

**Strahlungsmessung mit Hochfrequenzresonatoren
in der externen Strahlführung am
Elektronenbeschleuniger ELSA**

Jens Derksen

Bachelorarbeit in Physik
angefertigt im Physikalischen Institut

vorgelegt der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

März 2013

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Bonn,
Datum

.....
Unterschrift

1. Gutachter: PD Dr. Wolfgang Hillert
2. Gutachter: Prof. Dr. Reinhard Beck

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Die externe Strahlführung und die Experimente	1
1.2	Strahldiagnose mit Hochfrequenzresonatoren	3
2	Theorie der Hochfrequenzresonatoren	5
2.1	Berechnungen des idealen Hochfrequenzresonators	5
2.2	Kenngrößen eines realen Resonators	6
3	Anpassung der Hardware	9
3.1	Der verwendete Resonator	9
3.1.1	Messung der Resonanzfrequenz und Güte	11
3.1.2	Die Nadel – Anpassung des Koppelfaktors	13
3.2	Elektronik zur Auslese der Lagesignale	14
3.2.1	Kennlinien der Verstärkermodule und verwendete Kabel	16
4	Einbau und erste Messungen	19
4.1	Untersuchung der temperaturbedingten Veränderung der Resonanzfrequenz	21
4.2	Anpassung der Resonanzfrequenz und finale Messung der Güte	22
4.3	Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Lageresonators	23
5	Zusammenfassung und Ausblick	25
	Literatur	27
	Danksagung	29
	Abbildungsverzeichnis	31
	Tabellenverzeichnis	33

Kapitel 1

Einleitung

Am physikalischen Institut der Universität Bonn wird seit 1987 der Elektronenbeschleuniger ELSA¹ betrieben. Mit dieser dreistufigen Beschleunigeranlage (siehe Abbildung 1.1) werden Elektronen bis auf eine Maximalenergie von 3,2 GeV beschleunigt, um für Experimente der Hadronenphysik durch Bremsstrahlung hochenergetische Photonen erzeugen zu können. Dabei werden die Elektronen durch einen der zwei Linacs² vorbeschleunigt und ihre Energie im Boostersynchrotron weiter erhöht. Im ELSA-Stretcherring kann schließlich ein Strahlstrom von typischerweise 20 mA akkumuliert werden. Durch die langsame Resonanzextraktion kann über einen Zeitraum von einigen Sekunden, quasi-kontinuierlich ein kleiner Strahlstrom von etwa 100 pA in die externe Strahlführung extrahiert und den Experimenten (CB³ oder BGO-OD⁴) zur Verfügung gestellt werden.

Um die Strahlmenge in der externen Strahlführung bei kleinen Strahlströmen zu bestimmen, werden Hohlraumresonatoren verwendet. In der Strahlführung zum CB-Experiment wird diese zerstörungsfreie Messmethode bereits erfolgreich eingesetzt. Ziel dieser Arbeit ist es, die Strahlmengenmessung im Strahlweg zum BGO-OD Experiment zu realisieren.

1.1 Die externe Strahlführung und die Experimente

Nachdem die Elektronen im ELSA-Stretcherring auf die Extraktionsenergie beschleunigt worden sind, kann der Elektronenstrahl durch die externe Strahlführung die Experimente erreichen. Dazu werden die Elektronen mittels langsamer Resonanzextraktion kontinuierlich in die externe Strahlführung extrahiert. Die Reaktionen, die hadronenphysikalisch untersucht werden, werden aber nicht durch Elektronen, sondern hochenergetische Photonen ausgelöst. Daher werden in einem Kupfer- oder Diamantradiator, durch einen Bremsstrahlungsprozess, Gammaquanten erzeugt. Die bei diesem Prozess gestreuten Elektronen werden dann im Magnetfeld eines Taggermagneten⁵ abgelenkt, um aus ihrer Flugbahn ihre Energie bestimmen zu können. Aus der Differenz der Elektronenenergie vor und nach dem Streuprozess kann die Energie des Photons berechnet werden [Die11]. Das Photon wird markiert genannt, weil seine Energie bekannt ist. Danach trifft das erzeugte Photon auf das Target⁶; Die dabei entstehenden Reaktionsprodukte werden durch den Detektor detektiert und die Vielteilchen-Endzustände der Mesonen-Photoproduktion untersucht [Kös11]. Um den Radiator an der gewünschten Stelle und im richtigen Winkel zu treffen, ist die Kenntnis der Lage des Elektronenstrahls vor dem Radiatortank wichtig.

¹ ELSA – **E**lektronen-**S**trecher-**A**nlage

² engl. **L**inear **A**ccelerator – Linearbeschleuniger

³ engl. **C**ystal **B**arrel – kristallenes Faß, deutet auf die faßähnliche Form des Experiments durch die Anordnung der Szintillatorkristalle hin.

⁴ Das Experiment heißt **BGO**, da dessen Hauptszintillatorkristalle aus Bismutgermanat ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) bestehen, das **OD** deutet auf den **O**ffenen **D**ipolmagneten hin, welcher der zentrale Bestandteil des Vorwärtsspektrometers ist [Kös11].

⁵ engl. taggen – markieren

⁶ engl. target – Ziel

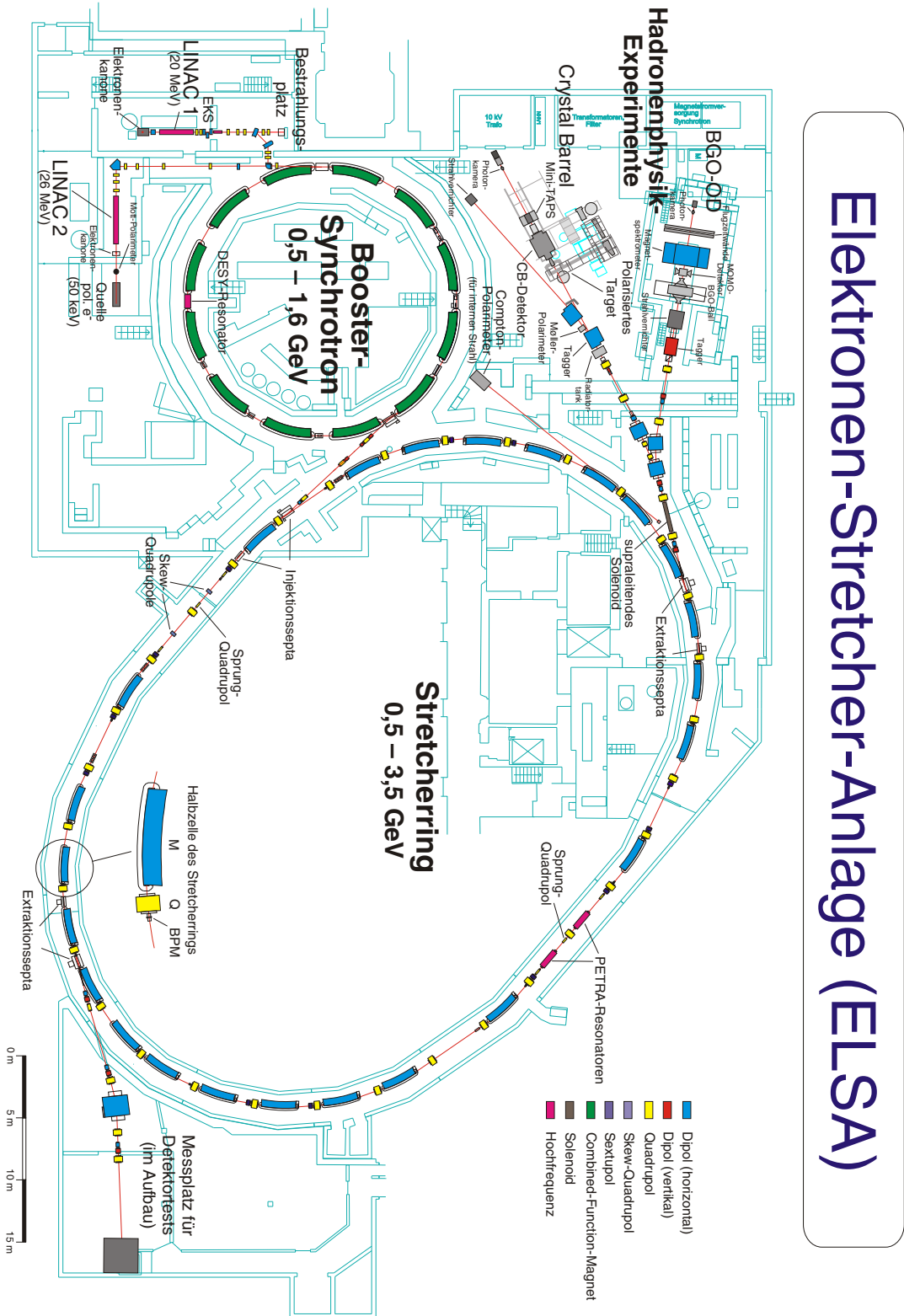


Abbildung 1.1: Gesamtübersicht über die Beschleunigeranlage ELSA [Fro09].

Vor der Inbetriebnahme der Hochfrequenzresonatoren zur Strahllagemessung musste die Strahlposition mit Hilfe eines Drahtscans bestimmt werden. Dabei fährt ein im Goniometer⁷ eingespannter Draht durch den Strahl und detektiert die auftreffenden Elektronen; so kann das Strahlprofil dargestellt und die Strahllage bestimmt werden. Diese Methode ist aber strahlvernichtend und dauert ca. 15 Minuten. Mit der Strahllagemessung durch Hochfrequenzresonatoren kann die Position des Strahls zerstörungsfrei sowie kontinuierlich gemessen und eventuelle Strahlverschiebungen während der Datennahme des Experiments durch Anpassung der Magnetoptik der externen Strahlführung korrigiert werden.

1.2 Strahldiagnose mit Hochfrequenzresonatoren

Um die Strahllage nicht destruktiv zu messen, werden im Allgemeinen sogenannte BPMs⁸ verwendet, die aus vier Elektroden in der Vakuumkammerwand bestehen. Die im Beschleuniger umlaufenden Bunche⁹ induzieren auf diesen Elektroden Ladungen, die als Spannung abgegriffen werden können. Durch die Kombination der vier Spannungssignale mit Hilfe einer Ausleseelektronik, kann die Strahllage gemessen werden. Diese Methode funktioniert aber nicht bei Strahlströmen unterhalb von 0,1 mA [Asv98]. In der externen Strahlführung steht nur ein typischer Strahlstrom von 100 pA zur Verfügung, daher werden in der externen Strahlführung Hochfrequenzresonatoren verwendet, um die Strahllage zu bestimmen. Strahldiagnose mit Hochfrequenzresonatoren beruht darauf, dass die Teilchenpakete, welche den Hochfrequenzresonator passieren, Wakefelder¹⁰ mit sich ziehen, welche an der geänderten Symmetrie im Resonator teilweise zurück bleiben. Das Cavity¹¹ ist so abgestimmt, dass die nachfolgenden Teilchenpakete dieses schwingende Feld resonant anregen. Mit Hilfe einer Koppelvorrichtung wird diese elektrische Leistung aus dem Resonator ausgekoppelt und für die Bestimmung der Strahllage oder des Strahlstroms verwendet.

