

# Auslegung des Kickers für das FRANZ-Projekt

Markus Basten

28.03.2013

Masterarbeit am Institut für Angewandte Physik

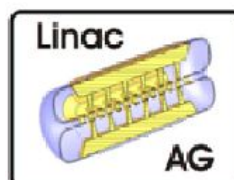
**Gutachter:**

Professor Dr. Holger Podlech

Professor Dr. Ulrich Ratzinger

Johann-Wolfgang-Goethe Universität

Frankfurt am Main





---

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Frankfurt am Main, den 28.03.2013



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>FRANZ</b>	<b>3</b>
2.1	Der Bunch-Kompressor . . . . .	5
2.2	Der Kicker des FRANZ-Projektes . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Theorie</b>	<b>7</b>
3.1	Gespeicherte Energie . . . . .	7
3.2	Verlustleistung . . . . .	7
3.3	Güte . . . . .	7
3.3.1	Intrinsische Güte . . . . .	9
3.3.2	Belastete Güte . . . . .	9
3.4	Oberflächenwiderstand . . . . .	10
3.5	Tuning: Frequenzabstimmung und Regelung . . . . .	11
3.6	Hochfrequenz-Resonatoren zur Teilchenauslenkung . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Design eines Hochfrequenz-Kickers für FRANZ</b>	<b>13</b>
4.1	Das erste Modell des 5-MHz-Kickers . . . . .	13
4.2	Das zweite Modell des 5-MHz-Kickers . . . . .	17
4.3	Berechnung der Winkeldifferenzen mit CST-Microwave-Studio . . . . .	23
4.4	Das erste Design der Kondensatorplatten . . . . .	25
4.5	Optimierung der Plattenbreiten . . . . .	26
4.6	Voruntersuchungen mit geringer Maschenzahl . . . . .	28
4.7	Simulationen mit hoher Maschenzahl . . . . .	32
4.7.1	Optimierung der Plattenbreiten . . . . .	32
4.7.2	Optimierung der Kondensatorplatten-Krümmung . . . . .	35
4.7.3	Optimierung der Kondensatorplatten-Steigung . . . . .	38
4.8	Äquidistante Winkel, 5 MHz . . . . .	42
4.9	Äquidistante Winkel, 2,5 MHz . . . . .	44
4.10	Tuning, Kühlung und aktueller Stand der Fertigung . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Schlusswort</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>Danksagung</b>	<b>63</b>



# 1 Einleitung

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Auslegung des Kickers für den Bunch-Kompressor des FRANZ-Projektes. Anhand eines Modells wurden die verschiedenen Möglichkeiten der Einkopplung sowie das Feld zwischen den Kondensatorplatten bereits untersucht [1]. In der vorliegenden Arbeit wird der Kicker mit Hilfe des Programms CST Microwave Studio erstellt und optimiert, sodass er nach Abschluss der Untersuchungen in die Fertigung gehen kann. Dabei ist der erste Schwerpunkt der Untersuchungen die Auslegung und Optimierung der Kondensatorplatten, die für die Auslenkung der Mikro-Bunche im FRANZ-Projekt verantwortlich sind. Zu Beginn der Masterarbeit gab es gezielte Winkelverteilungen, die der Kicker im Rahmen des FRANZ-Projektes erreichen sollte. Nachdem ein Erreichen dieser Werte nur bedingt möglich war, wurden verschiedene Abschnitte des FRANZ-Projektes neu überdacht und die Anforderungen an den Kicker änderten sich dadurch grundlegend. Aus diesem Grund wurde der Kicker zu Beginn der Arbeit für eine Frequenz von 5 MHz ausgelegt, wohingegen er im Rahmen der neuen Anforderungen für eine Resonanzfrequenz von 2,57 MHz ausgelegt wurde. Die Untersuchung der optimalen Resonanzfrequenz für die Anforderungen des Kickers stellt den zweiten Schwerpunkt dieser Arbeit dar.





## 2 FRANZ

Die Abkürzung FRANZ steht für **F**rankfurter-**N**eutronen-**Q**uelle am Stern-**G**erlach-**Z**entrum. Das FRANZ-Projekt ist eine intensive gepulste Neutronenquelle für niedrige Energien von bis zu 500 keV, welche von einem intensiven 2 MeV Protonenstrahl mit bis zu 140 mA betrieben wird [12]. Die Neutronen werden durch den Protonenbeschuss eines  ${}^7_3\text{Li}$  Targets erzeugt, welches als festes Target konzipiert und längerfristig evtl. als flüssiges Target geplant ist und an dem, im Abstand von 700 mm, ein Neutronenfluss von bis zu  $1 \cdot 10^7 \frac{n}{\text{cm}^2\text{s}}$  erzeugt werden soll [12]. Damit ist das FRANZ-Projekt das Experiment mit dem höchsten gepulsten Neutronenfluss im Energiebereich bis zu 500 keV. Mit dieser Neutronenquelle soll unter anderem der s-Prozess in Sternen, bei dem Elemente bis zu einer Massenzahl von  $A = 210$  aufgebaut werden, untersucht werden [12]. Um dies zu ermöglichen befindet sich nach dem Beschleunigungsbereich des FRANZ-Projektes der sogenannte Bunch-Kompressor. Seine Aufgabe besteht darin, mit einer Wiederholrate von 250 kHz 9 einzelne Mikro-Bunche auf 1 ns und einen Peakstrom von bis zu 7 A zu komprimieren [12]. Dieser Betriebsmodus wird als Kompressor-Modus bezeichnet. Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Untersuchung von Neutronen-Einfangprozessen an verschiedenen technisch interessanten Materialien. Somit sollen die Neutronen-Einfang-Querschnitte untersucht werden, um Materialien zu finden, die den hohen Anforderungen z.B. eines Transmutationsreaktors genügen [4]. Der FRANZ Protonen-Linac besteht aus einer Ionenquelle des Volumentyps, welcher ein Beschleunigungsabschnitt, bestehend aus einem RFQ und einer IH-Struktur, nachgegliedert ist. Bevor der Protonenstrahl allerdings in den RFQ gelangt, wird er zunächst durch 4 Solenoide geführt. Zwischen dem 2. und 3. Solenoid befindet sich der sogenannte Chopper, der mit einer Wiederholrate von 250 kHz den DC Protonenstrahl in 50 - 100 ns lange Makro-Bunche mit 150 mA unterteilt [8, 12]. Diese durchlaufen den 3. und 4. Solenoid und gelangen dann in den Beschleunigungsbereich des RFQ's und der IH, welche eine gekoppelte Struktur darstellen. Diese Struktur beschleunigt die Makro-Bunche auf eine Endenergie von 2,1 MeV bei 175 MHz, die nochmal durch den CH-Rebuncher im Anschluss um  $\pm 0,2$  MeV variiert werden kann [12]. Der RFQ formt die für die Hochfrequenzbeschleunigung grundsätzlich benötigte Mikrostruktur. Neun dieser Mikro-Bunche werden später vom Bunch-Kompressor innerhalb von 1 ns auf das Target fokussiert. Insgesamt wird es 2 Betriebsmodi des FRANZ-Projektes geben. Zum Einen den Kompressor-Modus, welcher schon erläutert wurde und die einzelnen Mikro-Bunche mit einem Peakstrom von bis zu 7 A auf eine Pulslänge von 1 ns komprimiert. Zum Anderen gibt es den sogenannten Aktivierungs-Modus, bei dem ein ungechoppeter Protonenstrahl im RFQ und in der IH beschleunigt wird. Der so erzeugte CW-Strahl besitzt eine Stromstärke von bis zu 3 mA, was einer Strahlleistung von bis zu 6 kW auf dem Target entspricht. Das bedeutet, dass das FRANZ-Projekt entweder gepulsten Betrieb mit einer sehr hohen gepulsten Neutronen-

intensität oder einen Dauerbetrieb mit einer mittleren Strahlintensität ermöglicht, welche für Aktivierungsmessungen geeignet ist. Nachfolgend ist das Layout des FRANZ-Projektes sowie eine Vergleichstabelle der geplanten FRANZ-Neutronen-Quelle mit bereits existierenden Neutronenquellen dargestellt. [8, 12, 13]

