

---

# Symmetrisierung der Feldverteilung in mehrzelligen Hochfrequenzresonatoren

---

Bachelorarbeit in Physik  
von  
Dennis Sauerland

angefertigt am  
Physikalisches Institut der Universität Bonn

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

August 2010



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Die Beschleunigeranlage ELSA . . . . .	1
1.2	Zielsetzung . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Der Hochfrequenzresonator . . . . .	3
2.2	Die Schleifenkopplung . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Der PETRA-Hochfrequenzresonator</b>	<b>6</b>
3.1	Einfluss der Abstimmstempel auf die Feldverteilung . . . . .	7
3.2	Funktionsweise der Resonanz- und Symmetrisierungsregelung . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Die Methode zur Einstellung identischer Koppelfaktoren</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Messungen und Auswertung</b>	<b>15</b>
5.1	Verifizierung der Stempelpositionen . . . . .	15
5.2	Stempelposition und ausgekoppelte Spannung . . . . .	15
5.3	Durchführung der Messung . . . . .	17
5.4	Drehung der Koppelschleife . . . . .	20
5.4.1	PETRA-Cavity 2 . . . . .	22
5.4.2	PETRA-Cavity 1 . . . . .	24
5.5	Einstellung identischer Koppelfaktoren . . . . .	25
5.6	Fehlerdiskussion . . . . .	27
5.6.1	Das Fit-Programm Gnuplot . . . . .	27
5.6.2	Einflüsse der Powermeter auf die Messung . . . . .	27
5.6.3	Die Einflüsse der Zellen 1 und 5 auf die Feldverteilung . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>30</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>31</b>
A.1	Ausblick - Symmetrisierung mittels Temperaturmessungen . . . . .	31
A.2	Daten- und Auswertungstabellen . . . . .	32
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>75</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>76</b>

1. Gutachter: PD Dr. Wolfgang Hillert
2. Gutachter: Prof. Dr. Klaus Desch

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Die Beschleunigeranlage ELSA

Seit dem Jahr 1987 betreibt das Physikalische Institut der Universität Bonn die **Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA** (siehe Abbildung 1.1).

Diese besteht aus dem Stretcherring, dem ein Booster-Synchrotron zur Vorbeschleunigung der Elektronenpakete<sup>1</sup> auf 1,2 GeV vorgeschaltet ist. Das Booster-Synchrotron kann von zwei Linearbeschleunigern gespeist werden. Der Stretcherring ist hierbei für Strahlenergien bis 3,5 GeV konzipiert und ist in der Lage, durch Resonanzextraktion das Tastverhältnis<sup>2</sup> zu erhöhen. Zudem besteht die Möglichkeit, einen spinpolarisierten Elektronenstrahl den Experimente der Mittelenergiephysik zur Verfügung zu stellen [Hil06a].

## 1.2 Zielsetzung

Zur Beschleunigung der Elektronenbunche im Stretcherring werden zwei fünfzellige PETRA<sup>3</sup>-Hochfrequenzresonatoren verwendet. Ziel dieser Arbeit ist es, die Feldverteilung in den fünf Zellen der beiden Hochfrequenzresonatoren zu symmetrisieren, das heißt eine Spiegelsymmetrie der Feldstärken um die mittlere Zelle des Resonators zu erreichen. Hierfür werden Messsignale aus den benachbarten Zellen der mittleren Zelle verglichen und die Geometrie dieser Zellen mit Abstimmstempel durch eine Symmetrisierungsregelung angepasst. Dies führt wiederum zu einer Veränderung der Feldverteilung in dem Hochfrequenzresonator, wodurch es möglich ist, Fehler in der Feldverteilung der fünf Zellen zu kompensieren (Details siehe Kapitel 4). Die Messsignale werden hierbei durch Signalmessschleifen aus der Leistung im Inneren der jeweiligen Zelle ermittelt. Hierbei sind die gemessenen Signale von den Koppelfaktoren der Signalmessschleifen abhängig, wodurch es nötig ist, die Einstellungen für beide Signalmessschleifen aneinander anzupassen. Da die Koppelfaktoren nicht durch eine Messung mit einem Netzwerkanalysator ermittelt werden können, wird ein Verfahren verwendet, welches durch Variation der Abstimmstempel und durch Messung der Signale der Signalmessschleifen einen Abgleich der Koppelfaktoren erreichen kann.

---

<sup>1</sup>in der Beschleunigerphysik auch Bunche genannt

<sup>2</sup>das Verhältnis von Extraktionszeit zur Gesamtzyklusdauer

<sup>3</sup>Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage

# Elektronen-Stretcher-Anlage (ELSA)

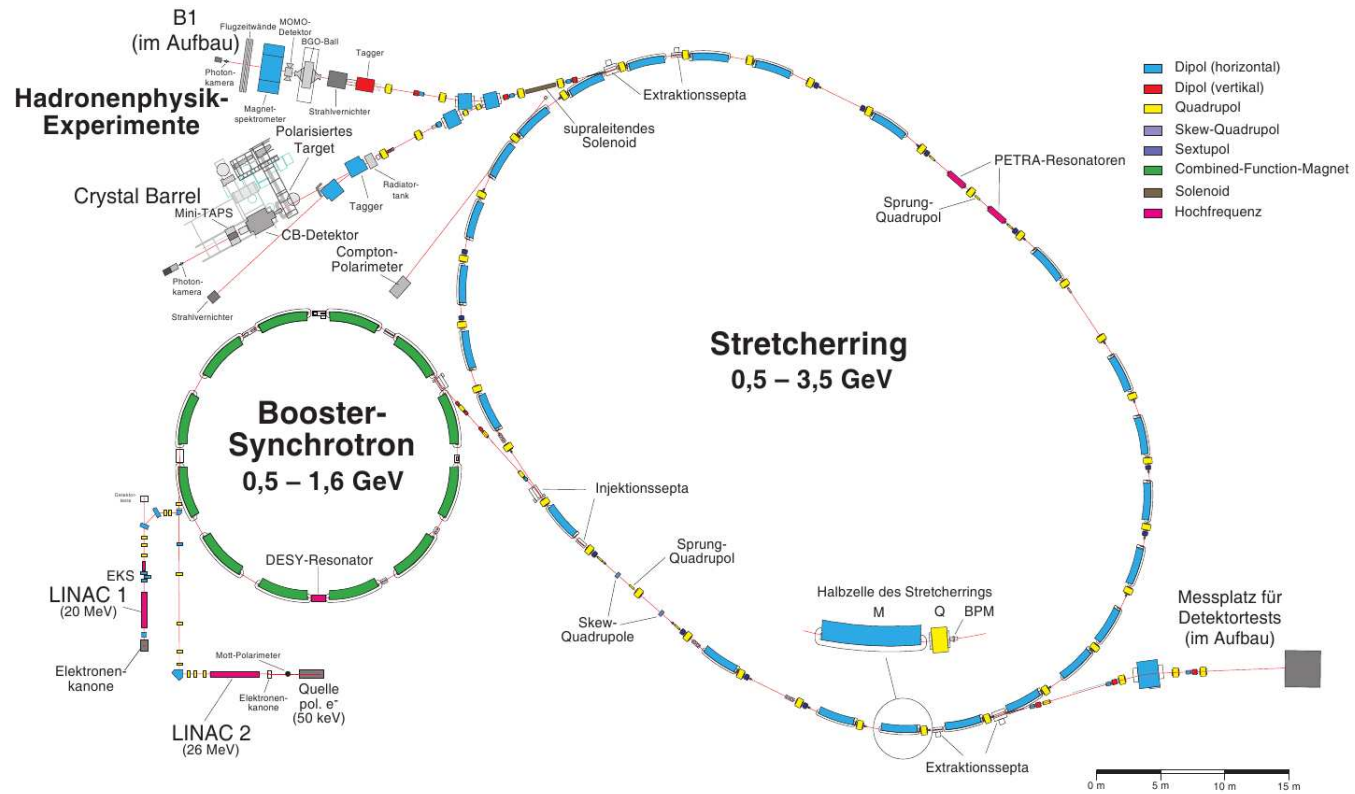


Abbildung 1.1: Ein Lageplan der Beschleunigeranlage ELSA der Universität Bonn (Stand 2010).

## 2 Theoretische Grundlagen

Zum Verständnis der angewendeten Methode zur Bestimmung der Einstellung der Signalmessschleifen und somit der Symmetrisierung der Feldverteilung soll zunächst in die theoretischen Grundlagen eines Hohlraumresonators eingeführt werden. Von besonderem Interesse ist die Funktionsweise einer Signalmessschleife. Mittels dieser können Spannungen, die ein Maß für die elektrische Feldstärke im Resonator sind, ausgekoppelt werden.

### 2.1 Der Hochfrequenzresonator

Ein Hochfrequenzresonator, auch Hohlraumresonator oder Cavity genannt, ist ein leitender, hohler Körper, in dem sich stehende elektromagnetische Wellen bestimmter Frequenzen ausbreiten können. Diese Frequenzen sind ausschließlich von der Geometrie des Resonators abhängig und ergeben sich aus den Lösungen der MAXWELLSchen Gleichungen, wobei die folgenden Randbedingungen gelten: Die senkrechten Komponenten des Magnetfeldes sowie die longitudinalen des elektrischen Feldes müssen auf der Resonatorwand verschwinden, da sonst Ausgleichsströme fließen, welche die für die elektromagnetischen Wellen verantwortliche Ladungsverteilung neutralisieren.

Mit diesen Randbedingungen lassen sich für einen rotationssymmetrischen Hochfrequenzresonator die sogenannten TM-<sup>4</sup> sowie die TE-<sup>5</sup>Moden als Lösung der MAXWELL-Gleichungen finden. Für einen rotationssymmetrischen Resonator mit dem Radius  $R$  und der Länge  $L$  sind diese Lösungen BESSEL-Funktionen  $J_m(x)$   $m$ -ter Ordnung [Hil06b]. Damit ergeben sich für die longitudinalen magnetischen und elektrischen Felder:

$$\text{TM}_{mnp} - \text{Mode:} \quad H_z = H_{mn} J_m(k_c r) \cos(m\varphi) \sin\left(\frac{p\pi}{L} z\right) \exp(i\omega_{mnp} t), \quad (2.1)$$

$$\text{TE}_{mnp} - \text{Mode:} \quad E_z = E_{mn} J_m(k_c r) \cos(m\varphi) \cos\left(\frac{p\pi}{L} z\right) \exp(i\omega_{mnp} t). \quad (2.2)$$

Hierbei bezeichnen die Indizes  $m, n, p$  die Knoten der Feldverteilung in azimuthaler, radialer und longitudinaler Richtung und  $k_c$  ist die kritische Wellenzahl, welche aus der Dispersionsrelation

$$k_c^2 + k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (2.3)$$

folgt, wobei  $c$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist. Die Resonanzfrequenzen  $\omega_{mnp}$  ergeben sich für die TM-Moden zu

$$\omega_{mnp} = c \sqrt{\left(\frac{j_{mn}}{R}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L}\right)^2} \quad (2.4)$$

und für die TE-Moden zu

$$\omega_{mnp} = c \sqrt{\left(\frac{j'_{mn}}{R}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L}\right)^2}. \quad (2.5)$$

$j_{mn}$  bzw.  $j'_{mn}$  stehen hierbei für die  $n$ -te Nullstelle der  $m$ -ten BESSEL-Funktion bzw. die Nullstelle der Ableitung der BESSEL-Funktion. Die Resonanzfrequenz ist somit lediglich von der Geometrie des Resonators abhängig. Entsprechend sind die Feldstärken im Resonator abhängig von der Frequenz der eingespeisten Leistung. Wird eine Hochfrequenzleistung genau auf der Resonanzfrequenz des Resonators eingespeist, so ist die Feldstärke maximal, bei Abweichungen von der Resonanzfrequenz nehmen die Feldstärken in Abhängigkeit von der Güte  $Q$  des Resonators, ab.

<sup>4</sup>Transversal magnetischen Moden; das elektrische Feld ist longitudinal orientiert

<sup>5</sup>Transversal elektrische Moden; das magnetische Feld ist longitudinal orientiert

## 2.2 Die Schleifenkopplung

Zur Messung von Signalen oder zum Einkoppeln von externen hochfrequenten elektromagnetischen Wellen werden in vielen Cavities Schleifenkopplungen verwendet. Diese bestehen aus einer gebogenen Leiterschleife, welche in der Nähe der Wand des Resonators an das magnetische Feld der TM-Moden koppeln kann. Das magnetische Feld erzeugt durch Induktion Ströme in der Leiterschleife, die gemessen werden können oder Ströme erzeugen ein magnetisches Feld, was das vorhandene Feld im Resonator verstärkt. In diesem Abschnitt wird nur eine Signalmessschleife behandelt, welche für die Auskopplung von Signalen aus dem Resonator verwendet wird.

Da der Hohlraumresonator und das Koaxialkabel, welches an die Signalmessschleife zur Messung von Spannungen verbunden ist, nicht identische Impedanzen aufweisen, kann nicht die gesamte Leistung des Hohlraumresonators ausgekoppelt werden, so dass die Leistungen teilweise reflektiert werden. Man definiert den Reflexionsfaktor  $\rho$  und erhält aus ihm die Amplituden- und die Phasenrelation  $\Delta\varphi$  der transmittierten<sup>6</sup> und reflektierten Leistungen:

$$\rho = \frac{U_{\text{refl}}}{U_{\text{trans}}} = |\rho| \exp(i\Delta\varphi). \quad (2.6)$$

Weiterhin definiert man den Koppelfaktor  $\kappa$ , welcher über den Reflexionsfaktor ein Maß für die Stärke der Kopplung von Signalmessschleife und Resonator darstellt [Hil06b]:

$$\kappa = \left| \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \right| \in [0, \infty] \quad (2.7)$$

Wird die Leistung des Hohlraumresonators reflexionsfrei aus der Signalmessschleife geleitet, so ist  $|\rho| = 0$  und somit  $\kappa = 1$ . In diesem Fall spricht man von kritischer Kopplung. Ist  $\kappa < 1$ , nennt man die Kopplung unterkritisch, für  $\kappa > 1$  überkritisch.

Für die Symmetrisierung der Feldverteilung der PETRA-Hochfrequenzresonatoren wird eine Schleifenkopplung mit einem Kopplungsfaktor von  $\kappa \ll 1$  verwendet. Der Grund für die Verwendung einer Schleifenkopplung liegt darin, dass lediglich die Stärke der Felder der Fundamentalmode  $\text{TM}_{010}$ <sup>7</sup> für die Symmetrisierung von Bedeutung sind. Da die elektrische Feldverteilung ein Maximum im Zentrum des Resonators besitzt, in der auch der Strahl den Resonator passiert, ist die Installation einer Stiftkopplung ohne Störung des Strahls kaum möglich. Die Verteilung der magnetischen Felder weist jedoch an der Kammerwand des Resonators ein Maximum auf, wodurch eine Schleifenkopplung auf technischem Wege relativ einfach zu realisieren ist. Ein Koppelfaktor von  $\kappa \ll 1$  wird gewählt, da bei einem Koppelfaktor nahe 1 ein Großteil der Leistung ausgekoppelt würde, wodurch kaum Feldenergie innerhalb des Resonators verbliebe. Dies würde zu einer signifikanten Verringerung der Beschleunigungsspannung führen.

Die Integration über die Stärke des longitudinalen elektrischen Feldes im Resonator entspricht einer Spannung  $U_{\text{Res}}$ , welche durch die Relation

$$P_V = \frac{U_{\text{Res}}^2}{2R_S} \quad (2.8)$$

mit der Verlustleistung im Resonator  $P_V$  sowie der Shuntimpedanz  $R_S$  verknüpft ist [Hil06b]. Die von außen durch eine Signalmessschleife zugängliche Größe ist die Spannung

$$U_{\text{ext}} = \sqrt{2Z_0 \cdot P_{\text{ext}}}. \quad (2.9)$$

<sup>6</sup>D. h. die messbare Spannung an der Signalmessschleife bzw. am Koaxialkabel.

<sup>7</sup>Diese Mode wird zur Beschleunigung der Elektronenbunche in ELSA verwendet.



$Z_0$  ist die Impedanz des Koaxialkabels von typischerweise  $50\ \Omega$  und  $P_{\text{ext}}$  die zur Spannung  $U_{\text{ext}}$  korrespondierende die Leistung. Mit dem Koppelfaktor  $\kappa(x)$  ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Resonatorverlustleistung  $P_V$  und externer Leistung an der Signalmessschleife [Pus05]:

$$P_{\text{ext}} = \kappa(x) \cdot P_V. \quad (2.10)$$

Mit den Gleichungen (2.8) und (2.10) ergibt sich für die Spannung an der Signalmessschleife

$$U_{\text{ext}}(x) = \sqrt{\frac{Z_0}{R_S} \kappa(x)} \cdot U_{\text{Res}}. \quad (2.11)$$

Da die Signalmessschleifen der PETRA-Cavities um ihre Längsachse drehbar sind, ist der Koppelfaktor abhängig von einem Winkel  $x$ . Es lässt sich durch Drehung der Signalmessschleife die Amplitude der ausgekoppelten Hochfrequenz variieren. Steht die Signalmessschleife in einem rechten Winkel zu den Magnetfeldlinien, ist die gemessene Spannung maximal, steht sie in einem Winkel von  $0^\circ$ , also parallel zu den Feldlinien, trägt keine Fläche der Signalmessschleife bei, die gemessene Spannung ist minimal. Dreht man die Signalmessschleife um einen Winkel von  $180^\circ$ , erhält man die gleiche Spannung mit umgekehrtem Vorzeichen.

Somit hängt der winkelabhängige Koppelfaktor von einem maximalen Koppelfaktor  $\kappa^0$  ab. Zudem beeinflusst ein mechanisches Gewinde mit einer Übersetzung  $k$  die Drehung der Koppelschleife, so dass sich die Proportionalität zwischen  $U_{\text{ext}}$  und  $U_{\text{Res}}$  aus Gleichung (2.11) allgemeiner als

$$U_{\text{ext}}(x) \sim G(\kappa^0, k, x) \cdot U_{\text{Res}}. \quad (2.12)$$

schreiben lässt.



Abbildung 3.1: PETRA-Resonatoren 1 und 2 im Stretcherring der Universität Bonn, ELSA.

### 3 Der PETRA-Hochfrequenzresonator

Die PETRA-Resonatoren des DESY (**D**eutsches **E**lektronen-**S**ynchrotron) sind durch besonders hohe Shuntimpedanz und somit hohe Beschleunigungsspannungen bei einer Hochfrequenz von 500 MHz gekennzeichnet [GSSZ77], [MHF10]. Der aus Kupfer hergestellte Resonator hat eine unbelastete Güte von  $Q \approx 29500$  sowie eine Shuntimpedanz von  $R_S \approx 15 \text{ M}\Omega$ . Bis zu 100 kW Vorlaufleistung können in Zelle 3 mittels einer Schleifenkopplung eingekoppelt werden. Dies ermöglicht Beschleunigungsspannungen von 1,7 MV. Zwei an Zelle 2 und 4 angebrachte Stempel<sup>8</sup>, fahrbare leitende Kolben, ermöglichen es, die Resonanzfrequenz des Resonators um einige hundert kHz zu verstimmen. Für weitere Regelungen sind in den Zellen 2, 3 und 4 jeweils Signalmessschleifen vorhanden. Zudem wurden Elektronik-Komponenten wie die sogenannte HF-Cassette, die Regel-Cassette sowie die Cavity-Kontrolle entwickelt, um diese Regelaufgaben zu übernehmen sowie die Abstimmstempel anzusteuern.

Zwei dieser PETRA-Resonatoren werden im Stretcherring der Universität Bonn verwendet (siehe Abbildung 3.1). Sie übernehmen hier die Funktion der Beschleunigung der aus dem Synchrotron mit einer Energie von 1,2 GeV injizierten Elektronenbunche auf ihre Extraktionsenergie<sup>9</sup> sowie der Kompensation von Synchrotronstrahlungsverlusten. Auch an ELSA wurde die Resonanzregelung (Details in Abschnitt 3.2) mit Hilfe der Regelkassette und Cavity-Kontrolle realisiert. Da die Koppelfaktoren der Signalmessschleifen nicht bekannt sind, wird die Symmetrisierungsregelung jedoch momentan nicht verwendet.

<sup>8</sup>nachfolgend als  $S_1$  und  $S_2$  bezeichnet

<sup>9</sup>typischerweise 3,2 GeV

### 3.1 Einfluss der Abstimmstempel auf die Feldverteilung

Die Abstimmstempel, welche in die Zellen 2 und 4 der PETRA-Cavity integriert sind, sind für die Variation der Resonanzfrequenz des Resonators durch Veränderung der Zellengeometrie verantwortlich. Diese sind in Kombination mit der HF- und der Regel-Cassette sowie der Cavity-Kontrolle für die frequenzabhängige Abstimmung des Resonators gegenüber äußeren Störfaktoren essenziell.

Der Abstimmstempel besteht aus einem in den Resonator integrierten Kolben mit einem Durchmesser von 115 mm [MHF07]. Dieser Kolben ist drehbar in einem mit dem Resonator verbundenen Gewinde eingefasst. An der Stelle, an der der Kolben aus dem Resonator und dem Gewinde hervorsteht, ist dieser an einem Zahnrad angebracht, welches den um seine Längsachse drehbaren Stempel mit einem Schrittmotor verbindet. Der Schrittmotor kann über die Cavity-Kontrolle durch ausgegebene  $f_{\min}$ - oder  $f_{\max}$ -Pulse gesteuert werden. Die Stempelposition ist in einem Bereich von +40 bis  $-20\text{ mm}^{10}$  variierbar. Dieser Bereich ist durch Potentiometer innerhalb der Cavity-Kontrolle sowie durch Veränderung der Position eines mechanischen Schalters einstellbar. Dieser Schalter ist auf einer mit dem Gewinde fixierten Schiene befestigt. Ein Taster, welcher hingegen mit dem Stempel verbunden ist, fährt über diese Schiene und kann den mechanischen Schalter bei einer eingestellten Stempelposition auslösen, wodurch die Stempelbewegung unterbrochen wird. Zudem ist diese Schiene mit einem Potentiometer verbunden, welches ebenfalls durch diesen Taster gesteuert wird. Durch den Spannungsabfall über diesem Widerstand kann an die SPS <sup>11</sup> eine zur Stempelposition korrespondierende Spannung weitergegeben werden, welche dort, auf Basis der Kennlinie des Potentiometers in die Position des Stempels zurückgerechnet werden kann. Diese Position wird dann an das ELSA Kontrollsystem weitergeben.

An der Cavity-Kontrolle ist es möglich, durch Betätigen eines Tasters kurze  $f_{\min}$ - oder  $f_{\max}$ -Pulse an die Stempel zu geben oder dauerhaft eine Fahrriichtung der Stempel festzulegen, bis die Position  $f_{\min}$  oder  $f_{\max}$ , also die größtmögliche Stempelposition außerhalb oder innerhalb der Zelle, erreicht ist. Diese Position wird durch Leuchtdioden an der Cavity-Kontrolle angezeigt. Über einen Schalter lässt sich die Stempelsteuerung von "Halle" auf "Fern" stellen, also zwischen manueller Steuerung von der Cavity-Kontrolle vor Ort zur Steuerung durch das Kontrollsystem umstellen. Im Kontrollsystem besteht nur die Möglichkeit durch dauerhafte  $f_{\min}$ - oder  $f_{\max}$ -Pulse die Stempel zu steuern. Zusätzlich lässt sich jedoch durch Schalten eines Relais in der Cavity-Kontrolle die Ansteuerung des Stempels der Zelle 4, also  $S_2$ , unterbrechen und so die Position fixieren.

Nach Abschnitt 2.1 legt lediglich die Geometrie die Resonanzfrequenz der einzelnen Zelle fest. Bei mehrzelligen Hohlraumresonatoren koppeln die einzelnen Hohlraumresonatoren jedoch an die benachbarten Zellen und die in eine Zelle eingekoppelte Leistung verteilt sich auf die einzelnen Resonatoren entsprechend deren Kopplungen und Geometrien. Bei den fünfzelligen PETRA-Cavities wird die Leistung des Klystrons mit einer Schleifenkopplung in Zelle 3, der mittleren Zelle, eingekoppelt. Im Fall, dass alle Zellen nahezu identisch aufgebaut sind und zwischen jeder Zelle der Koppelfaktor  $\kappa = 0,85$  herrscht [MHF10], wird im Gleichgewichtszustand<sup>12</sup> die Zelle 3 die stärksten Felder aufweisen; die Zellen 2 und 4 hätten dementsprechend identische Feldstärken, welche jedoch schwächer als die der Zelle 3 sind. Die Zellen 1 und 5 hätten weiterhin identische schwächere Felder. In diesem Fall spricht man von einer symmetrischen Feldverteilung in dem mehrzelligen Hohlraumresonator. Die statische Feldverteilung ist spiegelsymmetrisch zur mittleren Zelle. Eine Asymmetrie liegt somit vor, wenn im obigen Fall Zelle 4 eine höhere Feldstärke als Zelle 2 aufweisen würde. Analoges gilt für die Zellen 1 und 5.

<sup>10</sup>"+" bezeichnet eine Stempelposition innerhalb des Resonators, "-" eine Position ausserhalb

<sup>11</sup>Speicherprogrammierbare Steuerung

<sup>12</sup>Die Zeit nach dem Einschwingvorgang, in dem ohmsche Verluste und eingekoppelte Leistung im Gleichgewicht zueinander stehen.

Auf Grund von Fertigungsfehlern oder Abnutzungserscheinungen<sup>13</sup> kann es jedoch vorkommen, dass die Geometrie der einzelnen Zellen oder die Kopplungen der Zellen untereinander nicht spiegelsymmetrisch um die mittlere Zelle sind. Demzufolge tritt eine Asymmetrie in der Feldverteilung der Zellen auf.

Intuitiv lässt sich dies durch die Betrachtung von drei einzelnen Resonatorzellen nachvollziehen, welche nicht miteinander gekoppelt sind, jedoch von der gleichen Hochfrequenz gespeist werden. Ist der Innenraum einer Zelle "kleiner" als die der anderen und wird mit derselben Frequenz der Vorlaufleistung gespeist, hat diese auf Grund der geometrischen Randbedingungen eine andere Resonanzfrequenz (siehe Abschnitt 2.1) und somit eine andere Amplitude der angeregten Schwingung. Wird die Hochfrequenz an die Resonanzfrequenz der zwei anderen Zellen angepasst, so ist der Betrag der Feldstärke in der kleineren Zelle geringer und die Feldverteilung ist asymmetrisch.

Somit lässt sich mit Abstimmstempeln, welche die Geometrie einer Zelle verändern, auch die Feldverteilung des Resonators beeinflussen.

In der Praxis ist diese Betrachtungsweise jedoch nur bedingt umsetzbar, da die Zellen untereinander gekoppelt sind und weitere Effekte<sup>14</sup> eine Rolle bei der Feldverteilung spielen. Zudem liegen mit den PETRA-Cavities fünfzellige Resonatoren vor. Aufgrund der Komplexität empfiehlt es sich, Simulationen mit dem Programm CST<sup>15</sup> Microwave Studios<sup>®</sup> durchzuführen, um die Feldverteilung im Detail zu studieren.

### 3.2 Funktionsweise der Resonanz- und Symmetrisierungsregelung

Da jeder PETRA-Hochfrequenzresonator eine hohe, unbelastete Güte von  $Q \approx 29500$  aufweist und dementsprechend durch eine schmalbandige Resonanzkurve (Halbwertsbreite  $\approx 51$  kHz) charakterisiert ist, ist die Akzeptanz von Frequenzen, welche von der Resonanzfrequenz abweichen sehr gering [GSSZ77]. Bei Vorlaufleistungen wie im normalen ELSA-Betriebs von  $P_V \approx 40$  bis 90 kW können so bei einer Verstimmung der Resonanzfrequenz von wenigen kHz hohe reflektierte Leistungen auftreten.

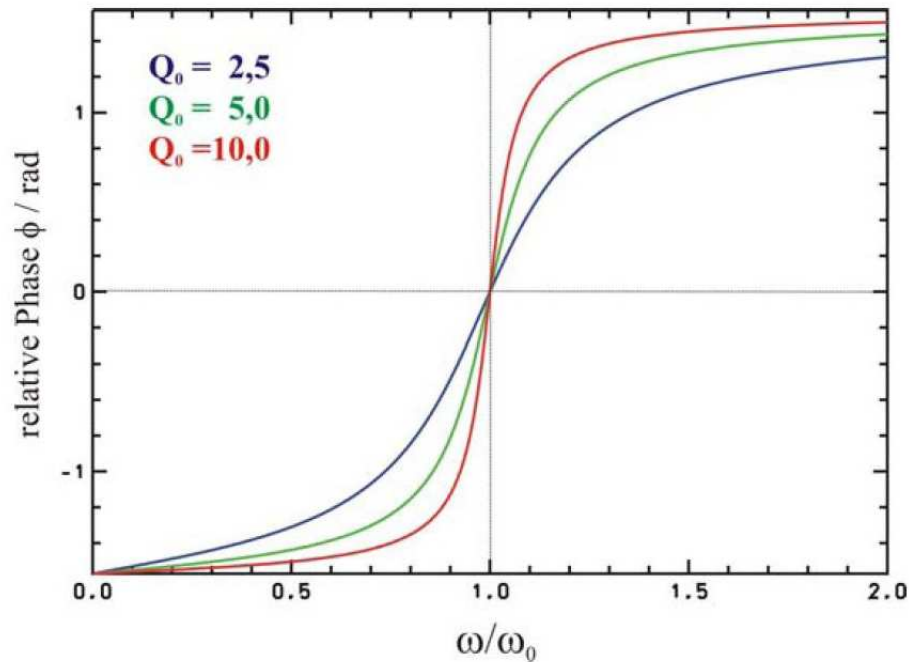
Diese Verstimmungen kommen vor allem durch die thermische Ausdehnung des Resonators bei Erhöhung der Vorlaufleistung zustande. Hierbei bewirkt die Erhöhung der Vorlaufleistung auf der Resonanzfrequenz höhere ohmschen Verluste, die zu einer Erwärmung des Resonators führen. Da die Resonanzfrequenz der angeregten Moden von der Geometrie der Resonatorinnenwand abhängt, tritt durch die Erwärmung eine thermische Ausdehnung des Materials auf, welche die Geometrie des Resonators und somit die Resonanzfrequenz ändert. Bei Erhöhung der Vorlaufleistung verschiebt sich die Resonanzfrequenz somit hin zu kleineren Frequenzen, bis ein thermisches Gleichgewicht zwischen dem Erwärmen der Wände und der Kühlung auftritt. Die Zeit zwischen der Erhöhung der Vorlaufleistung von  $P_V = 0$  kW auf beispielsweise 6,5 kW und dem Erreichen eines thermischen Gleichgewichts (und somit auch einer annähernd statischen Resonanzfrequenz) dauert erfahrungsgemäß etwa 30 Minuten und ist durch hohe reflektierte Leistungen im Bereich von  $\approx 3$  kW charakterisiert, da sich die Resonanzfrequenz von der Frequenz der HF-Einspeisung entfernt. Daher ist die Verwendung einer Resonanzregelung für den Beschleunigerbetrieb notwendig.

Da sich durch die Stempel die Geometrie der Resonatorzellen 2 und 4 durch Variation der Stempelpositionen beeinflussen lässt, ist es möglich, durch die Resonanzregelung die Resonatorgeometrie so zu verändern, dass die Resonanzfrequenz konstant bleibt. Somit sind die reflektier-

<sup>13</sup>Durch Funkenüberschläge innerhalb des Resonators und Anlagerung von Fremdatomen auf dem Kupfer des Resonators.

<sup>14</sup>z.B. Reduzierung des Feldes durch die Beschleunigung von Elektronenbunchen im Beschleunigerbetrieb

<sup>15</sup>Computer Simulation Technology

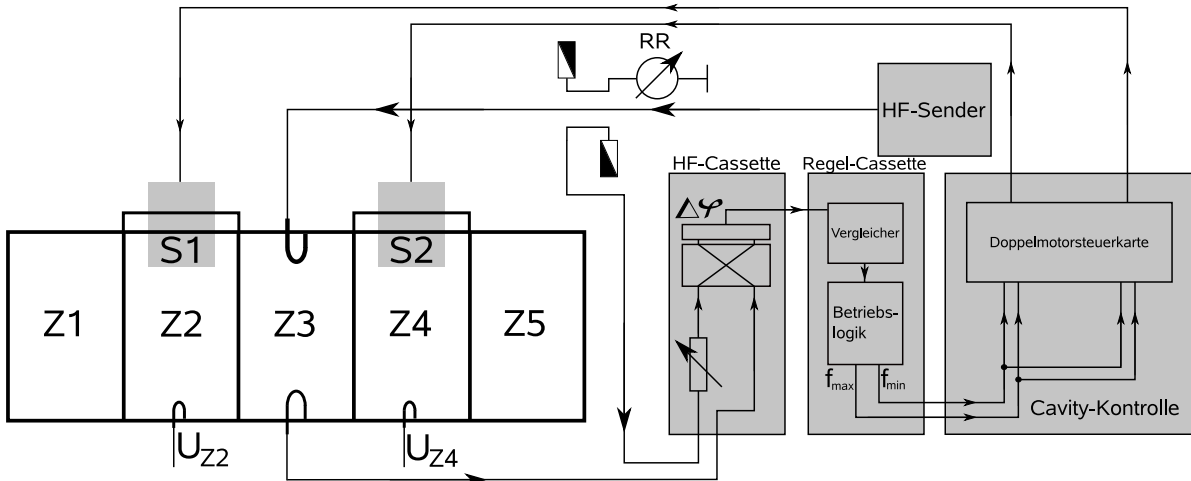


**Abbildung 3.2:** Phasenbeziehung zwischen einlaufender und ausgekoppelter Spannung bei Variation der Frequenz  $\omega$  der einlaufenden Spannung um die Resonanzfrequenz  $\omega_0$  des Resonators bei verschiedenen Güten  $Q_0$  [Hil06b].

ten Leistungen bei Erhöhung der Vorlaufleistung minimal. Für die Resonanzregelung verwendet man die Eigenschaften der Phasenbeziehung zwischen der in den Resonatorspannung sowie der aus Zelle 3 ausgekoppelten Spannung. Wie in Abbildung 3.2 zu erkennen ist, beträgt die Phasendifferenz  $\Delta\varphi = 0$  im Falle der Resonanz. Die Regelung vergleicht die Phasendifferenz der einlaufenden und der ausgekoppelten Spannung und variiert die Stempelpositionen derart, dass sie den Wert Null erreicht.

Konkret wird dies durch den in Abbildung 3.3 dargestellten Aufbau erreicht. Die HF-Cassette ermittelt mit Hilfe eines sogenannten Mischers die Phasendifferenz der beiden Signale. Weitere durch den Mischer auftauchende, amplitudenabhängige Signale sowie ein Signal, welches der Summe der Phasen entspricht, werden mit Hilfe von Bandpassfiltern deutlich abgeschwächt. Mittels eines Phasenschiebers kann die Phase des aus Zelle 3 ausgekoppelten Signals variiert werden, um mögliche Phasendifferenzen durch unterschiedliche Kabellängen zu kompensieren. Die Phasendifferenz wird nun in der Betriebslogik der Regel-Cassette in  $f_{\min}$ - oder  $f_{\max}$ -Pulse umgewandelt. Diese Pulse werden von der Motorsteuerkarte der Cavity-Kontrolle interpretiert und in eine Pulsreihenfolge für die Stempelmotoren umgewandelt (siehe dazu [MHF07]). Hierbei ist zu bemerken, dass die beiden Stempel nicht unabhängig voneinander durch diese Resonanzregelung angesteuert werden können, sondern jeweils durch die Betriebslogik symmetrisch angesteuert werden. Jedoch wurde ein zusätzliches Relais in die Cavity-Kontrolle integriert, welches es ermöglicht, dass der Stempel 2 keine Steuerungspulse mehr erhält und somit fixiert ist. Zusätzlich zu der Phasenregelung ist in der Cavity-Kontrolle eine Symmetrisierungsregelung integriert. Diese Regelung ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

Bei identisch eingestellten Koppelschleifen, das heißt, wenn die ausgekoppelten Spannungen der Hochfrequenz in den Zellen 2 und 4 zueinander korrekt in Relation stehen und damit die Spannungen  $U_{Z2}$  und  $U_{Z4}$  ein richtiges Maß für die Feldstärke in der Zelle 2 und 4 sind, wird mit Hilfe einer Operationsverstärkerschaltung die Differenz dieser Spannungen gebildet. Hierbei



**Abbildung 3.3:** Schema der Resonanzregelung eines PETRA-Cavitys an ELSA. Z1 bis Z5 entsprechen den Zellen des PETRA-Cavitys. S1 und S2 bezeichnet die Stempel 1 und 2.

wird die Operation

$$U_{\text{diff}} = \frac{(R_1 + R_2)R_4}{(R_3 + R_4)R_1} U_{Z4} - \frac{R_2}{R_1} U_{Z2} = U_{Z4} - U_{Z2} \quad (3.1)$$

durchgeführt [Wik]. Da alle Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  und  $R_4$  gleich groß sind, wird nur die Differenz der Eingangsspannungen  $U_{Z2}$  und  $U_{Z4}$  ausgegeben.