⁷ Eine Aparatur, mit der Radiatoren und Drähte im Radiatortank horizontal und vertikal zur Strahlachse verschoben und um alle drei Raumachsen rotiert werden können [Bel11].

⁸ engl. **Beam Position Monitor** – Strahllagemonitor

⁹ engl. **Bunch** – Paket gefüllt mit Elektronen welches im Beschleuniger umläuft

¹⁰ engl. **Wakefield** – Kielwellenfeld

¹¹ engl. **Cavity** – Englisches Wort für Hohlraumresonator, welches auch im Deutschen verwendet wird.

Kapitel 2

Theorie der Hochfrequenzresonatoren

2.1 Berechnungen des idealen Hochfrequenzresonators

Bei Hochfrequenzresonatoren handelt es sich meist um zylinderförmige, metallische Hohlkörper. Hochfrequenzresonatoren sind schwingfähige Systeme für Hochfrequenzwellen. Wird ein Resonator mit einem Hochfrequenzsignal der richtigen Frequenz angeregt, bilden sich in ihm stehende elektromagnetische Wellen aus. Welche stehenden Wellen (Moden) sich im Resonator ausbilden können, kann für einen ideal zylindrischen, geschlossenen Resonator errechnet werden, indem die Maxwellgleichungen für die Randbedingungen im Resonator gelöst werden. Als Lösungen ergeben sich die Besselfunktionen erster Ordnung J_m .

Für die Beschleunigerphysik sind Moden mit longitudinalem elektrischen Feld in Strahlrichtung interessant, da sie unter anderem zur Beschleunigung des Strahls verwendet werden. Solche Moden heißen transversal magnetische Moden (TM-Moden¹). Außerdem gibt es noch die transversal elektrischen Moden (TE-Moden²). Für die z -Komponente des elektrischen Feldes E_z der TM-Moden in einem ab-

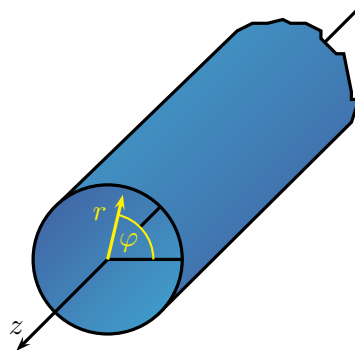


Abbildung 2.1: Zylindrischer Hohlleiter mit verwendetem Koordinatensystem [Heu11].

geschlossenen zylindrischen Hohlraumresonator der Länge l und des Durchmessers a , wie in Abbildung 2.1 zu sehen, ergibt sich [Jac06]:

$$E_z(r, \varphi, z, t) = E_{mn} \cdot J_m\left(\frac{j_{mn}}{a} r\right) \cdot \cos(m\varphi) \cdot \cos\left(\frac{p\pi}{l} z\right) \cdot e^{i\omega_{mnp}t} \quad (2.1)$$

Dabei ist J_m die m -te Besselfunktion mit ihrer n -ten Nullstelle j_{mn} . Die Anzahl der Knoten, die eine Mode in z -Richtung hat, wird durch p angegeben.

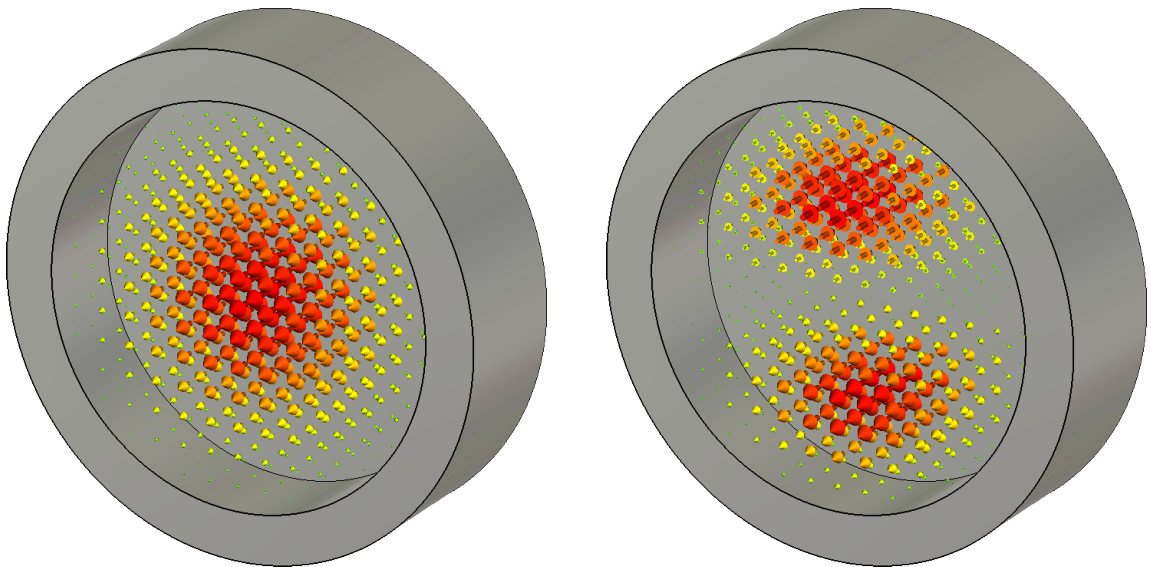
¹ TM-Moden – Transversal Magnetische Moden

² TE-Moden – Transversal Elektrische Moden

Das Feld schwingt mit der Kreisfrequenz ω_{mnp} [Kla76]:

$$\omega_{mnp} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\frac{j_{mn}^2}{a^2} + \frac{p^2\pi^2}{l^2}} . \quad (2.2)$$

Hierbei sind μ die Permeabilität und ε die Dielektrizität des Mediums im Resonator. Mit dem Programm CST Microwave Studio® kann die Feldverteilung im Resonator numerisch berechnet werden. Damit können die Felder durch Pfeile, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, visualisiert werden.



(a) TM_{010} -Mode: Es ist erkennbar, dass das Feld auf der Strahlachse, also in der Mitte des Resonators, am größten ist und zum Rand hin bis auf Null abfällt. Diese Mode wird in Teilchenbeschleunigern zur Beschleunigung des Strahls verwendet, da der Strahl den Resonator auf der Achse durchquert. Somit durchläuft er dort die größte Potentialdifferenz und erhält die meiste Energie.

(b) TM_{110} -Mode: Bei dieser Mode hat das Feld auf der Strahlachse einen Nulldurchgang und steigt mit dem Abstand zum Resonatormittelpunkt an, um schließlich zum Rand des Resonators wieder abzufallen. Die TM_{110} -Mode wird im Lageresonator verwendet, um die Position des Strahls zu detektieren, da das Feld mit zunehmender Strahlablage größer wird.

Abbildung 2.2: Elektrische Feldverteilung der zwei für die Beschleunigerphysik wichtigen Moden in einem zylindrischen Resonator dargestellt durch CST Microwave Studio® [Hil06].

Die TM_{010} -Mode wird in Teilchenbeschleunigern dazu verwendet, die Teilchen zu beschleunigen oder den Strahlstrom zu messen. Für die Strahlagemessung kommt die TM_{110} -Mode zum Einsatz, da bei dieser das E -Feld auf der Strahlachse einen Knoten hat und abhängig von der Abweichung zum Resonatormittelpunkt immer größer wird. Also kann mit zunehmender Strahlablage ein größeres Signal aus dem Resonator ausgekoppelt und damit die Strahlposition bestimmt werden.

2.2 Kenngrößen eines realen Resonators

Um die Kenngrößen eines realen Resonators zu erhalten, kann dieser durch das Ersatzschaltbild eines Schwingkreises beschrieben werden. Die Resonanzkreisfrequenz ω_0 ist die Frequenz, bei der eine bestimmte Mode im Resonator angeregt wird. Für eine Mode TM_{mnp} wird diese aus Formel (2.2) errech-

net. Ein Maß dafür, wie gut ein Resonator die Energie der Felder speichern kann, ist die Leerlaufgüte Q_0 :

$$Q_0 = \frac{\omega_0 W}{P_V} \quad . \quad (2.3)$$

Hierbei ist W die in den Feldern im Resonator gespeicherte Energie und P_V die anfallende Verlustleistung. Da aber ein Teil der Energie des elektrischen Feldes ausgekoppelt wird, um die Strahlleistung zu messen, fällt ein zusätzlicher Leistungsverlust P_{ext} an. Damit ergibt sich die sogenannte Lastgüte Q_L [Pus12]:

$$Q_L = \frac{\omega_0 W}{P_V + P_{\text{ext}}} \quad . \quad (2.4)$$

Diese ist natürlich abhängig davon, wie groß die Leistung ist, die ausgekoppelt wird, und im Cavity zusätzlich verloren geht. Das Verhältnis zwischen ausgekoppelter Leistung P_{ext} und Verlustleistung P_V wird Koppelfaktor κ genannt:

$$\kappa = \frac{P_{\text{ext}}}{P_V} \quad . \quad (2.5)$$

Damit lässt sich aus der gemessenen Lastgüte die Leerlaufgüte des Resonators errechnen:

