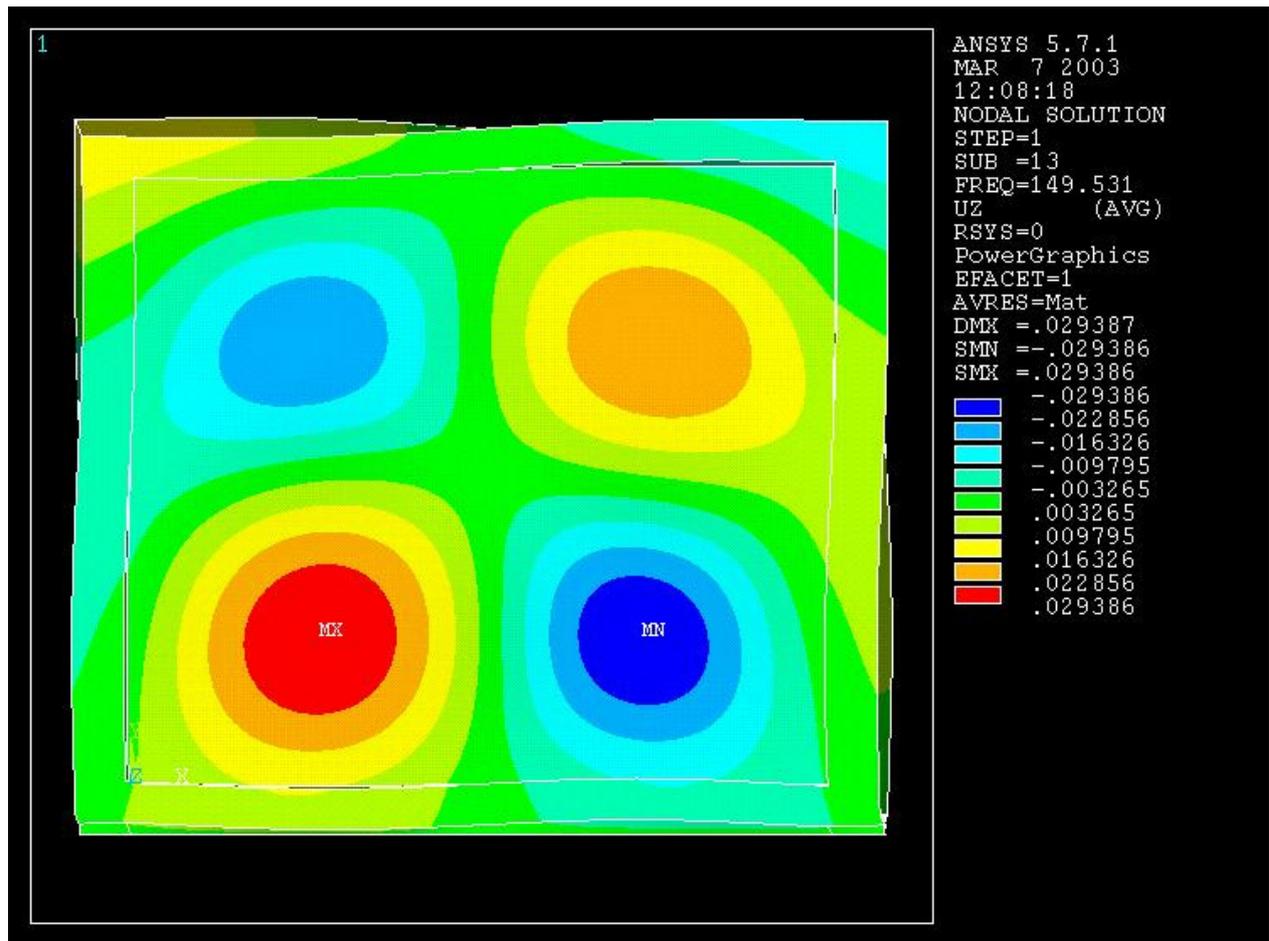


Abbildung 110 berechnete Prüfwandmode mit Winkeln