Damit die Symmetrisierungsregelung nicht ständig die Position eines Stempels verändert und damit die Resonanzfrequenz variiert, wodurch wiederum die Resonanzregelung nachregeln würde, wurde ein Diodennetz zwischengeschaltet. Die Schalter  $j_1$  und  $k_1$  sind vor Beginn eines Regelungsprozesses geöffnet. Da über jede Diode eine bestimmte Spannung abfällt<sup>16</sup>, muss die Spannungsdifferenz mindestens das Doppelte von  $U_{\text{Diode}}$  betragen.

Ist diese Differenz erreicht, wird das Signal über eine Zeitkonstante  $\tau = R_5 \cdot C_1$  wie folgt integriert

$$U_{\text{out}} = -\frac{1}{R_5 \cdot C_1} \cdot \int_0^t U'_{\text{diff}}(\tau) \, d\tau + U_{\text{out}}(0), \quad (3.2)$$

um starke Fluktuationen der Differenzspannung zu glätten [Wik]. Nun wird entsprechend des Vorzeichens des Differenzsignals, selektiert durch die Dioden, einer der Transistoren angesteuert. Durch den Spannungsabfall über dem angesteuerten Transistor wird das Relais  $J$  oder  $K$  angesteuert, wodurch alle  $j_i$  oder  $k_i$  Schalter geschlossen werden. Dadurch wird zum einen das Relais  $L$  angesteuert, welches dafür verantwortlich ist, dass mittels Leuchtdioden angezeigt wird, ob die Symmetrisierungsregelung arbeitet. Zum anderen wird das Diodennetz überbrückt, wodurch auch kleinere Differenzspannungen zu einer Schaltung der Relais führen können. Durch Schließen der Schalter  $j_3$  oder  $k_3$  können nun Spannungspulse, welche ständig durch den 300 Hz-Generator ausgesendet werden, zu der Motorsteuerkarte eines Stempels gelangen und dort in Pulse für den Schrittmotor umgewandelt werden.

Die Symmetrisierungsregelung fährt einen Stempel somit zu der Position, in der die Eingangsspannungen  $U_{Z2}$  und  $U_{Z4}$  den Wert Null erreicht, hingegen fährt die Resonanzregelung die beiden Abstimmstempel auf die Position in der die Phasenrelation  $\Delta\varphi = 0$  erreicht ist. Da sich beide

<sup>16</sup>Es handelt sich um den Diodentyp *OA182*. Über diesen Typ existieren keine Datenblätter, bei Typ *OA180* liegt ein Spannungsabfall von  $U_{\text{Diode}} \approx 0,75 \text{ V}$  vor [BKJ].

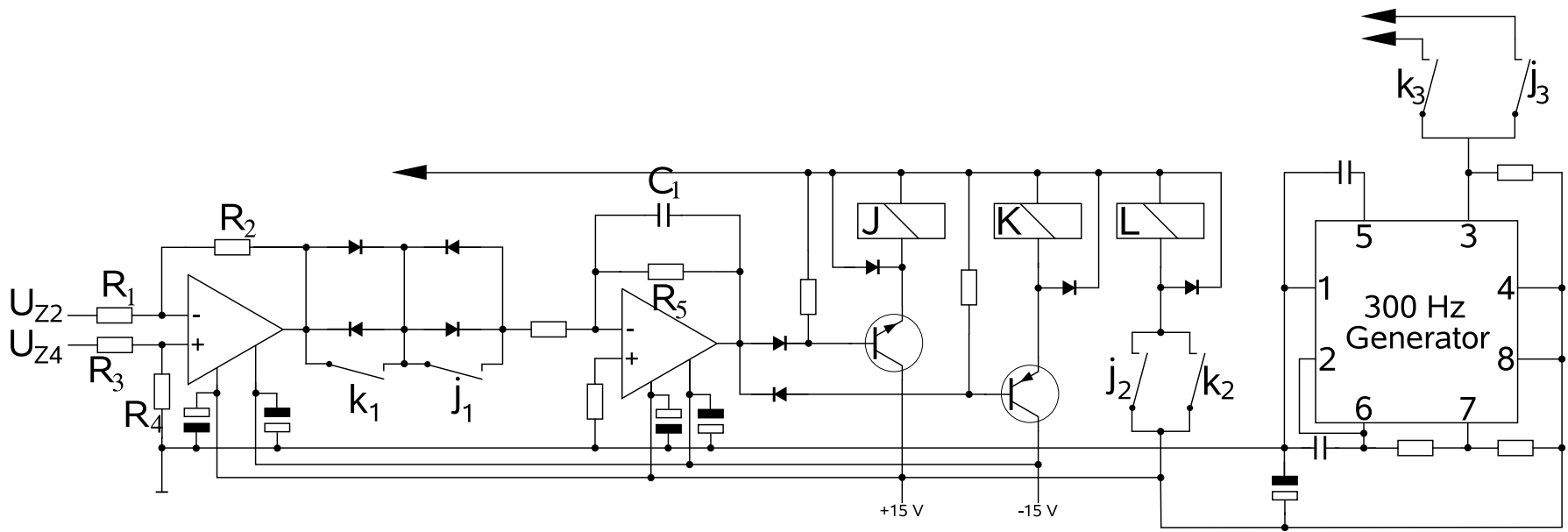


Abbildung 3.4: Schaltbild der Symmetrisierungsregelung der Cavity-Kontrolle. Relais  $J$ ,  $K$  und  $L$  schalten die betreffenden Schalter  $j_i$  und  $k_i$ .

Regelungen bei dauerhafter Ansteuerung der Stempel antagonistisch verhalten, dient das Di-  
odennetz dazu der Resonanzregelung eine höhere Priorität in den Regelungsprozessen zu geben.



## 4 Die Methode zur Einstellung identischer Koppelfaktoren

Die Cavity-Kontrolle ist in der Lage, durch die Signalmessschleifen der Zellen 2 und 4 der PETRA-Resonatoren bei gleichen Koppelfaktoren, die Feldstärken der Zellen 2 und 4 anzugleichen und somit zumindest in den mittleren Zellen des Resonators eine symmetrische Feldverteilung zu erreichen. Da sich mit Variation der Koppelfaktoren der Signalmessschleifen die ausgekoppelten Leistungen und somit die messbare Spannung variieren lassen, sind identische Koppelfaktoren für ein korrektes Funktionieren der Symmetrisierungsregelung erforderlich. Auf Grund der hohen Feldstärken innerhalb des PETRA-Resonators beim normalen Betrieb von ELSA sind nur kleine Spannungen und somit kleine Koppelfaktoren  $0 < \kappa \ll 1$  für Signalmessungen möglich. Da ein Großteil der Leistung im Resonator reflektiert wird und nur ein Bruchteil transmittiert wird, ist eine Bestimmung der Koppelfaktoren mit dem Netzwerkanalysator durch die Messung des Reflexionsfaktors nicht sinnvoll.

Die folgende Methode, die auch zur Symmetrisierung der siebenzelligen Cavities des PETRA-III-Beschleunigers am DESY verwendet wird [Eis09] kommt zum Einsatz um verschiedene Koppelfaktoren oder Dämpfungen der Signalmessschleifen und Kabel auszugleichen, welche zu einer fehlerhaften Symmetrisierungsregelung führen würden. Bei der am DESY verwendeten Methode resultiert durch kleine Variationen der Positionen der einzelnen Stempel eine lineare Relation zwischen Positionsänderung und gemessener Spannung an den Signalauskopplungen. An diesen Verlauf wird empirisch eine lineare Funktion approximiert, die Steigung dieser Funktion wird nun als Korrekturfaktor für die gemessene Spannung der jeweils anderen Signalmessschleifen verwendet. Ein ähnliches Verfahren, welches an die Rahmenbedingungen bei ELSA angepasst ist, wird bei dieser Arbeit für die Einstellung der Koppelfaktoren der Signalmessschleifen verwendet: Es wird eine einmalige Feinjustage der Koppelfaktoren der Signalmessschleifen unter Berücksichtigung der Kabeldämpfung vorgenommen. Wird die Position eines Stempels um die feste Position des anderen Stempels gefahren, verändert sich der Betrag der Feldstärke in der Zelle des fahrenden Stempels. Bei kleinen Variationen wird diese Änderung der Feldstärke in den Zellen wie folgt als linear angenommen:

$$U_{Z2}(\Delta S) = \frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)} \cdot \Delta S + U_{Z2}(\Delta S = 0) \quad (4.1)$$

$$U_{Z4}(\Delta S) = \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} \cdot \Delta S + U_{Z4}(\Delta S = 0) \quad (4.2)$$

Hierbei werden die Terme  $U_{Zi}(\Delta S = 0)$  als Ordinatenspannung, somit als Feldstärke bei gleicher Stempelposition, und  $\frac{d U_{Zi}}{d (\Delta S)}$  als Steigung des linearen Zusammenhangs bezeichnet, wobei  $\Delta S = S_1 - S_2$  die Differenz der Stempelpositionen ist. Da bei konstanter Vorlaufleistung und geeigneter Wahl der Frequenz die über alle Zellen integrierte Feldstärke konstant ist, wandert das verdrängte Feld teilweise in die Zelle, in der der Stempel fixiert ist, so dass die Steigungen der Signalmessschleifen der Zellen 2 und 4 immer mit entgegengesetztem Vorzeichen versehen sind. Im Fall eines symmetrischen Hochfrequenzresonators mit identischen Koppelfaktoren und Kabeldämpfungen der Signalmessschleifen gelten die Relationen

$$\frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)} = - \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} \quad (4.3)$$

sowie

$$U_{Z2}(\Delta S = 0) = U_{Z4}(\Delta S = 0). \quad (4.4)$$

Wie im Abschnitt 3.1 beschrieben ist bei einer vorliegenden Asymmetrie der mehrzelligen Resonatoren die Relation (4.4) nicht mehr korrekt, da bei symmetrischer Stempelposition das Feld

in einem der beiden Zellen auf Grund unterschiedlicher ‘‘Größe’’ der Zellen unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Der Einfluss der Asymmetrie der Feldverteilung auf die Steigung führt dazu, dass unterschiedliche Steigungen ermittelt werden, wenn man den Stempel  $S_1$  um den fixierten Stempel  $S_2$  bewegt, nachfolgend als  $S_1$ -Variation genannt, oder in umgekehrter Konfiguration,  $S_2$ -Variation genannt, verfährt.

Da zwischen den Signalmessschleifen des PETRA-Hochfrequenzresonators und dem Messstand zusätzliche Kabel eingesetzt werden und somit Kabeldämpfung das Signal verfälschen, ist der Einfluss der Kabeldämpfung zu beruckichtigen, die durch das LAMBERT-BEER-Gesetz

$$U(d) = U_0 \cdot e^{-\sigma d} \quad (4.5)$$

beschrieben wird. Hierbei ist  $U_0$  die Spannungsamplitude am Ursprung des Signals,  $\sigma$  die Dämpfungskonstante und  $U(d)$  die Spannungsamplitude nach der Kabellänge  $d$ . Da die Kabellänge  $d$  in den Messungen statisch ist, das Kabel also nicht ausgetauscht wird, wird der Ansatz

$$\gamma(d) = e^{-\sigma d} \quad (4.6)$$

gewählt. Somit wird die gemessene Spannung um den statischen Faktor  $\gamma < 1$  reduziert. Für das lineare Verhältnis zwischen Stempeldifferenz  $\Delta S$  und Signalmessschleifen-Spannung  $U_{Zi}$  ergibt sich somit

$$U_{Zi}(\Delta S, d) = \gamma(d) \left( \frac{d U_{Zi}}{d (\Delta S)} \cdot \Delta S + U_{Zi}(\Delta S = 0) \right). \quad (4.7)$$

Die Steigung und die Ordinate werden also durch die Dämpfung beeinflusst und müssen korrigiert werden.

In Gleichung (2.11) wurde bereits der Einfluss des Winkels  $x$  der Koppelschleife im Hochfrequenzresonator auf die gemessene Spannung an den Signalmessschleifen eingeführt. Die Änderung der Position der Signalmessschleifen führt zu Konsequenzen für die Methode:

$$U_{Zi}(\Delta S, d, x) = G(\kappa^0, k, x) \cdot \gamma(d) \cdot \left( \frac{d U_{Zi}}{d (\Delta S)} \cdot \Delta S + U_{Zi}(\Delta S = 0) \right). \quad (4.8)$$

Auf diese Weise lässt sich durch Drehung der Signalmessschleife die Steigung der linearen Funktion  $U_{Zi}(\Delta S, x)$  beeinflussen.

Ziel der Methode ist es nun, die Steigungen der linearen Funktionen für die beiden Signalmessschleifen anzugleichen. Unter Korrektur der Kabeldämpfung  $1/\gamma_{Zi}$  muss somit für die Zellen 2 und 4 die Relation

$$G(\kappa_{Z2}^0, k_{Z2}, x_{Z2}) \cdot \frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)} = - G(\kappa_{Z4}^0, k_{Z4}, x_{Z4}) \cdot \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} \quad (4.9)$$

für gleiche Koppelfaktoren der Signalmessschleifen gelten. Hierbei werden die Unterschiede der Koppelschleifen ( $\kappa_{Z2}^0 \neq \kappa_{Z4}^0$ ) sowie unterschiedliche Stellschraubengewinde ( $k_{Z2} \neq k_{Z4}$ ) durch unterschiedliche Winkel  $x_{Z2} \neq x_{Z4}$  der Signalmessschleifen zu den magnetischen Feldlinien kompensiert, so dass beide Koppelfaktoren dieselben Werte annehmen.

Unter dem Einfluss der Asymmetrie wird diese Relation verfälscht, da beispielweise bei der  $S_1$ -Variation die Steigung verringert wird, während bei der  $S_2$ -Variation die Steigung vergrößert wird. Durch Mittelung dieser Werte kann der Einfluss der Asymmetrie jedoch eliminiert werden. Das Ziel dieser Arbeit ist es somit, durch Veränderung eines Koppelfaktors unter Korrektur der Dämpfung die Bedingung (4.9) zu realisieren.

## 5 Messungen und Auswertung

### 5.1 Verifizierung der Stempelpositionen

Da für die oben beschriebene Methode zur Einstellung der Koppelschleifen der PETRA-Resonatoren eine zuverlässige Kenntnis und schnelle Variation der Stempelposition über das Kontrollsystem notwendig ist, muss sichergestellt werden, dass die im Kontrollsystem eingestellte Stempelposition mit der tatsächlichen Stempelposition an den PETRA-Resonatoren vor Ort übereinstimmen. Dies während der Messung zu verifizieren ist auf Grund des Strahlenschutzes nicht möglich, zumal diese Relation als zeitlich konstant angenommen werden kann, da die Stempelposition durch ein Potentiometer in eine korrespondierende Spannung umgewandelt und von der SPS mit stempelspezifischen Umrechnungsfaktoren (Polynom 2. Grades) wieder in Stempelpositionen zurückgerechnet werden.

Zur Verifizierung wird vor Ort die Stempelposition durch den Abstand des mit dem Stempel mechanisch verbundenen Kühlarrangements und der Unterkante der Abdeckung mit Hilfe einer digitalen Schiebelehre bestimmt. Die Stempelpositionsangaben des Kontrollsystems in mm werden ebenfalls notiert. Hierbei wurde vor allem im Bereich von 0 mm bis 12 mm viele Werte aufgenommen, da die Stempelpositionen bei der Hauptmessung hauptsächlich in diesem Bereich variiert werden. Bei den Stempelpositionen für die Messung vor Ort wird ein Messfehler von  $\Delta S_i = 0,5$  mm angenommen.

Nun werden die Stempelpositionen des Kontrollsystems gegen die vor Ort gemessenen Werte graphisch aufgetragen (siehe Abbildung 5.1). Da die Stempelposition vor Ort von der Position der Stempelabdeckung abhängt, ist ein von Null verschiedener Offset zu erwarten, der zudem von Stempel zu Stempel variieren kann. Man erwartet ein proportionales Verhalten der realen Positionen zu den Stempelpositionen des Kontrollsystems. Da beide Stempelpositionen jeweils in der Einheit mm ausgewertet werden, sollte die Steigung bei korrekter Übersetzung der Spannung in der SPS den Wert eins haben.

Anhand der gemessenen Werte (siehe Tabelle A.2 im Anhang) lassen sich Geradengleichungen der Form  $S_i^{\text{KS}}(S_i^{\text{real}}) = m \cdot S_i^{\text{real}} + b$  an diese approximieren. Als Steigung  $m$  ergeben sich mittels linearer Regression somit für die vier Stempel der Hochfrequenzresonatoren folgende Parameter:

$$\text{PETRA 1, Stempel 1:} \quad m = 1,049 \pm 0,006 \quad (5.1)$$

$$\text{PETRA 1, Stempel 2:} \quad m = 1,024 \pm 0,009 \quad (5.2)$$

$$\text{PETRA 2, Stempel 1:} \quad m = 0,984 \pm 0,008 \quad (5.3)$$

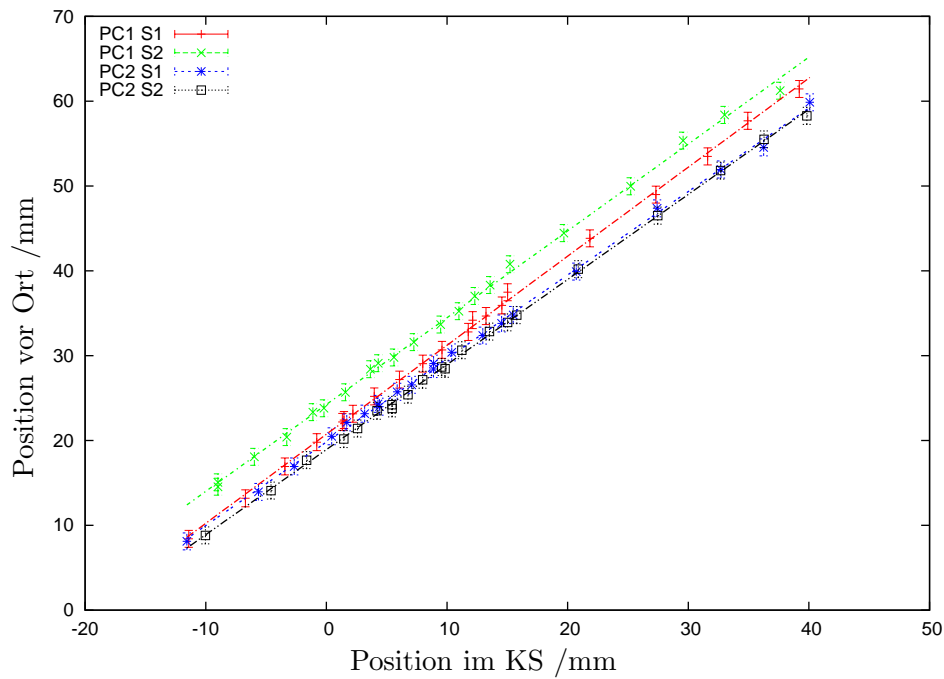
$$\text{PETRA 2, Stempel 2:} \quad m = 1,003 \pm 0,005 \quad (5.4)$$

Da jede Steigung mit dem Wert eins mit einem Fehler von unter 5% verträglich ist, kann auf eine Korrektur der im Kontrollsystem angezeigten Stempelpositionen verzichtet werden.

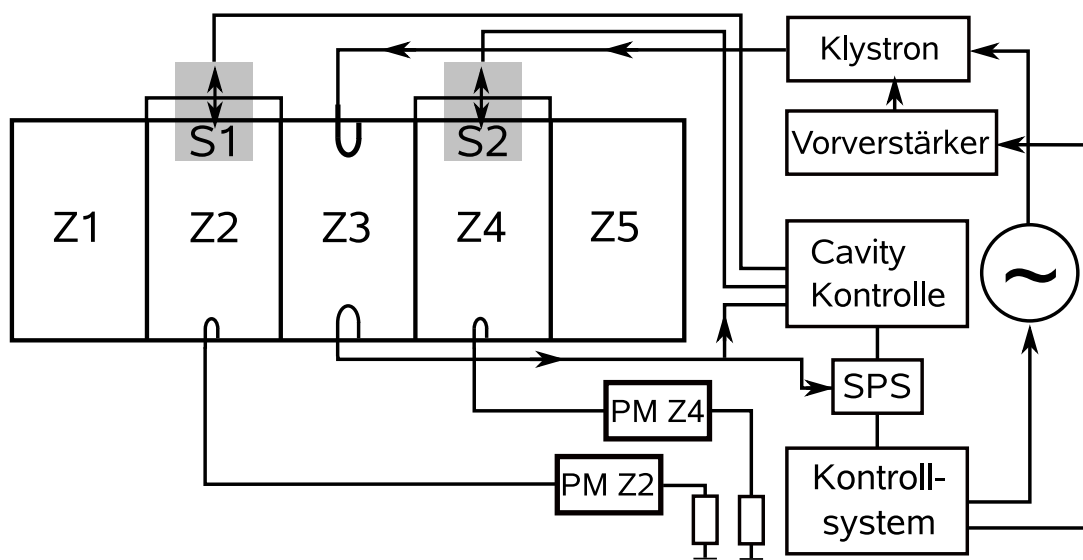
### 5.2 Stempelposition und ausgekoppelte Spannung

Für die Verwendung der in Kapitel 4 vorgestellten Methode zur Einstellung der Koppelschleife der PETRA-Hochfrequenzresonatoren ist ein proportionales Verhältnis zwischen Variation der Stempelposition und den aus den Zellen 2 und 4 des Resonators ausgekoppelten Leistungen notwendig. Daher muss in einer zusätzlichen Vormessung diese Linearität überprüft werden beziehungsweise der Bereich eingegrenzt werden, in dem ein annähernd lineares Verhalten zwischen den genannten Größen besteht. Hierfür wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, der in Abbildung 5.2 dargestellt ist.

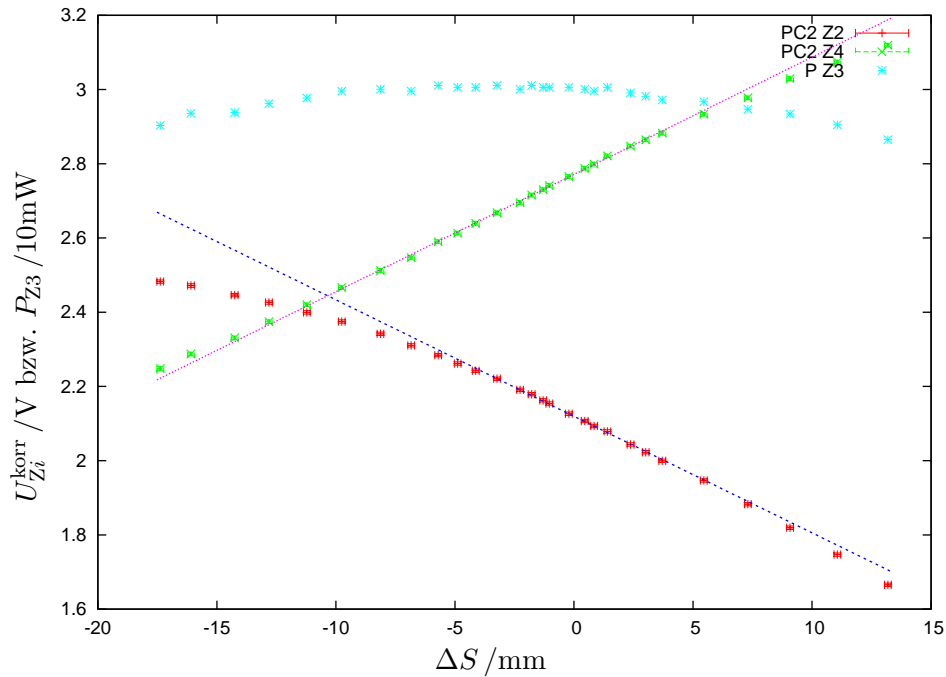
Die Stempelpositionen  $S_1$  und  $S_2$  des PETRA-Resonators 2 werden im Bereich von  $-9$  bis



**Abbildung 5.1:** Vor Ort gemessene Stempelposition aufgetragen gegen die im Kontrollsystem (KS) angezeigte Position der Stempel ( $S_i$ ) der PETRA-Cavities (PC  $i$ ) 1 und 2.



**Abbildung 5.2:** Verwendeter schematischer Aufbau der in den Abschnitten 5.2 und 5.3 beschriebenen Messungen.



**Abbildung 5.3:** Dämpfungskorrigierte Spannung der Zellen 2 und 4 des PETRA-Cavitys 2 sowie Leistung der Zelle 3 gegen die Differenz der Stempelposition  $\Delta S$ ,  $x_{Z4} = +3$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

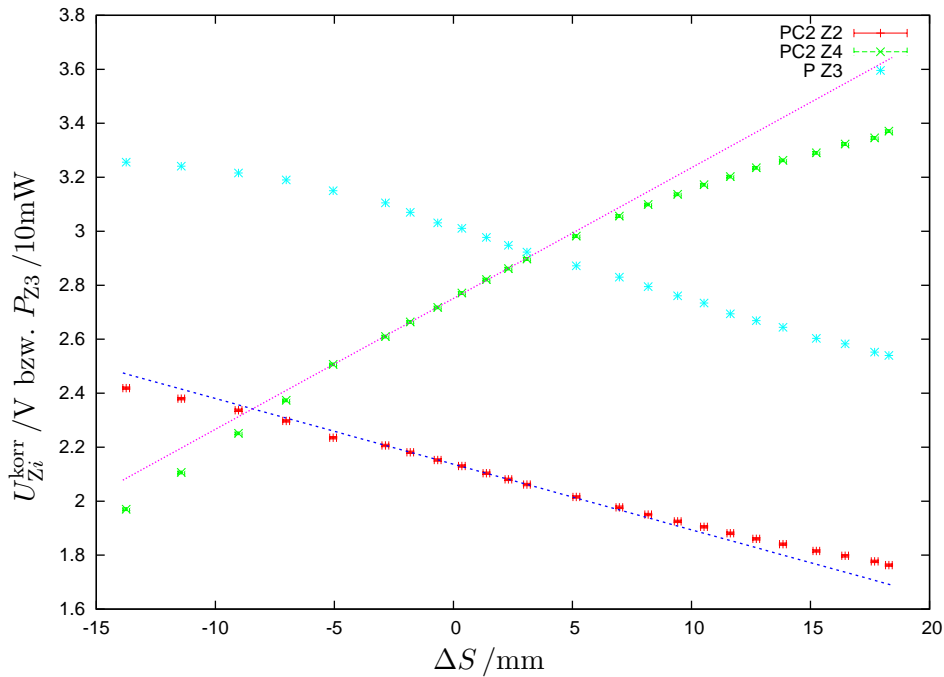
+22 mm variiert und die ausgekoppelte Spannung mit Powermetern<sup>17</sup> aufgenommen. In den Abbildungen 5.3 und 5.4 sind die in Zelle 2 und 4 ausgekoppelten Spannungen gegen die Differenz der Stempelpositionen  $\Delta S = S_1 - S_2$  aufgetragen. Abbildung 5.3 stellt den Messdaten bei Variation der Position des Stempels  $S_1$  und Abbildung 5.4 bei Variation des Stempels  $S_2$  dar. Ein lineares Verhältnis über einen großen Bereich der Variation der Stempelpositionen ist erkennbar. Eher sind polynomiale Anteile zweiter bzw. dritter Ordnung zu vermuten. Jedoch kann im Bereich von  $\Delta S = -5$  bis  $+5$  mm eine lineare Relation zwischen Spannung und Stempelposition angenommen werden, ohne den Fehler zu groß werden zu lassen. Für den weiteren Verlauf der Messungen werden deshalb die Stempelpositionen lediglich im Bereich von  $\Delta S = -4,3$  bis  $+4,3$  mm variiert bzw. eine lineare Approximation an die Werte nur in diesem Bereich vorgenommen.

### 5.3 Durchführung der Messung

Bei der Datennahme für die in Kapitel 4 vorgestellte Methode zur Einstellung der Koppelschleifen der PETRA-Resonatoren wird derselbe Versuchsaufbau wie in Abschnitt 5.2 (siehe Abbildung 5.2) verwendet und folgendermaßen vorgegangen:

Zunächst werden die Startstempelpositionen eingestellt, wobei beim PETRA-Cavity 1 die feste Stempelposition auf  $S_i = +(6 \pm 0,2)$  mm und beim PETRA-Cavity 2 auf  $S_i = +(8,3 \pm 0,2)$  mm eingestellt wird. Diese Stempelpositionen entsprechen den Positionen, an denen die Stempel, bei aktivierter Resonanzregelung und geringen Vorlaufleistungen nach der thermischen Stabilisierung des Cavitys stehen. Um diese Stempelposition zu fixieren, wurde der entsprechende Kontakt zwischen Cavity-Kontrolle und Stempel unterbrochen. Dies ist notwendig, da im

<sup>17</sup>Messgerät, welches Spannungen und Leistungen von hochfrequenten elektromagnetischen Signalen registrieren kann, Details [Roh85]



**Abbildung 5.4:** Dämpfungskorrigierte Spannung der Zellen 2 und 4 des PETRA-Cavitys 2 sowie Leistung der Zelle 3 gegen die Differenz der Stempelposition  $\Delta S$ ,  $x_{Z4} = +3$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

Kontrollsystem nur die Ansteuerung des Stempels 2 deaktiviert werden kann, jedoch trotzdem kleinste Änderungen ( $\Delta S_i^{\text{aus}} = \pm 0,1$  mm) der Position des deaktivierten Stempels beim Fahren des anderen Stempels auftreten können. Somit ist die Unterbrechung der Kontakte zwischen Stempel und Cavity-Kontrolle die sicherste Methode, einen systematischen Fehler zu verhindern. Der zu variierende Stempel wird zunächst auf die gleiche Stempelposition wie der feststehende Stempel gefahren und die Resonanzregelung aktiviert. Nun wird die Vorlaufleistung auf  $(13,00 \pm 0,03)$  kW bei der ELSA-Hochfrequenz  $f = 499,669$  MHz eingestellt. Hierbei soll dann der variable Stempel seine Position in etwa beibehalten. Nach etwa 30 Minuten haben sich die PETRA-Hochfrequenzresonatoren thermisch stabilisiert und die Resonanzfrequenz ist nur noch geringen Schwankungen unterworfen. Nun wird bei aktivierter Resonanzregelung die Frequenz auf etwa 499,51 MHz heruntergeregelt. Die Stempelposition des zu variierenden Stempels  $S_i$  soll nun auf eine Position gefahren sein, in der die Relation  $\Delta S = |S_1 - S_2| \approx 4,3$  mm noch erfüllt ist (vgl. Abschnitt 5.2). Hierbei muss beachtet werden, dass der Verstärkungsfaktor des Klystrons frequenzabhängig ist und die Vorlaufleistung schon bei kleinen Änderung der Frequenz variiert. Da die Spannung an der Signalmessschleife leistungsabhängig ist, muss zur Verwendbarkeit der Daten eine konstante Vorlaufleistung garantiert werden. Die Ansteuerung des Vorverstärkers wird daher so verändert werden, dass bei allen Frequenzeinstellungen eine konstante Vorlaufleistung vorliegt. Da die Resonanzregelung die Stempel nicht so fährt, dass die Phase zwischen der einlaufenden Welle und der in Zelle 3 ausgekoppelten Welle identisch ist, sondern eine geringe Phasendifferenz bestehen bleibt, ist es notwendig, die Frequenz bei deaktivierter Resonanzregelung manuell nachzuregeln. Hierbei muss vorsichtig vorgegangen werden, da bei Resonatoren hoher Güte, die Resonanzkurve sehr schmal ist und die Wahl einer leicht zum Resonator abweichende Frequenz zu hohen Reflexionen im Bereich von einigen kW führen kann. Dies kann im Extremfall Schäden am Klystron nach sich ziehen. Da die Resonanzfrequenz nicht direkt über die im Kontrollsystem angezeigte Phasenrelation  $\Delta\varphi$  ersichtlich ist, muss die Frequenz solange

variiert werden, bis ein Minimum in der reflektierten Leistung erreicht wird. Ist dies geschehen, werden die Vorlaufleistung  $VR^{18}$ , die Rücklaufleistung  $RR$ , die Positionen der Stempel  $S_1$  und  $S_2$ , die Resonanzfrequenz  $f_{\text{res}}$  sowie die aus den Zellen 2 und 4 ausgekoppelten Spannungen  $U_{Z2}$  und  $U_{Z4}$  sowie die ausgekoppelte Leistung  $P_{Z3}$  aus der mittleren Zelle des jeweiligen Resonators notiert. Nun wird die Position des zu variierenden Stempels um etwa 1 mm in Richtung der Position des festen Stempels gefahren und die Frequenz dementsprechend auf Resonanz, also zur Minimierung der reflektierten Leistung, nachgeregelt, die Vorlaufleistung wird konstant gehalten und die oben genannten Messwerte werden aufgenommen. Dies wird wiederholt bis, die Position des variablen Stempels symmetrisch um die Position des festen Stempels gefahren wurde.

Sind alle Messpunkte dieser Messreihe aufgenommen, so wird die Resonanzregelung wieder eingeschaltet und der variable Stempel beim Verschieben der Frequenz auf eine Position gefahren, die der Position des festen Stempels entspricht. Nun wird die Verbindung des festen Stempels mit der Cavity-Kontrolle wieder hergestellt, wodurch sich der Stempel über das Kontrollsystem wieder fahren lässt, sowie die Verbindung des variablen Stempels mit der Cavity-Kontrolle unterbrochen. Der ursprünglich variable Stempel ist nun auf einer Stempelposition fixiert. Die Messung wird dann wie oben beschrieben mit dem anderen Stempel durchgeführt.