$$Q_0 = Q_L (\kappa + 1) \quad . \quad (2.6)$$

Kapitel 3

Anpassung der Hardware

3.1 Der verwendete Resonator

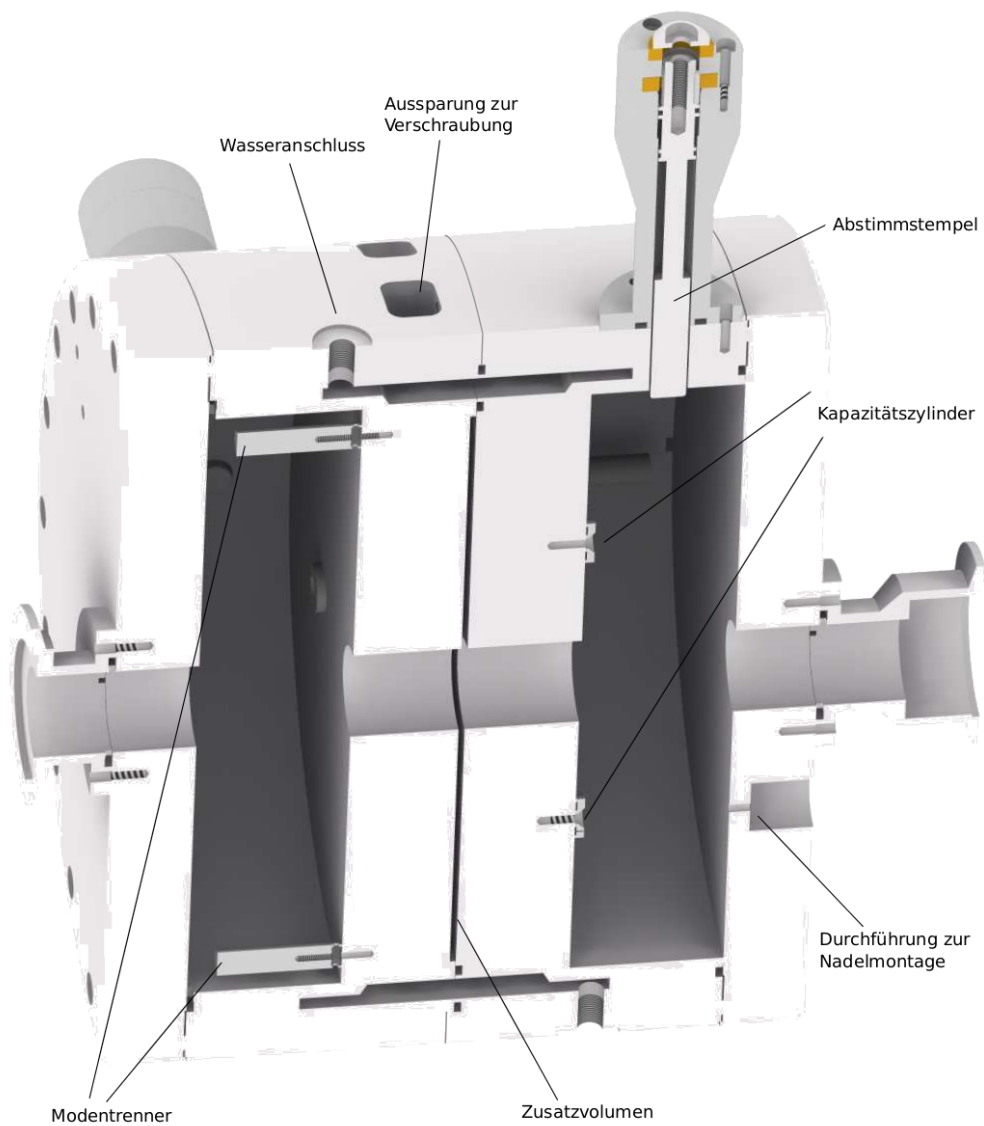


Abbildung 3.1: Schnitt durch den Lagerresonator nach [Pus12].

Der verwendete Lageresonator, der in Abbildung 3.1 zu sehen ist, wurde im Rahmen der Diplomarbeit [Pus05] und Dissertation [Pus12] konzipiert, gebaut und in der Strahlführung zum CB-Experiment installiert. Im Zuge dessen wurde der gleiche Resonator erneut gefertigt, um in die BGO-OD Strahlführung eingebaut zu werden. Der Lageresonator besteht aus zwei Teilresonatoren – im Folgenden x - und y -Resonator genannt –, die 90° verdreht aufeinander geschraubt sind. Jeder Teilresonator ist wiederum aus einem Mittelteil und einem Deckel aufgebaut und misst die Strahlblage in eine transversale Richtung. Durch die Modentrenner, zwei zylindrische Metallkörper im Resonatorinnenraum, wird die Symmetrie des Resonators gebrochen und die TM_{110} -Mode bildet sich immer in eine vorgegebene Richtung aus.

Damit die TM_{110} -Mode resonant angeregt werden kann, muss die Resonanzfrequenz des Resonators als eine ganzzahlige Vielfache der ELSA-HF¹ $\nu_{HF} = 499,67$ MHz gewählt werden, da die Elektronenpakete genau mit dieser Frequenz den Resonator passieren. Als Resonanzfrequenz der Lageresonatoren ν_0 wurde die dritte Harmonische der ELSA-HF gewählt, um einen guten Kompromiss aus Signalstärke und Abmessungen des Resonators zu erhalten [Pus12]:

$$\nu_0 = 3 \cdot \nu_{HF} = 1,499\,010\text{ GHz} \quad . \quad (3.1)$$

Herstellungsbedingt liegt die tatsächliche Resonanzfrequenz eines Resonators nicht immer genau bei der gewünschten Frequenz ν_0 und ändert sich mit Temperatur- und damit Volumenänderungen des Cavitys leicht. Daher wurden Abstimmstempel eingebaut, mit denen die Geometrie des Resonators leicht verändert und damit eine Anpassung der Resonanzfrequenz vorgenommen werden kann. Die eingebauten Stempel haben einen Frequenzhub von ca. 1,4 MHz [Pus12]. Ein Wasserkanal, durch den 20°C warmes Wasser fließt, stabilisiert die Temperatur des Lageresonators und vermindert somit temperaturbedingte Resonanzfrequenzverschiebungen.

Um zu verhindern, dass sich Anteile des Hochfrequenzfeldes vom einen Teilresonator in den anderen ausbreiten können, ist zwischen den beiden Teilresonatoren eine breite Zwischenwand mit einer Öffnung, durch die sich der Elektronenstrahl bewegen kann, eingebaut. In der Mitte der Zwischenwand ist ein Zusatzvolumen zu erkennen, welches vakuumbedingt notwendig ist. Durch dieses Volumen müssen keine großen Aluminiumflächen aufeinander geschraubt werden, welche Gaseinschlüsse erzeugen und dadurch später das Vakuum verschlechtern könnten.

Eine Koppelvorrichtung ist notwendig, um die Hochfrequenzleistung aus den Resonatoren auskoppeln zu können. Im Falle der vorliegenden Lageresonatoren wird dazu eine Koppelnadel verwendet, welche in den Resonatorinnenraum hineinragt. Die Anpassung der Koppelnadel wird in Abschnitt 3.1.2 beschrieben. Damit das Feld besser ausgekoppelt werden kann, befinden sich an den Koppelnadeln gegenüberliegenden Resonatorwänden sogenannte Kapazitätszylinder. Sie sorgen dafür, dass das elektrische Feld an den Nadeln konzentriert wird.

Damit im Resonator große Feldstärken entstehen können, muss die elektrische Leitfähigkeit der Resonatorinnenwand und damit die Güte sehr hoch sein. Die größte Schwierigkeit stellt dabei der Kontakt zwischen dem Resonatordeckel und dem Resonatormittelteil dar. Dazu wurde am Mittelteil an der Innenkante ein Überstand des Aluminiums von 0,01 mm erzeugt, der beim Anziehen der Deckelschrauben mit dem Deckel verpresst wird und somit für guten elektrischen Kontakt sorgt.

¹ ELSA-HF – ELSA-Hochfrequenz; ist die Frequenz, mit der die Hochfrequenzresonatoren zur Beschleunigung des Elektronenstrahls im ELSA-Stretcherring schwingen. Diese Hochfrequenz ist ausschlaggebend für die Bunchstruktur im Stretcherring.

3.1.1 Messung der Resonanzfrequenz und Güte

Mit einem Netzwerkanalysator² können die wichtigen Kenngrößen eines Resonators ausgemessen werden. Bei einer Reflexionsmessung leitet der Netzwerkanalysator ein Signal (\hat{U}_+ , \hat{I}_+) mit bekannter Amplitude in den Resonator und misst dessen Reflexionen (\hat{U}_- , \hat{I}_-), die auf der Leitung zurück laufen. Diese Reflexionen werden für mehrere Frequenzen in einem eingestellten Frequenzintervall gemessen. Mit dem Analysator kann aus den beiden Amplituden der Betrag des komplexen Reflexionsfaktors, der durch das Verhältnis [Hil06]

$$\rho = \frac{\hat{U}_+}{\hat{U}_-} \quad (3.2)$$

definiert ist, gemessen oder vektoriell mit der Phase des Signals in der komplexen Ebene dargestellt werden. Wird die Resonanzkurve eines Cavities um die Resonanzfrequenz $\nu_0 = \omega_0/2\pi$ auf dem Netzwerk-

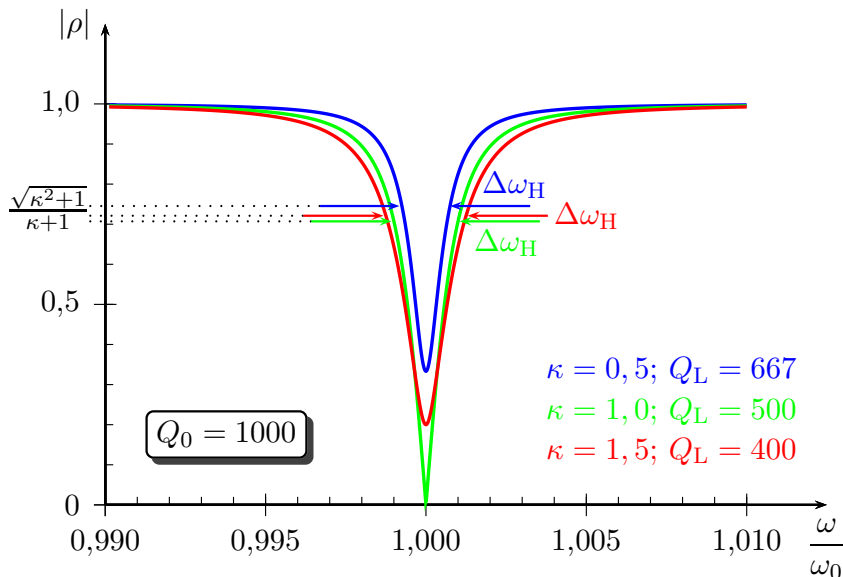


Abbildung 3.2: Theoretische Resonanzkurven für einen zylindrischen Resonator in Abhängigkeit vom Koppelkoeffizient κ [Heu11].

analysator betrachtet, ergibt sich für den Betrag des Reflexionsfaktors [Heu11]:

$$|\rho(\nu)| = \sqrt{\frac{(\kappa - 1)^2 + Q_0^2 \left(\frac{\nu}{\nu_0} - \frac{\nu_0}{\nu}\right)^2}{(\kappa + 1)^2 + Q_0^2 \left(\frac{\nu}{\nu_0} - \frac{\nu_0}{\nu}\right)^2}} \quad (3.3)$$