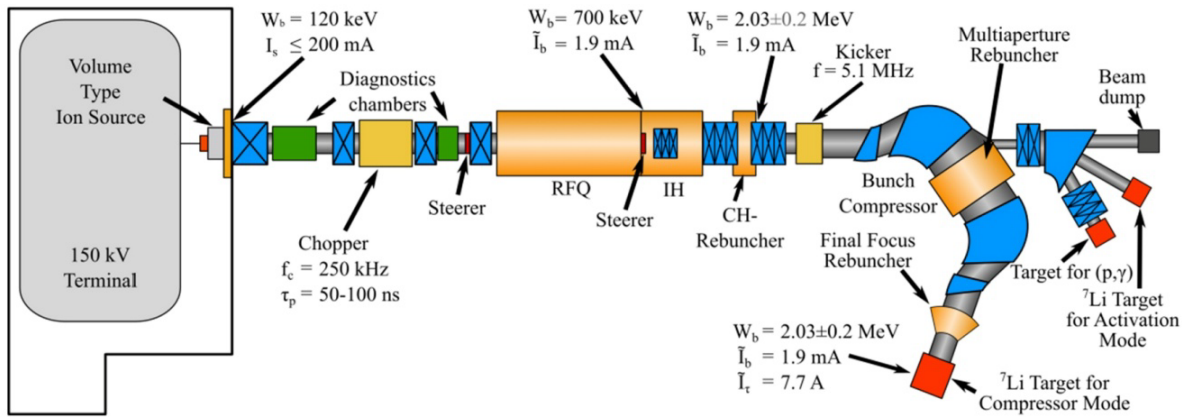


Abbildung 2.1: Layout des FRANZ-Projektes. [12]

Einrichtung	Neutronen Fluss an der Position des Targets* [cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Wiederholrate [Hz]	Flugstrecke [m]	Pulsbreite [ns]	Energiebereich der Neutronen [keV]
FZ Karlsruhe	1·10 <sup>4</sup>	250000	0.8	0.7	1-200
DANCE, Los Alamos	5·10 <sup>5</sup>	20	20	250	th-10 <sup>5</sup>
n_TOF, CERN	5·10 <sup>4</sup>	0.4	185	6	th-10 <sup>6</sup>
GELINA, Geel	5·10 <sup>4</sup>	800	30	1	th-10 <sup>5</sup>
ORELA, Oak Ridge	2·10 <sup>4</sup>	525	40	8	th-10 <sup>4</sup>
Elbe Dresden	1·10 <sup>5</sup>	500000	3.7	0.4	50-10 <sup>4</sup>
FRANZ, Frankfurt	1·10 <sup>7</sup>	250000	0.8	1	1-200 (500)

\* Integrierter Fluss zwischen 1 keV und 100 keV

Tabelle 2.1: Vergleich von FRANZ mit bereits existierenden Neutronenquellen. [12]

## 2.1 Der Bunch-Kompressor

Der Bunch-Kompressor ist das Bauteil im Rahmen des FRANZ-Projektes, welches die Parameter für diese Masterarbeit gesetzt hat, da der Kicker die hohen Anforderungen des Bunch-Kompressors erfüllen muss. Der Bunch-Kompressor besteht aus zwei homogenen und 2 inhomogenen magnetischen Dipolen sowie dem Multiapertur-Rebuncher in der Mitte und dem "Final-Focus"-Rebuncher am Ende (siehe Abbildung 2.2) [10]. Der "Final-Focus"-Rebuncher arbeitet bei einer Frequenz von 175 MHz und ermöglicht eine weitere Energievariation der Mikro-Bunche von  $\pm 0,2$  MeV [12]. Der Multiapertur-Rebuncher besitzt eine Resonanzfrequenz von 87,5 MHz und dient zur Kontrolle und Korrektur der longitudinalen Strahldynamik der einzelnen Mikro-Bunche. Das Ziel dieses Mobley-Typ Bunch-Kompressors ist die Fokussierung eines Makropulses von ca. 50 Nanosekunden Länge, der aus 9 Mikropulsen besteht, auf eine Länge von einer Nanosekunde [11]. Dabei beruht das Prinzip der longitudinalen Bunch-Kompression auf der Wegdifferenz der einzelnen Mikropulse beim Durchgang durch den Bunch-Kompressor. Das bedeutet, dass der erste Mikropuls auf die längste Flugbahn und der letzte Mikropuls auf die kürzeste Flugbahn geschickt wird. Dieses Prinzip wurde bereits durch R.C. Mobley vorgeschlagen und musste aufgrund der hohen Raumladung im Falle des FRANZ-Projektes weiter entwickelt werden. Es war zwingend erforderlich, die freien Driften ohne fokussierende Elemente der einzelnen Protonenpakete zu reduzieren und somit jede Möglichkeit zur transversalen Fokussierung zu nutzen. Abbildung 2.2 zeigt die einzelnen Bauteile noch einmal detailliert auf. [9, 10, 11, 12]

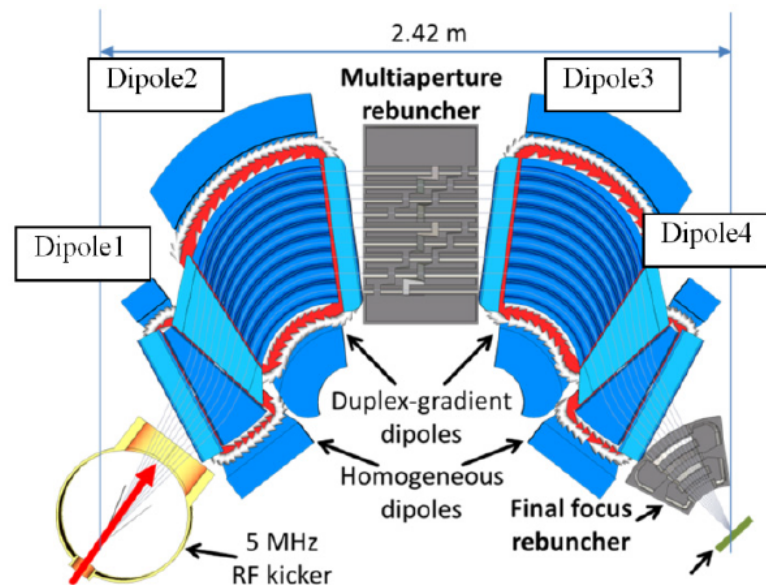


Figure 1: ARMADILLO bunch compressor.