Da die Messung nicht vor Ort an den PETRA-Resonatoren erfolgt und nach Gleichung (4.7) die Dämpfung der Kabel einen Einfluss auf die Ergebnisse der Messung hat, muss die Dämpfung korrigiert werden. Hierfür wird auf vorherige Messungen der Dämpfung der Kabel zurückgegriffen. Als Dämpfungen ergeben sich für die einzelnen Kabel der Zellen 2 und 4 der PETRA-Resonatoren 1 und 2:

$$\text{PETRA 1, Zelle 2: } A = (5,8 \pm 0,1) \text{ dB} \quad \Rightarrow \frac{1}{\gamma} = 1,943 \pm 0,022 \quad (5.5a)$$

$$\text{PETRA 1, Zelle 4: } A = (5,6 \pm 0,1) \text{ dB} \quad \Rightarrow \frac{1}{\gamma} = 1,894 \pm 0,022 \quad (5.5b)$$

$$\text{PETRA 2, Zelle 2: } A = (7,0 \pm 0,1) \text{ dB} \quad \Rightarrow \frac{1}{\gamma} = 2,265 \pm 0,026 \quad (5.5c)$$

$$\text{PETRA 2, Zelle 4: } A = (8,0 \pm 0,1) \text{ dB} \quad \Rightarrow \frac{1}{\gamma} = 2,518 \pm 0,029 \quad (5.5d)$$

Zur Bestimmung des Fehlers für diese Angaben wird ein Vergleich zu früher erfolgten Messungen gezogen. Dabei weichen die Werte lediglich um 0,1 dB von diesen Messungen ab. Daher wurde als Fehler  $\Delta A = \pm 0,1$  dB angenommen. Hierbei wurde die Dämpfung in der Einheit Dezibel in einen Korrekturfaktor  $\frac{1}{\gamma}$  (siehe Gleichung (4.7)) umgerechnet [KHS04]:

$$A = 20 \cdot \log \left( \frac{U(d)}{U_0} \right) \quad \Leftrightarrow \quad U(d) = U_0 10^{-\frac{A}{20}} \quad (5.6)$$

Nach einem Koeffizientenvergleich mit den Gleichungen (4.5) und (4.6) gilt daher

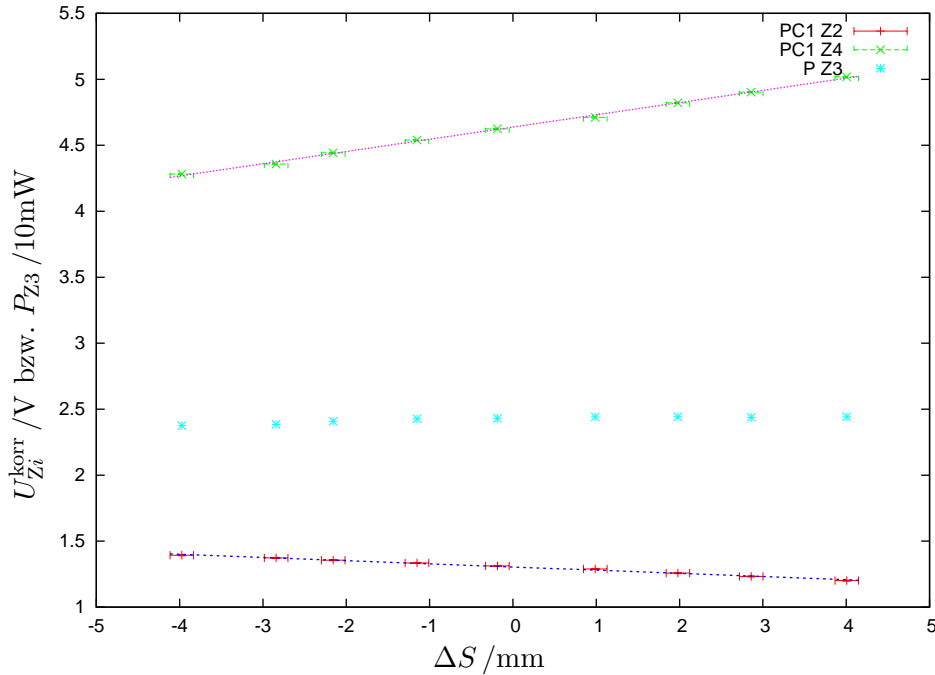
$$\gamma = 10^{-\frac{A}{20}}. \quad (5.7)$$

Für den Fehler ergibt sich

$$\Delta \left( \frac{1}{\gamma} \right) = \frac{d}{dA} 10^{\frac{A}{20}} = \frac{\ln(10)}{20 \cdot \gamma} \Delta A. \quad (5.8)$$

Auf diese Weise werden die gemessenen Spannungen mit dem Faktor  $\frac{1}{\gamma}$  korrigiert und derart die Spannung direkt nach den Signalmessschleifen ermittelt, dass Einflüsse der Kabelverbindungen nicht vorhanden sind. Eine ausführliche Fehlerdiskussion wird im Abschnitt 5.6 vorgenommen.

<sup>18</sup>Kontrollsystemeinstellung des Vorverstärkers



**Abbildung 5.5:** Exemplarische Darstellung der Relation von gemessener Spannung (dämpfungskorrigiert) gegen die Stempelpositionsdifferenz des PETRA-Cavitys 1 bei  $S_1$ -Variation.

Da nach den Gleichungen (4.1) bzw. (4.2) im Kapitel 4 für kleine Variationen der Stempelpositionen eine lineare Relation zwischen gemessener Spannung  $U_{Z_i}$  und Positionsdifferenz  $\Delta S$  besteht, wird an jede der zwei Spannungsverläufe für die Zellen 2 und 4 im Bereich von  $\Delta S = \pm 4,3 \text{ mm}$  eine lineare Funktion der Form

$$U_{Z_i}(\Delta S) = m_i \cdot \Delta S + b_i \quad (5.9)$$

angenähert. Nach Gleichungen (4.8) identifiziert man die Fitparameter  $m_i$  mit  $G(\kappa_{Z_i}^0, k_{Z_i}, x_{Z_i}) \cdot \frac{dU_{Z_i}}{d(\Delta S)}$  und  $b_i$  mit  $G(\kappa_{Z_i}^0, k_{Z_i}, x_{Z_i}) \cdot U_{Z_i}(\Delta S = 0)$ . Für diese Approximation wurde das Programm Gnuplot verwendet. Exemplarisch ist in Abbildung 5.5 diese lineare Approximation für die  $S_1$ -Variation des PETRA-Resonators 1 bei einer Koppelschleifeneinstellung der Zelle 4 von  $x_{Z_4} = +3$  dargestellt. Abbildung 5.6 zeigt die selbe Konfiguration bei der  $S_2$ -Variation.

Die Messwerte dieser Graphen sind in Tabelle A.1 im Anhang zu finden. Die Parameter der approximierten Geradengleichung werden in Abschnitt 5.4 verwendet.

## 5.4 Drehung der Koppelschleife

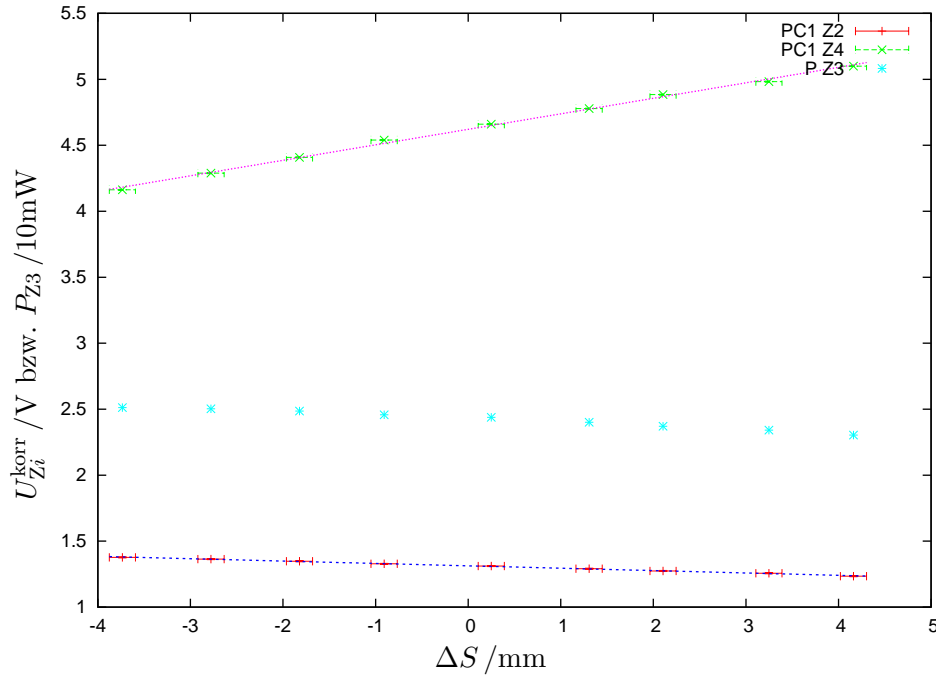
Um die Koppelschleifen der Zellen 2 und 4 der PETRA-Hochfrequenzresonatoren auf einen identischen Koppelfaktor einzustellen, wird die Einstellung der Koppelschleife einer Zelle, in diesem Fall die Koppelschleife der Zelle 4, variiert.

Nach Gleichung (2.11) lässt sich diese Änderung auf einen winkelabhängigen Koppelfaktor  $0 < \kappa(x) \ll 1$  zurückführen. Für die Auswertung der Messdaten wird der empirische Ansatz<sup>19</sup>

$$\kappa(x) = \kappa^0 \cdot \cos^2(k \cdot x) \quad (5.10)$$

<sup>19</sup>Ein  $\cos^2$  wird gewählt, da  $\kappa(x) > 0$  für alle  $x$  nach Gleichung (2.7) gelten muss.





**Abbildung 5.6:** Exemplarische Darstellung der Relation von gemessener Spannung (dämpfungskorrigiert) gegen Stempelpositionsdifferenz des PETRA-Cavitys 1 bei  $S_2$ -Variation.

einer drehbaren Signalmessschleife gewählt, wobei  $\kappa^0$  der maximal einstellbare unterkritische Koeffizient mit  $0 < \kappa^0 \ll 1$  und  $k$  eine Gewindekonstante ist.

Der Koeffizientenvergleich der Gleichungen (2.11) und (2.12) ergibt den winkelabhängigen Faktor

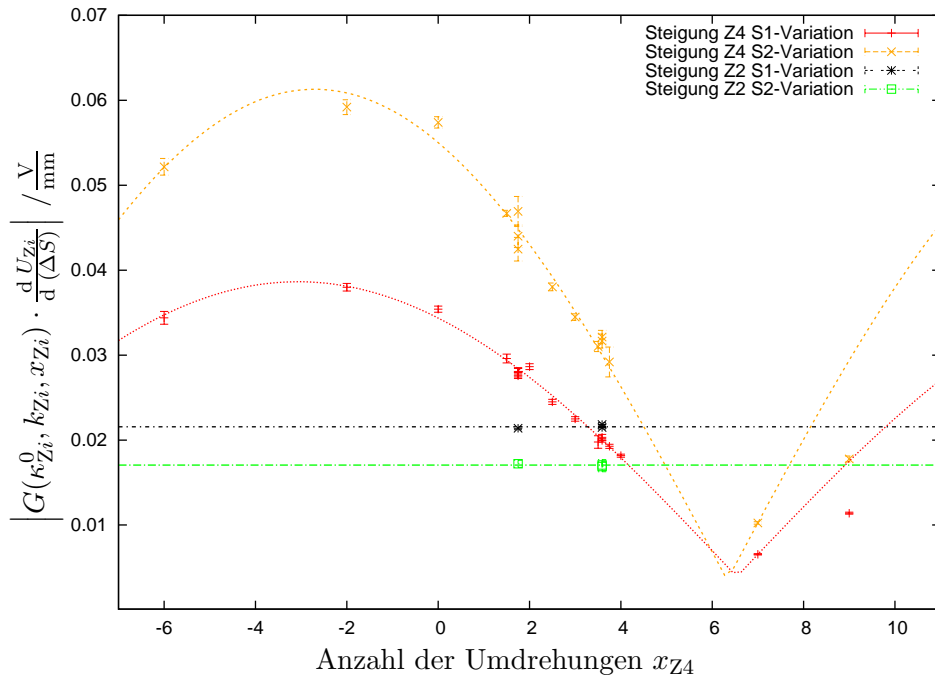
$$G(\kappa^0, k, x) = \sqrt{\frac{Z_0}{R_S} \kappa(x)} \quad (5.11)$$

welcher sich durch den Ansatz (5.10) als

$$G(\kappa^0, k, x) = \sqrt{\frac{Z_0}{R_S} \kappa^0} \cdot \sqrt{\cos^2(k \cdot x)} = \sqrt{\frac{Z_0}{R_S} \kappa^0} \cdot |\cos(k \cdot x)| \quad (5.12)$$

schreiben lässt. Nach Gleichung (4.8) hat dies Einfluss auf die Spannung  $U_{Zi}$  welche an der Signalmessschleife messbar ist. Da das magnetische Feld im Hohlraumresonator mit der Anregungsfrequenz der externe Einkopplung oszilliert, handelt es sich bei  $U_{Zi}(x)$  um ein Hochfrequenzsignal. Negative Wechselspannungen können jedoch nur durch eine Phasendifferenz von einer positiven unterschieden werden und da Messgeräte diese nicht erkennen, wird lediglich der Betrag einer effektiven Spannung  $U_{Zi}$  angezeigt. In dem Fall der beschriebenen Durchführung der Messung (siehe Kapitel 4) ändert sich somit die Ordinatenspannung  $b_i$  sowie die Steigung  $m_i$  des linearen Zusammenhangs zwischen  $U_{Zi}$  und  $\Delta S$  (vgl. (5.9)). Ziel ist es nun, eine Koppelschleifeneinstellung  $x$  zu finden, bei der die Relation (4.9) bei Variation der Position von Stempel 1 und bei Variation der Position von Stempel 2 bei Fixierung der Position des jeweils anderen Stempels gilt.

Die Koppelschleife kann mittels einer angebrachten Stellschraube gedreht werden. Um hierbei reproduzierbare Einstellungen der Koppelschleife zu gewährleisten, wird zunächst eine Skala an die Stellschraube angebracht, welche eine positive und negative Drehrichtung definiert. Die Skalierung ist hierbei derart gewählt, dass Drehungen in einem Winkel von  $45^\circ$  relativ genau ( $\approx \pm 3^\circ$ ) eingestellt werden können. Da die Drehungen der Koppelschleife jedoch über  $\pm 360^\circ$  hinausgehen,



**Abbildung 5.7:** Steigung  $\left|G(\kappa_{Zi}^0, k_{Zi}, x_{Zi}) \cdot \frac{d U_{Zi}}{d (\Delta S)}\right|$  gegen die Einstellung der Koppelschleife der Zelle 4  $x_{Z4}$  des PETRA-Cavitys 2, sowie entsprechende approximierten Funktionen.

d.h. mehr als eine Umdrehung gemacht werden, ist eine Notierung der Koppelschleifenposition bezüglich eines festgelegten Nullpunktes notwendig. Zusätzlich ist noch zu bemerken, dass die Gewinde der Stellschrauben der jeweiligen Hochfrequenzresonatoren unterschiedlich leicht zu verstellen sind. Dies lässt darauf schließen, dass höchstwahrscheinlich bei PETRA-Cavity 1 ein neueres Gewinde vorhanden ist als beim PETRA-Cavity 2. Eine Messreihe wird nun wie in Abschnitt 5.3 beschrieben aufgenommen. Anschließend wird die Koppelschleifenposition variiert und wiederum eine Messung durchgeführt. Die Graphen aller Koppelschleifeneinstellungen sind im Anhang von Abbildung A.2 bis A.65 zu finden. Die Messwerte sind in einem internen Bericht der ELSA-Arbeitsgruppe zusammengefasst [Sau10].

#### 5.4.1 PETRA-Cavity 2

Nach Abschnitt 2.2 wird eine Variation der Steigung  $\frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)}$  gemäß Gleichung (4.8) erwartet, wenn man die Einstellung der Signalmessschleife  $x_{Z4}$  ändert. Abbildung 5.7 zeigt den Verlauf der Steigung bei verschiedenen Einstellungen der Koppelschleife beim PETRA-Cavity 2. Die Messdaten für diesen Graphen sind im Anhang in den Tabellen A.5, A.6 sowie A.7 und A.8 im Anhang zu finden. Auf Grund der Asymmetrie der Feldverteilung im Resonator gibt es eine Aufspaltung der Steigungen bei  $S_1$ - oder  $S_2$ -Variation.

Da nur die Koppelschleife der Zelle 4 variiert wird, bleibt die Steigung der linearen Relation von Gleichung (4.1) der Zelle 2 eine negative Konstante.

Von den negativen Messdaten der Zelle 2 wird der Betrag gebildet und eine konstante Funktion

$$\left|G(\kappa_{Z2}^0, k_{Z2}, x_{Z2}) \cdot \frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)}\right| = \text{const.} \quad (5.13)$$

angenähert. An die variablen Steigungen in Abhängigkeit der Anzahl der Umdrehungen  $x_{Z4}$  wurde in Anlehnung an die Gleichung (5.12) eine Funktion der Form

$$G(\kappa_{Z4}^0, k_{Z4}, x_{Z4}) \cdot \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} = a + n \cdot \sqrt{\cos^2(m \cdot x_{Z4} + q)} \quad (5.14)$$

approximiert. Der Offset  $a$  wird zusätzlich eingeführt, da Fehler in der Geometrie der Signalmessschleife verhindern können, dass der Koppelfaktor entsprechend Gleichung (5.10) bei einer Winkeleinstellung den Wert Null erreicht. Wegen der Aufspaltung der Steigungen auf Grund der Asymmetrie der Hochfrequenzresonatoren sind hierbei jeweils zwei Approximationen pro Zelle notwendig.

Für den PETRA-Hochfrequenzresonator 2 ergeben sich nach einer Powermeter-Korrektur (Details hierzu in Abschnitt 5.6.2) folgende Fitparameter für die  $S_1$ -Variation:

$$\begin{aligned} \text{const.} &= (21,57 \pm 0,60) \text{ mV/mm} \\ a &= (3,92 \pm 0,37) \text{ mV/mm} \\ n &= (34,72 \pm 0,71) \text{ mV/mm} \\ m &= 0,16 \pm 0,01 \\ q &= 3,64 \pm 0,03 \end{aligned}$$

Für die  $S_2$ -Variation erhält man hingegen:

$$\begin{aligned} \text{const.} &= (17,06 \pm 0,85) \text{ mV/mm} \\ a &= (3,53 \pm 1,06) \text{ mV/mm} \\ n &= (57,77 \pm 1,79) \text{ mV/mm} \\ m &= 0,17 \pm 0,01 \\ q &= 3,61 \pm 0,02 \end{aligned}$$

Damit ergeben sich die gemittelten Fitparameter zu:

$$\begin{aligned} \overline{\text{const.}} &= (19,31 \pm 0,52) \text{ mV/mm} \\ \bar{a} &= (3,73 \pm 0,56) \text{ mV/mm} \\ \bar{n} &= (46,25 \pm 0,96) \text{ mV/mm} \\ \bar{m} &= 0,17 \pm 0,003 \\ \bar{q} &= 3,63 \pm 0,02 \end{aligned}$$

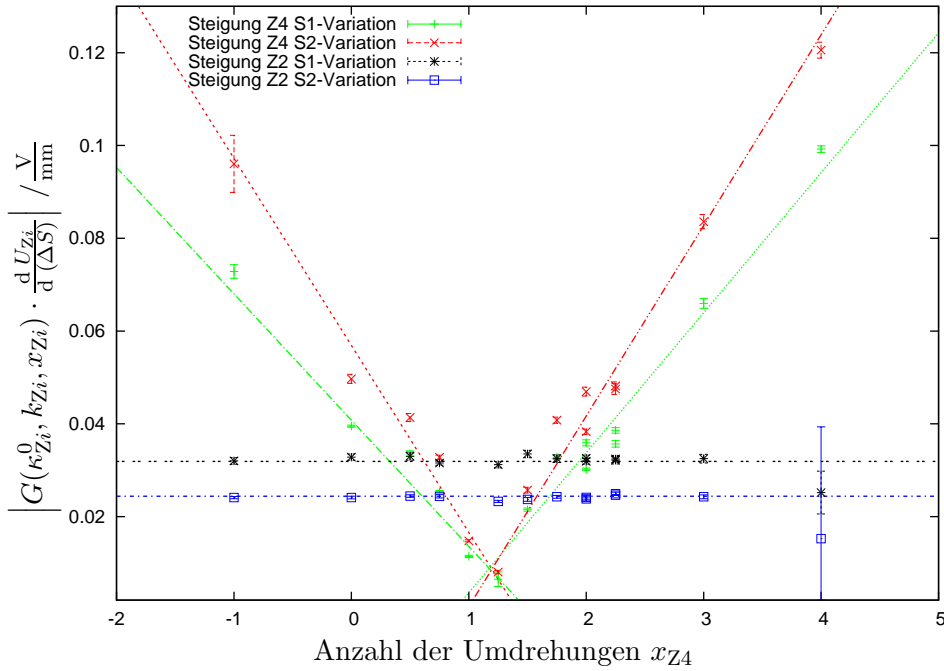
Mit diesen Werten wird der Schnittpunkt der Graphen durch gleichsetzen der Gleichungen (5.13) und (5.14) ermittelt und man erhält für die entsprechende Position der Signalmessschleife

$$x_{Z4} = \frac{\arccos\left(\sqrt{\left(\frac{\overline{\text{const.}} - \bar{a}}{\bar{n}}\right)^2}\right) - \bar{q} - \pi}{\bar{m}}. \quad (5.15)$$

Diese entspricht der Bedingung für gleiche Koppelfaktoren der Signalmessschleifen nach Gleichung (4.3). Für den PETRA-Hochfrequenzresonator 2 ergibt sich somit eine Koppelschleifenposition der Zelle 4 von

$$x_{Z4}^{\text{PC2}} = (+4,39 \pm 0,14) \text{ Umdrehungen}. \quad (5.16)$$

In dieser Position der Koppelschleife der Signalmessschleife ist der Koppelfaktor der Zelle 4 innerhalb seiner Fehler mit dem Koppelfaktor der Signalmessschleife in Zelle 2 identisch.



**Abbildung 5.8:** Steigung  $G(\kappa_{Zi}^0, k_{Zi}, x_{Zi}) \cdot \frac{dU_{Zi}}{d(\Delta S)}$  gegen die Einstellung der Koppelschleife der Zelle 4 des PETRA-Cavitys 1 mit entsprechenden approximierten Funktionen

### 5.4.2 PETRA-Cavity 1

Für den PETRA-Hochfrequenzresonator 1 wurden die Messungen in analoger Weise durchgeführt. Die Eliminierung der Dämpfung erfolgte ebenfalls durch die in Gleichungen (5.5) ermittelten Dämpfungsfaktoren für das PETRA-Cavity 1. In Abbildung 5.8 ist die Abhängigkeit der Steigung der linearen Relation  $G(\kappa_{Zi}^0, k_{Zi}, x_{Zi}) \cdot \frac{\Delta U_{Zi}}{\Delta(\Delta S)}$  gegen die Einstellung der Koppelschleife  $x_{Z4}$  der Zelle 4 zu sehen. Die korrespondierenden Messdaten sind in den Tabellen A.3 und A.4 im Anhang zu finden. Zu erkennen ist hierbei wiederum die Aufspaltung der Steigungen durch Einflüsse der Asymmetrie der Feldverteilung im Resonator. Die Variation der Steigung  $\frac{\Delta U_{Z4}}{\Delta(\Delta S)}$  durch Drehung der Koppelschleife ist deutlich größer als bei den Messungen des PETRA-Cavity 2. Nach Gleichung (4.8) wirkt sich dies auch auf eine die Variation der Ordinate aus; Es werden höhere Spannungen gemessen. Um die Powermeter, welche für eine maximale Leistung von 30 dBm ausgelegt sind, nicht zu beschädigen, wird die Position der Koppelschleife der Zelle 4 nur von  $-1$  bis  $+4$  Umdrehungen der Stellschraube variiert. Dies lässt darauf schließen, dass die Signalmessschleife des PETRA-Cavitys 1 eine andere Übersetzung im Schneckengetriebe aufweist, als die Signalmessschleife des PETRA-Cavitys 2 oder beide Koppelschleifen unterschiedliche Geometrien aufweisen. Beim Drehen der Stellschrauben fällt auch auf, dass diese unterschiedlich leicht zu bewegen sind, was ein weiteres Indiz für Koppelschleifen unterschiedlichen Typs darstellt.

Da nur Messwerte zwischen  $-1$  und  $+4$  Umdrehungen der Stellschraube aufgenommen werden, lässt sich eine Approximation an die Funktion (5.14) nicht durchführen. Eine lineare Approximation der Form

$$G(\kappa_{Z4}^0, k_{Z4}, x_{Z4}) \cdot \frac{\Delta U_{Z4}}{\Delta(\Delta S)} = h \cdot x_{Z4} + p \quad (5.17)$$

an die Daten zwischen  $-1$  und  $+1$  Umdrehungen sowie zwischen  $+1,1$  und  $+4$  Umdrehungen der Stellschraube genügt jedoch, da sich die Cosinus-Funktion in dem gemessenen Abschnitt

annähernd linear verhält. Die Steigungen und Ordinaten der Approximationen sind in Tabelle A.9 im Anhang zu finden. Da bei einer  $|\cos|$ -Funktion (vgl. Gleichung (5.12)) die Steigungen links und rechts des lokalen Minimums außer den Vorzeichen identische Werte aufweisen, wurde zur Mittelung der approximierten vier Steigungen der Betrag dieser verwendet.

Mit den gemittelten Werten

$$\begin{aligned}\overline{\text{const.}} &= (28,16 \pm 0,31) \text{ mV/mm} \\ \bar{h} &= (-34,71 \pm 2,06) \text{ mV/mm} \\ \bar{p} &= (48,85 \pm 3,34) \text{ mV/mm}\end{aligned}$$

ergibt sich somit eine Einstellung der Signalmessschleife der Zelle 4 des PETRA-Cavitys 1 von

$$x_{Z4}^{\text{PC1}} = \frac{\overline{\text{const.}} - \bar{p}}{\bar{h}} \quad (5.18)$$

$$= (+0,60 \pm 0,10) \text{ Umdrehungen.} \quad (5.19)$$

In dieser Position der Signalmessschleife ist der Koppelfaktor der Zelle 4 innerhalb seiner Fehler mit dem Koppelfaktor der Signalmessschleife in Zelle 2 identisch.

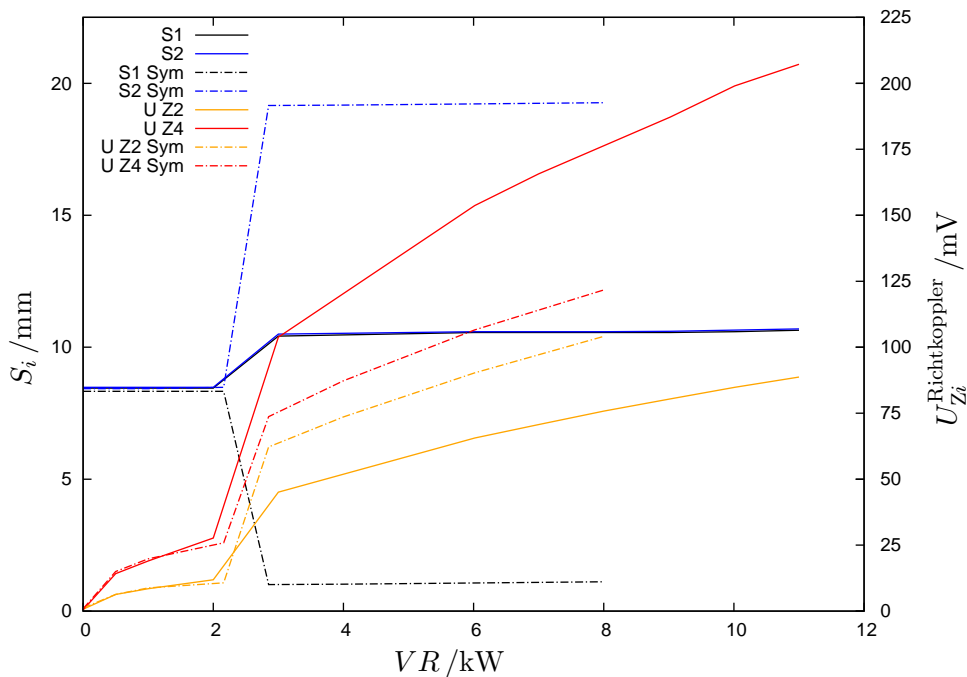
## 5.5 Einstellung identischer Koppelfaktoren

Nach Durchführung und Auswertung der vorgestellten Methode in Kapitel 4 zur Einstellung der Koppelfaktoren der Signalmessschleifen der Zellen 2 und 4 der PETRA-Hochfrequenzresonatoren ist es gelungen, eine Einstellung der Koppelschleife in Zelle 4 zu ermitteln, die dem Koppelfaktor der Zelle 2 entspricht (siehe Ergebnisse (5.16) sowie (5.19)). Nun werden die Koppelschleifen auf diese Positionen gedreht und die Signalmessschleifen der Zellen 2 und 4 mit den Eingängen der Symmetrisierungsregelung verbunden. Anschließend wird die Vorlaufleistung des Resonators zu den Hochfrequenzresonatoren langsam erhöht. Abbildung 5.9 zeigt die Stempelpositionen  $S_1$  und  $S_2$  sowie  $U_{Z2}$  und  $U_{Z4}$ <sup>20</sup> in Abhängigkeit der Vorlaufleistung  $VR$  bei aktivierter Resonanz- und Symmetrisierungsregelung des PETRA-Cavitys 2. Die Daten für diese Messung sind in Tabelle A.11 im Anhang zu finden.

Man erkennt aus der Abbildung, dass bis zu einer Vorlaufleistung von etwa 2,5 kW mit und ohne Symmetrisierungsregelung die voreingestellte Stempelposition nicht verändert wird. Der Regelmechanismus der Cavity-Kontrolle setzt somit erst ab Vorlaufleistungen von etwa 2,5 kW ein. Ist die Symmetrisierungsregelung ausgeschaltet, passt die Resonanzregelung die Resonanzfrequenz des Resonators an die Frequenz der einlaufenden Hochfrequenz an. Hierbei wird die reflektierte Leistung minimiert, was sich auch an dem Anstieg der gemessene Spannung zeigt, da mehr Leistung in den Resonator eingekoppelt wird. Nachdem die Resonanzregelung die Position der Stempel 1 und 2 gleichermaßen auf eine bestimmte Position gefahren hat, bleibt diese Position bei weiteren Leistungen konstant. Geht man zu höheren Vorlaufleistungen über, wird sich diese Position auf Grund der thermischen Ausdehnung des Resonators, was eine Verstimmung des Hochfrequenzresonators zur Folge hat, noch weiter verändern. Die gemessene Spannung erhöht sich nach der Relation  $U \sim \sqrt{P}$ . Hierbei ist jedoch die Spannungsdifferenz zwischen  $U_{Z2}$  und  $U_{Z4}$  als Folge der Asymmetrie relativ hoch.

Bei eingeschalteter Symmetrisierungsregelung werden die Stempel ab einer Vorlaufleistung von etwa 2,5 kW auf unterschiedliche Positionen gefahren, in diesem Fall  $S_1 \approx 1 \text{ mm}$  und  $S_2 \approx 19 \text{ mm}$ .

<sup>20</sup>Mittels eines sog. Richtkopplers ist eine abgeschwächte Amplitude der Spannung, welche zur Cavity-Kontrolle gelangt, messbar.



**Abbildung 5.9:** PETRA-Cavity 2:  $VR$ -Abhängigkeit der Stempelpositionen  $S_i$  sowie Spannungen der Zellen 2 und 4  $U_{Zi}$  (Richtkoppler). Gestrichelte Linien bezeichnen Verläufe bei aktivierter Symmetrisierungsregelung, durchgezogene Linien Verläufe ohne Symmetrisierungsregelung.

Durch Veränderung der Geometrie variiert die Feldstärke in den Zellen 2 und 4 und die ausgekoppelten Spannungen werden dementsprechend größer oder kleiner. Wie in Abbildung 5.9 zu sehen ist, verringert sich dementsprechend die Spannungsdifferenz zwischen  $U_{Z2}$  und  $U_{Z4}$ , bis die Symmetrisierungsregelung die momentane Stempelposition beibehält. Somit ist die Feldstärke in Zelle 2 innerhalb der Fehler der angewendeten Methode nach Kapitel 4 identisch mit der Feldstärke in Zelle 4.

Hierbei ist anzumerken, dass die Positionsänderung der Stempel im PETRA-Cavity 2 mit  $\Delta S \approx 17$  mm bei eingeschalteter Symmetrisierungsregelung im Vergleich zum PETRA-Cavity 1 sehr unterschiedlich ist. Beim PETRA-Cavity 1 weicht die Stempelposition kaum merklich von der voreingestellten Stempelposition ohne Symmetrisierungsregelung ab. Da eine gewisse Spannungsdifferenz<sup>21</sup> notwendig ist, um die Symmetrisierungsregelung auszulösen, ist dies nur damit zu erklären, dass diese Schwelle bei Vorlaufleistungen bis 20 kW nicht erreicht wird. Bei Vorlaufleistungen des normalen ELSA-Betriebs wird sich vermutlich eine Änderung der Stempelpositionen bemerkbar machen, jedoch nicht in den Dimensionen des PETRA-Cavities 2.

Da nach Gleichungen 5.5 deutlich unterschiedliche Dämpfungen bei den Kabelverbindungen zwischen PETRA-Cavity 2 und der Symmetrisierungsregelung vorliegen<sup>22</sup>, muss dieser Dämpfungsunterschied kompensiert werden. Hierfür sollen zukünftig zwei variable Dämpfungsglieder<sup>23</sup>, einsetzbar für Frequenzen von 10 MHz bis 2,5 GHz, verwendet werden.

<sup>21</sup>Nach Abschnitt 3.2:  $\Delta U \approx 2 \cdot U_{\text{Diode}}$

<sup>22</sup> $\Delta A = 0,92$  dB

<sup>23</sup>Typ ZX73-2500-S+ der Firma Mini-Circuits®

## 5.6 Fehlerdiskussion

Nach erfolgreicher Einstellung der Koppelschleife und ersten Tests der Symmetrisierungsregelung bis Vorlaufleistungen von etwa 20kW muss die angewendete Methodik nach Kapitel 4 auf mögliche Ungenauigkeiten sowie die Messungen auf systematische Fehler untersucht werden.

### 5.6.1 Das Fit-Programm Gnuplot

Da für die Approximation von Funktionen an Messwerte ausschließlich das Programm `Gnuplot` verwendet wurde, die Annäherung an die Messdaten somit lediglich mit dem MARQUARDT-LEVENBERG-Algorithmus vorgenommen wurde [HR02], kann die Verwendung von anderen Algorithmen zu leicht abweichenden Parametern und Fehlern der Approximationen führen. Zudem scheint `Gnuplot` besonders bei linearen Approximationen den Fehler der Steigungen zu klein auszugeben, zudem wird der Fehler des Messpunktes selber nur bis zu einem gewissen Grad bei der Berechnung des Fehlers berücksichtigt. So bewirkt eine Vergrößerung des Fehlers ab einer gewissen Größe keine Änderung des Steigungsfehlers. Da dies erst während der Messung festgestellt wurde, wurden die gemessenen Daten der Zelle 2, deren Einstellung der Koppelschleife während der Messung konstant war, verwendet, um auf Grund der Fluktuation der durch `Gnuplot` ermittelten Steigungen einen realistischeren Fehler zu ermitteln. Hierfür wurden die Wurzel der Varianz der Steigungen, unabhängig von deren Fehlern, als statistischer Fehler berechnet. Es stellte sich jedoch heraus, dass der statistische Fehler der Steigung in etwa mit dem von `Gnuplot` ausgegebenen Fehler der Steigung übereinstimmt. Somit entspricht der Fehler der durch die Auswertung mit `Gnuplot` ausgegeben wurde, in etwa dem Fehler, der durch Messungenauigkeiten entstanden ist. Deshalb wurden die durch `Gnuplot` ausgegeben Fehler bei allen Auswertungen verwendet.

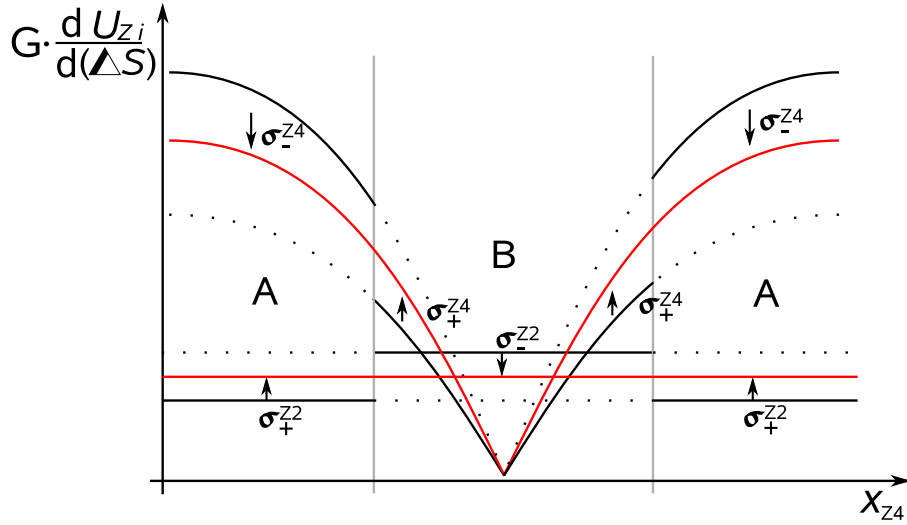
### 5.6.2 Einflüsse der Powermeter auf die Messung

Wie bereits in Abschnitt 5.4 erwähnt, trat während der Messung ein erheblicher systematische Fehler auf. Zufällig wurden bei den Messungen an PETRA-Cavity 1 die Powermeter, die normalerweise fest einer Signalmessschleife zugeordnet waren, getauscht. Bei der Auswertung stellt sich heraus, dass dadurch die Steigungen und Ordinaten des linearen Zusammenhangs zwischen ausgekoppelter Spannung und Differenz der Stempelpositionen (siehe Kapitel 4) beeinflusst wurden. Da sowohl Steigung als auch Ordinate betroffen sind, ist ein Fehler durch das nicht vorgenommene Nullen<sup>24</sup> des Powermeters ausgeschlossen, da die Nullung lediglich die Ordinate beeinflusst hätte. Nach Herstellerangaben ist das Messgerät in der Lage, die intrinsische Dämpfung des Messkopfes zu erkennen<sup>25</sup> und gibt die Messdaten standardmäßig in bereits korrigierter Form aus (Details siehe [Roh85]). Die Tatsache, dass die Steigung ebenfalls beeinflusst wird, führt mit der Kenntnis der Relation (4.7) zu dem Schluss, dass ein Messkopf oder beide Messköpfe falsche Dämpfungen an die Ausleseinheit übermitteln und so die Messwerte verfälscht werden.