Aus dem Verlauf des Reflexionsfaktors lassen sich die wichtigen Kenngrößen eines Resonators sehr einfach bestimmen: Die Resonanzfrequenz ν_0 ist die Frequenz, bei welcher der Reflexionsfaktor minimal wird $|\rho_{\min}| = |\rho(\nu_0)|$, also der Großteil des Signals in Form der angeregten Mode mit der Resonanzfrequenz ν_0 gespeichert und nicht reflektiert wird. Die Resonanzfrequenz kann durch die Abstimmstempel eingestellt werden. Aus dem minimalen Reflexionsfaktor $|\rho_{\min}|$ lässt sich bei kalibriertem Netzwerkanalysator

² In der vorliegenden Arbeit wurde ein vektorieller Netzwerkanalysator ZVC 62 der Firma Rohde & Schwarz verwendet

lyikator der Koppelfaktor berechnen:

$$\kappa = \begin{cases} \frac{1+|\rho_{\min}|}{1-|\rho_{\min}|}, & \text{für } \rho > 0 \\ \frac{1-|\rho_{\min}|}{1+|\rho_{\min}|}, & \text{für } \rho < 0 \end{cases} . \quad (3.4)$$

Da der Analysator aber nur den Betrag des Reflexionsfaktors anzeigt, können die beiden Fälle nur unterschieden werden, indem die vektorielle Darstellung des Reflexionsfaktors betrachtet wird. Ist der Koppelfaktor κ bekannt, kann die volle Halbwertsbreite $\Delta\nu_H$ bei

$$\left| \rho \left(\nu_0 \pm \frac{\Delta\nu_H}{2} \right) \right| = \frac{\sqrt{\kappa^2 + 1}}{\kappa + 1} \quad (3.5)$$

abgelesen werden, um aus dieser die Lastgüte Q_L zu berechnen:

$$Q_L = \frac{\nu_0}{\Delta\nu_H} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_H} . \quad (3.6)$$

Damit folgt schließlich die Leerlaufgüte Q_0 des Resonators aus:

$$Q_0 = Q_L (\kappa + 1) . \quad (3.7)$$

Die unbelastete Güte der Lagerresonatoren liegt laut Simulation zwischen 10 800 und 11 800. Nach dem Zusammenbau des Lagerresonators stellte sich heraus, dass die Güte eines Teilresonators ungefähr einen Faktor 15 schlechter war als in der Simulation vorhergesagt. Infolgedessen wurde der Lagerresonator wieder in zwei Hälften zerlegt und die betroffene Resonatorhälfte geöffnet. Es konnte nach Messungen herausgefunden werden, dass der Überstand, der den Kontakt vom Cavitydeckel zum Mantel gewährleisten sollte, aufgrund eines Herstellungsfehlers, kein Überstand war, sondern zwei hundertstel Millimeter zurück stand. Nach Simulationen mit CST Microwave Studio® zeigte sich, dass sich bei einer Längenänderung des Resonators um maximal 0,1 mm die Resonanzfrequenz nur so weit verschieben würde, dass diese durch den Abstimmstempel kompensiert werden könnte. Danach wurde das Bauteil neu überarbeitet und der gewünschte Überstand von ca. 0,01 mm erzeugt.

Nach erneutem Zusammenbau des Lagerresonators zeigte sich, dass die Güten im Bereich um 10 000 lagen und der Resonator mit dem Abstimmstempel auf die zur Signalerzeugung gewünschte Frequenz abstimmbar war. Die im Labor gemessenen Güten und eingestellten Resonanzfrequenzen sind Tabelle 3.1 zu entnehmen. Im Labor war der Lagerresonator nicht evakuiert und die Temperatur ϑ unterschied sich leicht von der am Einbauort des Resonators. Also muss die Resonanzfrequenz im Labor ν_{Lab} leicht verschoben sein, da sich dort im Resonator Luft befindet, welche eine andere Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r^{\text{Luft}} > 1$ besitzt als Vakuum. Die Temperatur am Einbauort liegt infolge der Wasserkühlung bei 20 °C. Daraus ergibt sich die Resonanzfrequenz im Labor ν_{Lab} aus Formel (3.8), wobei von einer temperaturbedingten Resonanzfrequenzverschiebung von 36 kHz/°C [Pus05] ausgegangen wird:

$$\nu_{\text{Lab}} = \frac{\nu_0}{\sqrt{\epsilon_r^{\text{Luft}}}} - (\vartheta - 20 \text{ °C}) \cdot 36 \text{ kHz/°C} . \quad (3.8)$$

Die entgeltigen Messwerte für die Güten der beiden Teilresonatoren, die Koppelfaktoren und die Abstimmung der Resonanzfrequenz, nach dem Einbau in die externe Strahlführung, werden in Abschnitt 4.2 dargestellt.

Resonator	Lastgüte Q_L	Resonanzfrequenz $\nu_{\text{Lab}}/\text{GHz}$
x -Resonator	5046 ± 200	$1,498\,47 \pm 0,000\,01$
y -Resonator	5172 ± 200	$1,498\,47 \pm 0,000\,01$

Tabelle 3.1: Güte und leicht verstimmte Resonanzfrequenz der beiden Teilresonatoren unter Laborbedingungen (Für eine Temperatur von 23 °C).

3.1.2 Die Nadel – Anpassung des Koppelfaktors

Die Kopplung an das Signal im Resonator wird durch eine Koppelnadel realisiert, die in Abbildung 3.3 zu sehen ist. Dafür wurde auf eine vakuumdichte SMA³-Durchführung eine 25 mm lange vergoldete Koppelnadel gelötet⁴. Der Koppelfaktor ist ausschließlich durch die Geometrie der Koppelvorrichtung



Abbildung 3.3: 25 mm lange, vergoldete Koppelnadel welche durch Lötten an einer vakuumdichten SMA-Durchführung befestigt wurde [Pus12].

vorgegeben. So konnte der Koppelfaktor der beiden Resonatoren durch schrittweises Kürzen der Koppelnadeln immer näher an den optimalen Koppelfaktor von $\kappa = 1$ angepasst werden. Die Annäherung in Form von Resonanzkurven des y -Resonators ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die im Labor gemessenen Koppelfaktoren der beiden Resonatoren, nach dem Anpassen der Nadeln, sind in Tabelle 3.2 zu sehen.

Resonator	Koppelfaktor
x -Resonator	$1,02 \pm 0,01$
y -Resonator	$0,97 \pm 0,01$

Tabelle 3.2: Im Labor gemessene Koppelfaktoren der beiden Teilresonatoren nach Anpassung der Koppelnadeln.

³ Bei SMA handelt es sich um eine Norm für koaxiale Hochfrequenzsteckverbinder.

⁴ Dies geschah im Rahmen der Dissertation [Pus12], wobei auf Erfahrungen des Instituts für Kernphysik der Universität Mainz zurück gegriffen werden konnte.

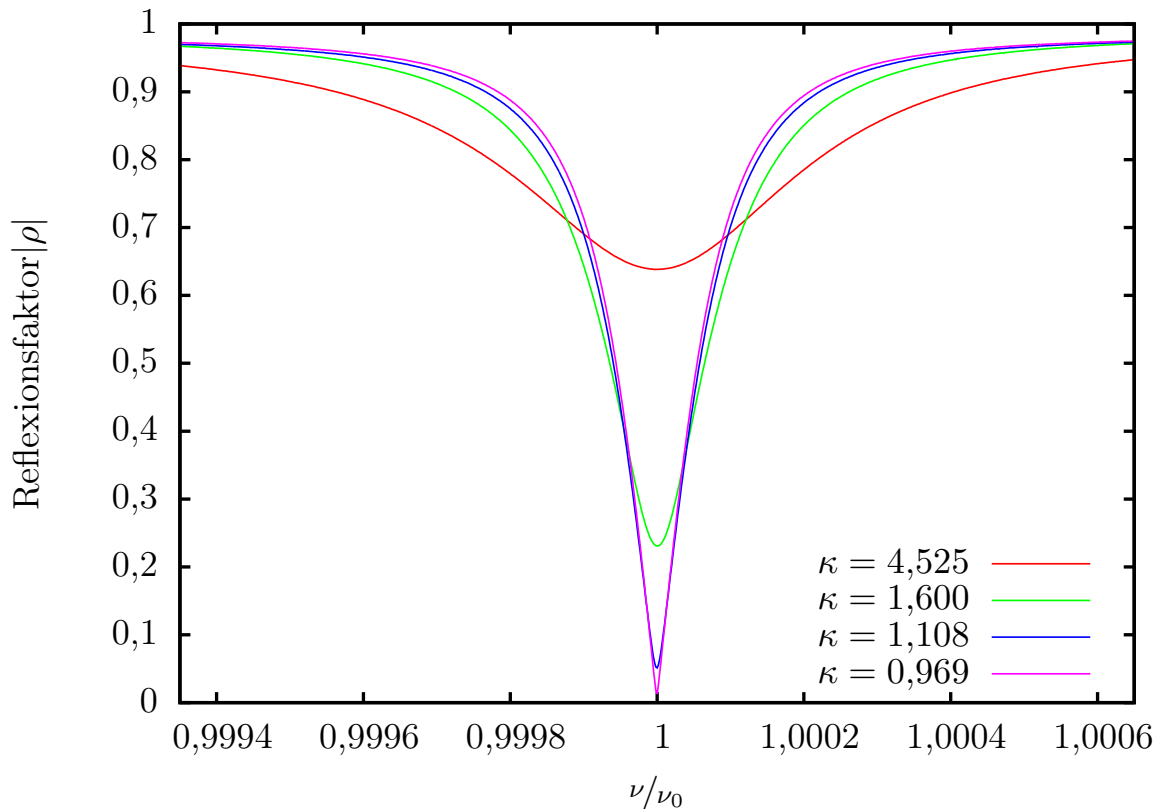


Abbildung 3.4: Resonanzkurven aufgenommen bei verschiedenen Längen der Koppelnadel und damit unterschiedlichen Koppelfaktoren. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Messpunkte verbunden und ohne Fehlerbalken dargestellt.