Abbildung 2.2: Bunch-Kompressor Konzept. [10]

## 2.2 Der Kicker des FRANZ-Projektes

Der Kicker ist dafür verantwortlich, die einzelnen Mikro-Bunche innerhalb eines Makro-Bunches auf die 9 verschiedenen Trajektorien auszulenken, auf denen sie den Bunch-Kompressor durchlaufen. Dabei waren zunächst keine exakten Winkel vorgegeben und es sollte nur eine möglichst große Aufspaltung im Bereich von  $\pm 10^\circ$  erreicht werden. Im Laufe der Masterarbeit hat sich allerdings herausgestellt, dass exakte Winkel und Winkeldifferenzen der einzelnen Trajektorien erforderlich sind, um die Akzeptanz des Bunch-Kompressors zu erreichen. Diese Anforderungen werden im Abschnitt 4 dargestellt. Insgesamt besteht der Kicker aus einer Induktivität und einer Kapazität und stellt somit einen elektromagnetischen Schwingkreis dar. Zu Beginn der Planung des FRANZ-Projektes wurde über eine magnetische Lösung zur Auslenkung der einzelnen Mikro-Bunche nachgedacht. Allerdings würde dafür ein System mit einem maximalen Feld von ca. 600 mT auf einer Rampe von 50 ns benötigt, was technisch sehr viel schwieriger zu realisieren ist als ein elektrisches Kicker-System [2]. Wie schon in der Einleitung erwähnt, zeigte sich im Laufe der Untersuchungen, dass die gewünschten Winkeldifferenzen des Bunch-Kompressors nur teilweise erreicht werden konnten. Aus diesem Grund wurde das Magnet-Konzept des Bunch-Kompressors neu entworfen, sodass eine Verteilung von äquidistanten Winkeldifferenzen zwischen den einzelnen Trajektorien akzeptiert wird. Dadurch wurde auch der Kicker neu konzipiert und es wurde zunächst versucht, bei einer Frequenz von 5 MHz eine äquidistante Winkeldifferenz-Verteilung zu erreichen (Abschnitt 4.8). Nachdem dies auch nicht zufriedenstellend erreicht werden konnte, wurde die Resonanzfrequenz des Kickers auf 2,5 MHz halbiert. Dadurch konnte eine möglichst äquidistante Verteilung der Winkeldifferenzen erreicht werden. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 4.8 gesondert beschrieben.

# 3 Theorie

## 3.1 Gespeicherte Energie

Die in einem Resonator gespeicherte Energie lässt sich über die elektrischen oder magnetischen Felder bestimmen, da die Energie in beiden Fällen im zeitlichen Mittel gleich verteilt ist. Somit erhält man durch Integration über das Resonatorvolumen die gespeicherte Energie [5, 6]:

$$W = \frac{1}{2}\mu_0 \int_V |H|^2 dV = \frac{1}{2}\epsilon_0 \int_V |E|^2 dV \quad (3.1)$$

Dabei ist  $H$  die magnetische und  $E$  die elektrische Amplitudenverteilung im Resonator und  $V$  das Volumen des Resonators.

## 3.2 Verlustleistung

Die Verlustleistung eines Resonators ergibt sich zunächst aus den Verlusten in der Resonatoroberfläche. Die Leistung, die pro Fläche dissipiert wird, ist gegeben durch [5, 6]:

$$\frac{dP_c}{ds} = \frac{1}{2}R_s |H|^2 \quad (3.2)$$

Sobald man dies über die gesamte Oberfläche  $S$  des Resonators integriert, erhält man die gesamte im Resonator dissipierte Leistung  $P_c$  [5, 6]:

$$P_c = \frac{1}{2}R_s \int_S |H|^2 ds \quad (3.3)$$

Dabei benutzt man zur Berechnung der Verlustleistung die magnetischen Felder, da hohe Magnetfelder identische Oberflächenströme verursachen und somit die Magnetfelder für die Verluste in der Resonatoroberfläche verantwortlich sind ( $H = \frac{dI}{dt}$ ).

## 3.3 Güte

Die Güte ist eine der wichtigsten Größen, um ein schwingungsfähiges System zu beschreiben. Sie gibt an, wieviel gespeicherte Energie in einem solchen System mit der Zeit dissipiert wird. Im Bereich der Beschleunigerphysik gibt es zwei wichtige Gütewerte, um Hohlraumresonatoren zu beschreiben. Zum Einen gibt es die unbelastete oder auch intrinsische Güte, bei der nur die Verluste der Resonatoroberfläche eine Rolle spielen und zum Anderen die belastete Güte, bei der der angepasste Einkoppler (Reduktion der intrinsischen Güte um den Faktor  $\frac{1}{2}$ ) sowie gegebenenfalls die Strahllast berücksichtigt werden [5].

Im Falle eines Hohlraumresonators werden durch die Hochfrequenz in den Resonatoroberflächen elektrische Ströme angeregt, die mit hochfrequenten elektrischen und magnetischen Wechselfeldern verbunden sind. Durch diese Wechselfelder verliert das Resonatorsystem im Laufe der Zeit Energie, da die Resonatoroberfläche einen endlichen Oberflächenwiderstand besitzt. Die intrinsische Güte stellt dar, wieviel Energie pro Schwingungsdauer dissipiert wird bzw. wie gut das Verhältnis zwischen gespeicherter Energie und Verlustleistung im Resonator ist [5, 6]:

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot W}{P_c} \quad (3.4)$$

Dabei stellt  $W$  die gespeicherte Energie im Resonator,  $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$  die Kreisfrequenz der Schwingung,  $P_c$  die Leistung, die im System dissipiert wird und  $\omega_0 \cdot W$  die so genannte Blindleistung im Resonator dar. Die Güte ist invers proportional zum Oberflächenwiderstand  $R_s$ , was deutlich wird, wenn man in Gleichung 3.4 die Gleichungen 3.1 und 3.3 einsetzt [5, 6]:

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot \mu_0 \int_V |H|^2 dV}{R_s \cdot \int_A |H|^2 dA} \quad (3.5)$$

Aus diesem Grund liegt die Güte von supraleitenden Beschleunigerstrukturen im Bereich von  $10^8$  bis  $10^{10}$ , wohingegen normaleitende Strukturen lediglich eine Güte im Bereich von  $10^3$  bis  $10^5$  besitzen [6]. Da  $R_s$  durch den Skin-Effekt proportional zu  $\sqrt{f}$  ist (siehe Abschnitt 3.4), ist auch die Güte direkt proportional zu  $\sqrt{f}$ .

Man kann die Güte anhand der Resonanzkurve ausmessen, indem man die Senderfrequenz im Bereich der Resonanzfrequenz variiert und die Antwort des Resonators auswertet. Hierzu wird entweder das elektrische oder magnetische Feld als Funktion der Senderfrequenzen aufgetragen. Das Verhalten des Resonators in der Nähe der Resonanz wird durch die Lorentzkurve beschrieben [5, 6].

$$|A(\omega)| = \frac{|A_0|}{\sqrt{1 + Q_0^2 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (3.6)$$

Dabei ist  $A(\omega)$  das Feld bei der Frequenz  $\omega$ ,  $A_0$  das Feld im Resonanzfall,  $\omega_0$  die Resonanzfrequenz und  $\Delta\omega = 2 \cdot (\omega - \omega_0)$  die doppelte Differenz zur Resonanzfrequenz. Um zur Definition der Güte zu gelangen benutzt man  $\Delta\omega_{3dB} = \omega_2 - \omega_1$ , wobei  $\omega_2$  und  $\omega_1$  die Frequenzen sind, bei denen der Feldpegel auf den Bruchteil  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  bzw. die Leistung auf den Bruchteil  $\frac{1}{2}$  abgesunken ist. Dies entspricht einer Abschwächung der Leistung bzw. des Feldpegels um 3 dB (siehe Abbildung 3.1) [5, 6].