Da die verwendete Methode nach Kapitel 4 auch die richtigen Resultate liefert, wenn die Dämpfungen der gemessenen Spannungen der beiden Signalmessschleifen identisch sind, und nicht bekannt ist, welche der Powermeter diesen systematischen Fehler produziert, wird dementsprechend eine Korrektur für beide Powermeter durchgeführt. Hierfür werden die Messungen und Auswertungen nach Abschnitt 5.3 durchgeführt, jedoch werden bei identischer Koppelschleifen-einstellung der Zellen 2 und 4 die Powermeter vertauscht und die Messung erneut nach Abschnitt

<sup>24</sup>Festlegung des Nullpunktes des Powermeters

<sup>25</sup>Informationen über die ausgemessene intrinsische Dämpfung des Messkopfes werden an die Ausleseinheit übermittelt.



**Abbildung 5.10:** Prinzip der Power-Meter Korrektur: Steigungen der Zellen 2 und 4 werden mit  $\sigma_{\pm}^{Zi}$  korrigiert. Hierbei wird  $\sigma_{+}^{Zi}$  auf Steigungen unter  $\bar{m}$  (rot) angewendet,  $\sigma_{-}^{Zi}$  auf Steigungen über  $\bar{m}$ . A und B entsprechen Vertauschungen der Powermeter.

5.3 durchgeführt. Aus den ermittelten Steigungen der Powermeter wird der Mittelwert  $\bar{m}$  gebildet und die Korrekturfaktoren  $\sigma_{\pm}$  berechnet, welche die nach oben und unten abweichenden Steigungen gleicher Koppelschleifeneinstellungen auf den Mittelwert korrigiert. Dieses Vorgehen illustriert Abbildung 5.10.

Die Daten dieser Untersuchung sind in Tabelle (A.10) im Anhang zu finden. Aus den gemittelten Werten dieser Untersuchung ergeben sich folgende Korrekturfaktoren für die nach unten oder oben abweichenden Messdaten der Spannungen aus Z2 und Z4:

$$\text{Korrektur } G(\kappa_{Z2}^0, k_{Z2}, x_{Z2}) \cdot \frac{dU_{Z2}}{d(\Delta S)} \text{ über } \bar{m} \quad \sigma_{-}^{Z2} = 0,796 \pm 0,016 \quad (5.20)$$

$$\text{unter } \bar{m} \quad \sigma_{+}^{Z2} = 1,346 \pm 0,045 \quad (5.21)$$

$$\text{Korrektur } G(\kappa_{Z4}^0, k_{Z4}, x_{Z4}) \cdot \frac{dU_{Z4}}{d(\Delta S)} \text{ über } \bar{m} \quad \sigma_{-}^{Z4} = 0,712 \pm 0,016 \quad (5.22)$$

$$\text{unter } \bar{m} \quad \sigma_{+}^{Z4} = 1,686 \pm 0,086 \quad (5.23)$$

Diese Korrekturfaktoren sind für die Messungen nach Abschnitt 5.3 für beide PETRA-Resonatoren reproduzierbar. Somit weisen die gemessenen Spannungen der Signalmessschleifen den gleichen Anteil der Powermeterdämpfung auf und die gemessenen Spannungen können für die weitere Auswertung nach Abschnitt 5.4 verwendet werden.

### 5.6.3 Die Einflüsse der Zellen 1 und 5 auf die Feldverteilung

Da in den PETRA-Cavities nur drei Signalmessschleifen in den Zellen 2, 3 und 4 integriert sind, lässt sich über die Feldstärke in den Zellen 1 und 5 keine Aussage treffen. Durch die Kopplung der einzelnen Zellen beeinflusst die Variation der Stempelposition ebenfalls die Feldstärke in den benachbarten Zellen. Weisen jedoch die Zellen 1 und 5 eine deutlich unterschiedliche Geometrie des Zelleninnenraums auf, können trotz Symmetrisierungsregelung unterschiedliche Feldstärken in den äußeren Zellen auftreten. Somit ist die Symmetrisierung der Feldverteilung der PETRA-Hochfrequenzresonatoren nur unter der Annahme der Gleichheit der äußeren Zellen erreicht. Weitere Simulationen mit CST Microwave Studios könnten hierbei die Einflüsse der Zellen 1



---

und 5 auf die verwendete Methode zur Einstellung der Koppelfaktoren zum Vorschein bringen.

## 6 Ergebnisse

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit ist es gelungen, die Koppelfaktoren der PETRA-Cavities 1 und 2 nach der vorgestellten Methode nach Kapitel 4 innerhalb der Fehlergrenzen auf identische Werte einzustellen. Somit kann die Feldverteilung während des ELSA-Betriebs durch die in die Cavity-Kontrolle integrierte Symmetrisierungsregelung durch Variation der Position der Abstimmstempel symmetrisiert werden. Auf Grund der unterschiedlichen Dämpfungen der verwendeten Powermeter trat während der Messung eine zusätzliche systematische Fehlerquelle auf, deren Einfluss jedoch im Rahmen einer Untersuchung und anschließender Korrektur minimiert werden konnte. Bei ersten Tests mit der Symmetrisierungsregelung stellte sich heraus, dass der PETRA-Resonator 2 unter Annahme einer korrekten Durchführung der Messung eine deutlich asymmetrischere Feldverteilung aufweist als der PETRA-Resonator 1.

## A Anhang

### A.1 Ausblick - Symmetrisierung mittels Temperaturmessungen

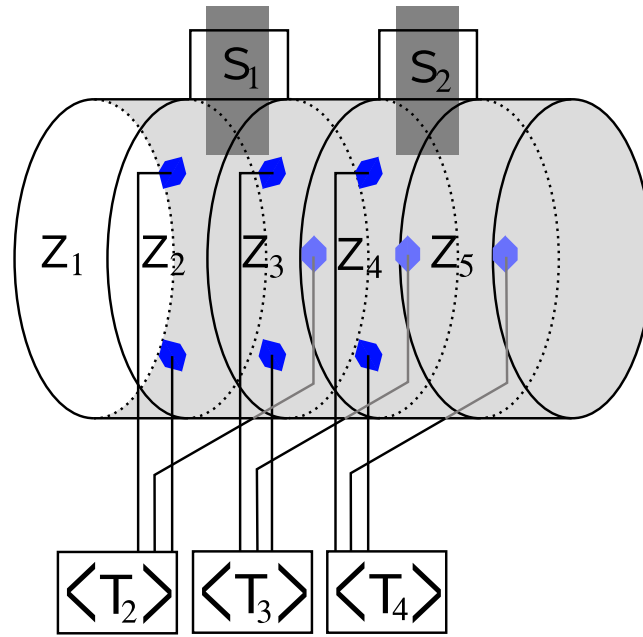
Wie bereits in Kapitel 5 erwähnt, ist die Endstellung der Stempel 1 und 2 des PETRA-Cavitys 2 mit verbundener Symmetrisierungsregelung bei einer Vorlaufleistung von  $VR = 13 \text{ kW}$  auf den Positionen  $S_1 = (1 \pm 1) \text{ mm}$  sowie  $S_2 = (18 \pm 1) \text{ mm}$ . Unter der Annahme, dass das in Kapitel 4 beschriebene Verfahren zur Einstellung der Koppelschleifen in den Zellen 2 und 4 des Hochfrequenzresonators korrekt ist, lässt sich anhand dieser Positionen erkennen, dass dieser Hochfrequenzresonator deutlich größere Asymmetrien in der Feldverteilung aufweist als PETRA-Cavity 1. Da die Feldstärke innerhalb der Zellen auf Grund der ohmschen Verluste an den Zellenwänden eine proportionale Temperaturerhöhung nach sich zieht, bietet sich hier eine Temperaturmessung an PETRA-Cavity 2 an.

Hierbei empfiehlt es sich, die Wasserkühlung des Hochfrequenzresonators zu drosseln oder gegebenenfalls auszuschalten<sup>26</sup> und jeweils an den Zellen eine oder mehrere elektronisch auslesbare Temperatursensoren anzubringen. Da die Grundmode  $\text{TM}_{010}$  in radialer Richtung an den Zellenwänden größtenteils homogen ist und die longitudinale Feldverteilung vom Zellenzentrum zu den Zellenenden hin abnimmt, sollten beispielsweise drei Temperatursensoren<sup>27</sup> ausreichen. Diese sollten jeweils in Höhe des Zellenzentrums und radial äquidistant an der Außenhaut des Hohlraumresonators angebracht werden (siehe Abbildung A.1). Zur Verifizierung der asymmetrischen Feldverteilung sollte die Symmetrisierungsregelung durch Lösen der Verbindungen zwischen den Zellen 2 bzw. 4 und der Cavity-Kontrolle außer Kraft gesetzt und die Stempel jeweils auf die gleiche Positionen gefahren werden ( $S_1 = S_2 \approx 8 \text{ mm}$ ). Die Resonanzregelung sollte aktiviert werden, um die reflektierte Leistung zum Klystron hin zu minimieren und dem Zustand vor der Symmetrisierung zu entsprechen.

Wird nun die Grundmode  $\text{TM}_{010}$  mit geringer Vorlaufleistung  $VR \simeq 10 \text{ kW}$  auf der Standardfrequenz angeregt, werden durch die Feldverteilung in den einzelnen Zellen des Hochfrequenzresonators durch ohmsche Verluste die Zellenwände unterschiedlich erhitzt. Somit erwärmen sich auch die Außenwände des Hohlraumresonators. Im thermischen Gleichgewicht sollten nun die Temperatursensoren der jeweiligen Zellen unterschiedliche Spannungen bzw. Temperaturen messen. Da für jede Zelle drei Temperatursensoren verwendet werden und die Grundmode radialsymmetrisch ausgeprägt ist, bietet es sich an, eine Mittelung der drei korrespondierenden Messwerten für eine Zelle vorzunehmen und daraus einen Fehler durch deren Varianz zu gewinnen. So lassen sich nun indirekt die Feldverteilungen in den Zellen 2, 3 und 4 aus den gemessenen Temperaturen ermitteln. Misst man in Zelle 2 eine höhere Temperatur als in den Zellen 3 und 4 bei gleichen Stempelpositionen, so lässt sich damit belegen, dass die Felder in Zelle 2 deutlich ausgeprägter sind als in den beiden anderen Zellen. Die Temperaturmessung ist dementsprechend auch unabhängig von den Koppelfaktoren in den Zellen 2 und 4. Bei korrekt eingestellten Koppelschleifen würde somit die Symmetrisierungsregelung die Stempel in den Zellen 2 und 4 dementsprechend auf asymmetrische Positionen fahren, um die Feldverteilung dadurch zu symmetrisieren. Zum einen könnte somit die Richtigkeit des Verfahrens zur Einstellung der Koppelschleifen und zum anderen die deutliche Asymmetrie der Feldverteilung in PETRA-Cavity 2 in Teilen experimentell bestätigt werde.

<sup>26</sup>Hierbei sollte zunächst sichergestellt sein, dass die Erhitzung bei gewählter Vorlaufleistung nicht dauerhafte Schäden an den Resonatoren hervorruft.

<sup>27</sup>Temperaturabhängige Widerstände, z.B. des Typs PT100



**Abbildung A.1:** Schematische Darstellung der Messung. Hier mittels neun Temperatursensoren.

## A.2 Daten- und Auswertungstabellen

### Anmerkung zu den Bezeichnungen im Anhang:

- $S_i$ : Stempel 1 oder Stempel 2
- $\Delta S$ : Stempeldifferenz,  $\Delta S = S_1 - S_2$
- $f_{\text{res}}$ : Nachkommaanteil der Resonanzfrequenz in MHz des Hochfrequenzresonators. Für die Resonanzfrequenz sind noch 499 MHz zu addieren
- $U_{Z_i}$ : An den Powermetern gemessene Spannung der Zelle  $i$
- $U_{Z_i}^{\text{korrt}}$ : Um die Dämpfung korrigierte Werte der an den Powermetern gemessenen Spannungen der Zelle  $i$
- $\kappa_{Z_i}$ : Einstellung der Signalmessschleife der Zelle  $i$  in Umdrehungen bezüglich eines gewählten Nullpunktes
- $PC\ i\ Z\ j$ : Aus den Powermeter ausgelesene Spannung des  $i$ -ten PETRA-Resonators der Zelle  $j$
- PZ3: Leistung in der Zelle 3 des jeweiligen PETRA-Resonators, im Graphen normiert auf 10 bzw. 30 mW
- $\Delta S_1, \Delta f_{\text{res}}$ : Fehler bezogen auf die nachstehende Messgröße
- $S_i$ -Variation: Variation des  $i$ -ten Stempels, der andere Stempel verbleibt auf der Startposition
- $\kappa_{Z_i}$ : Einstellung der Signalmessschleife der  $i$ -ten Zelle, entspricht  $x_{Z_i}$

Da die Auflistung aller Daten der durchgeführten Messungen den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, sind hier nur die graphischen Darstellungen der Messungen aufgelistet. Die Tabellen der Messungen sind bei der ELSA-Arbeitsgruppe erhältlich [Sau10].

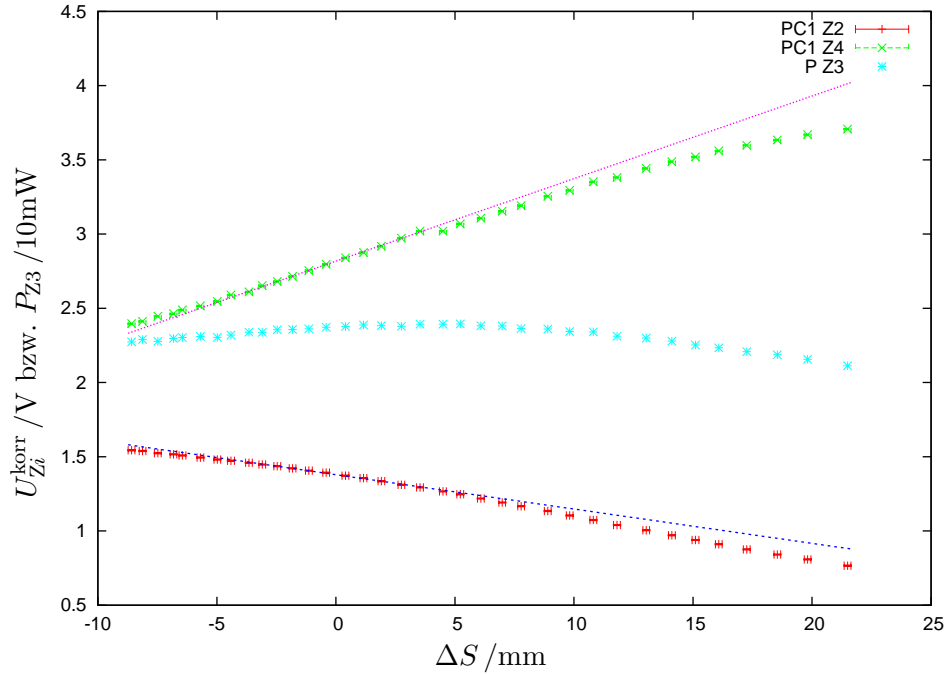


Abbildung A.2: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = 0$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

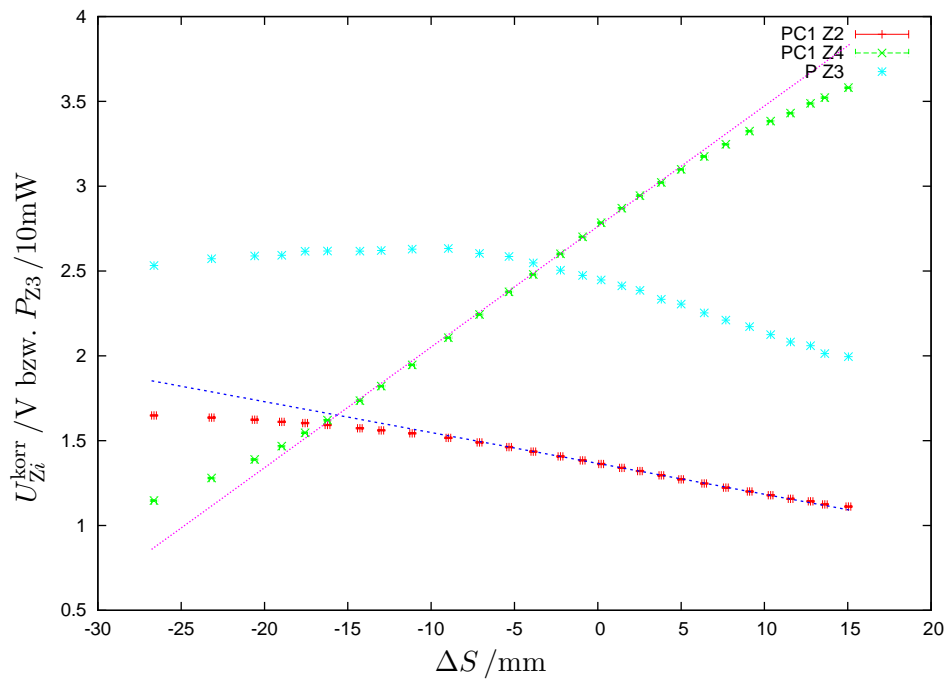


Abbildung A.3: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = 0$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

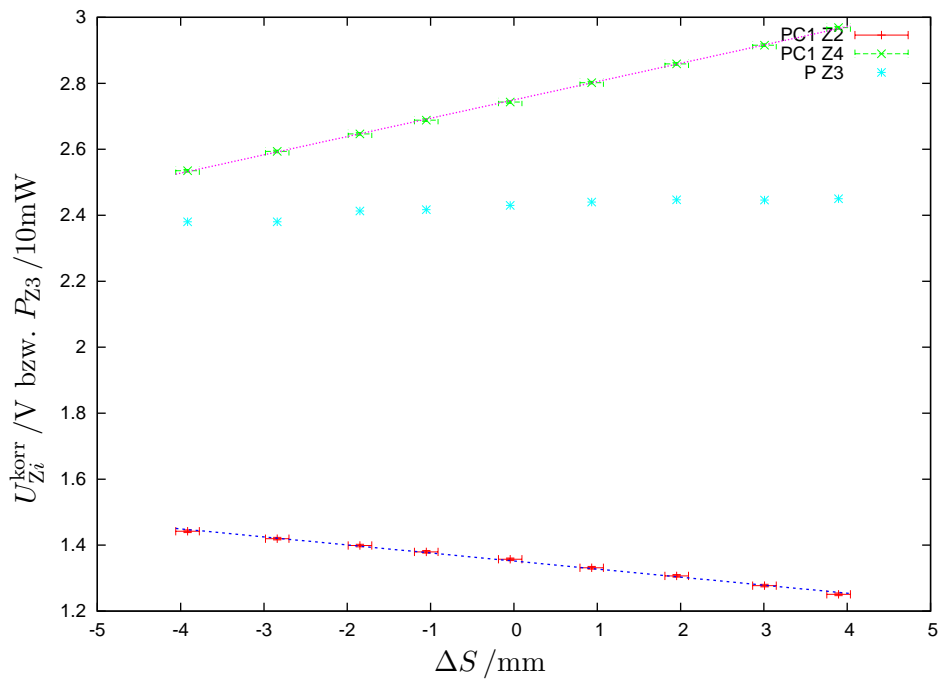


Abbildung A.4: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = 0$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

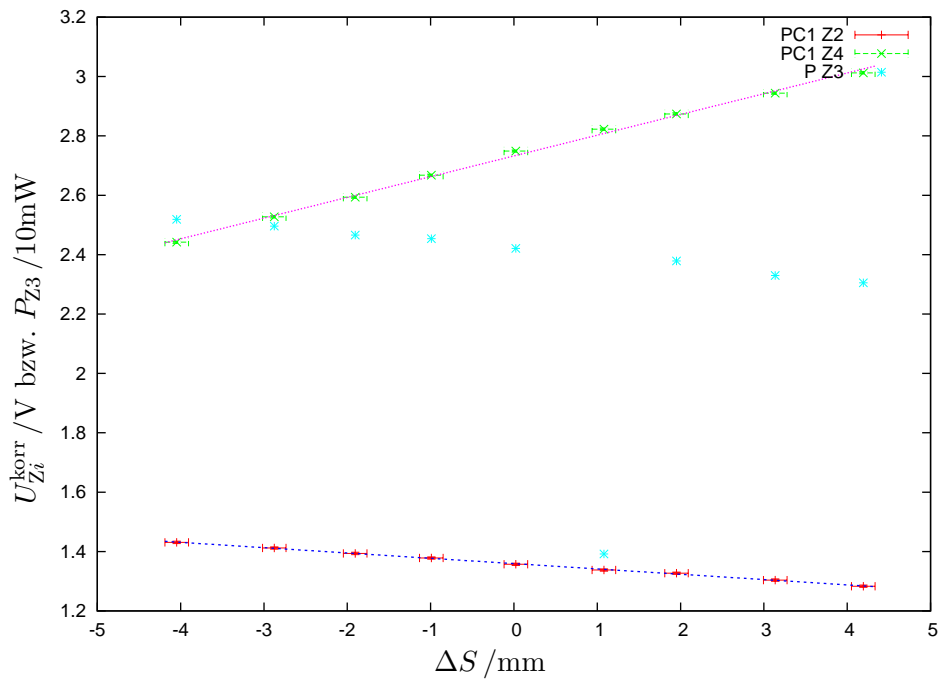
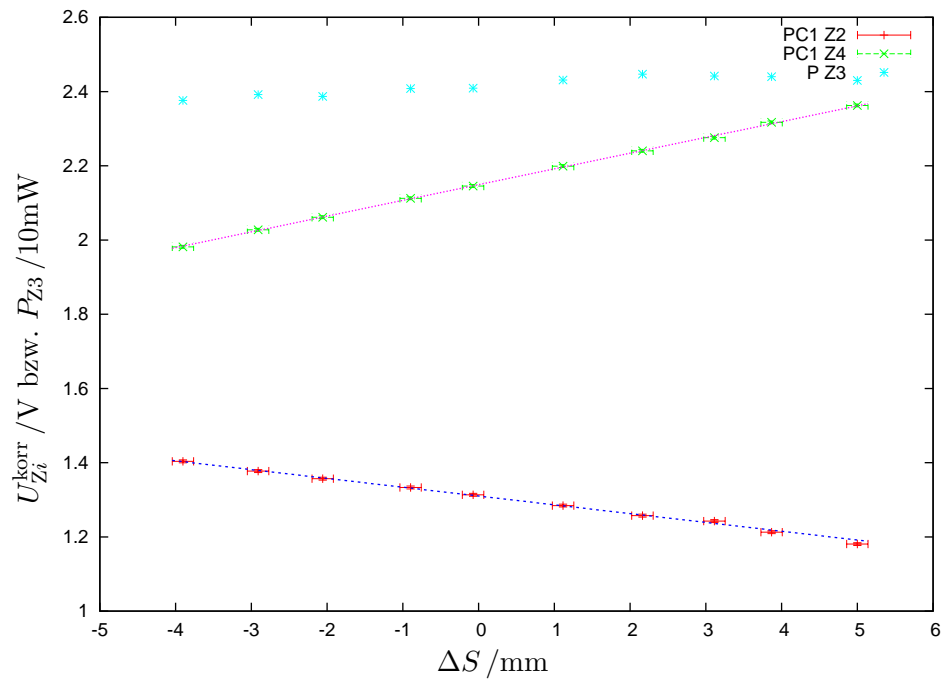
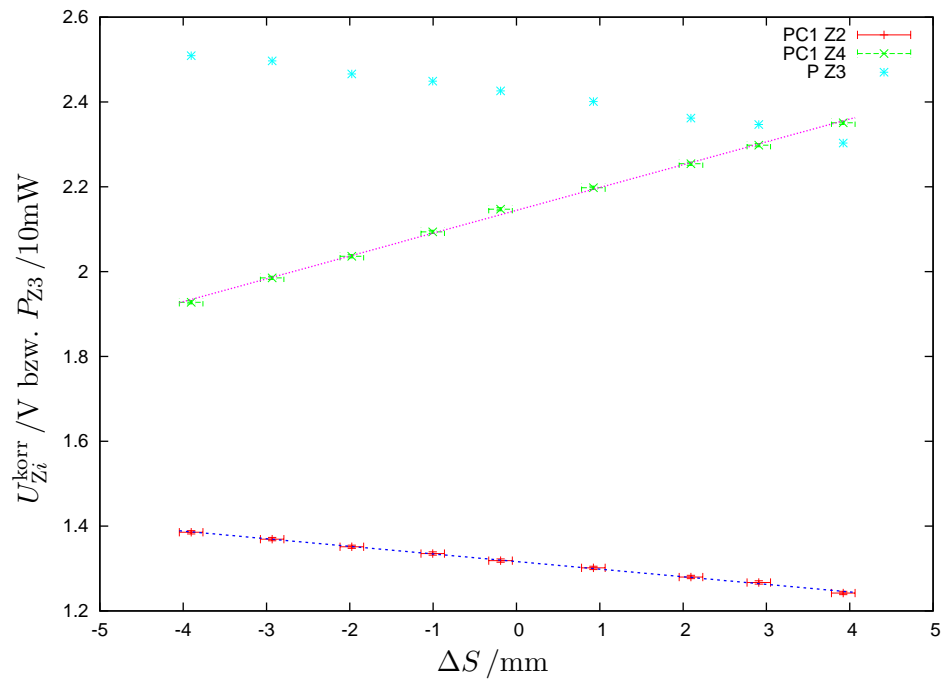


Abbildung A.5: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = 0$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

Abbildung A.6: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +2$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.Abbildung A.7: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +2$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

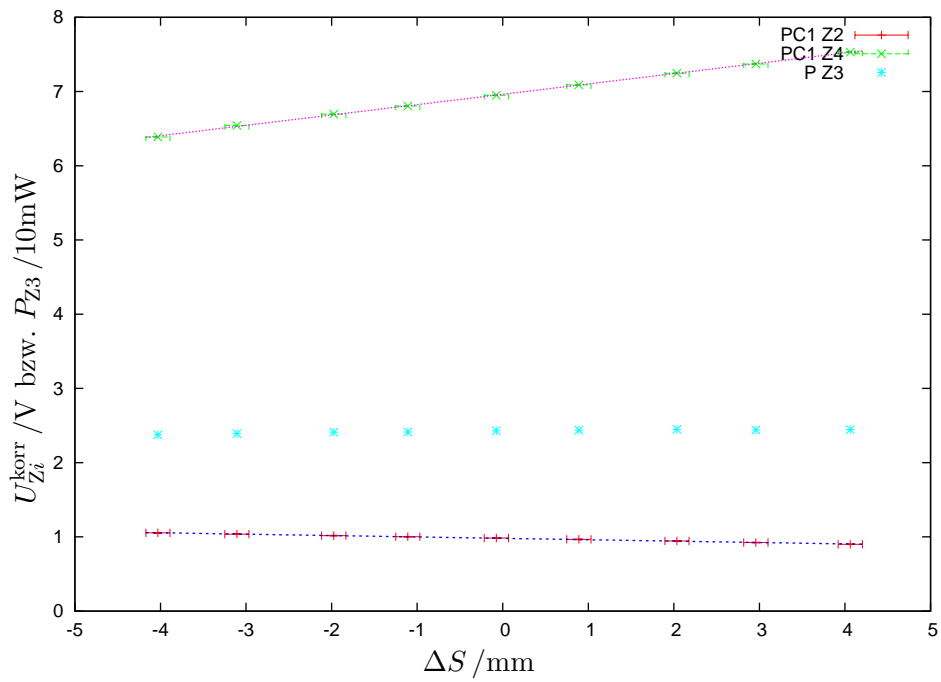


Abbildung A.8: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +4$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

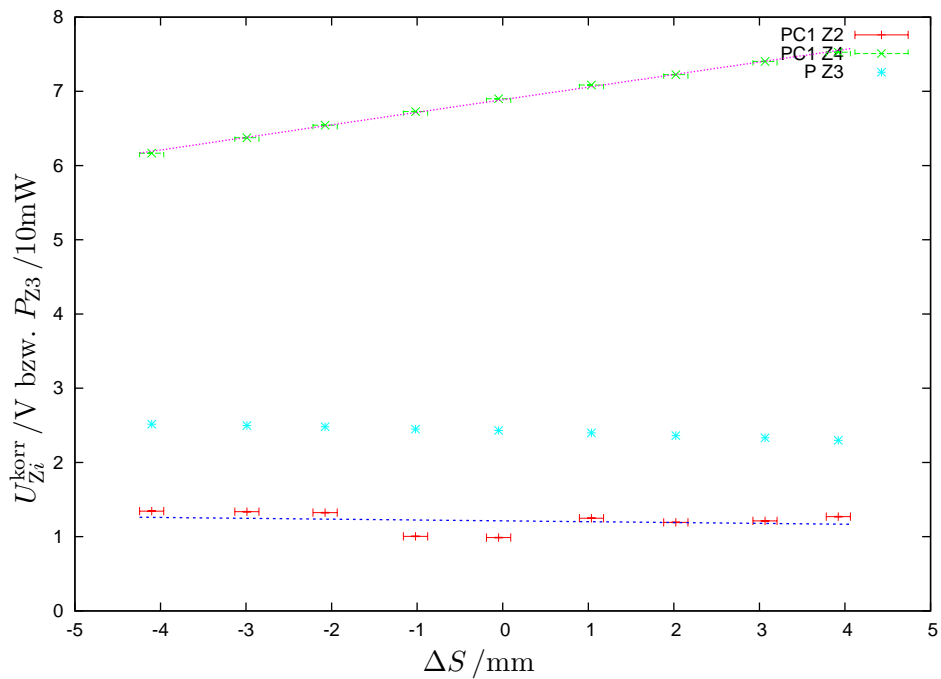


Abbildung A.9: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +4$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.



$S_1$ /mm	$S_2$ /mm	$\Delta S$ /mm	$f_{\text{res}}/499\text{MHz} + x\text{Hz}$	$U_{Z2}$ /V	$U_{Z2}^{\text{kor}} /V$	$U_{Z4}$ /V	$U_{Z4}^{\text{kor}} /V$	$P_{Z3}$ /mW	$RR$ /W	$VR$ /kW
2,119	6,093	-3,974	605340	0,7171	1,3934	2,2600	4,2816	23,76	44	13,026
3,251	6,093	-2,842	620620	0,7067	1,3732	2,3000	4,3574	23,85	45	12,985
3,936	6,093	-2,157	634630	0,6975	1,3553	2,3450	4,4427	24,08	48	13,039
4,942	6,093	-1,151	650380	0,6867	1,3343	2,3960	4,5393	24,27	50	13,053
5,907	6,093	-0,186	664760	0,6752	1,3120	2,4410	4,6245	24,31	52	13,039
7,081	6,093	0,988	679250	0,6635	1,2893	2,4870	4,7117	24,41	53	13,039
8,073	6,093	1,980	698420	0,6471	1,2574	2,5450	4,8216	24,42	55	13,012
8,953	6,093	2,860	711720	0,6342	1,2323	2,5880	4,9030	24,38	55	12,999
10,099	6,093	4,006	728390	0,6180	1,2009	2,6490	5,0186	24,42	56	13,026
6,242	2,080	4,162	604180	0,6352	1,2343	2,6920	5,1001	23,04	42	12,999
6,242	2,994	3,248	621980	0,6466	1,2564	2,6300	4,9826	23,41	45	13,026
6,242	4,137	2,105	636130	0,6556	1,2739	2,5780	4,8841	23,71	48	13,012
6,242	4,936	1,306	650120	0,6645	1,2912	2,5220	4,7780	24,01	50	13,012
6,242	5,993	0,249	665400	0,6746	1,3108	2,4600	4,6605	24,38	53	13,039
6,242	7,150	-0,908	679080	0,6835	1,3281	2,3960	4,5393	24,58	54	13,026
6,242	8,064	-1,822	694220	0,6935	1,3476	2,3270	4,4086	24,86	55	13,039
6,242	9,020	-2,778	706880	0,7017	1,3635	2,2640	4,2892	25,03	55	13,026
6,242	9,977	-3,735	719030	0,7088	1,3773	2,1970	4,1623	25,12	55	12,999

**Tabelle A.1:** PETRA 1, Abbildungen A.10, A.11;  $\kappa_{Z4} = +3$  Umdrehungen, Fehler:  $\Delta S_i = 0,1$  mm,  $\Delta(\Delta S) = 0,14$  mm,  $\Delta f_{\text{res}} = 200$  Hz,  $\Delta U_{Zi} = 2$  mV.