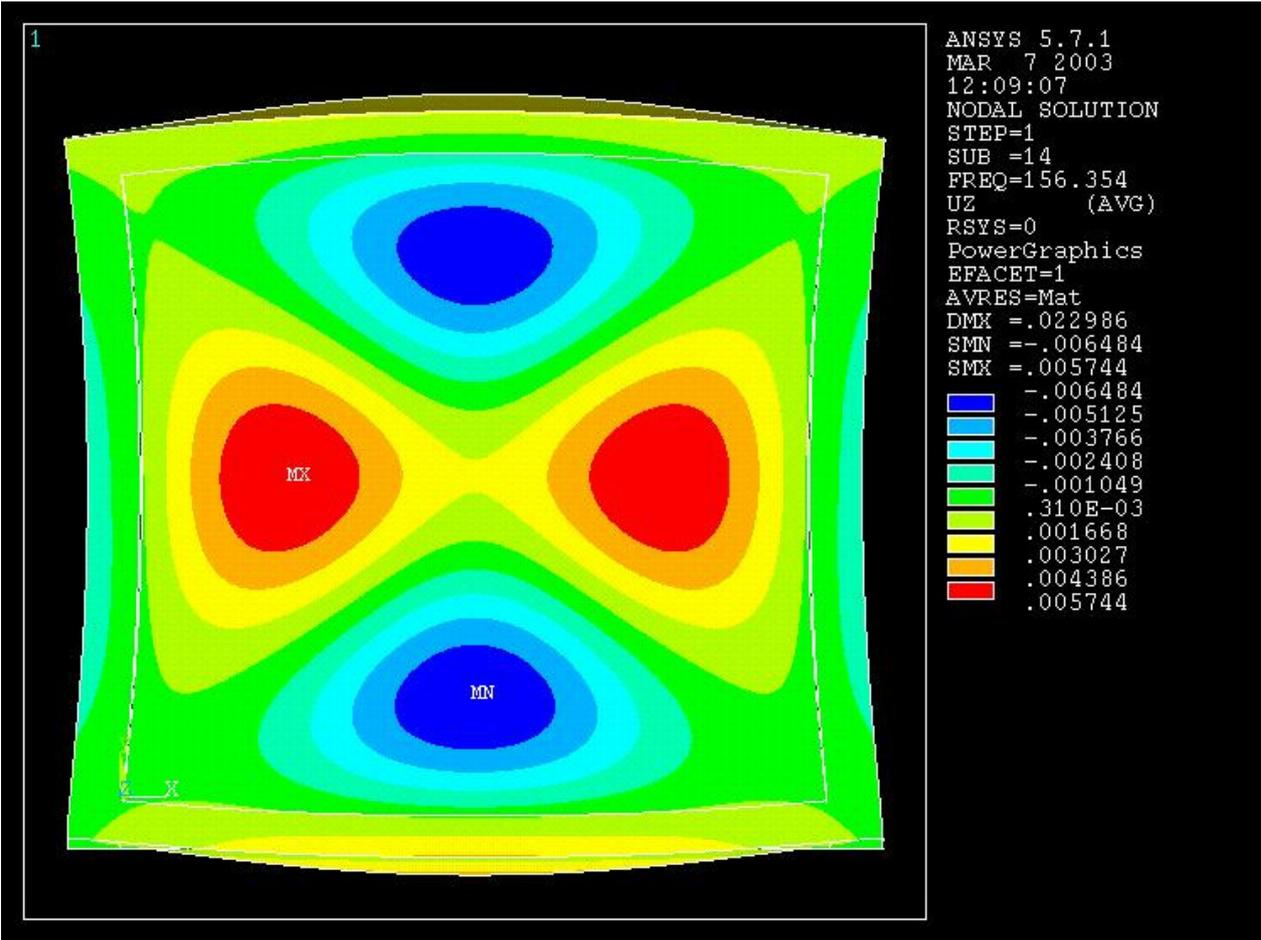


Abbildung 111 berechnete Prüfstandmode mit Winkeln