3.2 Elektronik zur Auslese der Lagesignale

Die Hochfrequenzsignale, die aus dem Resonator ausgekoppelt werden, haben sehr geringe Leistungen um 0,1 aW [Pus12] was einem Wert von -160 dBm entspricht⁵. Damit nicht nur das Rauschen verstärkt wird, was nahezu den gleichen Leistungspegel wie das ausgekoppelte Lagesignal besitzt, werden sogenannte Lock-In-Verstärker⁶ verwendet. Mit Hilfe dieser besonderen Verstärker wird das Konzept der phasensensitiven Gleichrichtung benutzt. Dabei wird ausgenutzt, dass die Frequenz des Lagesignals ω_{sig} aus dem Resonator sehr genau bekannt ist. Die Frequenz liegt, wie oben beschrieben, bei der dritten Harmonischen der ELSA-HF. Für die Umsetzung dieses Konzeptes wird ein Referenzsignal derselben Frequenz benötigt, welches durch den Master-Generator der ELSA-Hochfrequenz mit nachfolgendem Frequenzverdreifacher erzeugt wird. Das Lagesignal aus dem Resonator besteht aus einer Überlagerung vieler Frequenzkomponenten aus dem Hintergrundrauschen, enthält aber auch einen Anteil des

⁵ Bei dBm handelt es sich um die Einheit des Leistungspegels im Bezug auf 1 mW. Der Leistungspegel L_P zwischen der Leistung P und der Bezugsleistung P_{bez} wird wie folgt angegeben: $L_P/\text{dB} = 10 \cdot \log(P_1/P_2)$. Der Leistungspegel mit der Einheit dB gibt somit ein Verhältnis von zwei Leistungen an. Mit der Einheit dBm werden absolute Leistungen angegeben wobei als Bezugsleistung 1 mW verwendet wird $L_P/\text{dBm} = 10 \cdot \log(P_1/1\text{mW})$.

⁶ SR830 Lock-In Amplifier, Firma Stanford Research, Inc. Die funktionsweise der Lock-In-Verstärker ist genauer in der Dissertation [Pus12] beschrieben.

gewünschten Lagesignals U_{Sig} der Form:

$$U_{\text{Sig}}(t) = U_{\text{Sig}}^0 \sin(\omega_{\text{Sig}} + \Theta_{\text{Sig}}) \quad . \quad (3.9)$$

Das Referenzsignal aus dem Master-Generator hat die Form:

$$U_{\text{Ref}}(t) = U_{\text{Ref}}^0 \sin \omega_{\text{Ref}} \quad . \quad (3.10)$$

Bei der phasensensitiven Gleichrichtung wird das Referenzsignal im Lock-In-Verstärker zum Lagesignal multipliziert. Am Ausgang des Lock-In-Verstärkers ergibt sich ein Signal, welches unter anderem die gewünschte Kombination des Lagesignals U_{Sig} mit dem Referenzsignal U_{Ref} enthält.

$$U_{\text{out}} = \frac{1}{2} U_{\text{Ref}}^0 U_{\text{Sig}}^0 \cos((\omega_{\text{Ref}} - \omega_{\text{Sig}})t - \Theta_{\text{Sig}}) + \dots \quad . \quad (3.11)$$

Je besser die Frequenz des Lagesignals ω_{Sig} mit der des Referenzsignals ω_{Ref} übereinstimmt, desto langsamer oszilliert der gewünschte Term. Im Idealfall sind die Frequenzen gleich und der Term überlagert die anderen Komponenten mit einem Gleichspannungssignal. Das gesamte Ausgangssignal wird durch Tiefpassfilter isoliert und die Signalamplitude kann zusammen mit der Phase Θ_{Sig} am Lock-In-Verstärker abgelesen oder durch Schnittstellen zur Weiterverarbeitung an einen Industriecomputer gesendet werden. Dieser Computer kommuniziert auch mit dem Kontrollsystem, damit die Messwerte im Kontrollsystem dargestellt und abgelesen werden können.

Da die verwendeten Lock-In-Verstärker Signale mit einer maximalen Frequenz von ca. 102 kHz verarbeiten können, muss das Nutzsignal aus dem Lageresonator und das Referenzsignal vorher heruntergemischt werden. Bei einem Mischer⁷ handelt es sich um ein elektronisches Bauteil, welches aus einem Hochfrequenzsignal (meist mit RF⁸ bezeichnet) mit der Frequenz ν_{RF} und einem lokalen Oszillator-Signal (LO⁹) mit der Frequenz ν_{LO} durch Multiplikation ein Signal mit der sogenannten Zwischenfrequenz (IF¹⁰) erzeugt, welches die Frequenzen $\nu_{\text{IF}} = |\nu_{\text{RF}} \pm \nu_{\text{LO}}|$ enthält. Dabei ist die Amplitude des IF-Signals proportional zu der des Hochfrequenzsignals (RF). Als LO wird hier ein Oszillator¹¹ verwendet, bei dem durch Temperaturänderung entstehende Frequenzverschiebungen durch eine Abstimmspannung korrigiert werden können. Der Oszillator wird durch mehrere Zirkulatoren vor zurücklaufenden Hochfrequenzsignalen geschützt. Mit Hilfe dieses LO-Signals kann das Nutzsignal auf eine Frequenz unter 102 kHz herabgemischt und so im Lock-In-Verstärker verwendet werden. Um auch das Referenzsignal herunterzumischen, wird ein baugleicher Mischer verwendet. Bevor das Signal aus dem Resonator heruntergemischt werden kann muss es vorverstärkt werden, damit ein Signal mit ausreichend großer Leistung am RF-Eingang des Mixers anliegt. Dazu wurde ein rauscharmer 60 dB-Verstärker¹² verwendet. Die elektronischen Bauteile sind in hochfrequenzdichten Gehäusen, welche äußere Störeinflüsse reduzieren, zu Modulen¹³ zusammengefasst. Zusätzlich sind in der gesamten Schaltung, wie sie in Abbildung 3.5 zu sehen ist, mehrere Bandpass- und Tiefpassfilter¹⁴ integriert, um störende Signalanteile weitestgehend zu unterdrücken. Die beiden Verstärkermodule wurden direkt auf den Lageresonator aufgeschraubt, um den Weg des ausgekoppelten Lagesignals zur Vorverstärkung und damit

⁷ In diesem Fall wird der Mischer DM0052LA der Firma MITEQ, Inc. verwendet.

⁸ engl. RF – Radio Frequency; Hochfrequenz.

⁹ engl. LO – Local Oscillator; lokaler Oszillator.

¹⁰ engl. IF – Intermediate Frequency; Zwischenfrequenz.

¹¹ Coaxial Resonator Oscillator, Model No.521020, EMF Systems, Inc.

¹² AMF-4F-01100180-04-13P, Firma MITEQ, Inc.

¹³ Die Module sind in Abbildung 3.5 mit geschlossenen Linien umrandet und grau unterlegt.

¹⁴ Model FLL-100K Firma MITEQ, Inc.

die äußeren Einflüsse möglichst gering zu halten. Die Module und Bauteile, welche mit der gestrichelten Linie umrandet sind, wurden in einen 19"-Einschub eingebaut und im Rack, welches auch die Lock-In-Verstärker und den Industriecomputer zur Weiterverarbeitung der Daten enthält, untergebracht.

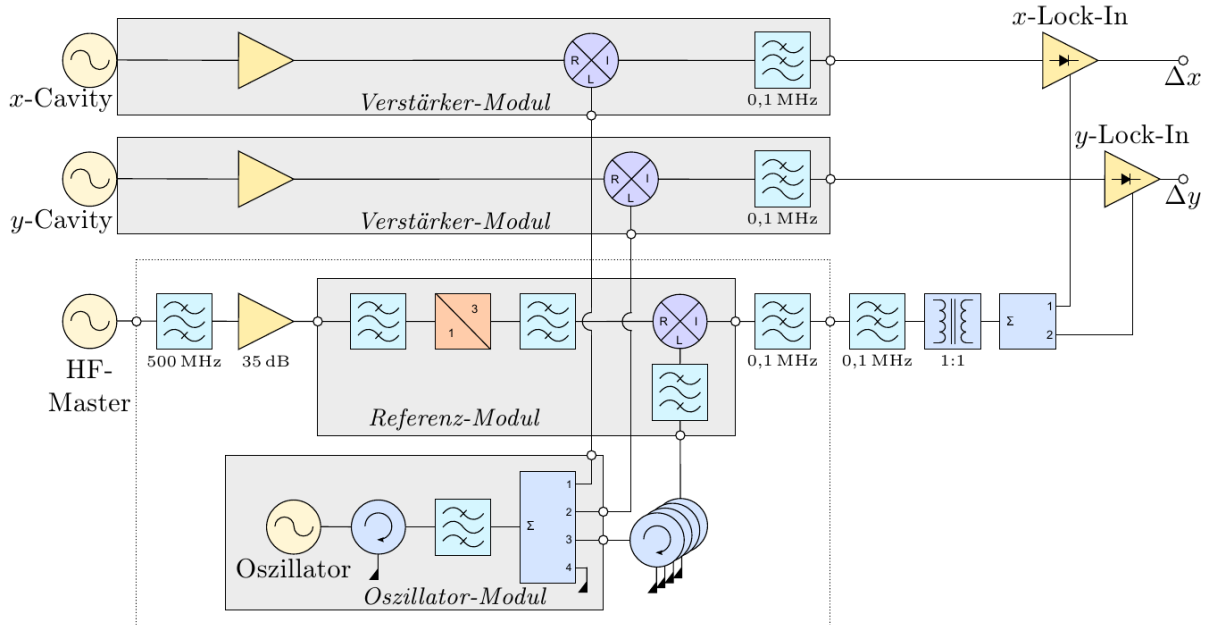


Abbildung 3.5: Elektronik zur Verstärkung und Weiterverarbeitung des ausgekoppelten Lagesignals [Pus12].

3.2.1 Kennlinien der Verstärkermodule und verwendete Kabel

Um die gewonnenen Daten mit einer Strahlage in Verbindung bringen zu können, werden die Messwerte in einer extra für diesen Zweck geschriebenen Software [Pus12] weiterverarbeitet. Um die Strahlablage rechnerisch bestimmen zu können, ist es notwendig die Leistung zu kennen, die aus dem Resonator ausgekoppelt wurde. Da dieses Signal aber schon elektronisch verstärkt und weiterverarbeitet wurde, ist die Leistung, die am Lock-In-Verstärker verarbeitet wird, viel größer als die ausgekoppelte. Sind die Kennlinien des Verstärkermoduls, welche das Verhalten von Eingangsleistung P_{in} zur Ausgangsleistung P_{out} angeben, bekannt, kann die ursprüngliche Leistung bestimmt und damit eine Strahlage berechnet werden.

Die Kennlinien wurden vermessen, indem die Verstärkermodule mit zwei Netzwerkanalysatoren als Frequenzgeneratoren – zum einen zur Erzeugung eines Nutzsignals, zum anderen als lokaler Oszillator – betrieben wurden. Dabei wurde das Ausgangssignal mit einem Leistungsmessgerät gemessen und das Eingangssignal, mit zwei Hochfrequenzabschwächern als Dämpfungsglied, in der Nähe der typischen Signalleistungen variiert. Durch die Kennlinien kann die Leistung am Ausgang der Verstärkermodule in Zusammenhang mit der Eingangsleistung gebracht und somit die ausgekoppelte Leistung des Lagesignals errechnet werden. Die gewonnenen Daten der Verstärkermodule wurden in die Software übernommen und werden nun zur Errechnung der Strahlablage verwendet.