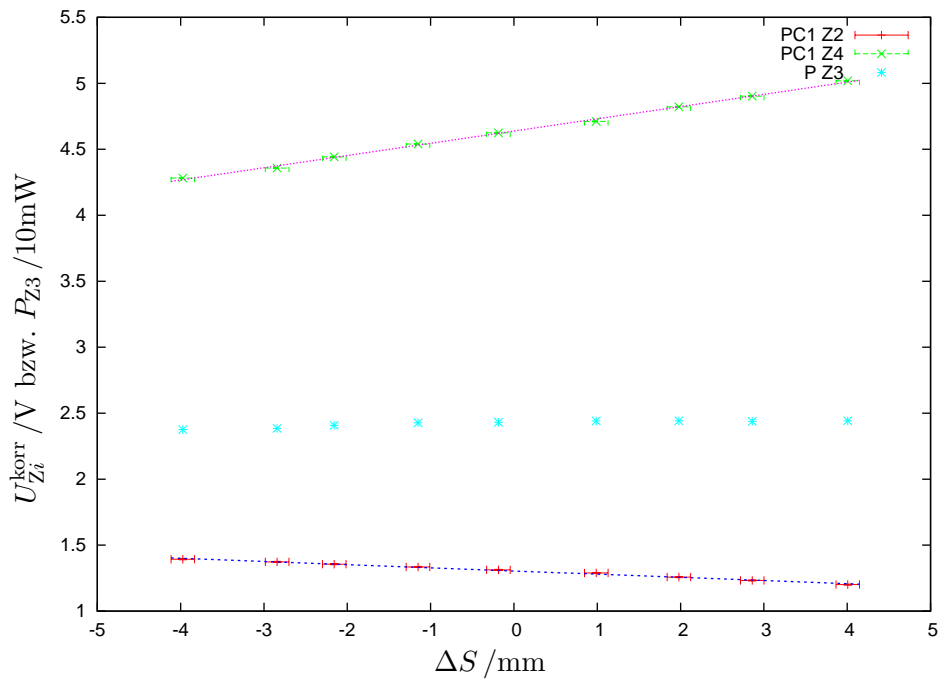


Abbildung A.10: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +3$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

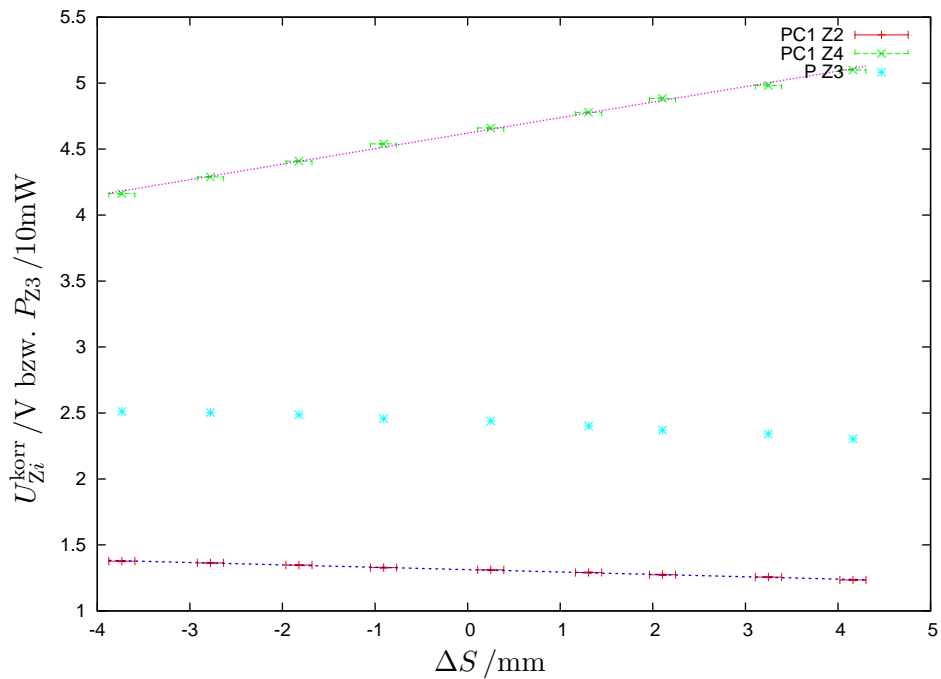
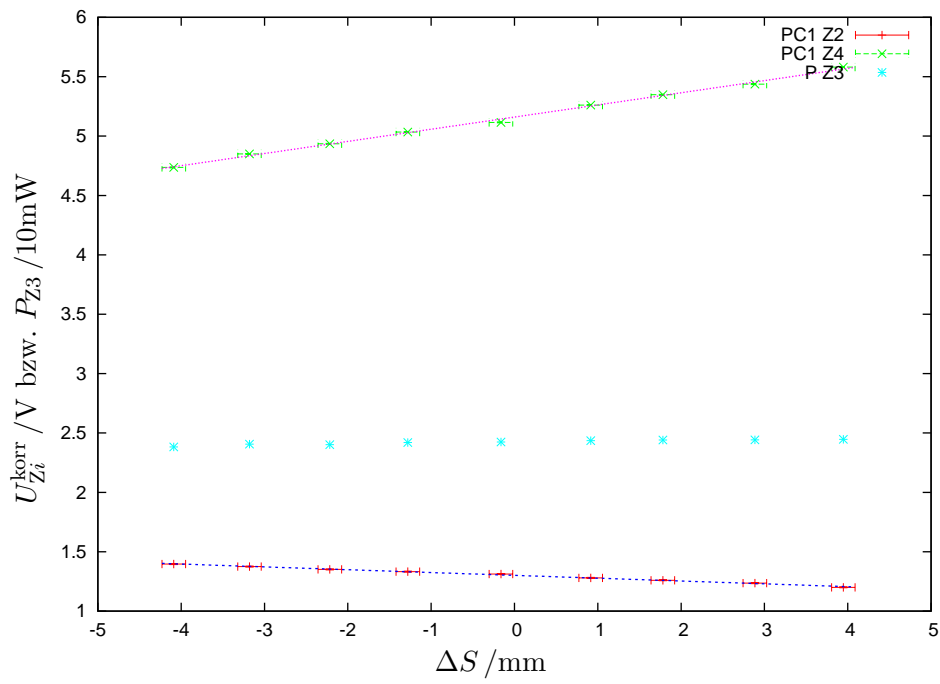
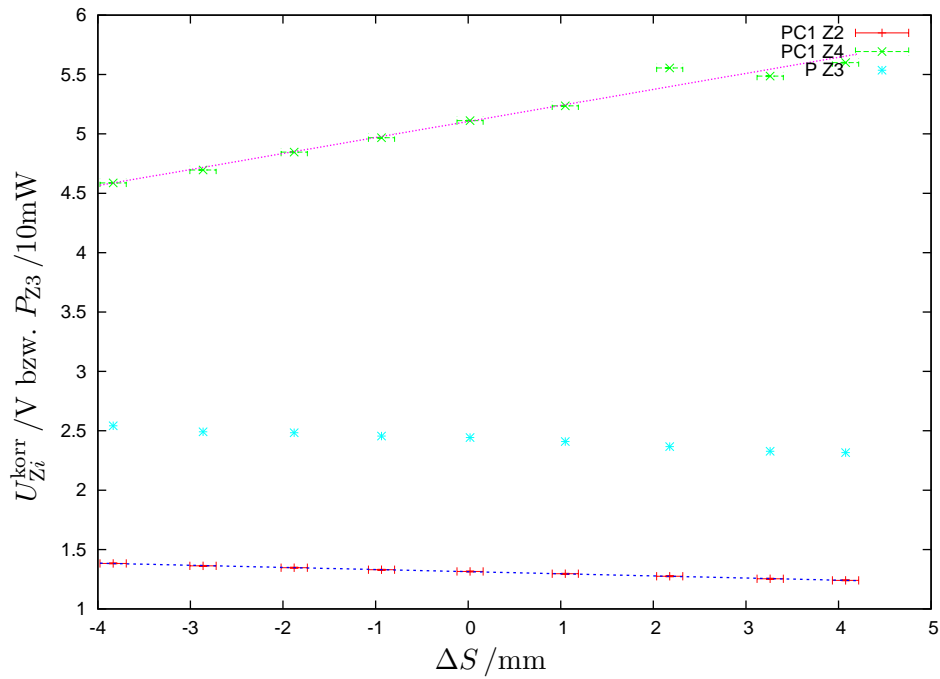
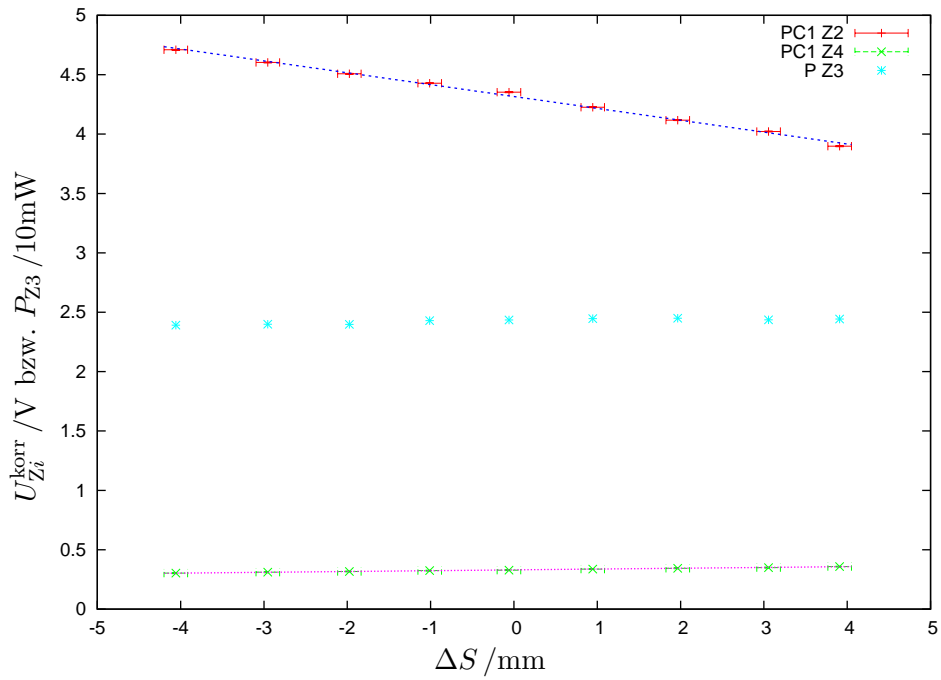
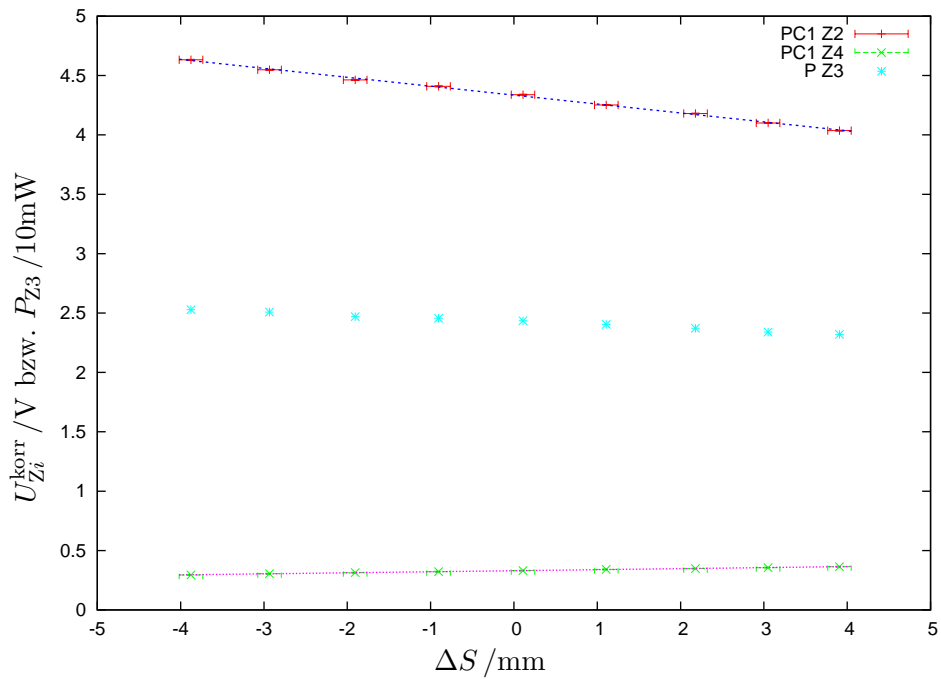


Abbildung A.11: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +3$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

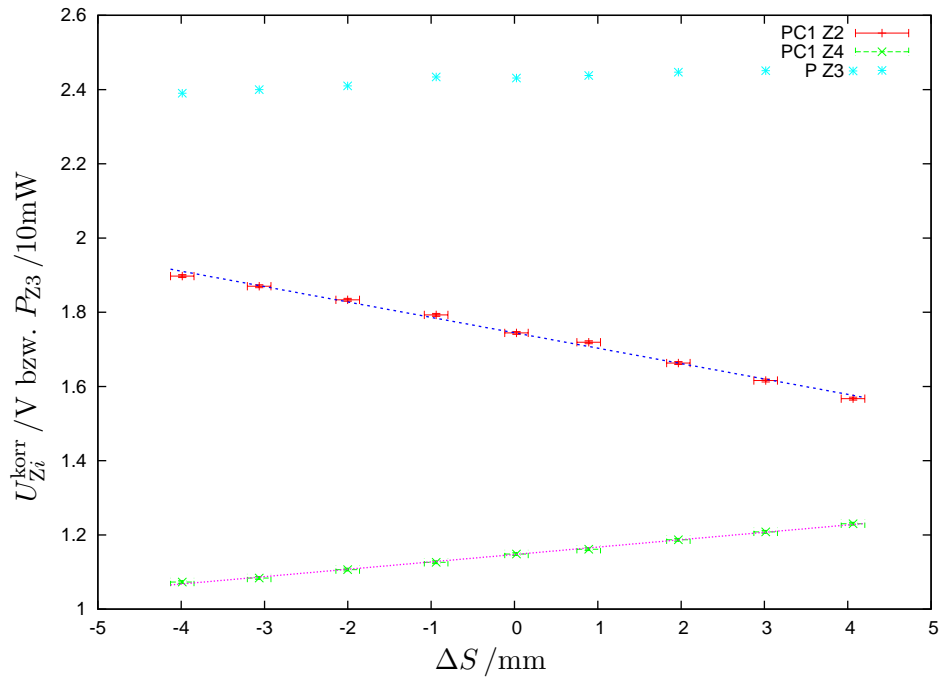
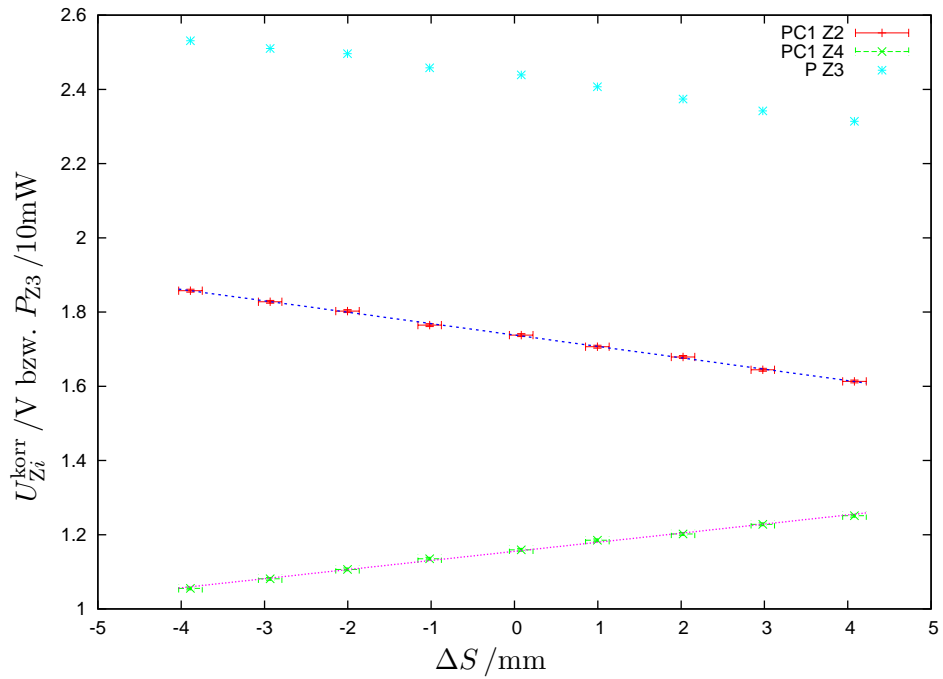
Abbildung A.12: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = -1$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.Abbildung A.13: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = -1$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.



**Abbildung A.14:** PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +1$  Umdrehungen,  $\kappa_{Z2} = +1$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.



**Abbildung A.15:** PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +1$  Umdrehungen,  $\kappa_{Z2} = +1$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

Abbildung A.16: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +0,5$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.Abbildung A.17: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +0,5$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

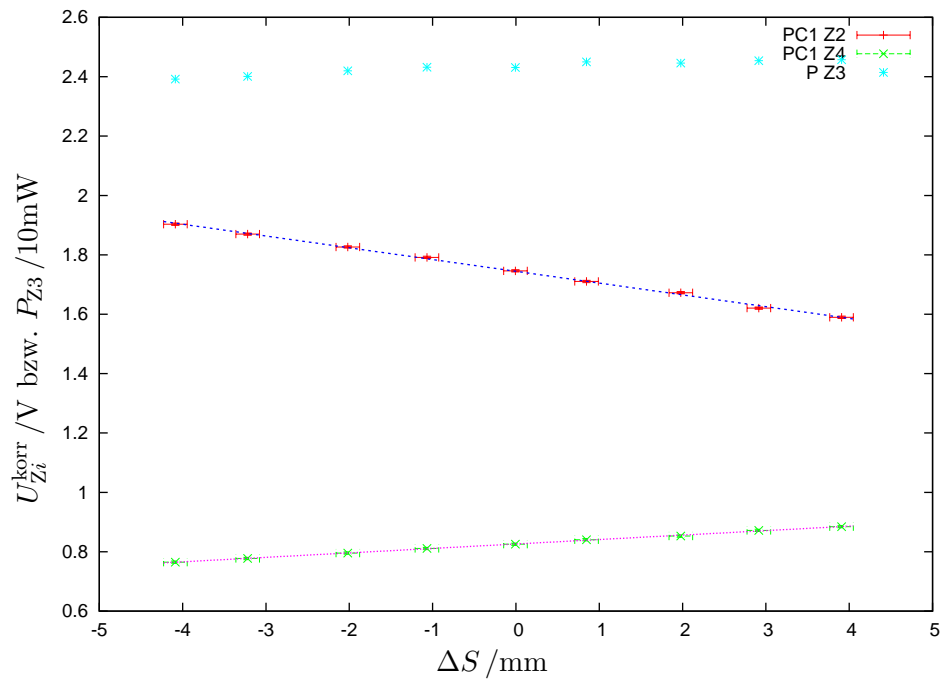


Abbildung A.18: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +0,75$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

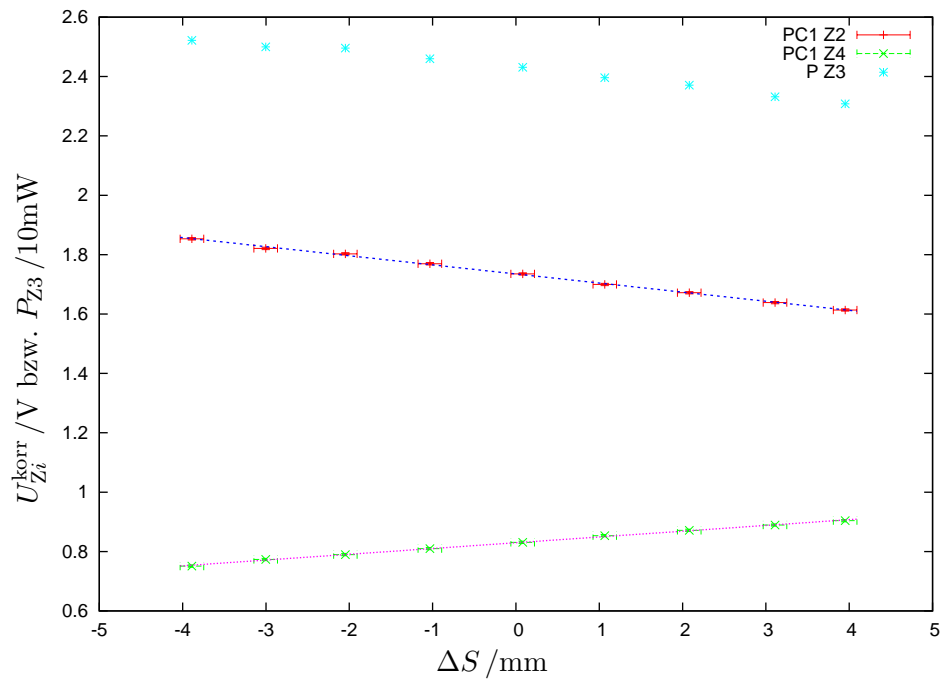


Abbildung A.19: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +0,75$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

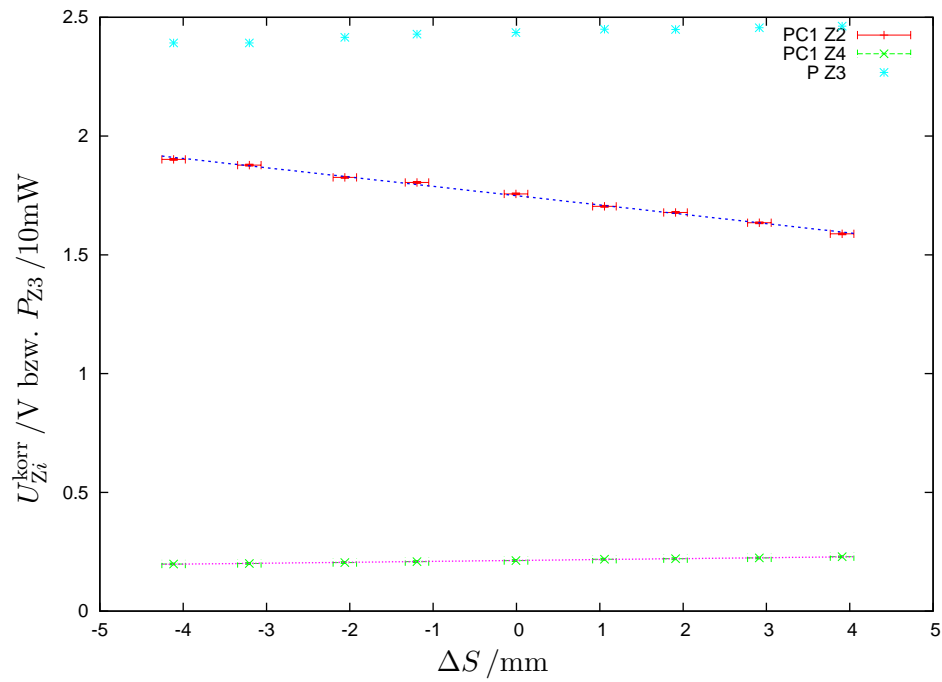


Abbildung A.20: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +1,25$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

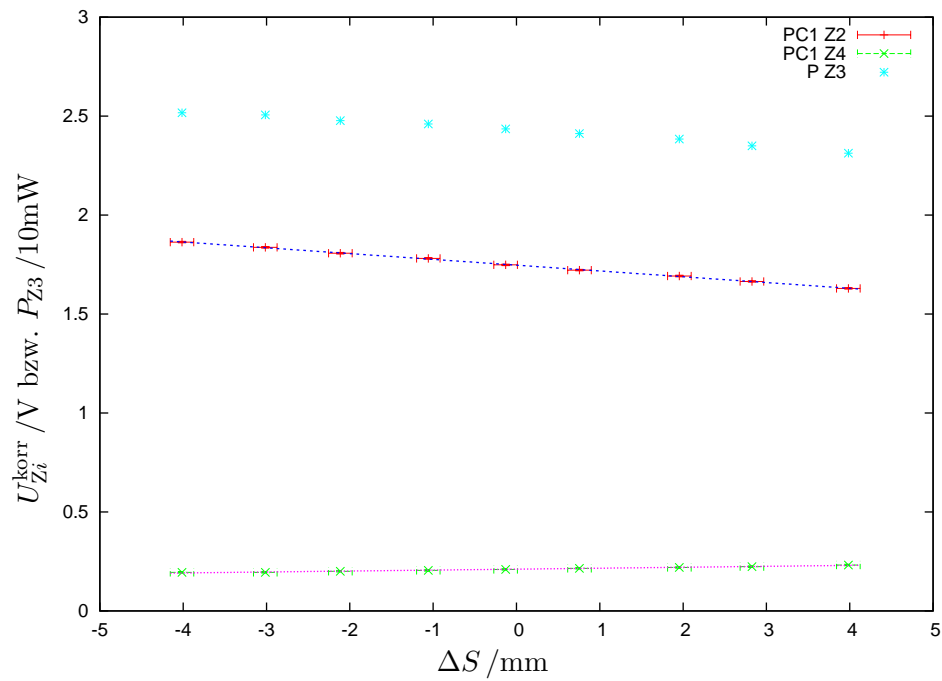


Abbildung A.21: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +1,25$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

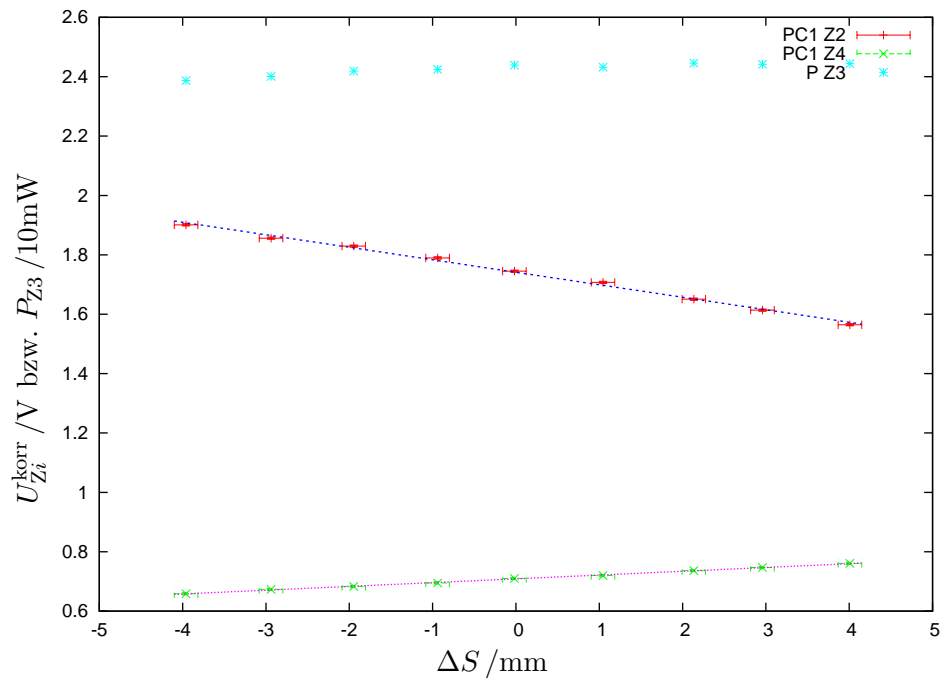


Abbildung A.22: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +1,5$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

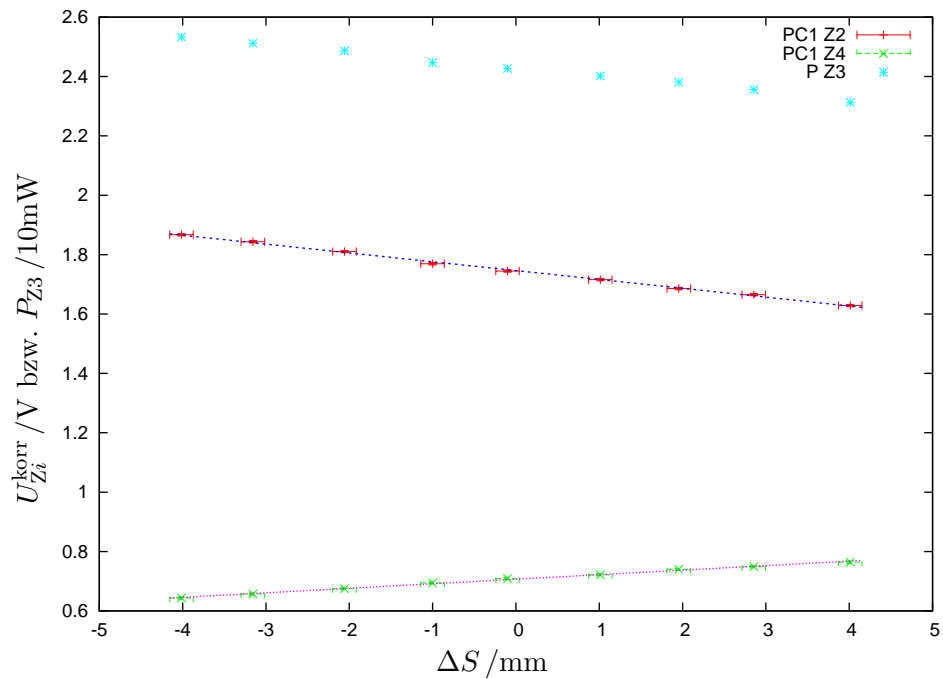


Abbildung A.23: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +1,5$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.



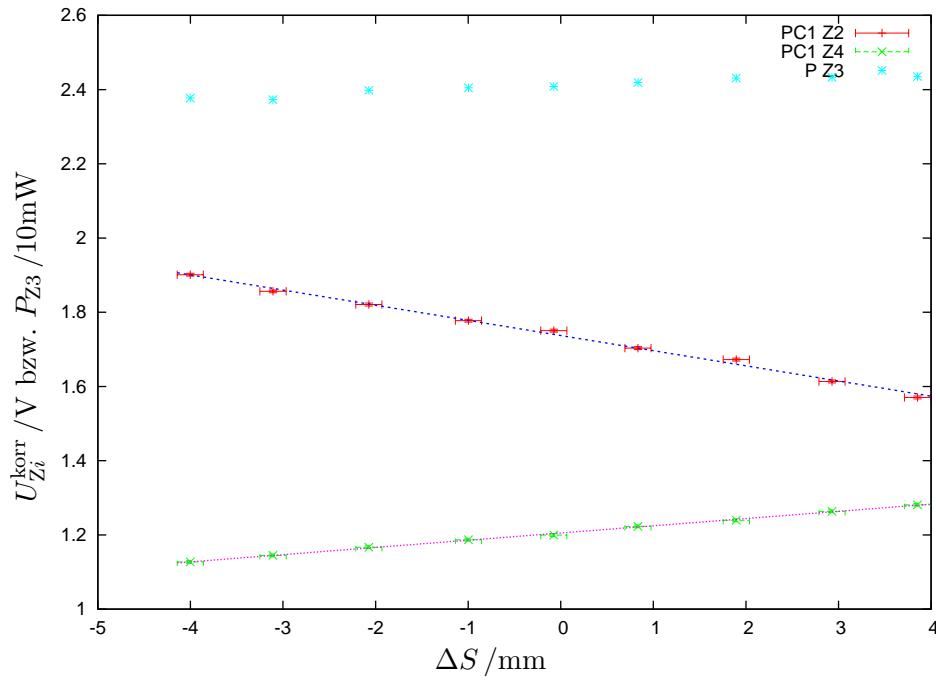


Abbildung A.24: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +1,75$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

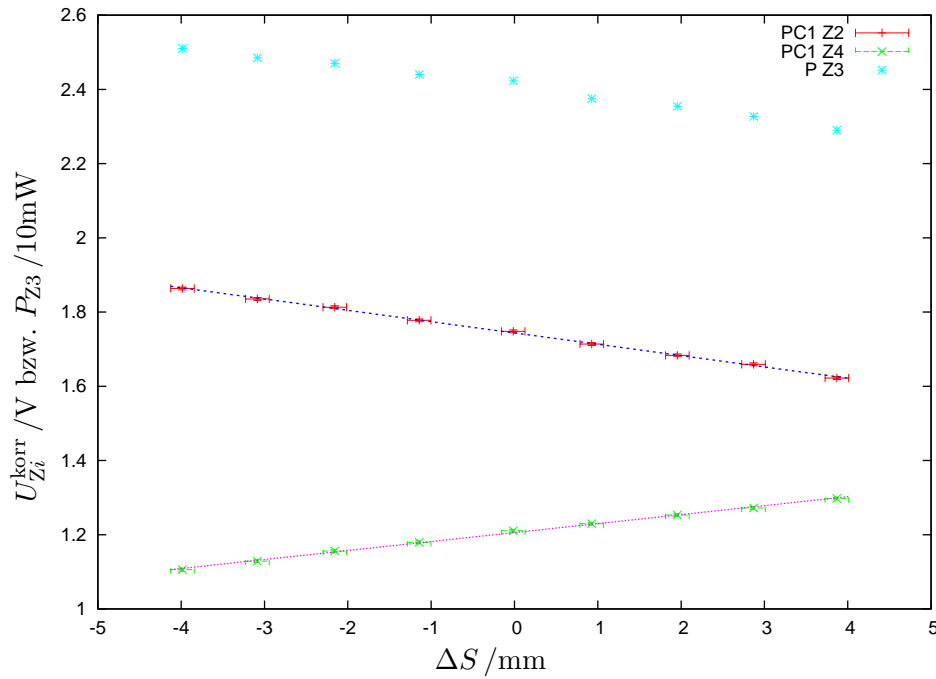


Abbildung A.25: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +1,75$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

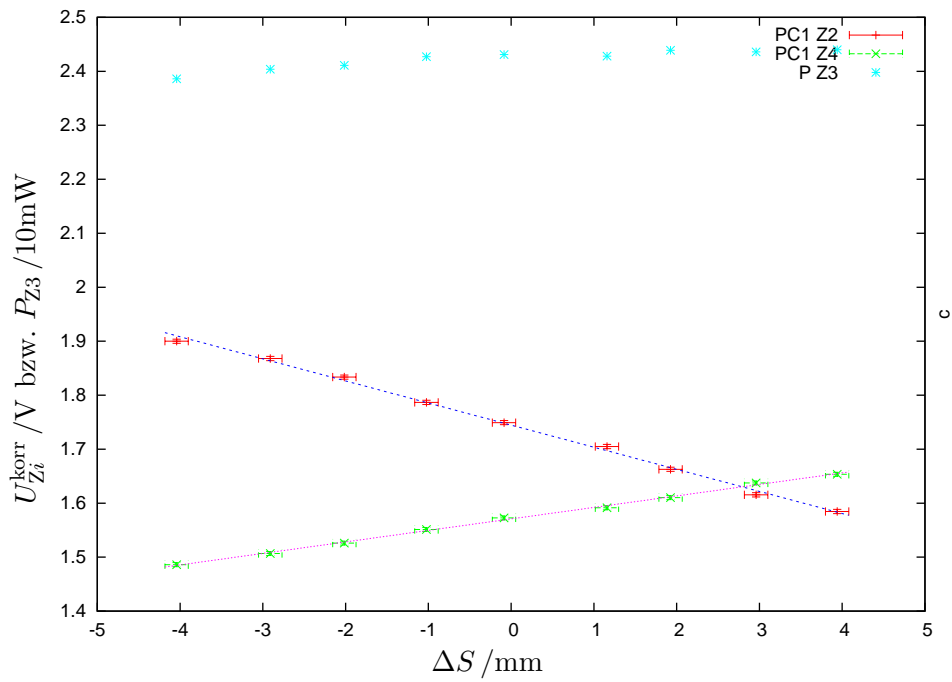


Abbildung A.26: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +2$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

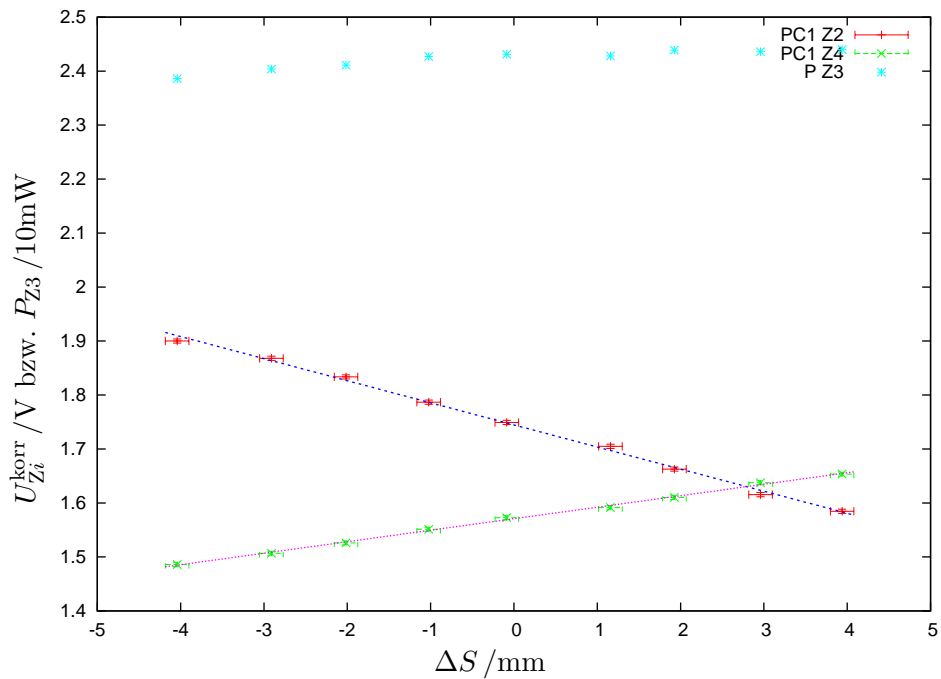


Abbildung A.27: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +2$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

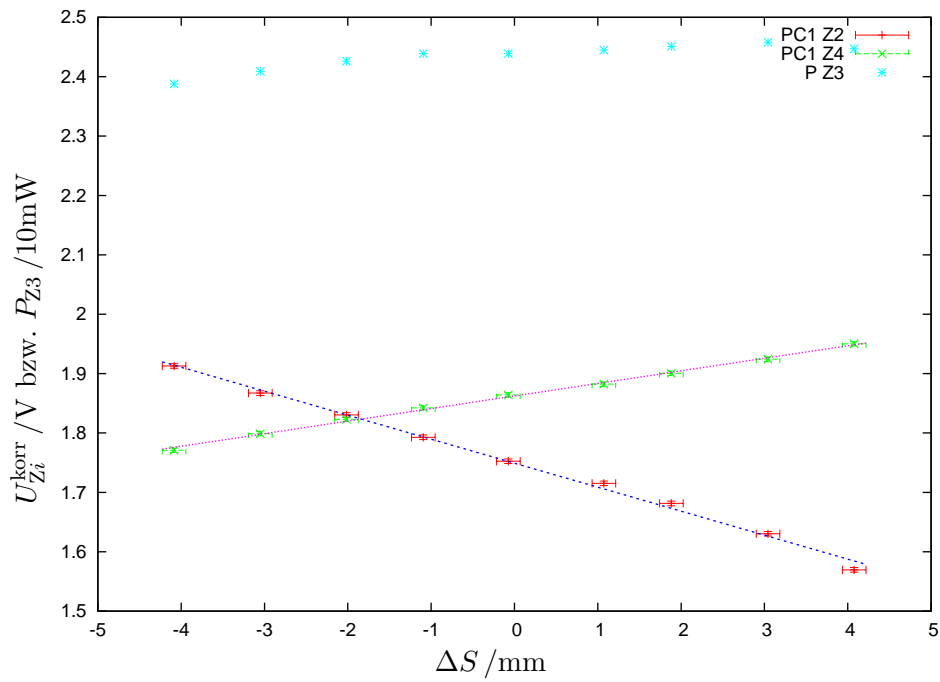


Abbildung A.28: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +2,25$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation, Powermeterkonfiguration A.