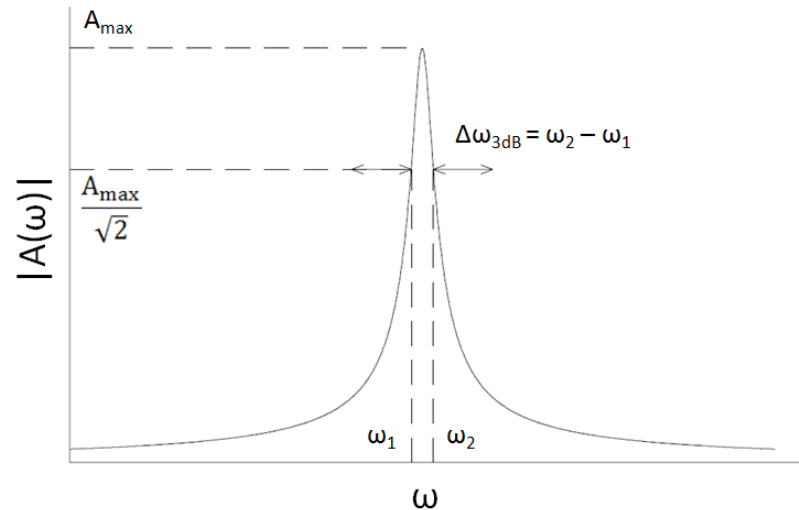


Abbildung 3.1: Resonanzkurve um die Resonanzfrequenz. [6]

Wenn man nun  $|A(\omega)| = \frac{|A_0|}{\sqrt{2}}$  in Gleichung 3.6 einsetzt erhält man die Definition der Güte:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{3dB}} \quad (3.7)$$

Man sieht also: Je schmaler die Resonanzkurve ist, desto höher ist die Güte. Somit ist die Güte sowohl ein Maß für die Breite der Resonanzkurve als auch ein Maß dafür, wie schnell die im System gespeicherte Energie dissipiert wird [5, 6].

### 3.3.1 Intrinsische Güte

Wie schon erwähnt gibt es die intrinsische Güte  $Q_0$ , welche nur die Verluste in den Resonatorwänden berücksichtigt. Sie kann mit Formel 3.4 wie folgt ausgedrückt werden:

$$Q_0 = \frac{2\pi f_0 W}{P} = \frac{2\pi W}{P \cdot T} = 2\pi \frac{W}{W_T} = 2\pi N \quad (3.8)$$

Dabei ist  $T$  die Schwingungsdauer und  $P \cdot T$  die Energie  $W_T$ , die pro Hochfrequenzperiode dissipiert wird. Das bedeutet, die unbelastete Güte  $Q_0$  ist bis auf einen Faktor  $2\pi$  gleich der Zahl der Schwingungsperioden  $N$ , die vergeht, bis die gespeicherte Energie  $W$  im Resonator auf den Bruchteil  $\frac{1}{e}$  abgesunken ist. [1, 5, 6]

### 3.3.2 Belastete Güte

Da die intrinsische Güte nur die Verluste in der Resonatoroberfläche berücksichtigt, benötigt man zur Beschreibung eines Resonators die belastete Güte, die den Ein- und Auskoppler und den Strahl selbst mit einbezieht. Die in einem Resonator gespeicherte Energie wird, bei abgeschaltetem Sender, nicht nur über die Verluste in der Resonatoroberfläche dissipiert, sondern "strömt" auch über den Ein- und Auskoppler aus dem Resonator. Neben diesen Verlusten stellt

die Leistungsübertragung auf den Teilchenstrahl einen weiteren Verlustmechanismus dar, der mit einbezogen werden muss. Mit allen Verlusten berücksichtigt lässt sich die gesamte Verlustleistung wie folgt beschreiben [1, 5, 6]:

$$P_{tot} = P_c + P_e + P_t + P_s \quad (3.9)$$

Dabei bezeichnet  $P_c$  die Leistung, die im Resonator dissipiert wird,  $P_e$  die Leistung durch den Energieverlust im Einkoppler,  $P_t$  die Leistung durch den Energieverlust im Auskoppler (welche bei Normalleitung meistens vernachlässigbar ist) und  $P_s$  die Leistung, die auf den Strahl übertragen wird [1, 5, 6]. Wenn man dies nun in Gleichung 3.4 einfügt, erhält man:

$$Q_L = \frac{\omega_0 \cdot W}{P_{tot}} \quad (3.10)$$

Durch geschicktes Erweitern von Gleichung 3.9 kann man sowohl für den Einkoppler als auch für den Auskoppler eine eigene Güte definieren [1, 5, 6]:

$$\frac{P_{tot}}{\omega_0 \cdot W} = \frac{P_c + P_e + P_t + P_s}{\omega_0 \cdot W} \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_e} + \frac{1}{Q_t} + \frac{1}{Q_s} \quad (3.12)$$

Dabei ist  $Q_e$  die belastete Güte des Einkopplers,  $Q_t$  die belastete Güte des Auskopplers und  $Q_s$  die belastete Güte des Strahls [1, 5, 6]:

$$Q_e = \frac{\omega_0 \cdot W}{P_e} \quad (3.13)$$

$$Q_t = \frac{\omega_0 \cdot W}{P_t} \quad (3.14)$$

$$Q_s = \frac{\omega_0 \cdot W}{P_s} \quad (3.15)$$

### 3.4 Oberflächenwiderstand

Der Oberflächenwiderstand eines Resonators hängt von der leitenden Schichtdicke des Materials ab, die wiederum durch den Skin-Effekt von der Frequenz abhängt. Durch diesen Effekt wird die leitende Schichtdicke mit steigender Frequenz kleiner, sodass der Oberflächenwiderstand mit steigender Frequenz ansteigt. Der Skin-Effekt an sich lässt sich durch das Phänomen der Selbstinduktion am Beispiel eines dünnen Drahtes erklären. Das äußere elektrische Feld bewirkt einen Stromfluss entlang des Drahtes und damit ein Magnetfeld, welches Wirbelströme induziert, die dem Erzeugerstrom nahe der Achse des Drahtes entgegengerichtet sind. Am Rand des Drahtes hingegen sind die Wirbelströme gleichgerichtet mit dem Erzeugerstrom. Somit wird der Erzeugerstrom nahe der Achse abgeschwächt und fließt nur noch in einer dünnen Schicht, deren Dicke invers proportional zur Wurzel der Frequenz ist, an der Oberfläche des Drahtes. Die Dicke dieser Schicht wird als Skintiefe bezeichnet [5].



$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (3.16)$$

Dabei ist  $\rho$  der spezifische Widerstand des Materials,  $\mu_0$  die Vakuumpermeabilität und  $\mu_r$  die Permeabilität des Materials. Mit Hilfe der Skintiefe lässt sich nun der Oberflächenwiderstand berechnen [5]:

$$R_s = \frac{1}{\sigma \cdot \delta} \quad (3.17)$$

Dabei ist  $\sigma$  die Leitfähigkeit des Materials.

### 3.5 Tuning: Frequenzabstimmung und Regelung

Damit ein einwandfreier Betrieb des Kickers gewährleistet ist, muss die benötigte Resonanzfrequenz genau eingestellt werden. Da es verschiedene Gründe geben kann, weshalb die Zielfrequenz des Resonators nicht getroffen wird, benötigt man eine Möglichkeit, die Resonanzfrequenz so zu variieren, dass der gewünschte Wert dennoch erreicht wird. Gründe, die zur Abweichung der Resonanzfrequenz vor Inbetriebnahme führen können, sind zum Einen Ungenauigkeiten in der Fertigung und zum Anderen Abweichungen zwischen den Simulationen und der Realität. Darüber hinaus entstehen Schwankungen der Resonanzfrequenz während des Betriebsablaufes unter anderem durch Temperatur- und Druckschwankungen sowie Verformungen des Resonators durch die Evakuierung, welche eine Änderung der Geometrie und somit auch der Kapazität und Induktivität des Resonators darstellen. Diese Variationen in der Induktivität und Kapazität des Resonators erzeugen eine Änderung der gespeicherten Energie, welche wiederum zur Variation der Resonanzfrequenz führt. Um nun die Resonanzfrequenz gezielt variieren zu können benötigt man Tuner, die entweder an das magnetische oder elektrische Feld ankoppeln und somit die Resonanzfrequenz entweder erhöhen oder absenken. Die Frequenzänderungen durch die Änderung der gespeicherten Energie lässt sich mit den Formeln 3.18 und 3.19 berechnen [5]:

$$\Delta f_m = \frac{\Delta W_m}{W} \frac{f}{2} = \frac{\mu_0 f}{4W} \int_{\Delta V} |H|^2 dV \quad (3.18)$$

$$\Delta f_e = -\frac{\Delta W_e}{W} \frac{f}{2} = -\frac{\epsilon_0 f}{4W} \int_{\Delta V} |E|^2 dV \quad (3.19)$$