Da bedingt durch den Einbauort des Resonators das Rack mit der Elektronik sehr weit entfernt vom Messort steht, mussten mit den LO-Signalen sehr lange Strecken von ca. 10 m überwunden werden. Die Mischer benötigen laut Datenblatt einen Mindest-Oszillatorpegel von 7 dBm. Daher wurde zusätzlich das Verhalten der Verstärkermodule für kleinere Oszillatorpegel untersucht (siehe Abbildung 3.7).

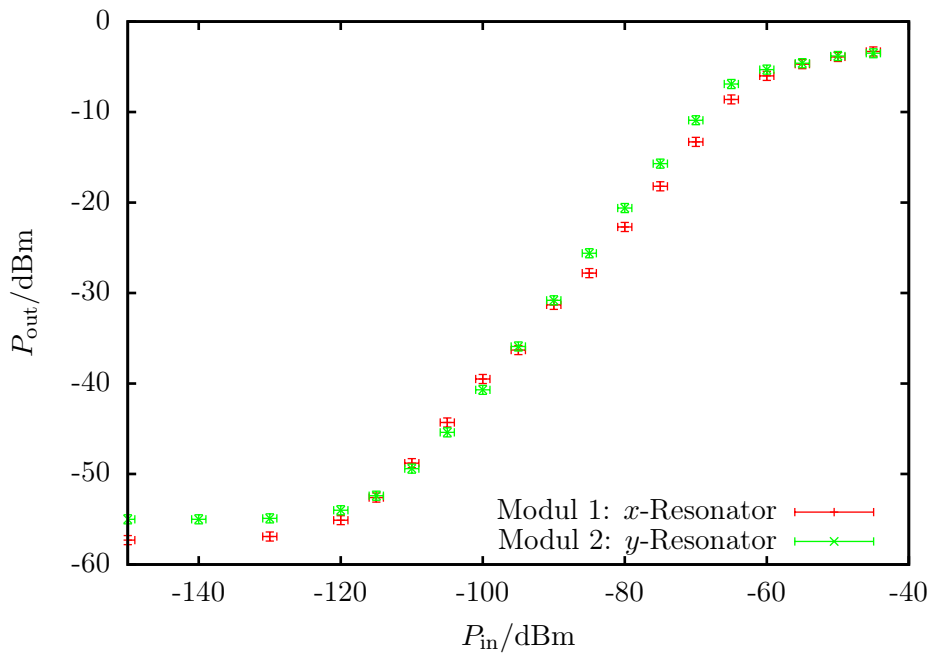


Abbildung 3.6: Kennlinien der beiden Verstärkermodule, aufgenommen mit einer LO-Leistung von 7 dBm am Mischer.

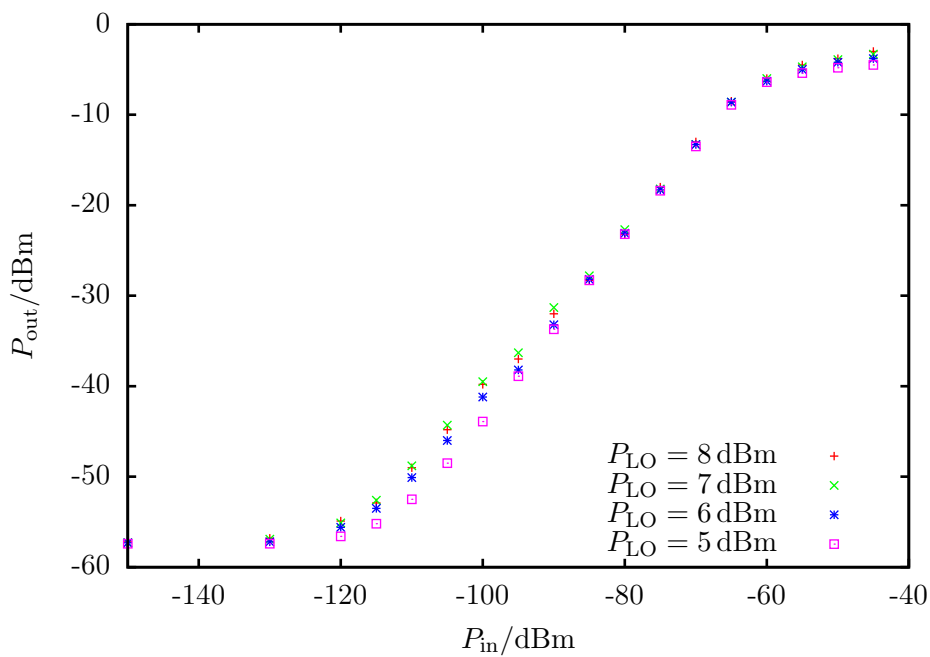


Abbildung 3.7: Kennlinien des Verstärkermoduls für verschiedene Oszillatorleistungen P_{LO} . Es ist erkennbar das für Oszillatorleistungen von unter 7 dBm die Ausgangsleistung zwischen -110 und -100 dBm Eingangsleistung nicht mehr linear ansteigt.

Dabei stellte sich heraus, dass das Verhalten des Verstärkermoduls für unterschrittenen LO-Mindestpegel nicht mehr linear ist und somit die rechnerische Bestimmung der Strahlblende verfälschen würde. Durch die Verwendung von verlustarmen Hochfrequenzkabeln¹⁵ konnte die Unterschreitung von 7 dBm am LO-Eingang des Mixers vermieden und damit der lineare Verlauf der Verstärkung des Verstärkermoduls erhalten werden.

¹⁵ Aircom Plus der Firma SSB-Electronic GmbH

Kapitel 4

Einbau und erste Messungen

Der Lageresonator soll die Strahlage in der externen Strahlführung zum BGO-OD-Experiment messen und wurde dazu direkt vor dem Radiatortank des Experiments eingebaut. Der Einbauort ist in Abbildung 4.1 dargestellt und in Abbildung 4.2 ist ein Foto des eingebauten Resonators zu sehen. Für den Einbau musste die Halterung, welche Baugleich mit der des anderen Lageresonators war, angepasst werden. Außerdem musste ein Flansch am Lageresonator durch einen maßgefertigten Membranbalg ersetzt werden, um die thermischen Ausdehnungen des Strahlrohrs kompensieren zu können. Die Position ist für die Experimente sehr günstig, da sich der Resonator räumlich nah am Radiator befindet, in dem die für die Experimente benötigten getaggten Photonen erzeugt werden.

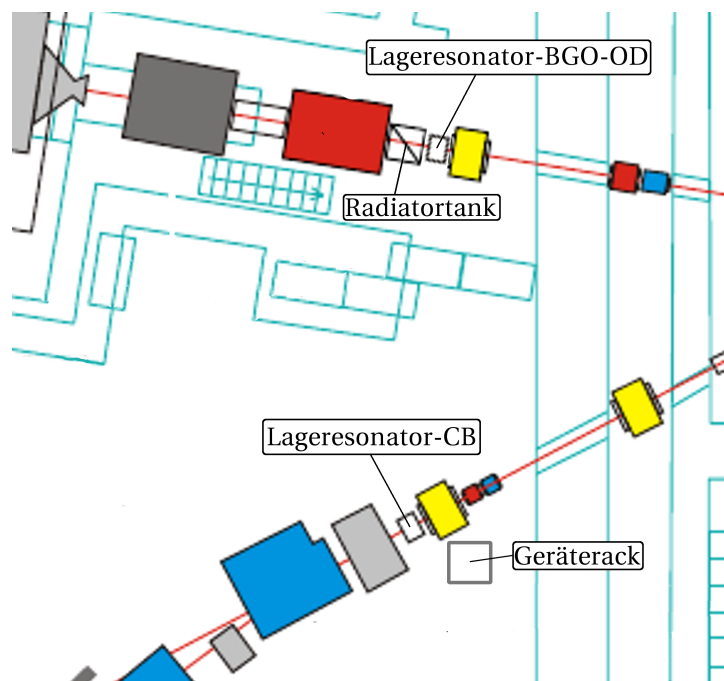


Abbildung 4.1: Einbauort des Lageresonators in der externen Strahlführung vor dem BGO-OD-Experiment und Standort des Geräteracks mit der weiterverarbeitenden Elektronik. Bearbeiteter Ausschnitt des ELSA-Lageplans [Fro09].

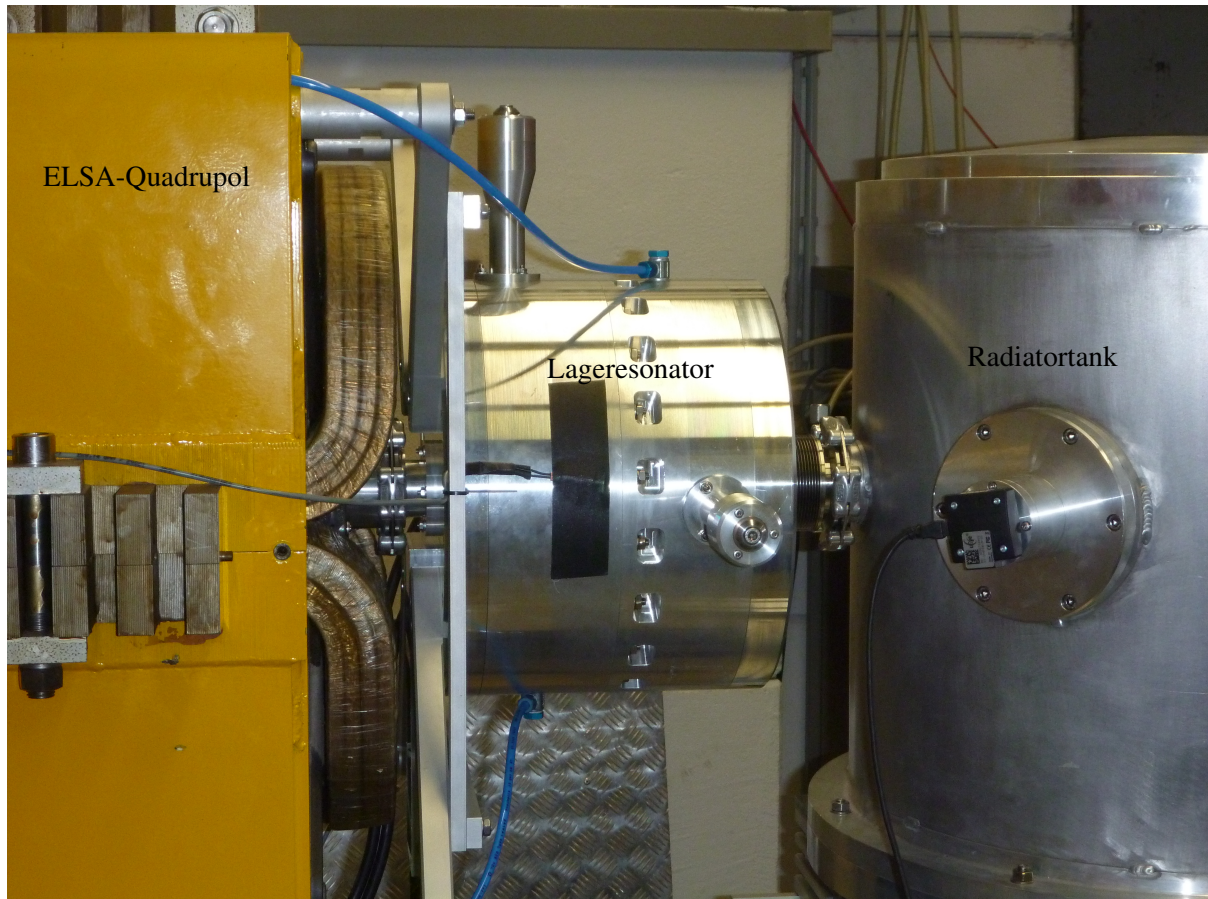


Abbildung 4.2: Foto des eingebauten Lageresonators in der externen Strahlführung vor dem Radiatortank des BGO-OD-Experiments. Der Resonator ist durch eine Halterung am letzten ELSA-Quadrupol (links) befestigt. Rechts vom Resonator befindet sich der Radiatortank welcher durch den Membranbalg mit dem Lageresonator verbunden ist. Der Elektronenstrahl kommt beim Betrieb von links.