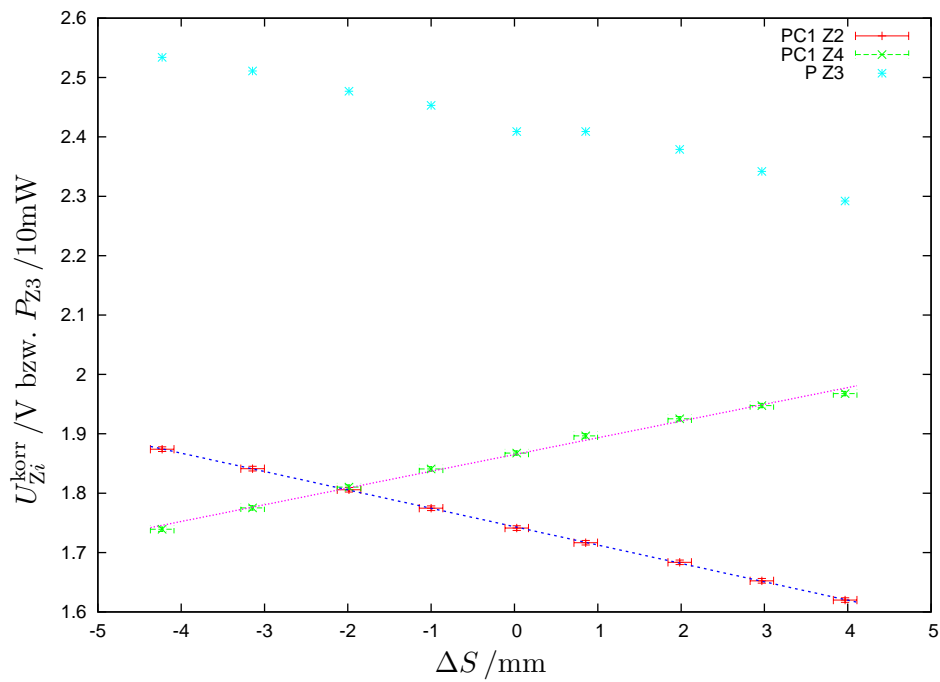
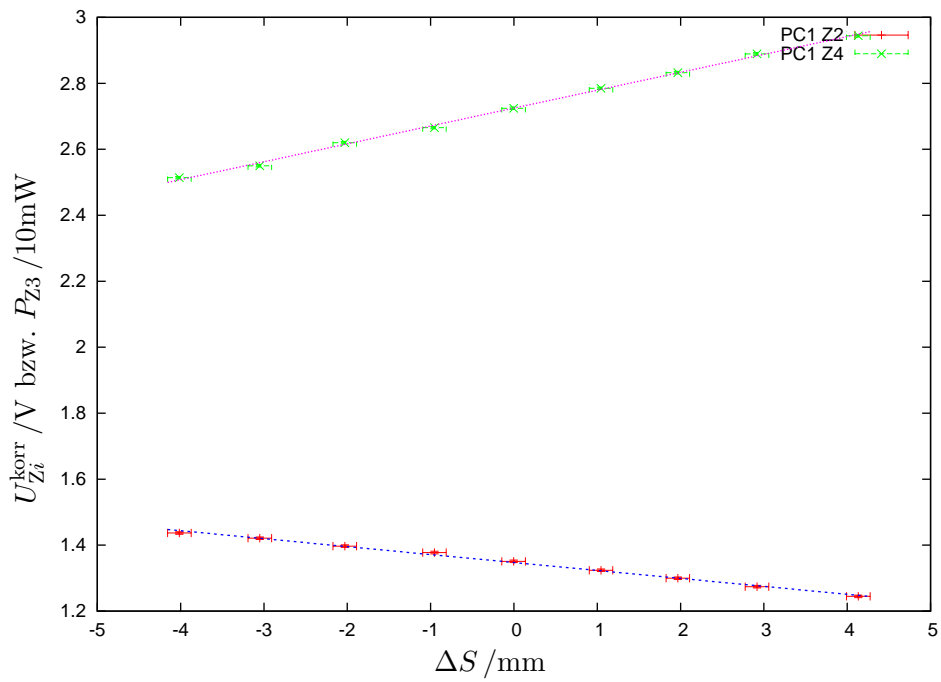
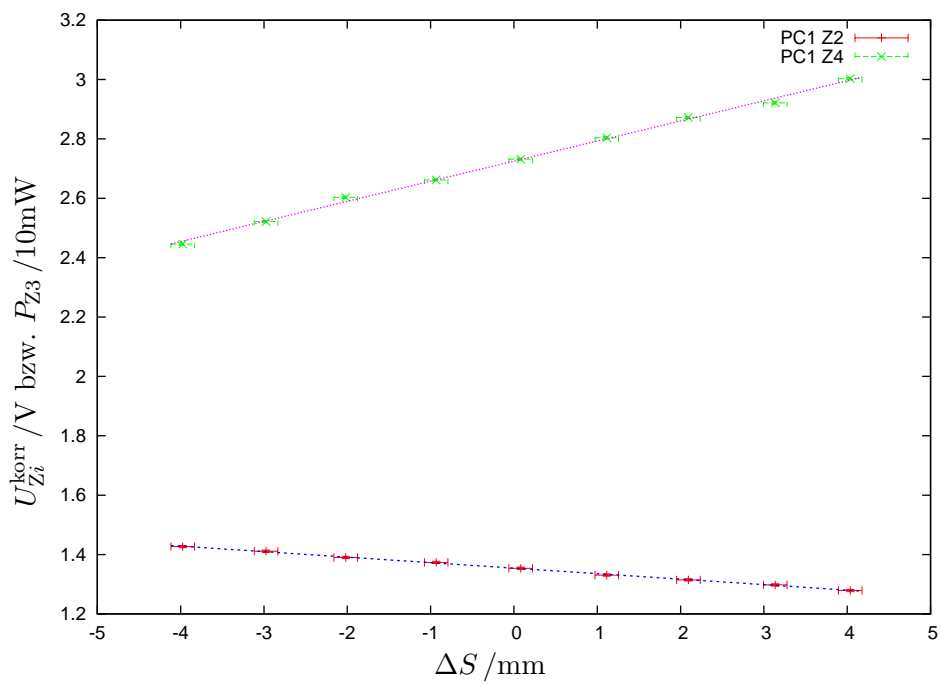


Abbildung A.29: PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +2,25$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation, Powermeterkonfiguration A.



**Abbildung A.30:** PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +2,25$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation, Powermeterkonfiguration B.



**Abbildung A.31:** PETRA 1, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = 0$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation, Powermeterkonfiguration B.

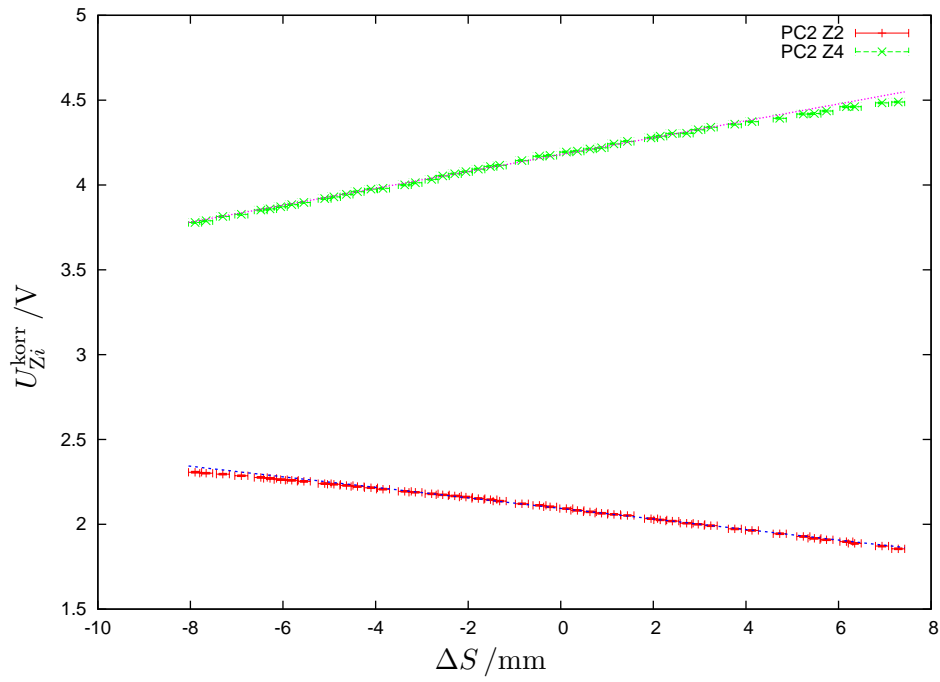


Abbildung A.32: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +0$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

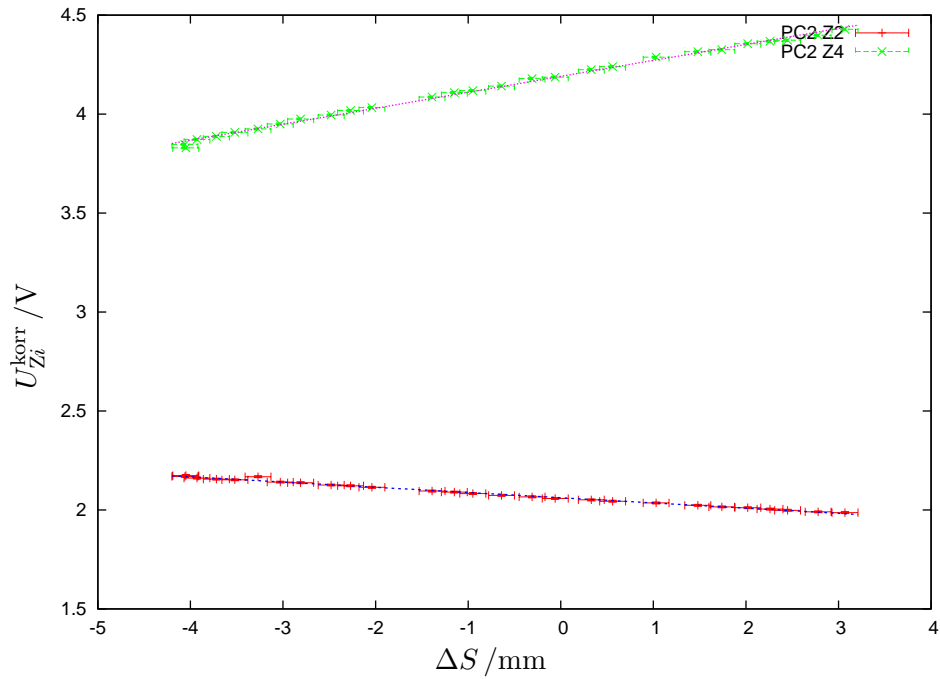


Abbildung A.33: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = 0$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

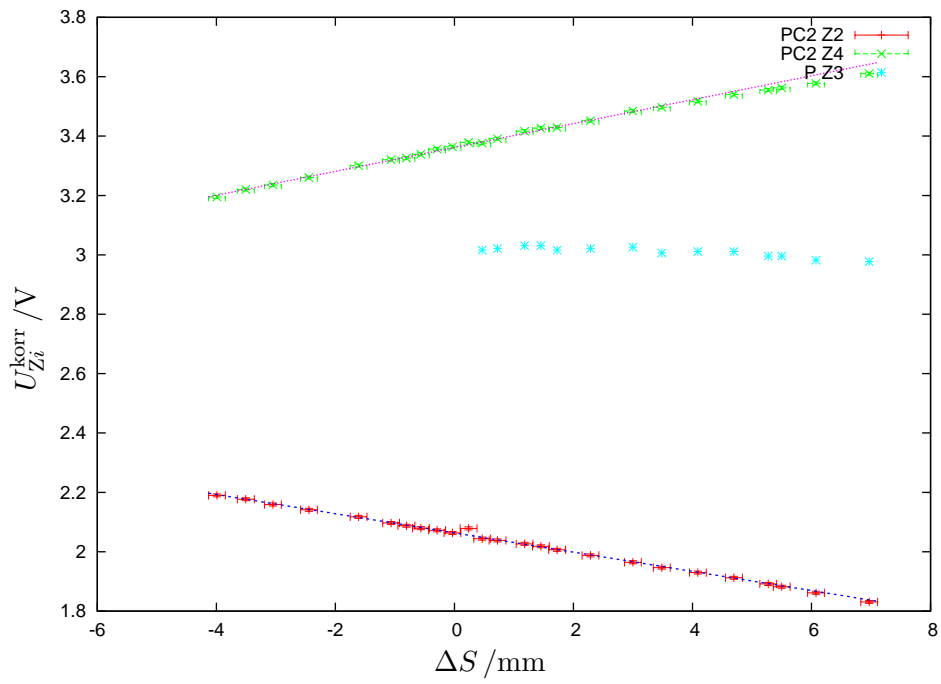


Abbildung A.34: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +2$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

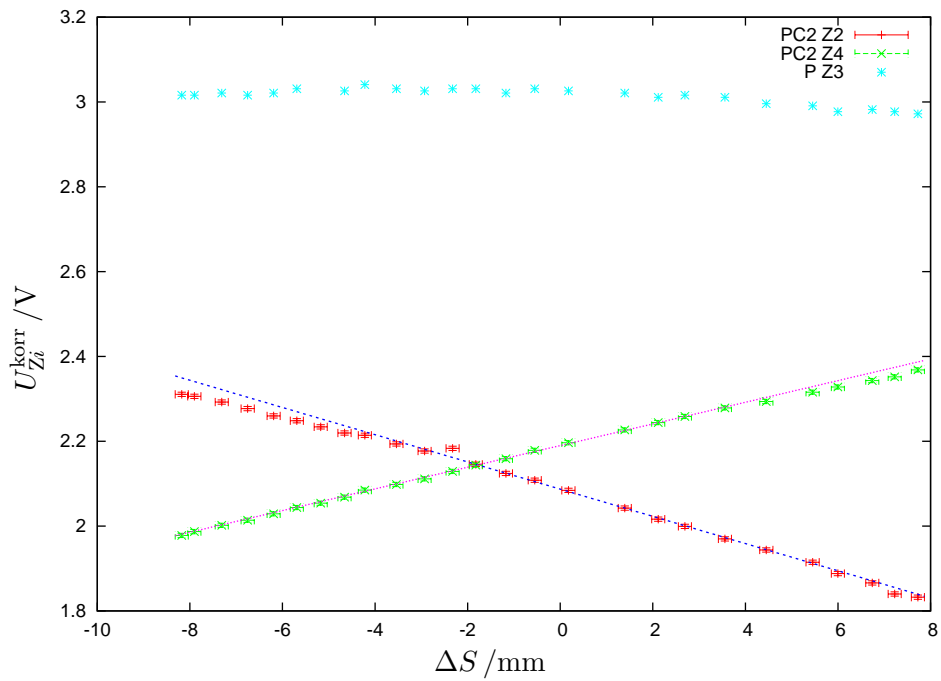
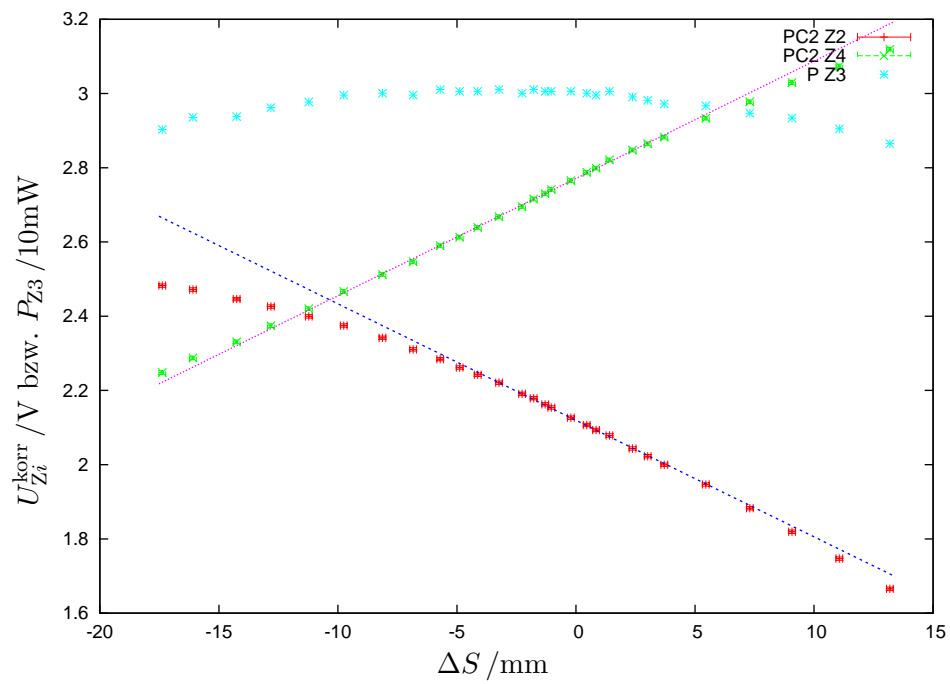
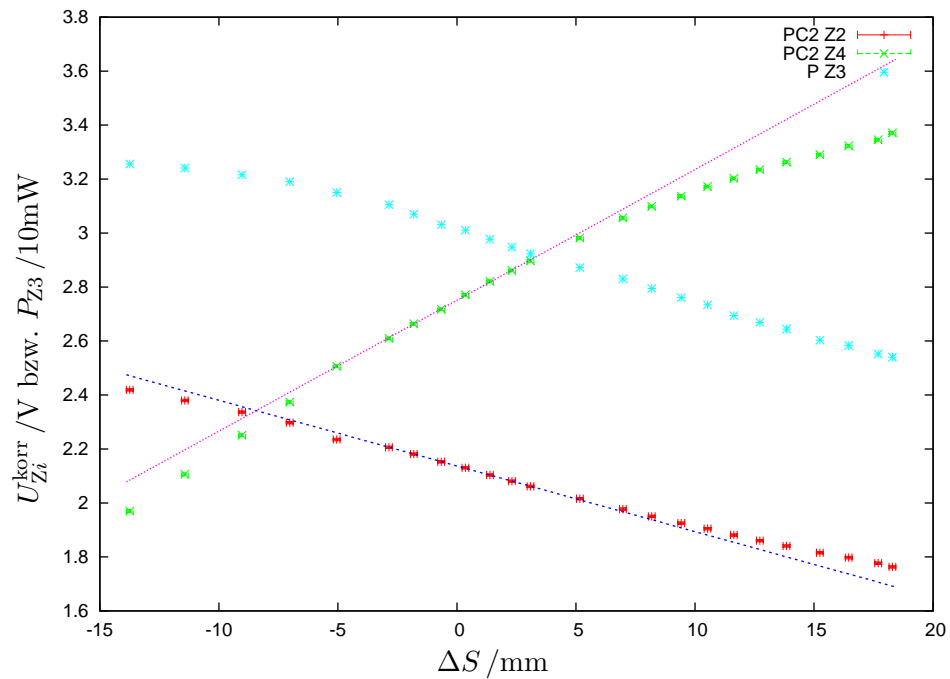


Abbildung A.35: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +4$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

Abbildung A.36: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +3$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.Abbildung A.37: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +3$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

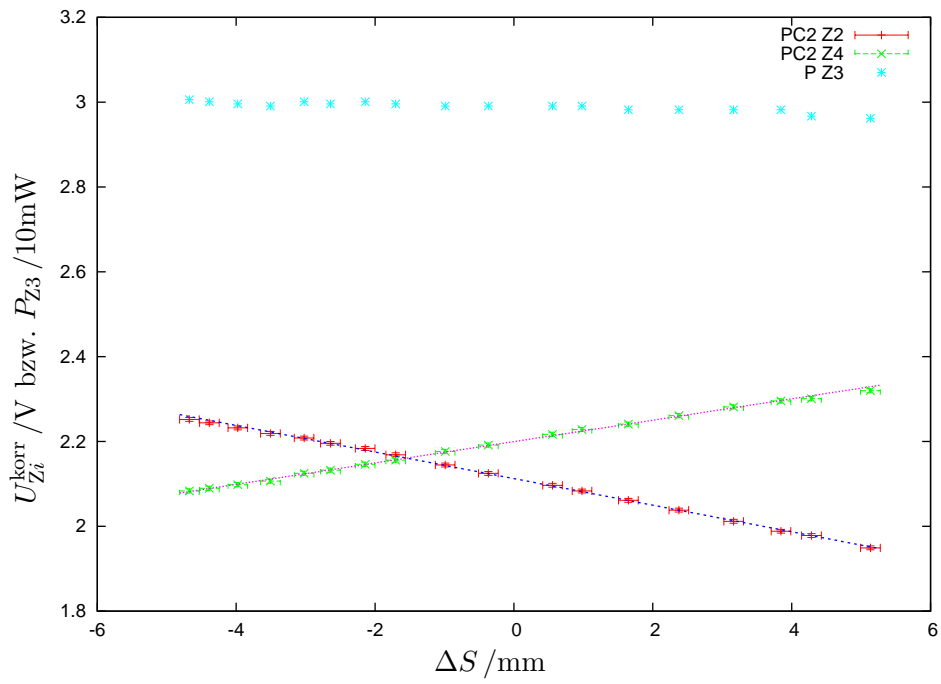


Abbildung A.38: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +5$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

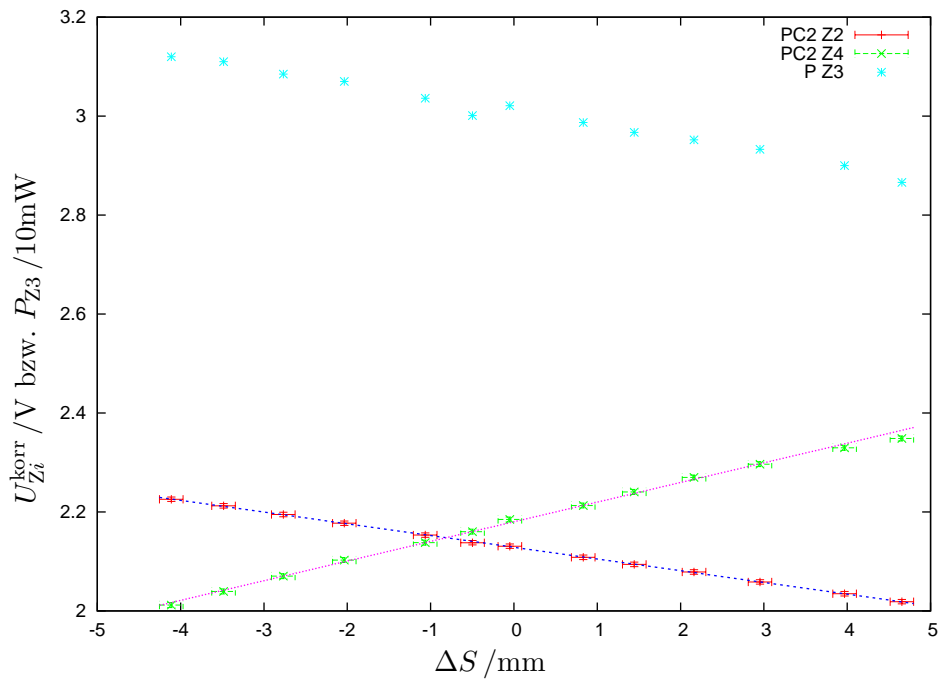
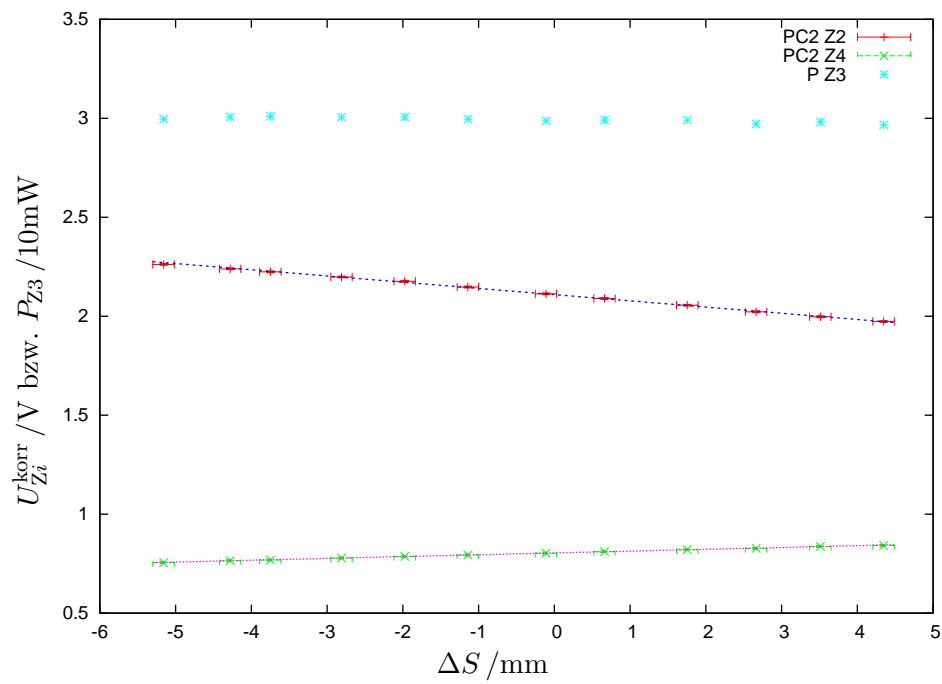
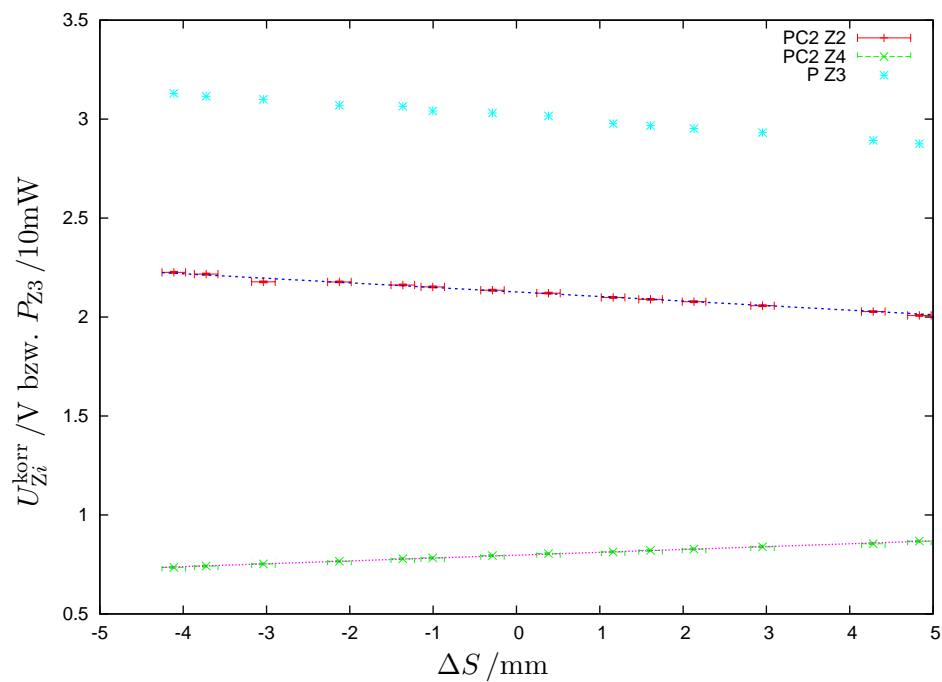


Abbildung A.39: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +5$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.



Abbildung A.40: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +7$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.Abbildung A.41: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +7$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

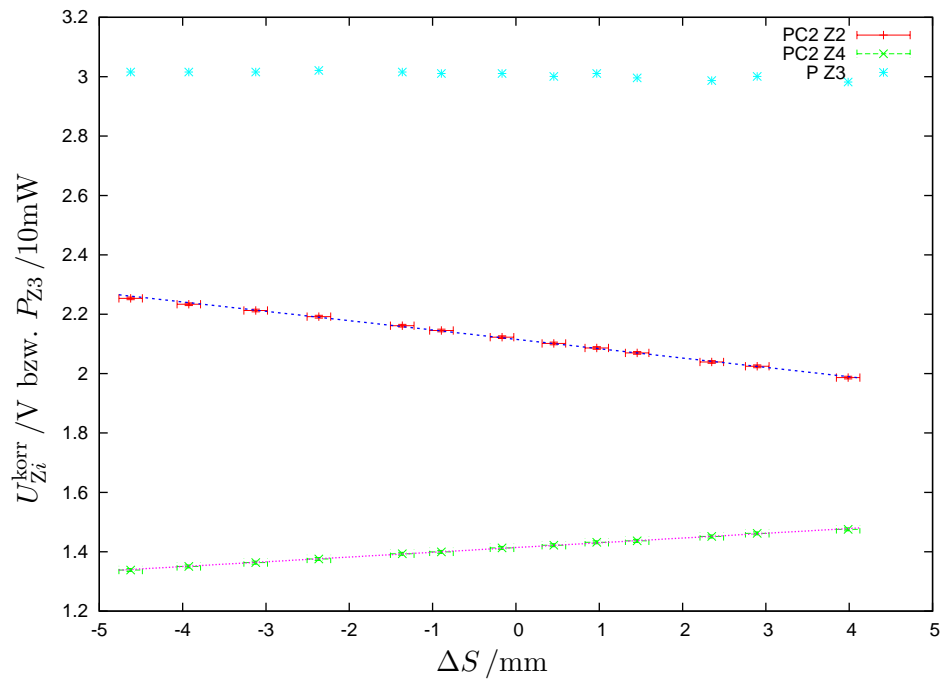


Abbildung A.42: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +9$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

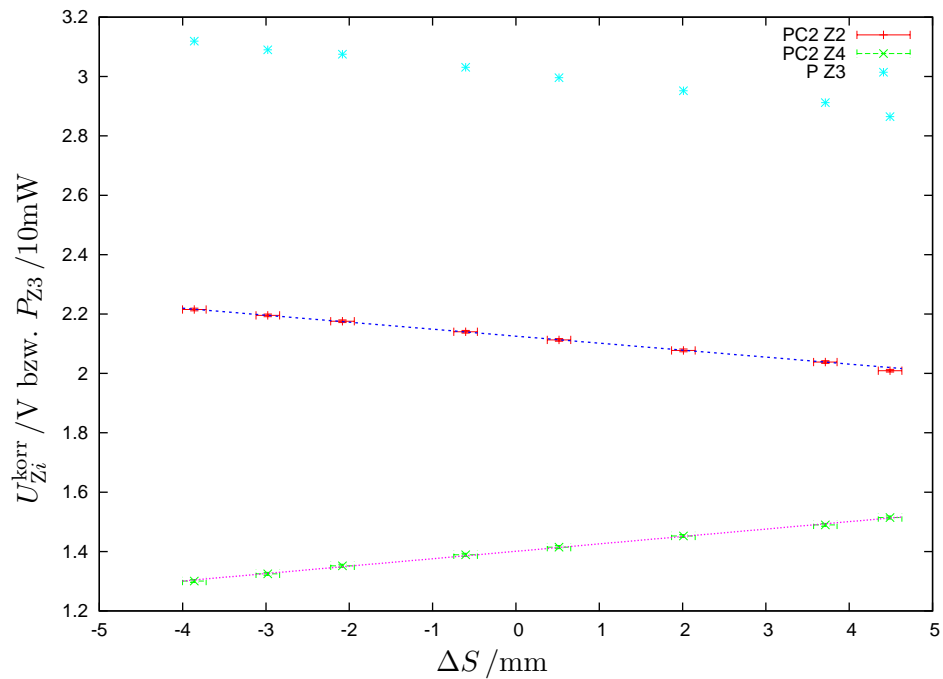
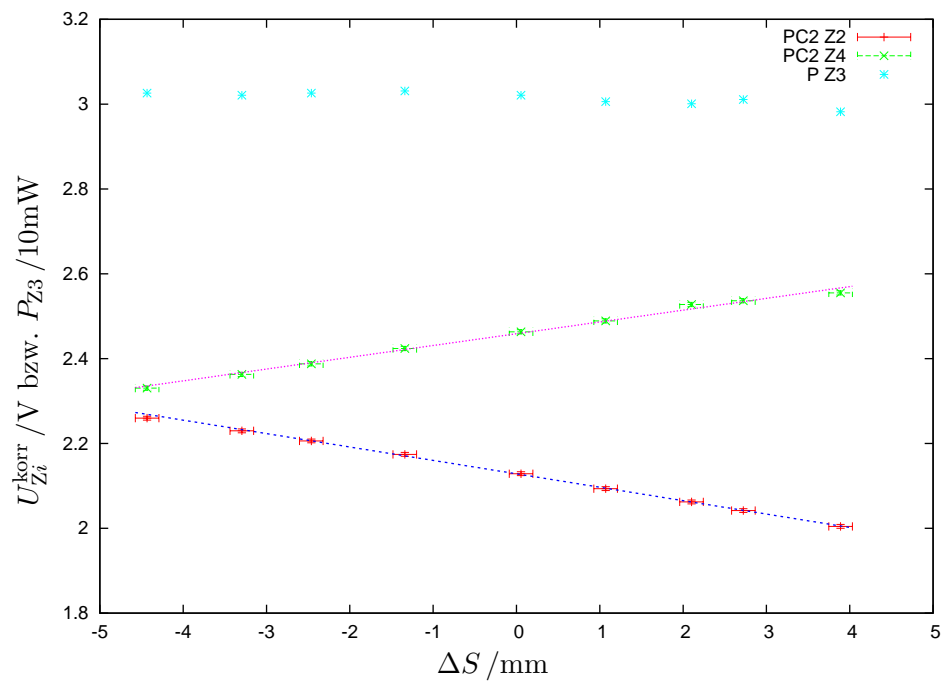
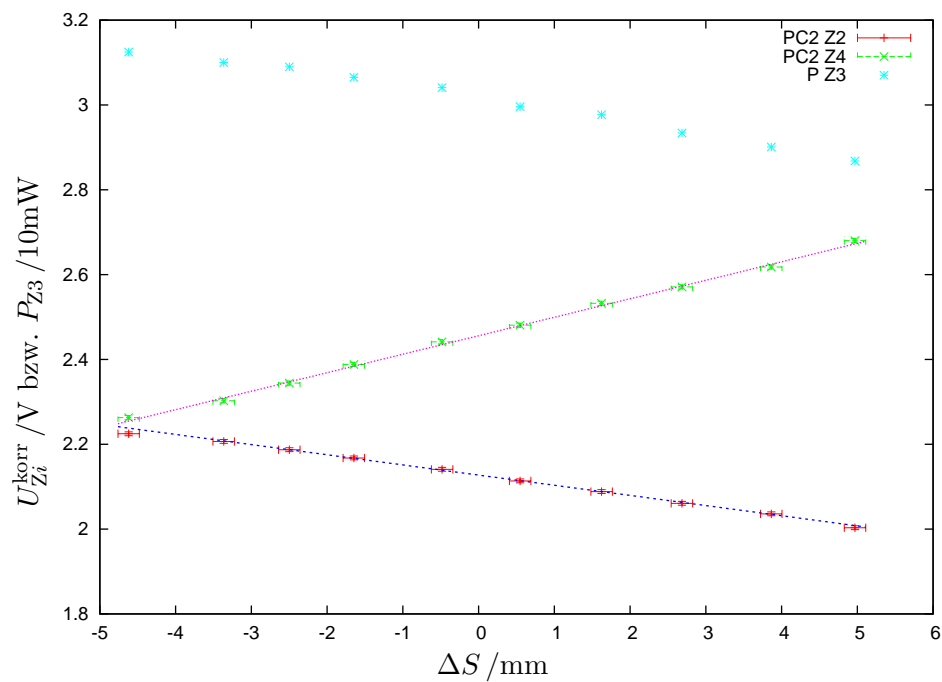


Abbildung A.43: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +9$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

Abbildung A.44: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +3,5$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.Abbildung A.45: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +3,5$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