Mit Hilfe dieser Formel kann also abgeschätzt werden, welche Frequenzänderung bei Verdrängung von elektrischem oder magnetischem Feld im Volumen  $\Delta V$  durch einen Tuner erreicht werden kann. Abhängig davon, ob nun mehr elektrisches oder magnetisches Feld im Volumen  $\Delta V$  durch den Tuner verdrängt wird, kommt es entweder zu einer Erhöhung oder Absenkung der Resonanzfrequenz. Wie in Gleichung 3.1 zu erkennen ist steigt die Resonanzfrequenz, wenn das magnetische Feld verdrängt wird, wohingegen die Resonanzfrequenz nach Gleichung 3.19 abgesenkt wird, wenn das elektrische Feld verdrängt wird. Man spricht im ersten Fall von induktivem und im zweiten Fall von kapazitivem Tuning. [5]

### 3.6 Hochfrequenz-Resonatoren zur Teilchenauslenkung

Die Auslegung des Kickers für das FRANZ-Projekt war unter anderem deshalb schwierig und zeitaufwendig, da zu einem ähnlichen Zweck kein vergleichbares Bauteil existiert. Das Prinzip, Teilchenstrahlen oder Teilchenpakete mit Hilfe eines elektrischen Feldes abzulenken, wird in verschiedenen Bereichen eingesetzt. Ein Beispiel wäre die stochastische Kühlung, bei der einzelne Teilchenpakete gezielt durch einen elektrischen Kicker auf eine ideale Kreisbahn gebracht werden, um die Größe des Teilchenpakets im Phasenraum zu verkleinern. Allerdings arbeitet dieses System nicht mit einem Resonator, sondern lediglich mit einem Pick-Up, der die Position des Teilchens detektiert, und mit einem breitbandig verstärkten Signal an einem Plattenkondensator, der die Teilchenpakete auslenkt. In dem hier vorliegenden Fall wird die Auslenkung der Mikro-Bunche durch die Anregung der Grundmode eines Leitungsresonators erreicht. Ein weiterer Unterschied ist die Größe der Auslenkung. Im Falle der stochastischen Kühlung werden die Teilchenpakete nur gering abgelenkt, damit sie sich auf dem Orbit der Kreisbahn befinden, wohingegen beim FRANZ-Projekt die Mikro-Bunche in einem Bereich von ca.  $20^\circ$  ausgelenkt werden sollen. Diese wesentlich größere Auslenkung stellt ganz andere Anforderungen an den Resonator als im Falle der stochastischen Kühlung. Die meisten Systeme zur Ablenkung von Teilchenstrahlen oder Teilchenpaketen sind sogenannte Kicker-magnete, wie sie z.B. in Synchrotrons zum Einsatz kommen. Ein vergleichbarer Einsatzbereich zum Kicker des FRANZ-Projektes ist das Unterteilen eines Teilchenstrahls. Ein Beispiel dafür wäre der Nachchopper am Garching Tandembeschleuniger, welcher in der Diplomarbeit von Herrn Posselt 1984 entwickelt wurde [7]. Die Aufgabe des Nachchoppers war, das Untergrundrauschen zwischen den eigentlichen Teilchenpaketen zu reduzieren. Dazu wurden zwei Kicker-Resonatoren installiert, welche bei 5 MHz und 160 MHz betrieben wurden [7]. Durch die Überlagerung der beiden Auslenkungen konnte aus den sinusförmigen Signalen ein nahezu rechteckiges Signal erzeugt werden, das die Soll-Bunche unbeeinflusst durch das System läßt und den Untergrund zwischen den einzelnen Paketen auslenkt und auf einer Blende deponiert [7]. Der 5 MHz-Kicker dieses Projektes wurde ähnlich wie beim FRANZ-Projekt als RCL-Schwingkreis aufgebaut, wogegen der 160 MHz-Kicker als kapazitiv verkürzter  $\frac{\lambda}{2}$ -Resonator ausgeführt wurde [7]. Allerdings unterscheidet sich der 5 MHz-Kicker des Nachchoppers von dem Kicker dieser Masterarbeit, da die Spulen im Falle des Nachchoppers mit einem variablen Spulenabgriff außerhalb des Vakuumgefäßes angebracht waren, wohingegen sie beim FRANZ-Kicker im Vakuumgefäß selbst untergebracht sind. Außerdem waren die Kondensatorplatten des Nachchoppers gerade und nicht speziell geformt wie die des FRANZ-Kickers und auch die Ablenkspannungen unterscheiden sich deutlich. Der Kicker in Garching hatte maximale Spannungsamplituden von 20 kV, wogegen der Kicker des FRANZ-Projektes maximale Spannungen von bis zu 210 kV (im 2,5 MHz-Fall) erzeugen muss. In beiden Fällen wird zwar das elektrische Feld genutzt um die Teilchen auszulenken, aber es konnten keine Informationen oder Daten aus diesem Projekt auf das hier vorliegende FRANZ-Projekt übertragen werden. Somit stellt der Kicker dieser Masterarbeit ein Bauteil dar, welches so bisher noch nicht zum Einsatz gekommen ist und damit eine neue Möglichkeit zur Auslenkung von Teilchen-Paketen liefert.

## 4 Design eines Hochfrequenz-Kickers für FRANZ

Das Ziel dieser Masterarbeit war die Auslegung und Fertigstellung des Kickers für das FRANZ-Projekt. Dabei gab es, wie schon erwähnt, mehrere Probleme, sodass in dieser Arbeit drei Abschnitte der Auslegung vorgestellt werden. Zunächst wurde das Grundmodell des Kickers in CST eingegeben und auf die Resonanzfrequenz von 5,147 MHz abgestimmt. Schon bei diesem ersten Modell wurden, wie in den nachfolgenden Abschnitten gezeigt wird, einige Veränderungen vorgenommen. Danach mussten die Kondensatorplatten des Kickers so optimiert werden, dass sie die geforderten Winkeldifferenzen möglichst genau erreichen. Nachdem dies nur ungenügend erreicht werden konnte, begann die Neuauslegung des Bunch-Kompressors und des Kickers. Dabei wurde der Bunch-Kompressor so angepasst, dass er äquidistante Winkeldifferenzen zwischen den einzelnen Trajektorien akzeptiert. Dies war für den Kicker wesentlich einfacher zu erreichen als die spezielle Verteilung der Winkeldifferenzen, welche in Abschnitt 4.4 dargestellt ist. Allerdings traten auch hier Probleme auf, sodass eine äquidistante Verteilung nur teilweise erreicht werden konnte, da der lineare Teil der Schwingungsperiode nicht lang genug war. Aus diesem Grund wurde die Frequenz des Kickers auf 2,57 MHz abgesenkt, damit der lineare Abschnitt der Sinusschwingung lang genug für die einzelnen Mikro-Bunche ist. Der letzte Abschnitt stellt das vorläufige Tuning-Konzept und den aktuellen Bestellstatus zum Ende dieser Arbeit dar. Diese verschiedenen Schritte werden nach den Beschreibungen des Grundmodells vorgestellt.