4.1 Untersuchung der temperaturbedingten Veränderung der Resonanzfrequenz

Nach dem Einbau stellte sich heraus, dass die Resonanzfrequenz beider Teilresonatoren nur ca. 10 kHz unter der gewünschten Frequenz von 1,499 010 GHz lag, und die Verschiebung somit gut durch Gleichung (3.8) beschrieben werden kann. Diese Verschiebung lässt sich durch eine Temperaturabweichung von ungefähr 0,25 °C erklären. Die Genauigkeit der Temperaturmessung im Labor lag unter diesem Wert. Für die Nutzung im Experimentierbetrieb wird die Resonanzfrequenz des Resonators um 30 kHz nach oben verstimmt, damit das Signal bei Temperaturvariationen nicht über die Resonanz läuft und somit einen Phasensprung verursacht.

Die zeitliche Verschiebung der Resonanzfrequenz wurde untersucht. Dabei fiel auf, dass die Resonanzfrequenz periodisch im Tagesrhythmus schwankt, was vermutlich auf die Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht zurückzuführen ist. Um dies zu verifizieren, wurde ein Temperaturwiderstand auf der Oberfläche des Resonators befestigt. Dann erfolgte eine Messung der Temperatur und gleichzeitig der Frequenzverschiebung (Abbildung 4.3); dies bestätigte die vermuteten Temperaturschwankungen.

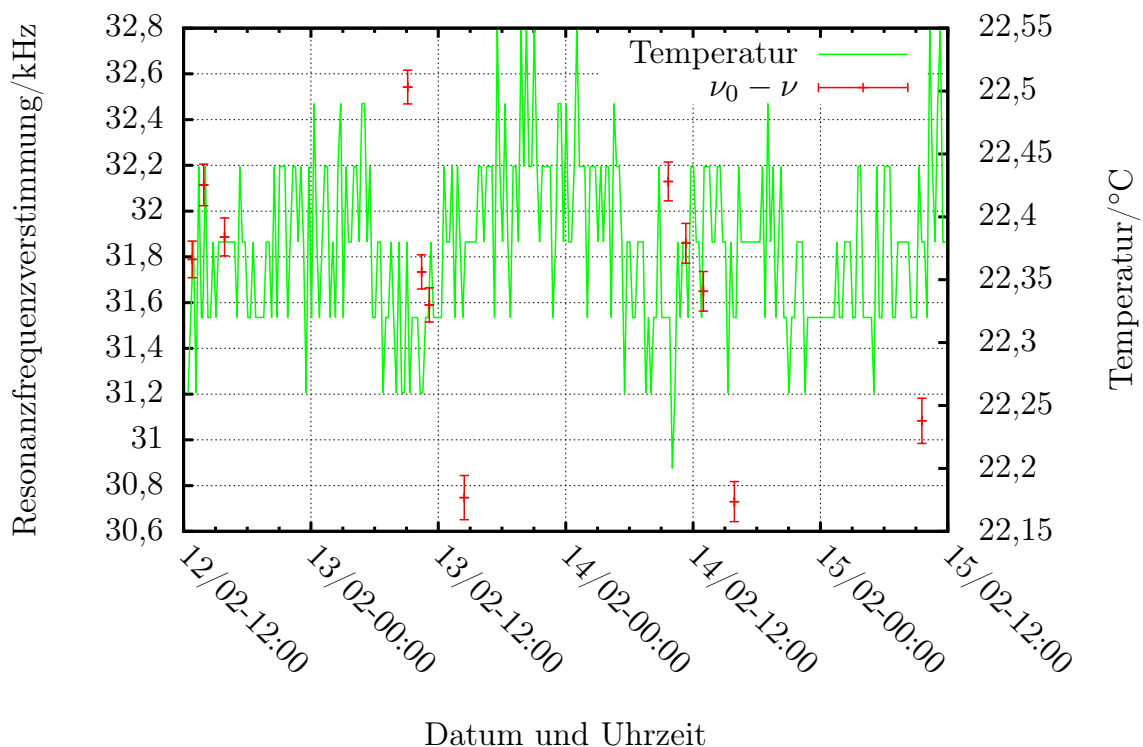


Abbildung 4.3: Schwankungen der Resonanzfrequenz des Lagerresonators im eingebauten Zustand und Temperatur auf der Oberfläche des Resonators.

Es wurde eine maximale Schwankung der Resonanzfrequenz um 1,795 kHz am 13.02.2013 beobachtet. Die Schwankung entspricht einer Temperaturvariation des Resonatorinnenraums von 0,05 °C. Diese Beobachtung zeigt, dass die Temperaturstabilisierung durch das Kühlwasser sehr gut funktioniert und die gemessene Temperaturvariation fast ausschließlich die Resonatoroberfläche betrifft. Eine durch Temperaturvariationen verursachte Resonanzfrequenzverschiebung, die in der durch die Messung bestimmten

Größenordnung liegt, ist für die Messung der Strahlage nicht relevant.

4.2 Anpassung der Resonanzfrequenz und finale Messung der Güte

Bevor der Lageresonator eingesetzt wurde, wurden die Resonanzfrequenzen der Teilresonatoren erneut eingestellt und die weiteren Kenngrößen vermessen. Dabei ergaben sich die Resonanzkurven in den Abbildungen 4.4 und 4.5. Die Messwerte für die Resonatorkenngrößen sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

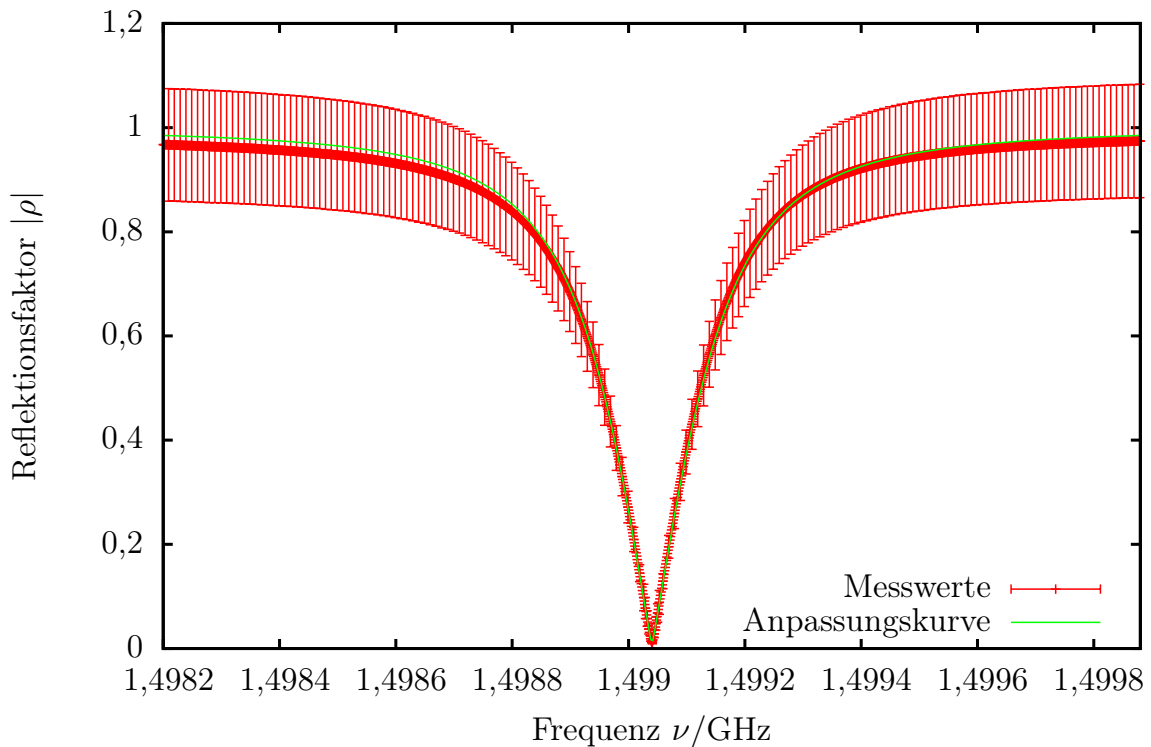


Abbildung 4.4: Finale Resonanzkurve des x -Resonators im eingebauten, abgestimmten und evakuierten Zustand. Es wurde eine Kurve der Funktion (3.3) an die Messdaten angepasst. Als Fehler wurden die Angaben aus dem Handbuch des Netzwerkanalysators [Roh06] verwendet und zur besseren Übersichtlichkeit nur jeder zwanzigste Messwert mit Fehler dargestellt.

	Resonanzfrequenz ν_0/GHz	Koppelfaktor κ	Lastgüte Q_L	Leerlaufgüte Q_0
x -Resonator	$1,499\,04 \pm 0,000\,01$	$1,02 \pm 0,01$	5091 ± 200	$10\,284 \pm 407$
y -Resonator	$1,499\,04 \pm 0,000\,01$	$0,98 \pm 0,01$	5161 ± 200	$10\,219 \pm 399$

Tabelle 4.1: Finale Werte für die Kenngrößen des Lageresonators im eingebauten und evakuierten Zustand in der externen Strahlführung.