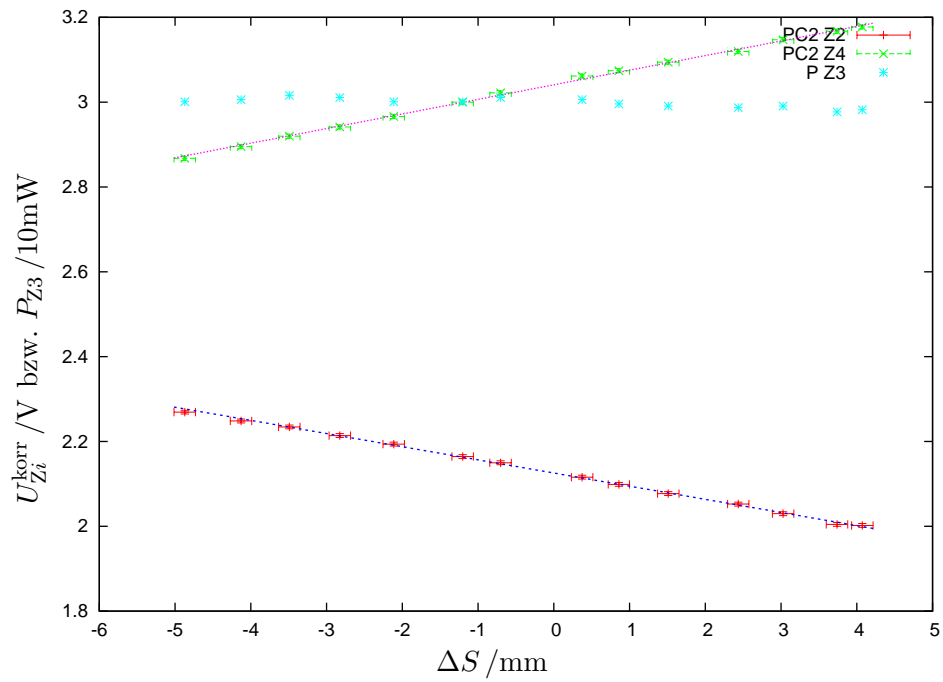


Abbildung A.46: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +2,5$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

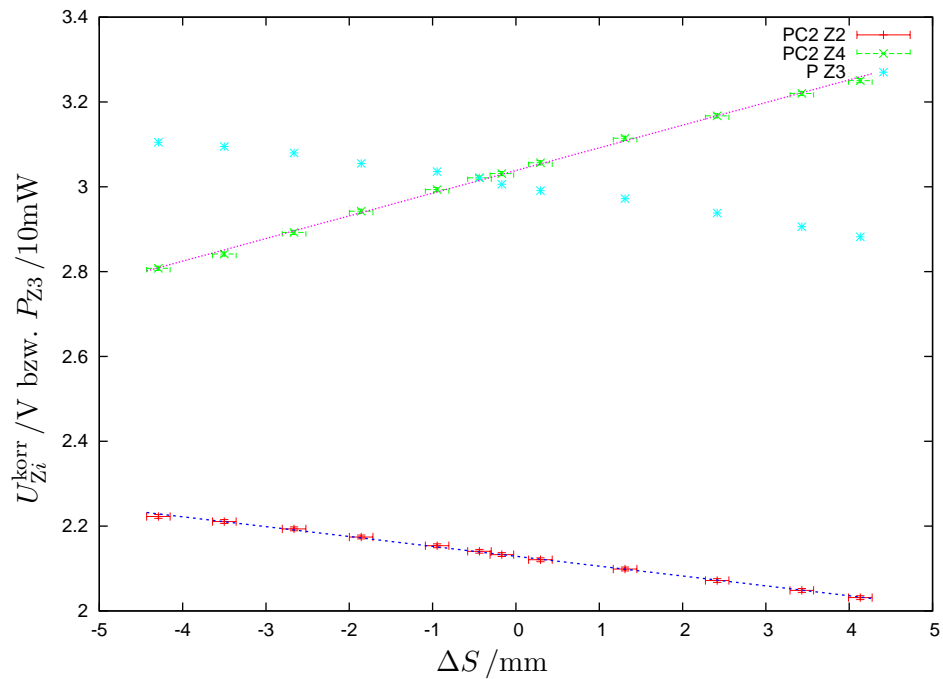
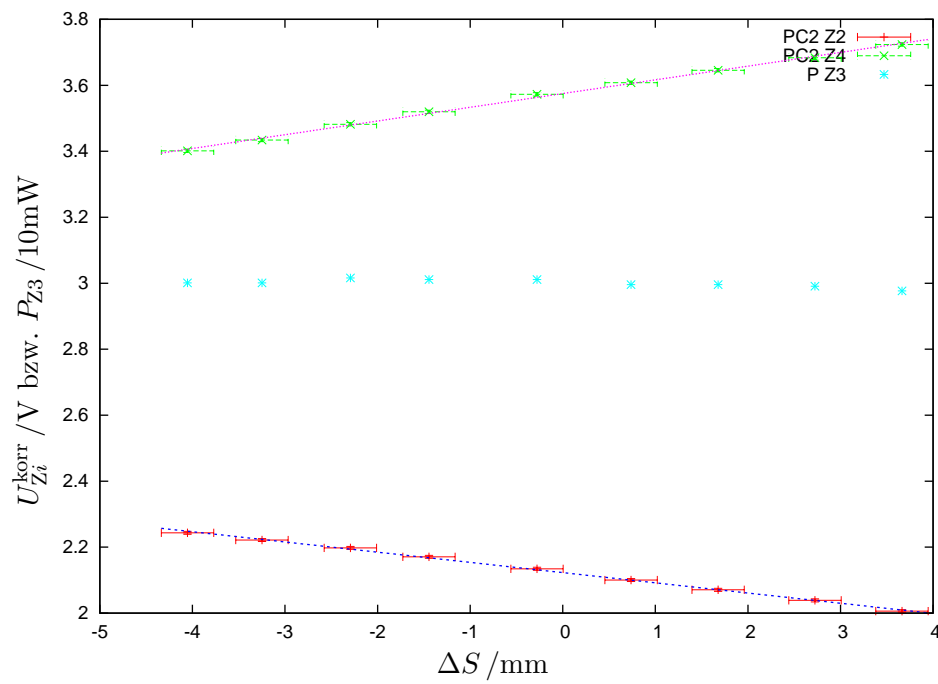
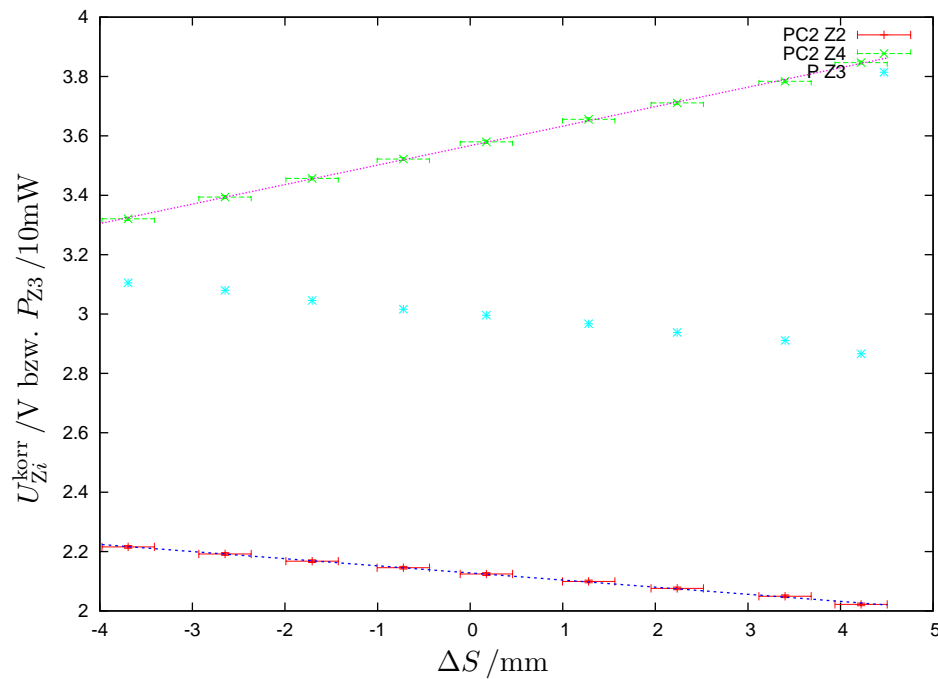


Abbildung A.47: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +2,5$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

Abbildung A.48: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +1,5$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.Abbildung A.49: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = +1,5$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

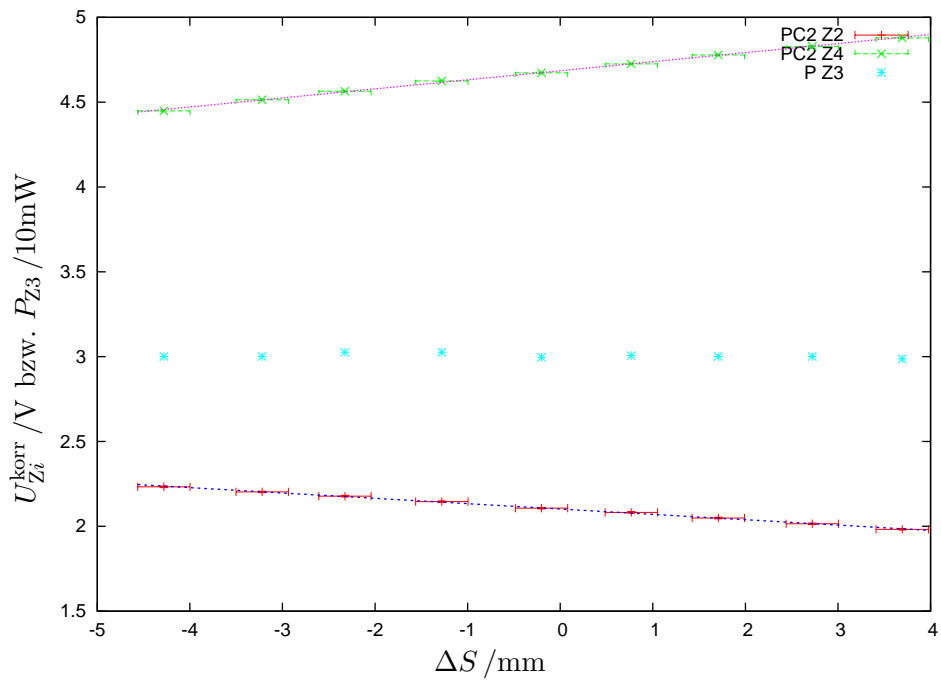


Abbildung A.50: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = -2$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

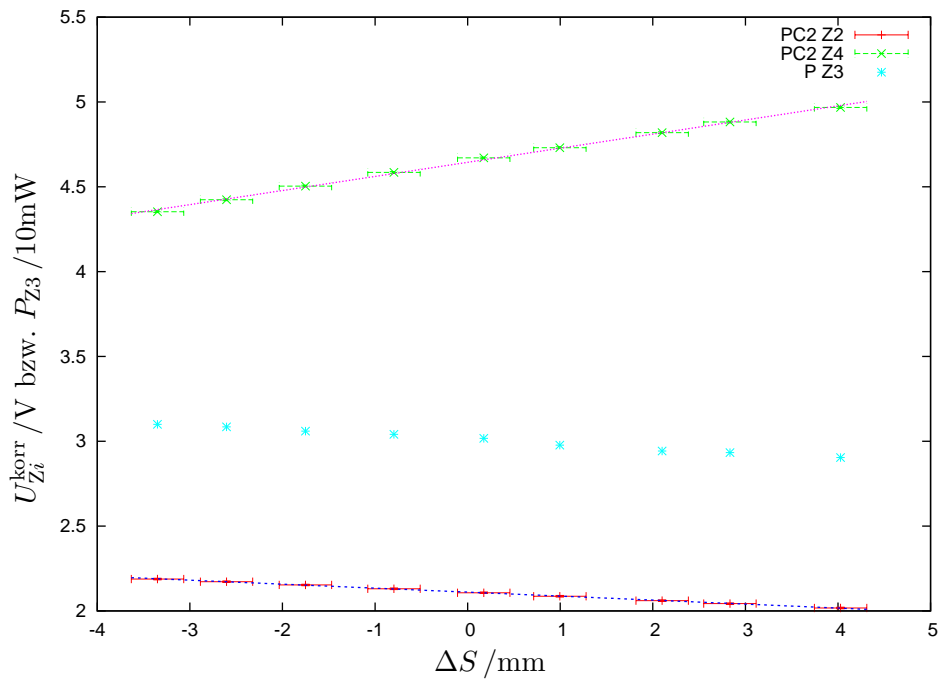
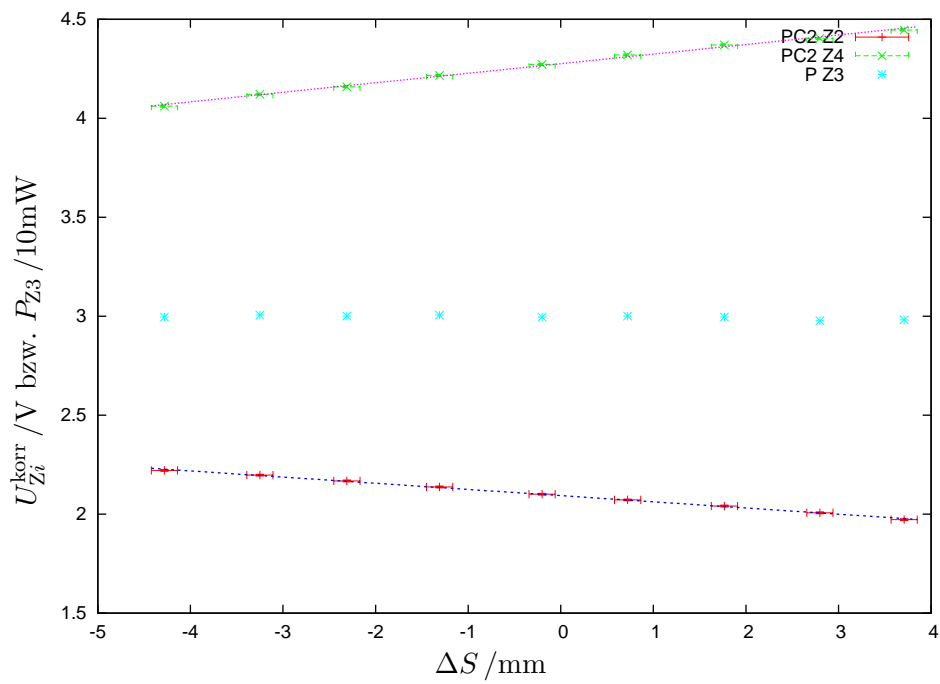
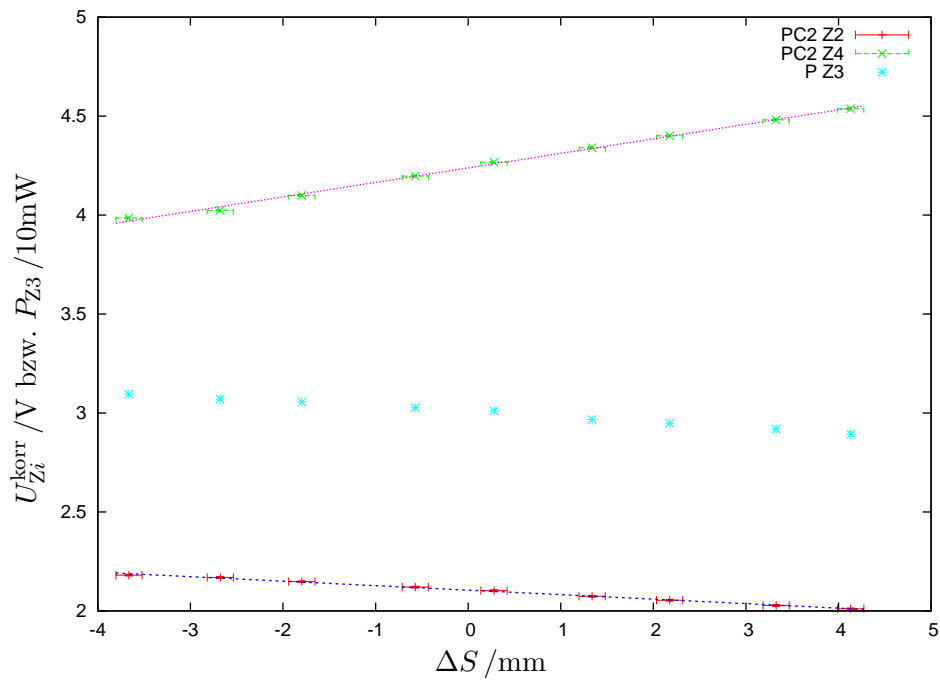


Abbildung A.51: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = -2$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

Abbildung A.52: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = -6$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.Abbildung A.53: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z_4} = -6$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

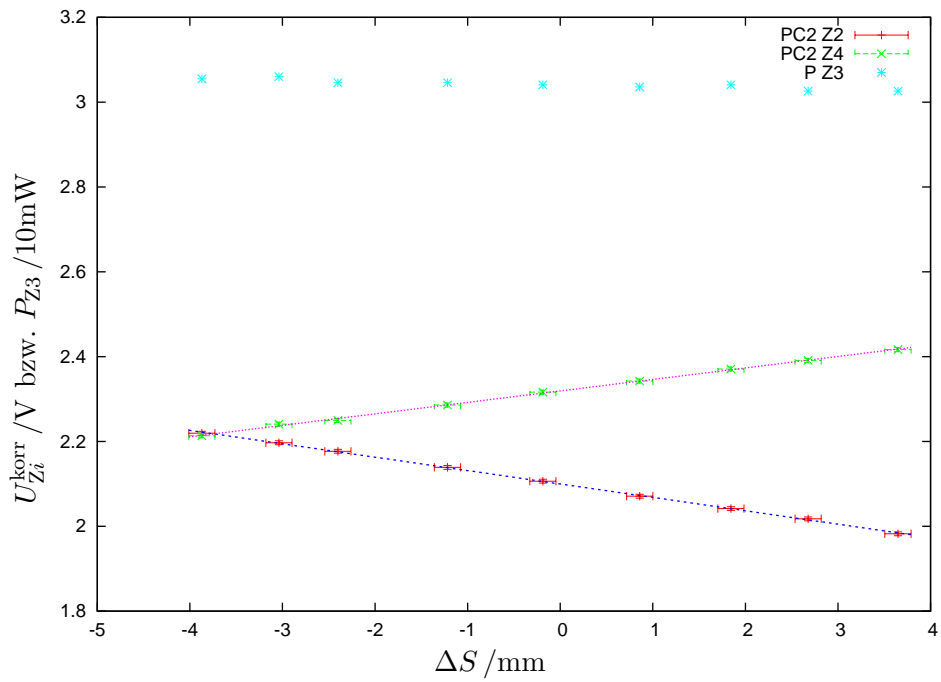


Abbildung A.54: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +3,75$  Umdrehungen,  $S_1$ -Variation.

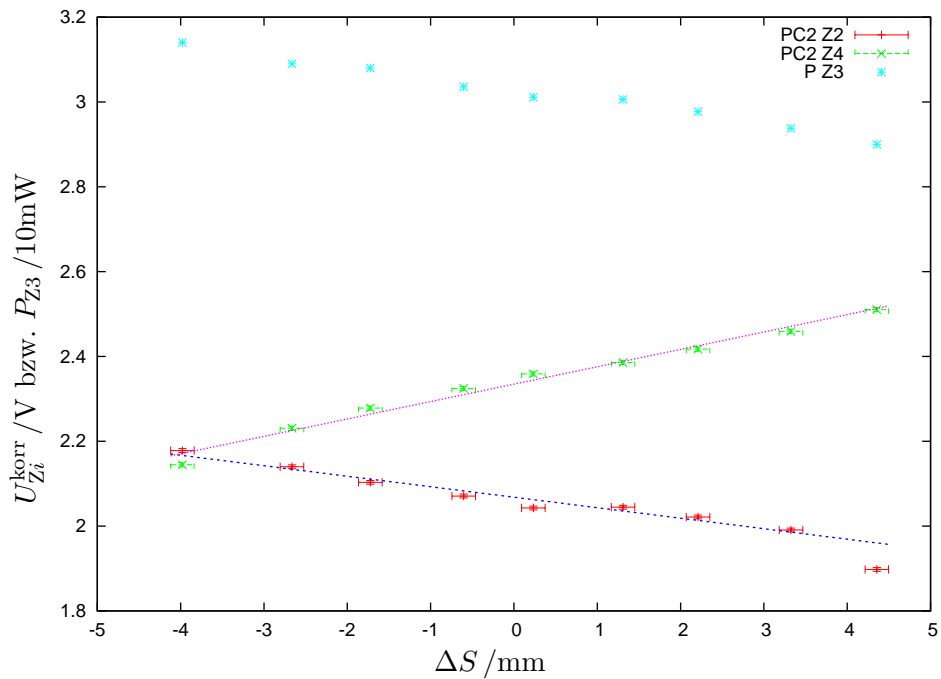
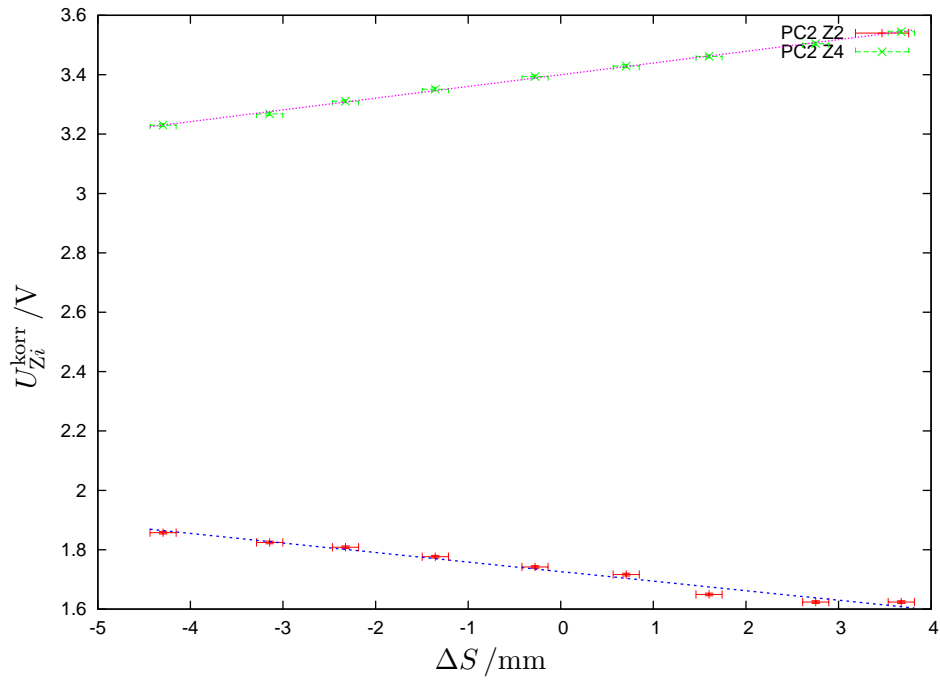
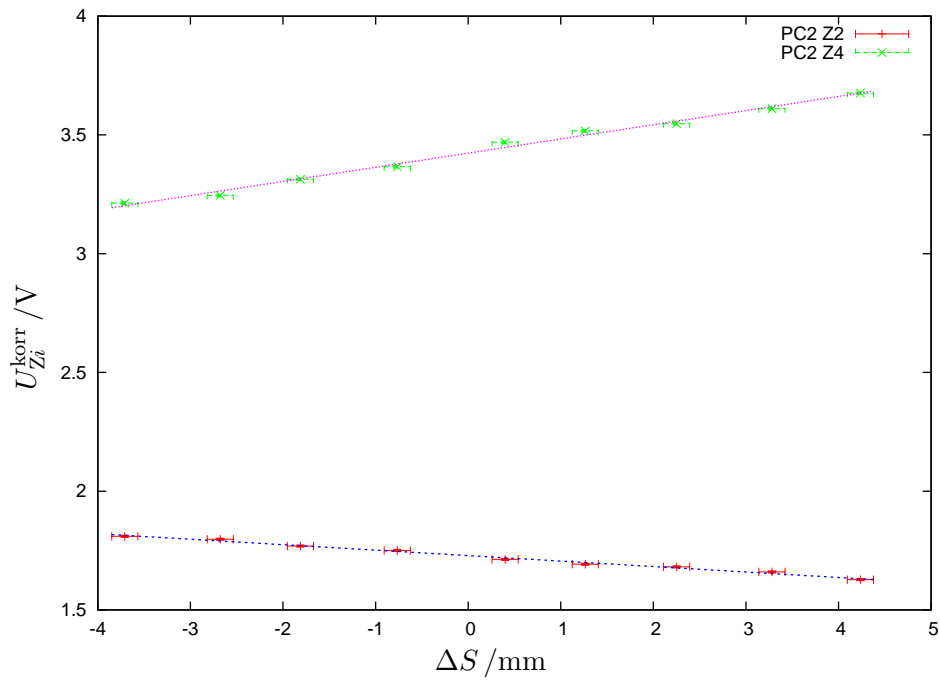


Abbildung A.55: PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +3,75$  Umdrehungen,  $S_2$ -Variation.

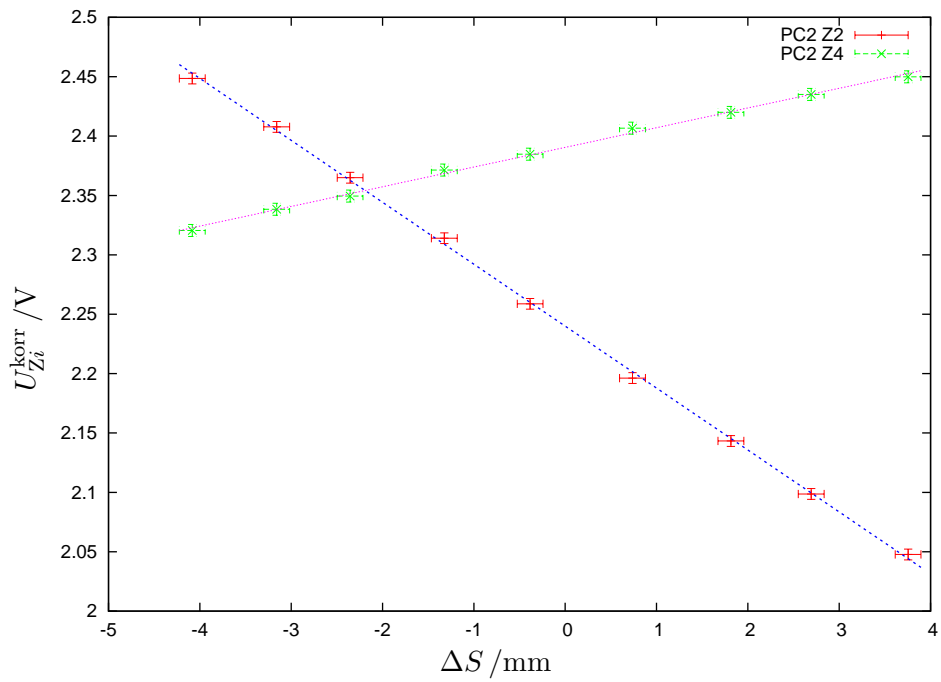




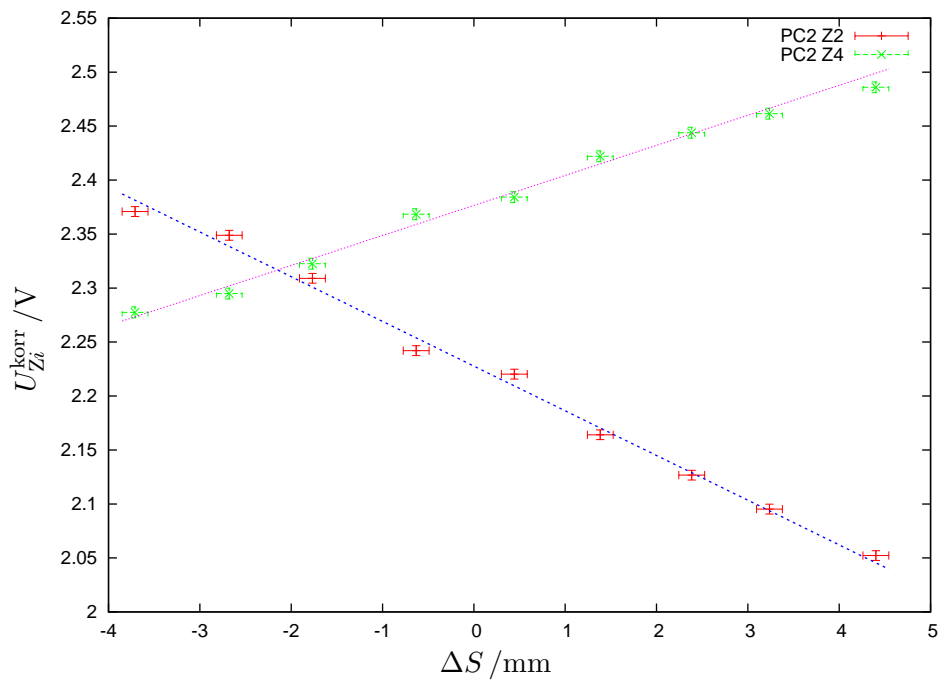
**Abbildung A.56:** PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +1,75$ ,  $\kappa_{Z2} = +2,5$  Umdrehungen;  $S_1$ -Variation, Powermeter Konfiguration A.



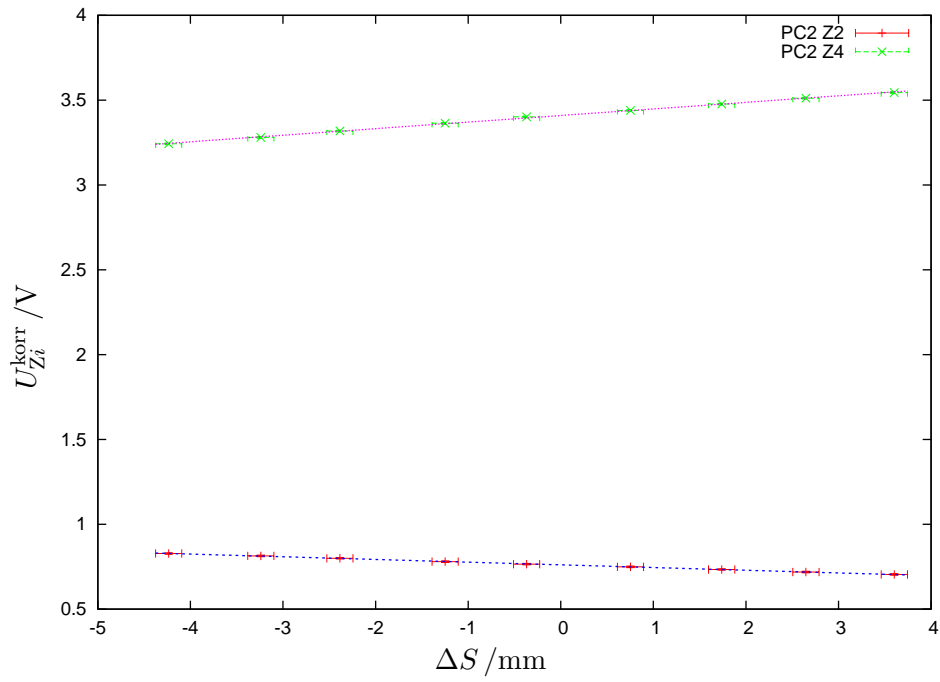
**Abbildung A.57:** PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +1,75$ ,  $\kappa_{Z2} = +2,5$  Umdrehungen;  $S_1$ -Variation, Powermeter Konfiguration A.



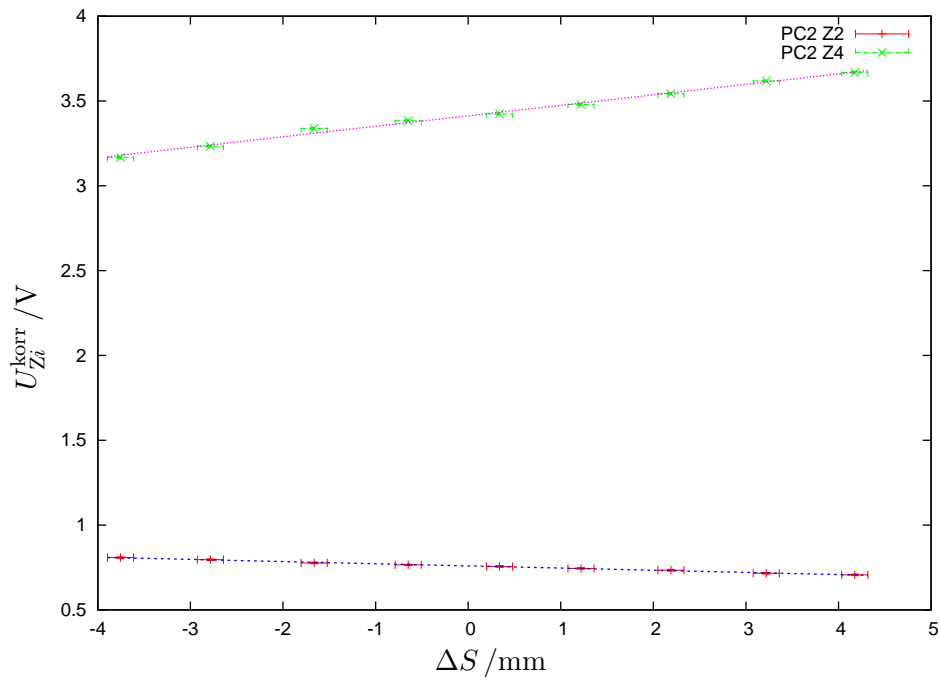
**Abbildung A.58:** PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +1,75$ ,  $\kappa_{Z2} = +2,5$  Umdrehungen;  $S_1$ -Variation, Powermeter Konfiguration B.



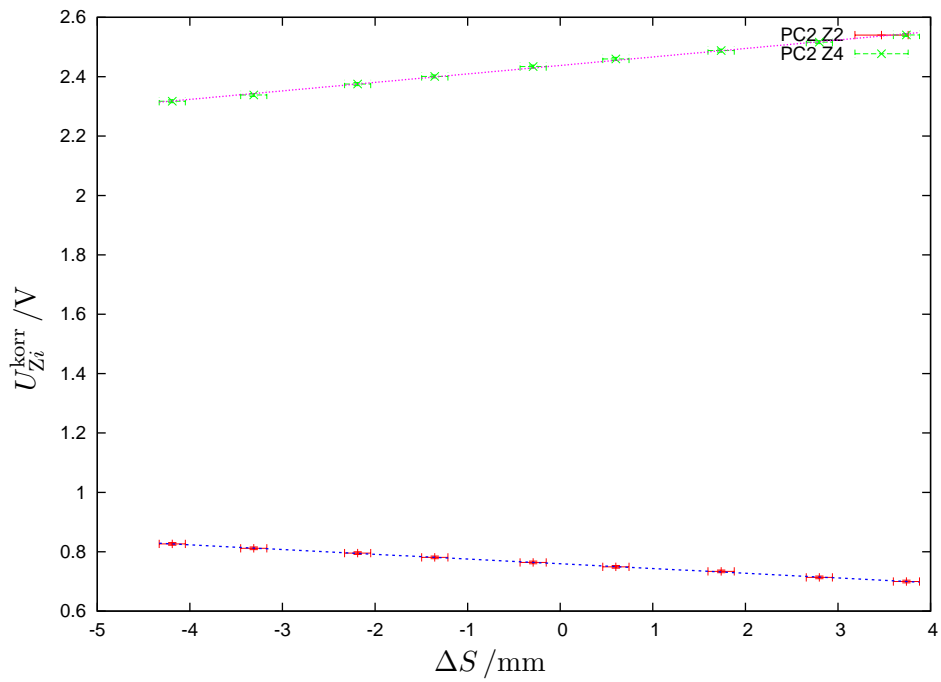
**Abbildung A.59:** PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +1,75$ ,  $\kappa_{Z2} = +2,5$  Umdrehungen;  $S_1$ -Variation, Powermeter Konfiguration B.



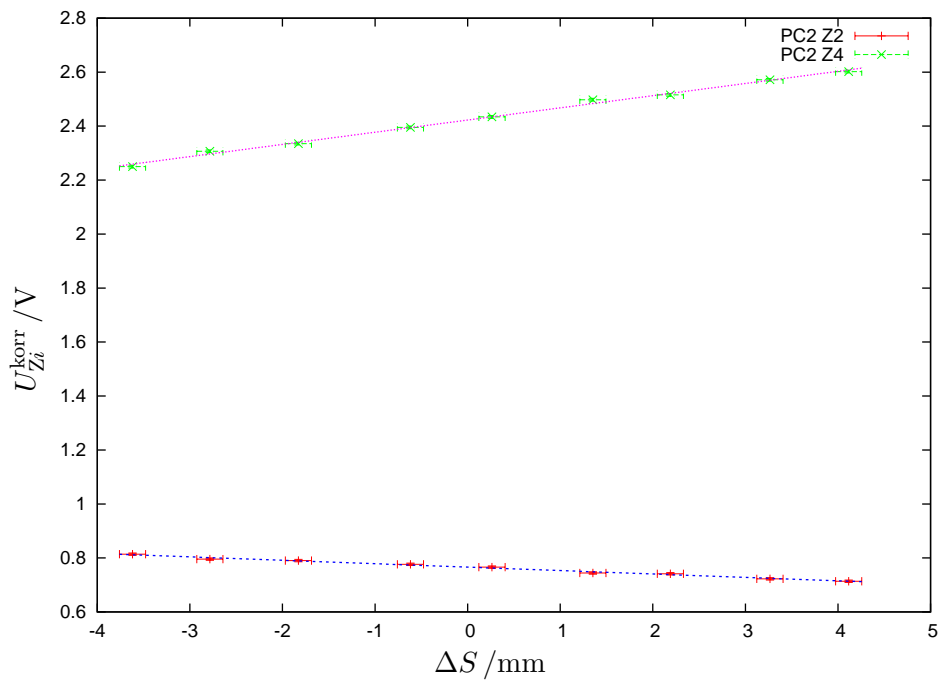
**Abbildung A.60:** PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +1,75$ ,  $\kappa_{Z2} = +5,5$  Umdrehungen;  $S_1$ -Variation.