### 4.1 Das erste Modell des 5-MHz-Kickers

Das erste Modell, welches in CST eingegeben wurde, hatte das gebaute 8-MHz-Modell als Vorbild. Dieses Modell wurde schon einmal von Herrn Nie mit CST Studio Suite 2009 erstellt, um die grundlegenden Eigenschaften eines RCL-Schwingkreises zu untersuchen [3]. Das erste Ziel bestand darin, die Resonanzfrequenz des Kickers auf die zunächst geforderten 5,147 MHz zu bringen, indem die Tankgröße sowie die Größe der Induktivität angepasst wurde. Der Kicker bestand zu diesem Zeitpunkt aus einer Induktivität mit 8 Windungen und einem Kondensator mit gekrümmten Platten (siehe Abbildung 4.2). Die Form der Platten wurde in zwei Abschnitten definiert. Zum einen aus einer 100 mm langen Parabel und zum anderen aus einer 100 mm langen Geraden, sodass die Platten eine Gesamtlänge von 200 mm besitzen. Dabei wurde die Parabel über die Krümmung  $g$  und den Scheitelpunkt  $(X_0 | Y_0)$  und die Gerade über den Steigungswinkel  $\alpha$  definiert [2]:

#### 4 Design eines Hochfrequenz-Kickers für FRANZ

$$y_{\text{parabel}}(x) = g * (x - X_0)^2 + Y_0 \quad (4.1)$$

$$y_{\text{gerade}}(x) = \tan(\alpha) * (x - X_2) + Y_2 \quad (4.2)$$

$X_0$  und  $Y_0$  stellen dabei die Koordinaten des Scheitelpunkts der Parabel,  $X_2$  und  $Y_2$  den Endpunkt der Parabel dar. Die Werte der verschiedenen Parameter wurden für ein Koordinatensystem festgelegt, das seinen Ursprung am Beginn der Platten genau zwischen diesen hat, wie in Abbildung 4.1 dargestellt ist:

Parameter	Beschreibung	Wert
$g$	Krümmung der Parabel	$0,95 \frac{1}{\text{m}}$
$X_0$	X-Koordinate des Scheitelpunkts	0,0096 m
$Y_0$	Y-Koordinate des Scheitelpunkts	0,0099 m
$\alpha$	Steigungswinkel des linearen Teils	$10^\circ$
$X_2$	X-Koordinate des Endpunkts der Parabel	0,1 m
$Y_2$	Y-Koordinate des Endpunkts der Parabel	$a*(0,1-X_0)^2+Y_0 \approx 0,0177$ m

Tabelle 4.1: Tabelle mit Eckdaten der Kondensatorplatten.

Mit diesen Daten sieht das Profil der Kondensatorplatten wie folgt aus:

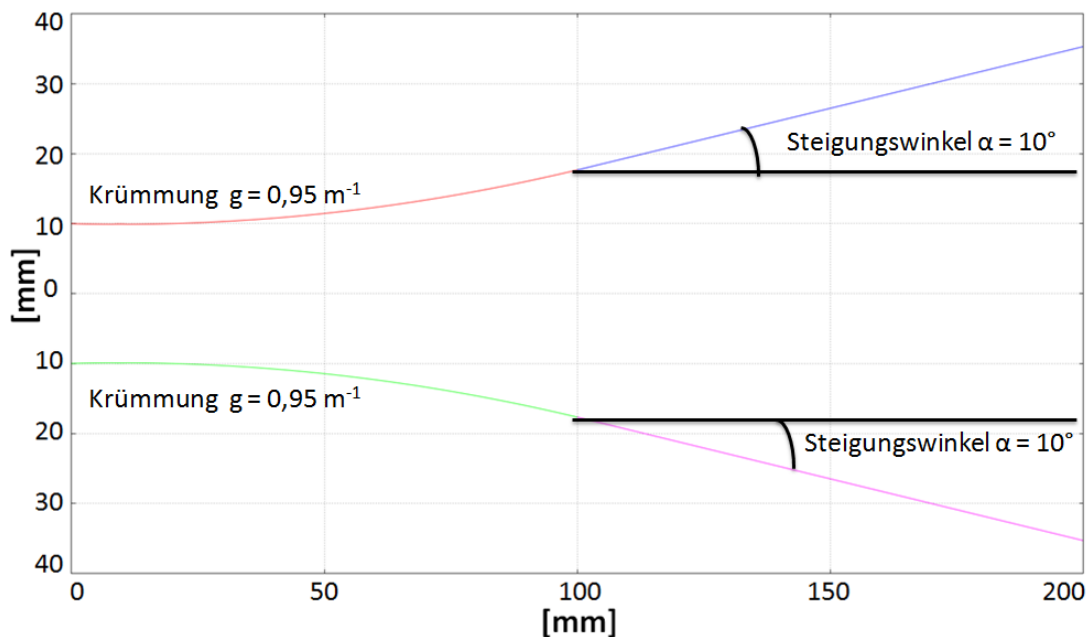


Abbildung 4.1: Profil der Kondensatorplatten.

Dabei treten die Mikro-Bunche von links in den Kondensator ein und verlassen das Kondensatorfeld am rechten Rand. Die beiden Kondensatorplatten haben einen minimalen Abstand von 19,8 mm sowie einen maximalen Abstand von ca. 71 mm am Ausgang des Kondensators.

Die Daten für die Kondensatorplatten wurden für die ersten Untersuchungen beibehalten. Erst im weiteren Verlauf dieser Masterarbeit wurde damit begonnen, die einzelnen Parameter hinsichtlich der neuen Anforderungen zu optimieren. Mit diesen Daten wurde dann das erste Modell erstellt, das aus dem Kondensator und der Induktivität mit 8 Windungen bestand, welche von insgesamt 6 Teflon-Stützen getragen und stabilisiert wurden:

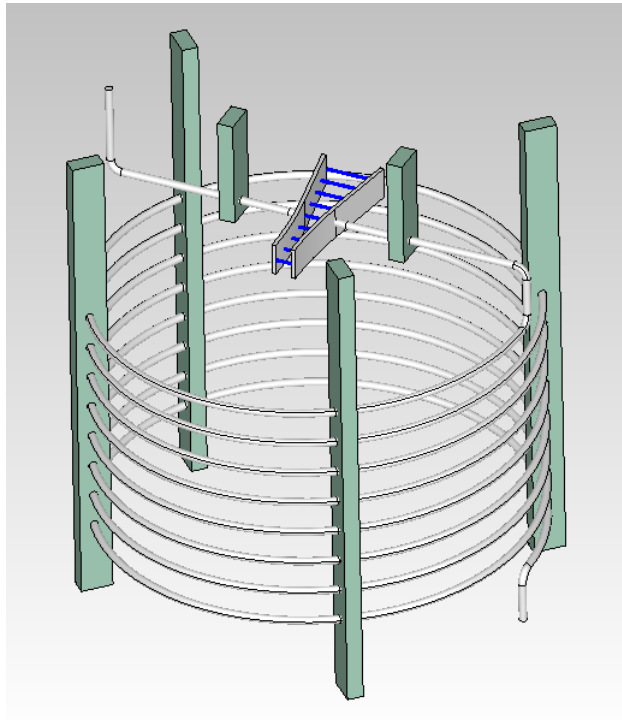


Abbildung 4.2: Das erste Design des 5-MHz-Kickers.

Die aus CST Microwave Studio ausgelesenen Daten des ersten Modells sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Parameter	Beschreibung	Wert
f	Frequenz	5,198 MHz
U	Spannung	175830 V
$P_{\text{Loss}}$	Verlustleistung	20209 W
$P_{\text{Loss, Norm}}$	Normierte Verlustleistung	12.812 W

Tabelle 4.2: Kenndaten des ersten Modells.

Ermittelt wurde die Spannung zwischen den Kondensatorplatten, indem das elektrische Feld entlang mehrerer Pfade zwischen den Platten integriert und danach der Mittelwert der einzelnen Spannungen genommen wurde. Für die Berechnungen der normierten Verlustleistung wurde im Fall des 5 MHz-Kickers eine normierte Spannung von 140 kV verwendet, da diese Spannung ausreicht, um die Mikro-Bunche in einem Bereich von  $\pm 10^\circ$  auszulenken. Auf dem nachfolgenden Bild sind die 9 verschiedenen Integrationspfade zur Berechnung der Spannung dargestellt.