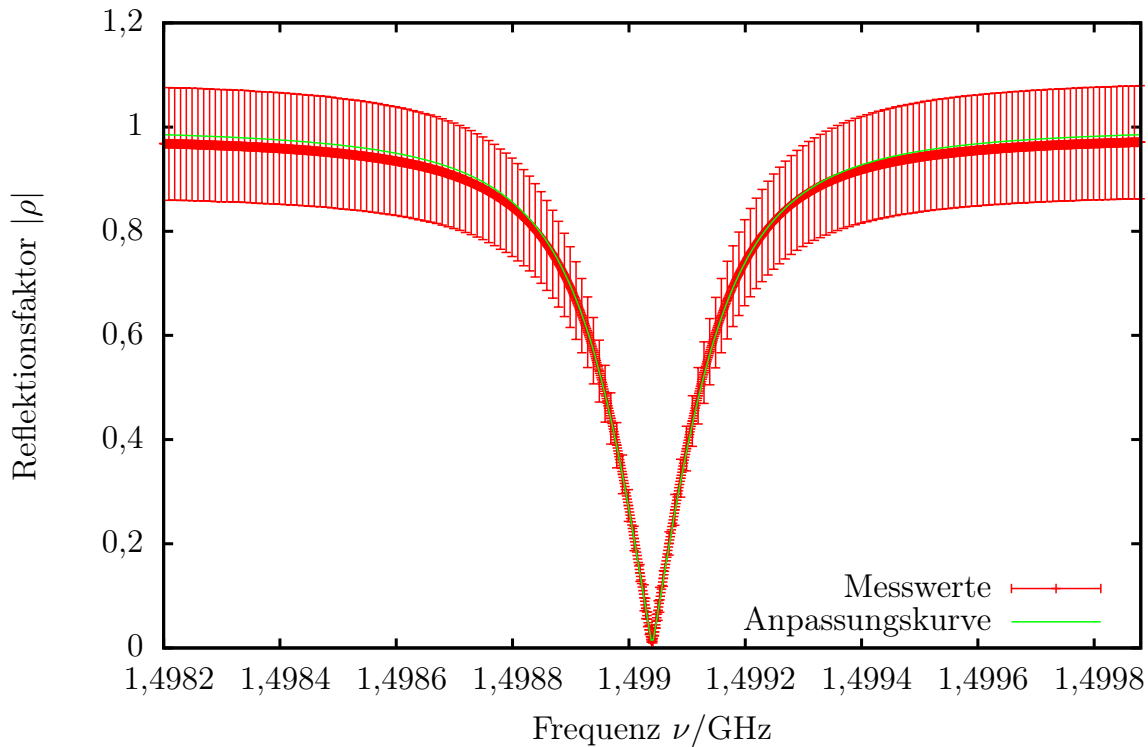


Abbildung 4.5: Finale Resonanzkurve des y -Resonators im eingebauten, abgestimmten und evakuierten Zustand. Es wurde eine Kurve der Funktion (3.3) an die Messdaten angepasst. Als Fehler wurden die Angaben aus dem Handbuch des Netzwerkanalysators [Roh06] verwendet und zur besseren Übersichtlichkeit nur jeder zwanzigste Messwert mit Fehler dargestellt.

4.3 Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Lageresonators

Nachdem der Resonator vollständig verschlossen und die Verkabelung mit der verarbeitenden Elektronik vorgenommen war, konnte in einer kurzen Strahlzeit für das BGO-OD-Experiment die Funktionsfähigkeit des Lageresonators überprüft werden. Dabei bestätigte sich, dass mit zunehmender Strahlablage in beide transversale Richtungen die angezeigte Spannung an den Lock-In-Verstärkern ansteigt. Der Lageresonator verhält sich also wie gewünscht.

Eine Kalibration des Lageresonators, um aus der gemessenen Spannung am Lock-In-Verstärker die exakte Strahlage bestimmen zu können, steht noch aus. Nach einer solchen Kalibration kann den Spannungswerten am Verstärker von der Software eine Position des Strahls zugeordnet werden.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist es gelungen, den Strahllagemonitor für den Einsatz in der externen Strahlführung zum BGO-OD-Experiment an der Beschleunigeranlage ELSA vorzubereiten, einzubauen und in Betrieb zu nehmen. Dazu wurden die Güten der Teilresonatoren gemessen und ein Problem des Kontaktes vom Resonatordeckel mit dem Mantel behoben. Die Koppelnadeln zur Auskopplung des Lagesignals aus dem Resonator wurden angepasst, um einen möglichst hohen Signalpegel zu erhalten. Es wurden Kennlinien der Verstärkermodule für das Nutzsignal aufgenommen und die Verstärkung in die auswertende Software übernommen. Der Resonator wurde in die externe Strahlführung eingebaut, eine temperaturbedingte Verschiebung der Resonanzfrequenz beobachtet und die im Betrieb erforderlichen Parameter eingestellt und vermessen. Bei ersten Tests konnte die Funktion des Lagemonitors überprüft und eine Verschiebung des Nullpunktes von der Sollposition festgestellt werden.

In Zukunft muss noch eine Bestimmung der Kalibrationsfaktoren des Lageresonators erfolgen, damit der Lagemonitor im Strahlbetrieb für das BGO-OD-Experiment verwendet und Strahlverschiebungen durch eine Änderung der Magneto-optik korrigiert werden können.

Literatur

- [Asv98] O. Asvany, „Strahllagemessung in Elektronenbeschleunigern zur Korrektur der Gleichgewichtsbahn und ihre Anwendung zur Minimierung der vertikalen Strahlemittanz“, Universität Bonn, 1998.
- [Bel11] A. Bella, „Setup of a Goniometer System for the Production of Linearly Polarised Photons for the BGO-OD Experiment at ELSA“, Universität Bonn, 2011.
- [Die11] G. Diefenthal, „Testmessungen mit Halbleitersensoren zum Einsatz an ELSA“, Universität Bonn, 2011.
- [Fro09] F. Frommberger, *Elektronen-Strecher-Anlage (ELSA)*, 2009,
URL: <http://www-elsa.physik.uni-bonn.de/Beschleuniger/elsaplan.html>
(besucht am 10.01.2013).
- [Heu11] N. Heurich, „Dämpfung von Strahlinstabilitäten im Elektronenbeschleuniger ELSA mithilfe von Breitbandresonatoren“, Universität Bonn, 2011.
- [Hil06] W. Hillert, *E106 Hohlraumresonatoren/Cavities - Ergänzende Informationen zur Versuchsdurchführung*, Praktikumsanleitung Universität Bonn, 2006,
URL: www-elsa.physik.uni-bonn.de/Lehrveranstaltungen/FP-E106/E106-Er1aeuterungen.pdf (besucht am 25.02.2013).
- [Jac06] J. D. Jackson, *Klassische Elektrodynamik*, 4. Auflage, de Gruyter, 2006.
- [Kla76] G. Klages, *Einführung in die Mikrowellenphysik*, 3. Auflage,
Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, 1976.
- [Kös11] C. Kössler,
„Detektorstudie für einen Vorwärtsdetektor für das BGO-OD-Experiment an ELSA“,
Universität Bonn, 2011.
- [Pus05] T. Pusch, „Lagemessung des extrahierten Strahls am Elektronenbeschleuniger ELSA mittels Hochfrequenzresonatoren“, Universität Bonn, 2005.
- [Pus12] T. Pusch, „Bestimmung von Intensität und Position des extrahierten Elektronenstrahls an ELSA mittels Hochfrequenzresonatoren“, Diss., Universität Bonn, 2012.
- [Roh06] „Betriebshandbuch vektorieller Netzwerkanalysator“, 2006,
URL: http://www.rohde-schwarz.de/file/ZVR-NT_Band2d.pdf (besucht am 07.03.2013).

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Bedanken, die mir die Entstehung meiner Arbeit ermöglicht und mir eine angenehme Zeit bei ELSA geschenkt haben.

Insbesondere gilt mein Dank Herrn PD Dr. Wolfgang Hillert, der mir im Vorfeld die Auswahl meines Themas ermöglicht, mir viel gezeigt und mir während meiner Zeit bei ELSA immer für Fragen beiseite gestanden hat.

Desweiteren danke ich Herrn Prof. Dr. Reinhard Beck für die Übernahme der Kokorrektur meiner Arbeit.

Besonderer Dank gilt allen Mitgliedern der ELSA-Arbeitsgruppe: Nikolas Heurich, Dr. André Roth und Thomas Perlitius für die anregenden Gespräche und das nette Zusammenleben im gemeinsamen Büro. Dr. Thorsten Pusch für die Beantwortung der zahlreichen aufgetauchten Fragen beim Umgang mit dem Lageresonator und der Elektronik. Philipp Hänisch für den Zusammenbau und Umgang mit der Hardware. Herrn Bücking für sein Engagement mit den Elektronikkomponenten. Dr. Frank Frommberger für Fragen beim Umgang mit der Software. Nikolas Heurich, Thomas Perlitius, Oliver Boldt und Jens-Peter Thiry für das Korrekturlesen der Rohversionen meiner Arbeit. Natürlich danke ich auch allen anderen Mitgliedern der Arbeitsgruppe, die mir immer mit gutem Rat und Anregungen beiseite standen, auch wenn sie hier nicht explizit erwähnt wurden.

Ganz besonders danke ich meiner Tochter Verena und meiner Freundin Sandra Unruh, die mir auch in stressigen Zeiten immer wieder ein Lächeln auf die Lippen zauberten.

Ein abschließender Dank gilt meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglichten und mir somit die Grundlage für diese Arbeit schenkten.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beschleunigeranlage ELSA.	2
2.1	Zylindrischer Hohlleiter.	5
2.2	Elektrische Feldverteilung der TM_{010} - und TM_{110} -Mode in einem zylindrischen Resonator	6
3.1	Schnitt durch den Lageresonator	9
3.2	Theoretische Resonanzkurven für verschiedene Koppelfaktoren	11
3.3	Koppelnadel	13
3.4	Resonanzkurven bei Anpassung des Koppelfaktors	14
3.5	Elektronik zur Verstärkung und Weiterverarbeitung des ausgekoppelten Lagesignals . .	16
3.6	Kennlinien der beiden Verstärkermodule.	17
3.7	Kennlinien des Verstärkermoduls für verschiedene Oszillatorleistungen.	17
4.1	Einbauort des Lageresonators.	19
4.2	Foto des eingebauten Lageresonators.	20
4.3	Schwankungen der Resonanzfrequenz im eingebauten Zustand.	21
4.4	Finale Resonanzkurve des x -Resonators.	22
4.5	Finale Resonanzkurve des y -Resonators.	23

Tabellenverzeichnis

3.1	Güte und Resonanzfrequenz unter Laborbedingungen	13
3.2	Angepasste Koppelfaktoren unter Laborbedingungen.	13
4.1	Finale Messwerte der Resonatorkenngrößen.	22