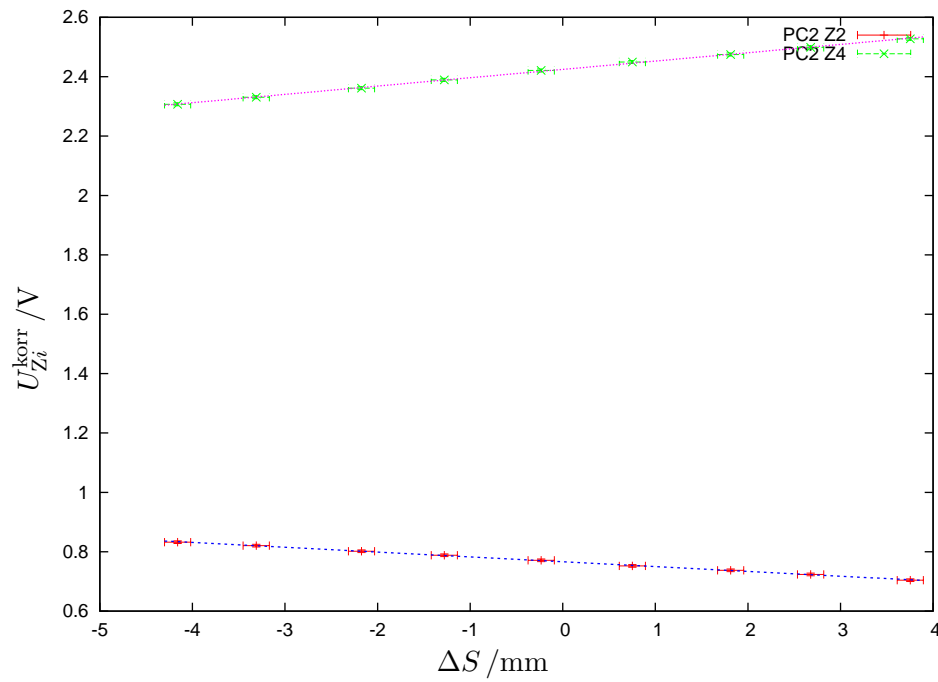
**Abbildung A.61:** PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +1,75$ ,  $\kappa_{Z2} = +5,5$  Umdrehungen;  $S_1$ -Variation.



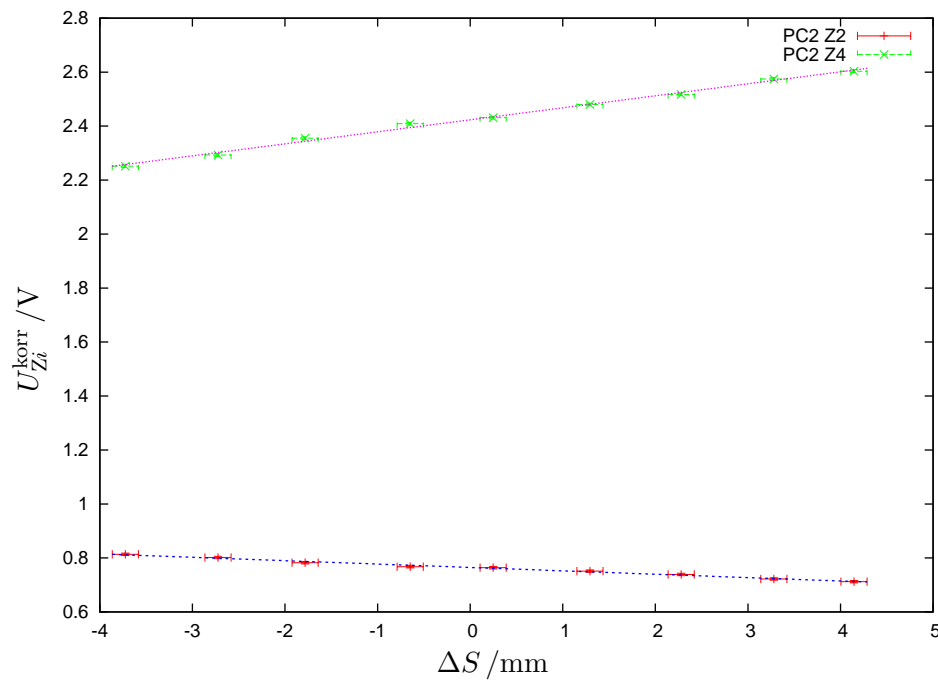
**Abbildung A.62:** PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +3,59$ ,  $\kappa_{Z2} = +5,5$  Umdrehungen;  $S_1$ -Variation, Powermeter Konfiguration A.



**Abbildung A.63:** PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +3,59$ ,  $\kappa_{Z2} = +5,5$  Umdrehungen;  $S_1$ -Variation, Powermeter Konfiguration A.



**Abbildung A.64:** PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +3,59$ ,  $\kappa_{Z2} = +5,5$  Umdrehungen;  $S_1$ -Variation, Powermeter Konfiguration B.



**Abbildung A.65:** PETRA 2, ohne Dämpfung,  $\kappa_{Z4} = +3,59$ ,  $\kappa_{Z2} = +5,5$  Umdrehungen;  $S_1$ -Variation, Powermeter Konfiguration B.

PETRA-Cavity 1				PETRA-Cavity 2			
Stempel 1		Stempel 2		Stempel 1		Stempel 2	
KS /mm	vor Ort /mm	KS /mm	vor Ort /mm	KS /mm	vor Ort /mm	KS /mm	vor Ort /mm
39,198	61,440	37,623	61,240	-11,561	8,110	-10,023	8,810
34,935	57,690	33,011	58,380	-5,634	13,940	-4,586	14,090
31,609	53,490	29,569	55,350	-2,662	16,940	-1,643	17,680
27,318	48,990	25,228	49,970	0,445	20,490	1,448	20,170
21,839	43,830	19,688	44,450	1,689	22,130	2,583	21,410
15,019	37,480	13,576	38,320	3,174	23,160	4,197	23,500
14,544	35,920	12,305	37,030	4,402	23,990	5,436	24,210
13,230	34,670	10,991	35,240	5,873	25,740	6,765	25,400
11,763	32,800	9,477	33,670	7,070	26,560	7,975	27,160
9,582	30,680	7,250	31,590	8,890	29,070	9,842	28,460
7,989	29,060	5,608	29,790	10,390	30,390	11,231	30,640
6,060	27,180	3,651	28,400	12,968	32,370	13,517	32,840
3,964	25,200	1,581	25,680	15,484	34,800	15,787	34,780
2,203	23,150	-0,204	23,800	20,714	39,910	20,880	40,200
1,323	22,190	-1,118	23,340	27,415	47,370	27,467	46,510
-0,802	19,800	-3,289	20,400	32,706	51,950	32,679	51,820
-3,443	16,940	-5,974	18,080	36,253	54,550	36,279	55,500
-6,714	13,190	-8,987	14,550	40,074	59,870	39,834	58,270
-11,410	8,410	-8,987	15,070	14,529	33,800	15,025	33,920
1,462	22,410	4,294	29,110	4,281	24,310	5,451	23,780
12,126	34,190	15,218	40,780	8,874	28,420	9,559	28,660
5,725	27,110	8,564	33,280				

**Tabelle A.2:** Stempelpositionen der PETRA-Cavities 1 und 2 mit im Kontrollsystem angezeigten und vor Ort gemessenen Positionen.

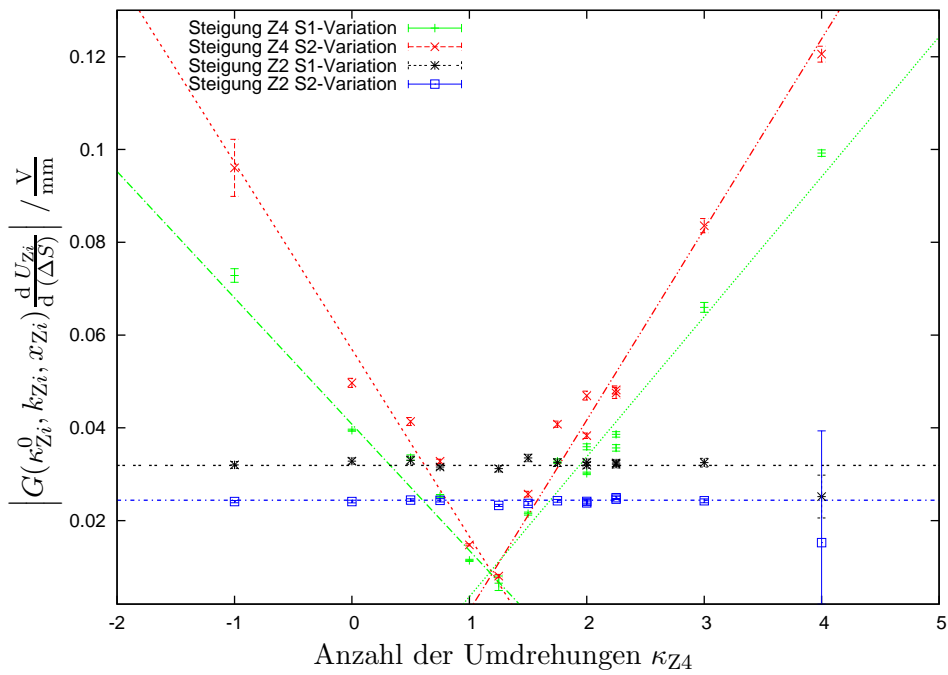
$\kappa_{Z4}$	$G \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$	$G \frac{d U_{Z4}^{PM-korr}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z4}^{PM-korr}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$
0	0,05550	0,00033	0,03949	0,00023
2	0,04243	0,00038	0,03020	0,00027
4	0,13943	0,00098	0,09922	0,00070
3	0,09271	0,00151	0,06597	0,00108
-1	0,10235	0,00205	0,07284	0,00146
1	0,00678	0,00014	0,01143	0,00024
0,5	0,01990	0,00036	0,03356	0,00060
0,75	0,01500	0,00020	0,02530	0,00035
1,25	0,00386	0,00093	0,00651	0,00157
1,5	0,01275	0,00020	0,02150	0,00033
1,75	0,01945	0,00029	0,03279	0,00049
2	0,02130	0,00038	0,03592	0,00065
2,25	0,02116	0,00042	0,03567	0,00071
2,25	0,05423	0,00083	0,03859	0,00059
$\kappa_{Z4}$	$GU_{Z4}(\Delta S = 0) / \frac{V}{mm}$	$\Delta(GU_{Z4}(\Delta S = 0)) / \frac{V}{mm}$	$G \frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$
0	2,7497	0,0008	0,02439	0,00051
2	2,1492	0,0010	0,02371	0,00046
4	6,9634	0,0026	0,01871	0,00343
3	4,6383	0,0039	0,02414	0,00069
-1	5,1602	0,0054	0,02377	0,00054
1	0,3304	0,0004	0,10000	0,00230
0,5	1,1472	0,0009	0,04151	0,00109
0,75	0,8261	0,0005	0,03965	0,00061
1,25	0,2133	0,0002	0,03920	0,00085
1,5	0,7088	0,0005	0,04209	0,00100
1,75	1,2051	0,0007	0,04084	0,00103
2	1,5708	0,0010	0,04094	0,00084
2,25	1,8623	0,0011	0,04041	0,00099
2,25	2,7249	0,0022	0,02408	0,00057
$\kappa_{Z4}$	$G \frac{d U_{Z2}^{PM-korr}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z2}^{PM-korr}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$	$GU_{Z2}(\Delta S = 0) / \frac{V}{mm}$	$\Delta(GU_{Z2}(\Delta S = 0)) / \frac{V}{mm}$
0	0,03283	0,00068	1,3518	0,0013
2	0,03193	0,00062	1,3101	0,0012
4	0,02519	0,00462	0,9805	0,0009
3	0,03250	0,00093	1,3041	0,0018
-1	0,03201	0,00073	1,3011	0,0014
1	0,07958	0,00183	4,3165	0,0059
0,5	0,03303	0,00087	1,7447	0,0028
0,75	0,03155	0,00048	1,7445	0,0016
1,25	0,03120	0,00067	1,7492	0,0022
1,5	0,03350	0,00080	1,7414	0,0026
1,75	0,03250	0,00082	1,7372	0,0026
2	0,03258	0,00067	1,7446	0,0022
2,25	0,03216	0,00079	1,7491	0,0026
2,25	0,03242	0,00077	1,3473	0,0015

**Tabelle A.3:** PETRA-Cavity 1, Gnuplot-Fitergebnisse samt Fehler für dämpfungskorrigierte Steigung und Ordinate in Abhängigkeit der Koppelschleifeneinstellung  $\kappa_{Z4}$ , Steigung um Powermeter-Asymmetrie korrigiert (PM-korr),  $S_1$ -Variation.

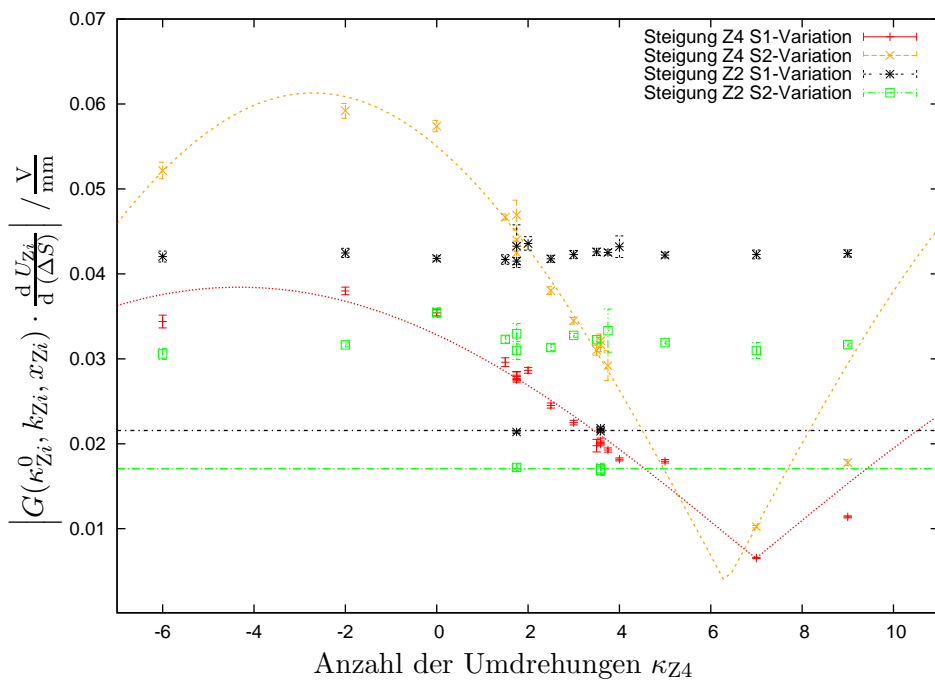
$\kappa_{Z4}$	$G \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$	$G \frac{d U_{Z4}^{PM-korr}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z4}^{PM-korr}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$
0	0,06984	0,00139	0,04970	0,00099
2	0,05382	0,00083	0,03830	0,00059
4	0,16941	0,00241	0,12056	0,00172
3	0,11745	0,00215	0,08358	0,00153
-1	0,13497	0,00864	0,09605	0,00615
1	0,00876	0,00013	0,01478	0,00022
0,5	0,02454	0,00051	0,04137	0,00086
0,75	0,01944	0,00027	0,03278	0,00046
1,25	0,00477	0,00022	0,00804	0,00037
1,5	0,01525	0,00036	0,02571	0,00061
1,75	0,02419	0,00040	0,04078	0,00067
2	0,02784	0,00057	0,04695	0,00096
2,25	0,02819	0,00072	0,04753	0,00121
2,25	0,06769	0,00122	0,04817	0,00087
$\kappa_{Z4}$	$GU_{Z4}(\Delta S = 0) / \frac{V}{mm}$	$\Delta(GU_{Z4}(\Delta S = 0)) / \frac{V}{mm}$	$G \frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$
0	2,7326	0,0036	0,01791	0,00021
2	2,1444	0,0021	0,01793	0,00027
4	6,8874	0,0063	0,01134	0,01788
3	4,6211	0,0055	0,01803	0,00031
-1	5,1046	0,0224	0,01790	0,00018
1	0,3301	0,0003	0,07517	0,00123
0,5	1,1551	0,0013	0,03070	0,00034
0,75	0,8297	0,0007	0,03064	0,00045
1,25	0,2110	0,0006	0,02926	0,00029
1,5	0,7068	0,0009	0,02979	0,00051
1,75	1,2057	0,0010	0,03050	0,00038
2	1,5712	0,0015	0,02992	0,00053
2,25	1,8651	0,0019	0,03096	0,00012
2,25	2,7252	0,0032	0,01853	0,00023
$\kappa_{Z4}$	$G \frac{d U_{Z2}^{PM-korr}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z2}^{PM-korr}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$	$GU_{Z2}(\Delta S = 0) / \frac{V}{mm}$	$\Delta(GU_{Z2}(\Delta S = 0)) / \frac{V}{mm}$
0	0,02412	0,00029	1,3593	0,0006
2	0,02414	0,00037	1,3164	0,0007
4	0,01527	0,02407	1,2136	0,0466
3	0,02427	0,00042	1,3129	0,0008
-1	0,02410	0,00025	1,3138	0,0005
1	0,05983	0,00098	4,3350	0,0031
0,5	0,02443	0,00027	1,7381	0,0009
0,75	0,02438	0,00036	1,7350	0,0012
1,25	0,02328	0,00023	1,7468	0,0007
1,5	0,02371	0,00041	1,7462	0,0013
1,75	0,02427	0,00031	1,7436	0,0010
2	0,02381	0,00042	1,7438	0,0014
2,25	0,02464	0,00010	1,7436	0,0003
2,25	0,02495	0,00031	1,3542	0,0006

**Tabelle A.4:** PETRA-Cavity 1, Gnuplot-Fitergebnisse samt Fehler für Steigung und Ordinate in Abhängigkeit der Koppelschleifeneinstellung  $\kappa_{Z4}$ , Steigung um Powermeter-Asymmetrie korrigiert (PM-korr),  $S_2$ -Variation.





**Abbildung A.66:** PETRA 1,  $\kappa_{Z4}$  gegen dämpfungskorrigierte Steigung  $G(\kappa_{Zi}^0, k_{Zi}, x_{Zi}) \cdot \frac{dU_{Zi}}{d(\Delta S)}$ , die Einflüsse der Powermeter wurden ebenfalls kompensiert.



**Abbildung A.67:** PETRA 2,  $\kappa_{Z4}$  gegen dämpfungskorrigierte Steigung  $G(\kappa_{Zi}^0, k_{Zi}, x_{Zi}) \cdot \frac{dU_{Zi}}{d(\Delta S)}$ , die Einflüsse der Powermeter wurde ebenfalls kompensiert. Anmerkung: Die oberen Werte  $G(\kappa_{Z2}^0, k_{Z2}, x_{Z2}) \cdot \frac{dU_{Z2}}{d(\Delta S)}$  entstammen einer anderen Einstellung von  $x_{Z2}$  mangels Schnittpunkt bei der Auswertung.

$\kappa_{Z4}$	$G \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$	$G \frac{d U_{Z4}^{PM-korr}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z4}^{PM-korr}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$
0	0,04976	0,00052	0,03541	0,00037
2	0,04025	0,00049	0,02864	0,00035
4	0,02553	0,00025	0,01817	0,00018
3	0,03160	0,00037	0,02249	0,00026
5	0,01640	0,00261	0,01167	0,00186
7	0,00920	0,00011	0,00655	0,00008
9	0,01601	0,00017	0,01139	0,00012
3,5	0,02778	0,00104	0,01977	0,00074
2,5	0,03442	0,00042	0,02450	0,00030
1,5	0,04159	0,00073	0,02960	0,00052
-2	0,05339	0,00062	0,03799	0,00044
-6	0,04832	0,00106	0,03439	0,00075
3,75	0,02707	0,00035	0,01927	0,00025
1,75	0,03945	0,00057	0,02807	0,00040
1,75	0,01658	0,00032	0,02796	0,00053
1,75	0,03874	0,00045	0,02757	0,00032
3,59	0,02857	0,00047	0,02033	0,00034
3,59	0,02806	0,00029	0,01997	0,00020
$\kappa_{Z4}$	$GU_{Z4}(\Delta S = 0) / \frac{V}{mm}$	$\Delta(GU_{Z4}(\Delta S = 0)) / \frac{V}{mm}$	$G \frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$
0	4,1793	0,0012	0,03106	0,00022
2	3,3617	0,0011	0,03237	0,00059
4	2,1898	0,0006	0,03209	0,00094
3	2,7714	0,0009	0,03140	0,00036
5	2,1834	0,0069	0,03135	0,00025
7	0,8040	0,0003	0,03141	0,00038
9	1,4142	0,0004	0,03149	0,00031
3,5	2,4588	0,0025	0,03163	0,00032
2,5	3,0410	0,0011	0,03102	0,00030
1,5	3,5750	0,0019	0,03097	0,00042
-2	4,6852	0,0016	0,03154	0,00040
-6	4,2762	0,0028	0,03122	0,00048
3,75	2,3192	0,0009	0,03159	0,00025
1,75	3,3999	0,0015	0,03214	0,00187
1,75	2,3905	0,0008	0,05215	0,00051
1,75	3,4095	0,0012	0,01589	0,00013
3,59	2,4380	0,0012	0,01595	0,00014
3,59	2,4247	0,0007	0,01622	0,00016

**Tabelle A.5:** PETRA-Cavity 2, Gnuplot-Fitergebnisse samt Fehler für dämpfungskorrigierte Steigung und Ordinate in Abhängigkeit der Koppelschleifeneinstellung  $\kappa_{Z4}$ , Steigung um Powermeter-Asymmetrie korrigiert (PM-korr),  $S_1$ -Variation. Anmerkung: Für die Schnittpunktsberechnung wurden nur die letzten Werte von Z2 verwendet ( $\kappa_{Z2}$  wurde verändert).

$\kappa_{Z4}$	$G \frac{d U_{Z2}^{\text{PM-korr}}}{d(\Delta S)} / \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z2}^{\text{PM-korr}}}{d(\Delta S)} \right) / \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	$GU_{Z2}(\Delta S = 0) / \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	$\Delta(GU_{Z2}(\Delta S = 0)) / \frac{\text{V}}{\text{mm}}$
0	0,04182	0,00030	2,0936	0,0005
2	0,04358	0,00079	2,0634	0,0013
4	0,04320	0,00127	2,0872	0,0024
3	0,04227	0,00049	2,1195	0,0008
5	0,04221	0,00033	2,1124	0,0007
7	0,04229	0,00052	2,1092	0,0010
9	0,04240	0,00042	2,1154	0,0007
3,5	0,04258	0,00042	2,1284	0,0008
2,5	0,04177	0,00041	2,1256	0,0008
1,5	0,04169	0,00057	2,1228	0,0011
-2	0,04247	0,00054	2,1018	0,0010
-6	0,04204	0,00064	2,0936	0,0012
3,75	0,04252	0,00034	2,0998	0,0006
1,75	0,04327	0,00251	1,7263	0,0048
1,75	0,04150	0,00040	2,2400	0,0013
1,75	0,02140	0,00018	0,7609	0,0003
3,59	0,02148	0,00018	0,7594	0,0004
3,59	0,02183	0,00022	0,7663	0,0004

**Tabelle A.6:** PETRA-Cavity 2, Gnuplot-Fitergebnisse samt Fehler für dämpfungskorrigierte Steigung und Ordinate in Abhängigkeit der Koppelschleifeneinstellung  $\kappa_{Z4}$ , Steigung um Powermeter-Asymmetrie korrigiert (PM-korr),  $S_1$ -Variation. Anmerkung: Für die Schnittpunktberechnung wurden nur die letzten Werte von Z2 verwendet ( $\kappa_{Z2}$  wurde verändert).

$\kappa_{Z4}$	$G \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$	$G \frac{d U_{Z4}^{PM-korr}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z4}^{PM-korr}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$
0	0,08065	0,00094	0,05739	0,00067
3	0,04845	0,00054	0,03448	0,00038
5	0,03970	0,00049	0,02825	0,00035
7	0,01440	0,00020	0,01025	0,00014
9	0,02498	0,00050	0,01777	0,00035
3,5	0,04358	0,00084	0,03101	0,00060
2,5	0,05344	0,00064	0,03803	0,00046
1,5	0,06560	0,00050	0,04669	0,00035
-2	0,08318	0,00123	0,05919	0,00088
-6	0,07331	0,00139	0,05217	0,00099
3,75	0,04102	0,00247	0,02919	0,00175
1,75	0,05969	0,00195	0,04247	0,00139
1,75	0,02782	0,00104	0,04691	0,00176
1,75	0,06183	0,00186	0,04400	0,00133
3,59	0,04515	0,00110	0,03213	0,00078
3,59	0,04448	0,00116	0,03165	0,00083
$\kappa_{Z4}$	$GU_{Z4}(\Delta S = 0) / \frac{V}{mm}$	$\Delta(GU_{Z4}(\Delta S = 0)) / \frac{V}{mm}$	$G \frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)} \right) / \frac{V}{mm}$
0	4,1908	0,0023	0,02633	0,00042
3	2,7508	0,0011	0,02433	0,00016
5	2,1802	0,0012	0,02370	0,00013
7	0,7967	0,0005	0,02301	0,00070
9	1,4008	0,0013	0,02353	0,00013
3,5	2,4559	0,0020	0,02396	0,00022
2,5	3,0384	0,0016	0,02327	0,00028
1,5	3,5672	0,0013	0,02399	0,00031
-2	4,6443	0,0029	0,02350	0,00017
-6	4,2384	0,0035	0,02271	0,00049
3,75	2,3346	0,0058	0,02474	0,00188
1,75	3,4233	0,0051	0,02301	0,00080
1,75	2,3765	0,0024	0,04141	0,00152
1,75	3,4125	0,0048	0,01278	0,00031
3,59	2,4225	0,0028	0,01268	0,00046
3,59	2,4234	0,0030	0,01254	0,00045

**Tabelle A.7:** PETRA-Cavity 2, Gnuplot-Fitergebnisse samt Fehler für dämpfungskorrigierte Steigung und Ordinate in Abhängigkeit der Koppelschleifeneinstellung  $\kappa_{Z4}$ , Steigung um Powermeter-Asymmetrie korrigiert (PM-korr),  $S_2$ -Variation. Anmerkung: Für die Schnittpunktsberechnung wurden nur die letzten Werte von  $Z2$  verwendet ( $\kappa_{Z2}$  wurde verändert).

$\kappa_{Z4}$	$G \frac{d U_{Z2}^{\text{PM-korr}}}{d(\Delta S)} / \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	$\Delta \left( G \frac{d U_{Z2}^{\text{PM-korr}}}{d(\Delta S)} \right) / \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	$GU_{Z2}(\Delta S = 0) / \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	$\Delta(GU_{Z2}(\Delta S = 0)) / \frac{\text{V}}{\text{mm}}$
0	0,03545	0,00057	2,0619	0,0010
3	0,03276	0,00022	2,1371	0,0003
5	0,03191	0,00017	2,1287	0,0003
7	0,03098	0,00094	2,1267	0,0018
9	0,03168	0,00017	2,1254	0,0003
3,5	0,03225	0,00030	2,1274	0,0005
2,5	0,03133	0,00038	2,1289	0,0007
1,5	0,03229	0,00042	2,1280	0,0008
-2	0,03164	0,00023	2,1107	0,0004
-6	0,03057	0,00066	2,1049	0,0013
3,75	0,03331	0,00254	2,0681	0,0044
1,75	0,03098	0,00107	1,7287	0,0021
1,75	0,03295	0,00121	2,2277	0,0035
1,75	0,01721	0,00042	0,7595	0,0008
3,59	0,01707	0,00062	0,7659	0,0012
3,59	0,01689	0,00061	0,7648	0,0012

**Tabelle A.8:** PETRA-Cavity 2, Gnuplot-Fitergebnisse samt Fehler für dämpfungskorrigierte Steigung und Ordinate in Abhängigkeit der Koppelschleifeneinstellung  $\kappa_{Z4}$ , Steigung um Powermeter-Asymmetrie korrigiert (PM-korr),  $S_2$ -Variation. Anmerkung: Für die Schnittpunktberechnung wurden nur die letzten Werte von  $Z2$  verwendet ( $\kappa_{Z2}$  wurde verändert).

$h / \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	$\Delta h / \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	$p / \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	$\Delta p / \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	const. / $\frac{\text{V}}{\text{mm}}$	$\Delta$ const. / $\frac{\text{V}}{\text{mm}}$
0,030177	0,002619	-0,026571	0,005473	0,0244114	0,0000240
-0,0403182	0,006275	0,0568944	0,006273	0,031903	0,000627
0,0410931	0,003399	-0,0405005	0,0060330		
-0,027238	0,003195	0,040794	0,002268		

**Tabelle A.9:** PETRA 1, Werte der Approximationsparameter,  $h$  Steigung,  $p$  Ordinate mit korrespondierenden Fehlern.

Konfig.	$G \frac{d U_{Z2}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$G \frac{d U_{Z4}}{d (\Delta S)} / \frac{V}{mm}$	$\overline{m_{Zi}} / \frac{V}{mm}$	$\sigma_{\pm}$
A		0,0211567	0,03769	0,6951
B		0,0542299	“	1,782
A		0,0281871	0,047941	0,7082
B		0,0676943	”	1,7008
A	0,0309574		0,024745	0,7993
B	0,0185322		”	1,3352
A	0,0404072		0,032245	0,798
B	0,0240822		”	1,3389
A	0,01419070		0,0186099	0,8081
B	0,02302910		“	1,3114
A	0,01016090		0,01422265	0,7779
B	0,0182844		“	1,337083
A		0,0156689	0,0111276	0,71017
B		0,00658632	“	1,6895
A		0,0237067	0,01737905	0,73309
B		0,0110514	“	1,57257

**Tabelle A.10:** Daten der Untersuchung zur Korrektur der Einflüsse der Powermeter,  $\overline{m_{Zi}}$  Mittelwert der Steigungen der Powermeter-Konfigurationen,  $\sigma_{\pm}$  Korrekturfaktoren.

$VR / kW$	ohne Symmetrisierung				mit Symmetrisierung			
	$S_1 / mm$	$S_2 / mm$	$U'_{Z2} / V$	$U'_{Z4} / V$	$S_1 / mm$	$S_2 / mm$	$U'_{Z2} / V$	$U'_{Z4} / V$
0,000	8,450	8,483	0,00125	0,00089	8,329	8,429	0,00071	0,00050
0,500	8,450	8,483	0,00632	0,01497	8,329	8,429	0,00627	0,01420
1,000	8,450	8,483	0,00881	0,01982	8,329	8,429	0,00852	0,01895
2,000	8,450	8,483					0,01185	0,02770
2,157			0,01070	0,02593	8,329	8,483		
2,854			0,06217	0,07371	1,006	19,162		
3,000	10,421	10,499					0,04513	0,10378
4			0,07357	0,08733	1,021	19,177		
6,019	10,557	10,589	0,09031	0,10655	1,067	19,222	0,06562	0,15370
7,002	10,557	10,589					0,07073	0,16570
8,004	10,557	10,589	0,10408	0,12166	1,112	19,267	0,07578	0,17640
9,020	10,557	10,604					0,08037	0,18720
10,012	10,587	10,649					0,08476	0,19900
11,000	10,646	10,694					0,08866	0,20720

**Tabelle A.11:** Position der Stempel  $S_i$  und ausgekoppelte Spannungen  $U_{Zi}$  der Mini-Circuits bei verschiedenen Vorlaufleistungen  $VR$ , mit/ohne Symmetrisierungsregelung.

## Literatur

- [BKC] BKC INTERNATIONAL ELECTRONICS INC.: *Gold bonded germanium diode - Typ No. OA180*
- [Eis09] EISLAGE, Arvid: *Automatic Field Balancing of the PETRA-III 7-Cell Cavities*. Präsentation ESLS, 2009
- [GSSZ77] GERKE, H. ; SCHLOZ, H. P. ; SOMMERFELD, M. ; ZOLFAGHIR, A.: *Das PETRA-Cavity*. DESY, Hamburg, Interner Bericht, DESY PET-77/08, 1977
- [Hil06a] HILLERT, Wolfgang: The Bonn Electron Stretcher Accelerator ELSA: Past and future. In: *Eur. Phys. J. A* 28 (2006). <http://dx.doi.org/10.1140/epja/i2006-09-015-4>. – DOI 10.1140/epja/i2006-09-015-4
- [Hil06b] HILLERT, Wolfgang: *E 106 Hohlraumresonatoren / Cavities, Ergänzende Informationen zur Versuchsdurchführung*. Bonn, Versuchbeschreibung, 2006
- [HR02] *Kapitel 13.8.2 Curve Fitting*. In: HARTMANN, A. K. ; RIEGER, H.: *Optimization Algorithms in Physics*. Wiley-VCH Verlag Berlin GmbH, 2002
- [KHS04] KAINKA, B. ; HÄSSLER, M. ; STRAUB, H. W.: *Grundwissen Elektronik - Die Grundlagen der Elektronik für Hobby, Ausbildung und Beruf*. Franzis Verlag GmbH, 2004
- [MHF07] MHFE, DESY: *Cavity Tuning Plunger (Feinabstimmung) / DESY*. Hamburg, 2007. – Forschungsbericht
- [MHF10] MHFE, DESY: *500 MHz, 5-Cell Cavity / DESY*. Hamburg, 2010. – Forschungsbericht
- [Pus05] PUSCH, Thorsten: *Lagemessung des extrahierten Strahls am Elektronenbeschleuniger ELSA mittels Hochfrequenzresonatoren*. Bonn, Physikalisches Institut, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Diplomarbeit, 2005
- [Roh85] ROHDE UND SCHWARZ: *Millivoltmeter - URV5*. 1985
- [Sau10] SAUERLAND, Dennis: *Symmetrisierung der Feldverteilung von mehrzelligen Hochfrequenzresonatoren - Messdaten und Graphen*. Bonn, Interner Bericht, 2010
- [Wik] WIKIPEDIA: *Operationsverstärker*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Operationsverstaerker>

## Danksagung

Ohne die Unterstützung vieler Personen wäre die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen, weshalb ich mich an dieser Stelle für deren Einsatz und ihre Hilfsbereitschaft bedanken möchte. Leider können hier nicht alle Personen aufgeführt werden, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Deshalb seien die nun genannten Personen stellvertretend auch für alle nicht genannten. Mein besonderer Dank richtet sich an

- Herrn PD Dr. Wolfgang Hillert, der jederzeit zur Beantwortung von Fragen und zur Hilfestellung zur Verfügung stand.
- Herrn Prof. Dr. Klaus Desch für die Übernahme des Koreferats.
- meine Bürokollegen André Roth, Rebecca Zimmermann, Jens-Peter Thiry sowie Christine Reinsch für die angenehme Arbeitsatmosphäre und der häufigen, produktiven Fachdiskussionen sowie Hilfestellungen
- Oliver Preisner, Dominik Heiliger, André Roth sowie Jens-Peter Thiry für das Korrekturlesen dieser Arbeit
- meine Eltern für die Unterstützung in meinem bisherigen Leben, die mir das Studium erst ermöglicht haben.
- die ganze Arbeitsgruppe ELSA, für Hilfestellungen und die tolle Zeit die ich bei euch verbringen durfte.

Auch allen, die ich nicht erwähnt habe, ein herzliches Dankeschön.

## Danke



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

Bonn, den 26. August 2010

Unterschrift .....