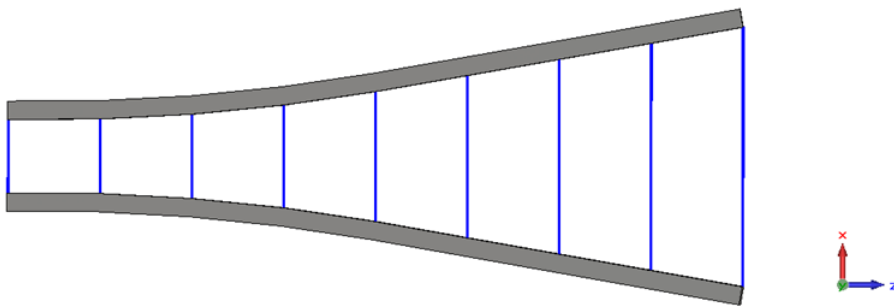


Abbildung 4.3: Integrationspfade der Spannungen zwischen den Kondensatorplatten.

Die Auslenkung der einzelnen Trajektorien der Mikro-Bunche im Bereich von  $\pm 10^\circ$  soll im Idealfall wie in Abbildung 4.4 aussehen. Dabei werden die ersten 4 Mikro-Bunche zur unteren Platte abgelenkt, der 5. Mikro-Bunch durchläuft die Platten nahezu unbeeinflusst und die Mikro-Bunche 6 bis 9 werden zur oberen Platte abgelenkt.

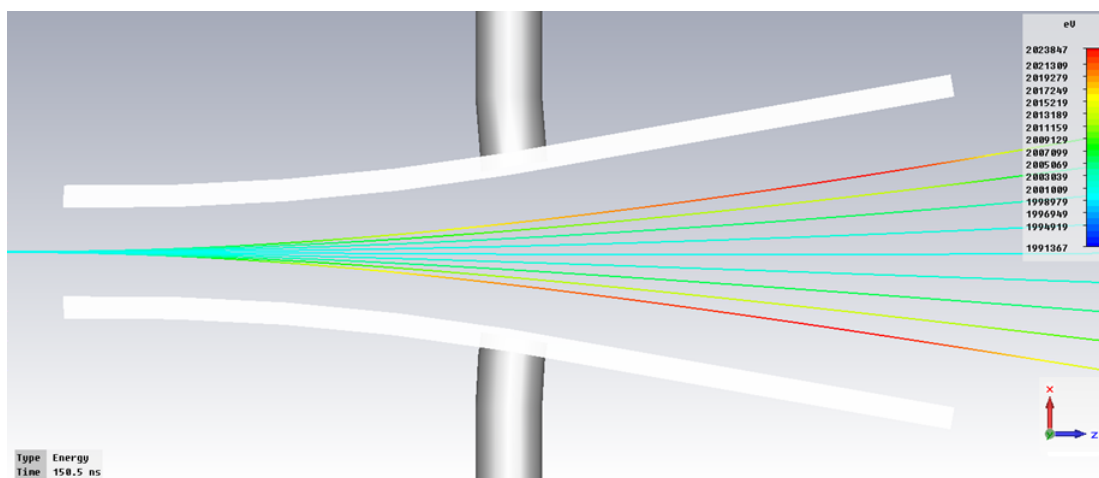


Abbildung 4.4: Auslenkung der Trajektorien.

## 4.2 Das zweite Modell des 5-MHz-Kickers

Die erste Version des 5-MHz-Kickers wurde nach einigen Untersuchungen dahingehend verändert, dass ein zweites Spulenpaar in die Kavität eingebaut wurde, um die Verlustleistung des Resonators zu verringern. Das erste Modell konnte man vereinfacht als Quarterwave-Resonator darstellen, bei dem der Kondensator zwischen der Induktivität und der Resonatoroberfläche besteht. Durch Spiegelung des Systems an der Kondensatormittelebene erhält man eine Struktur, die dem Half-Wave-Resonator ähnelt, allerdings ein anderes Schwingungsverhalten aufweist. In einem Half-Wave-Resonator schwingen beide Seiten der durchgängigen Stütze gleichzeitig zur Mitte hin, wogegen im Falle des 5-MHz-Kickers beide Stützen in die gleiche Richtung schwingen. Dies bedeutet, dass eine Stütze zur Kondensatorplatte schwingt, wogegen die andere Stütze von der Kondensatorplatte zum Tankdeckel schwingt.

Um zu zeigen, dass das Einfügen einer weiteren Spule die Verlustleistung entscheidend verbessert, wird das Prinzip am Beispiel eines Quarterwave-Resonators und sogenannten Doppel-Quarterwave-Resonators beschrieben. Im Quarterwave-Resonator sieht die Feldverteilung des elektrischen und magnetischen Feldes wie folgt aus:

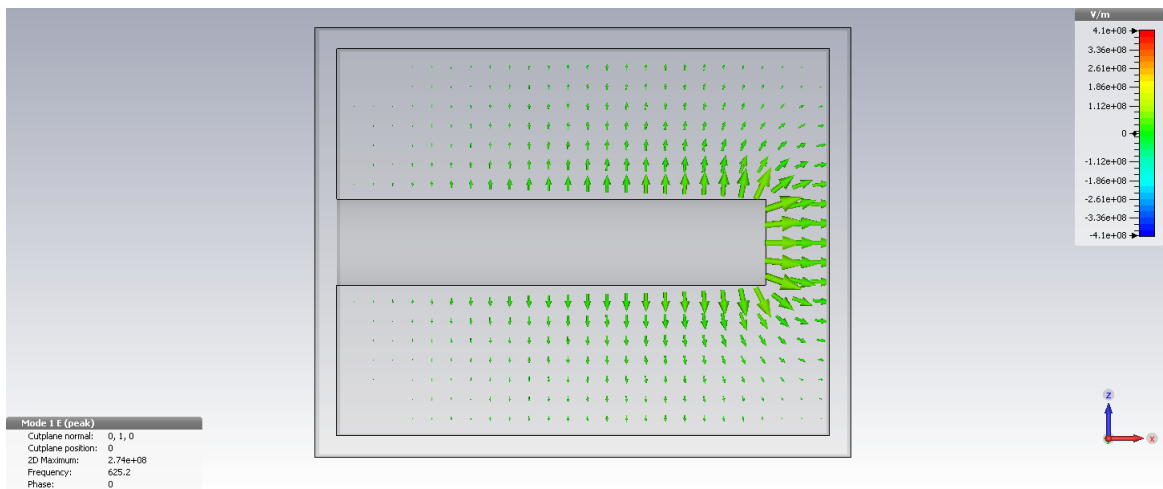


Abbildung 4.5: Elektrisches Feld eines Quarterwave-Resonators.

#### 4 Design eines Hochfrequenz-Kickers für FRANZ

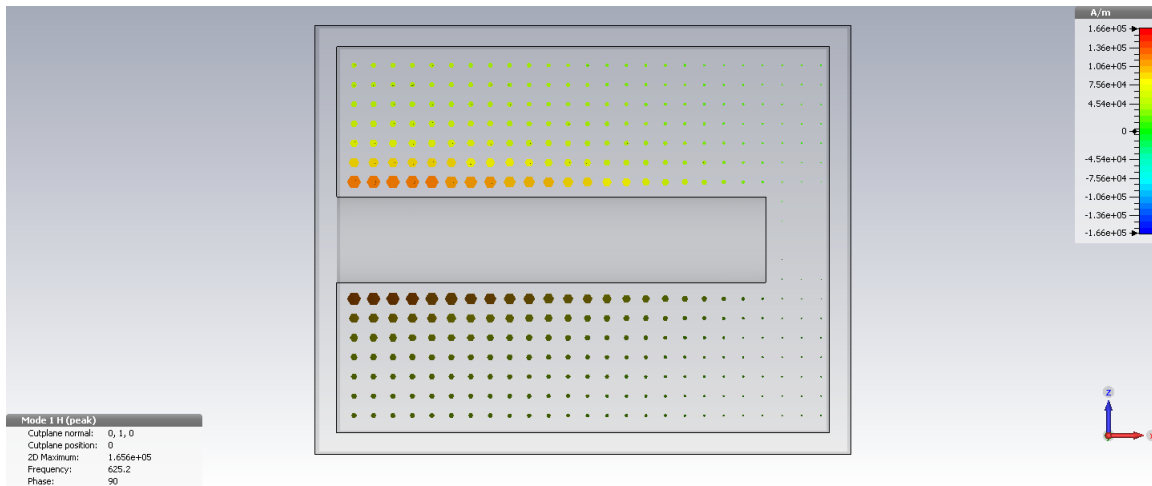


Abbildung 4.6: Magnetisches Feld eines Quarterwave-Resonators.

Die Feldverteilung des elektrischen Feldes entlang einer Geraden knapp über dem Stem ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen:

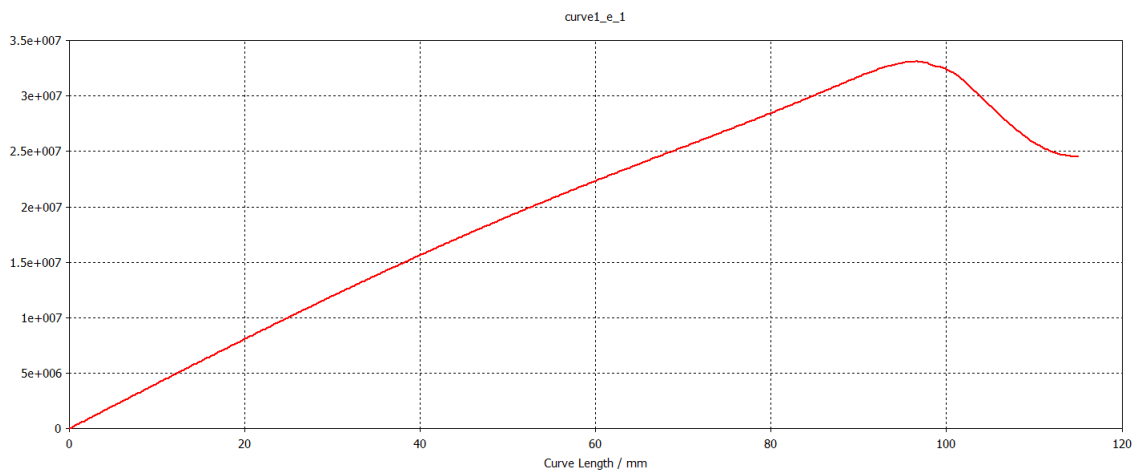


Abbildung 4.7: Elektrisches Feld entlang des Stems.

Wenn man nun einen zweiten Stem einfügt, der dem anderen Stem genau gegenüber sitzt, erhält man einen Resonator, der den gleichen Spalt zwischen den beiden Stems besitzt, allerdings eine doppelt so große Oberfläche hat. Die elektrischen und magnetischen Felder des Doppel-Quarterwave-Resonators sind in den Abbildungen 4.8 und 4.9 dargestellt.



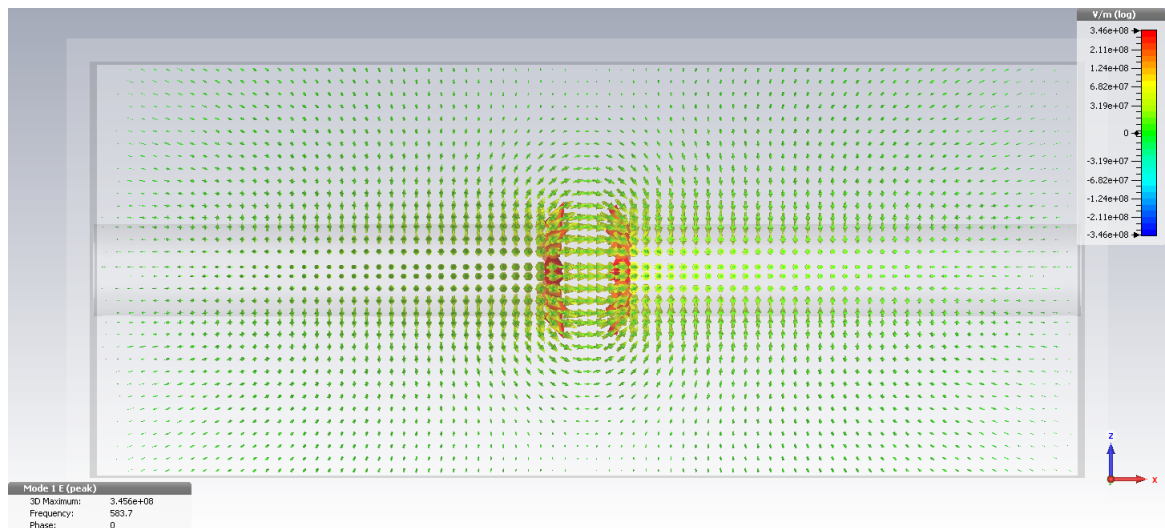


Abbildung 4.8: Elektrisches Feld des Doppel-Quarterwave-Resonators.

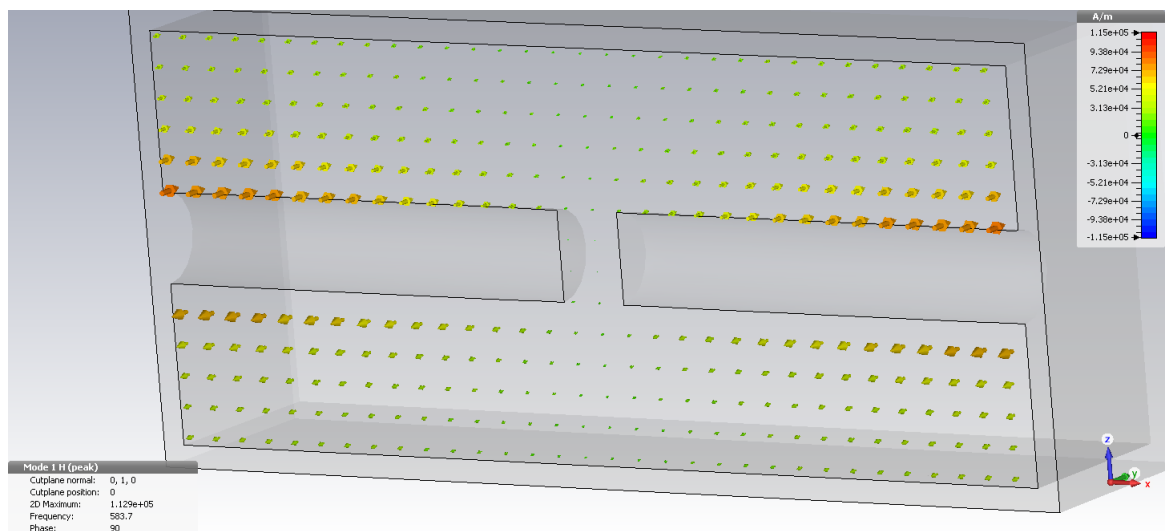


Abbildung 4.9: Magnetisches Feld des Doppel-Quarterwave-Resonators.

Durch die Vergrößerung der Oberfläche um einen Faktor 2 vergrößert sich nach Gleichung 3.3 allerdings auch die Verlustleistung um einen Faktor 2 bei gleicher Stromamplitude. In Abbildung 4.10 ist wieder das elektrische Feld entlang der beiden Stems aufgetragen, das, wie man sieht, ein größeres Maximum erreicht als beim Quarterwave-Resonator.

#### 4 Design eines Hochfrequenz-Kickers für FRANZ

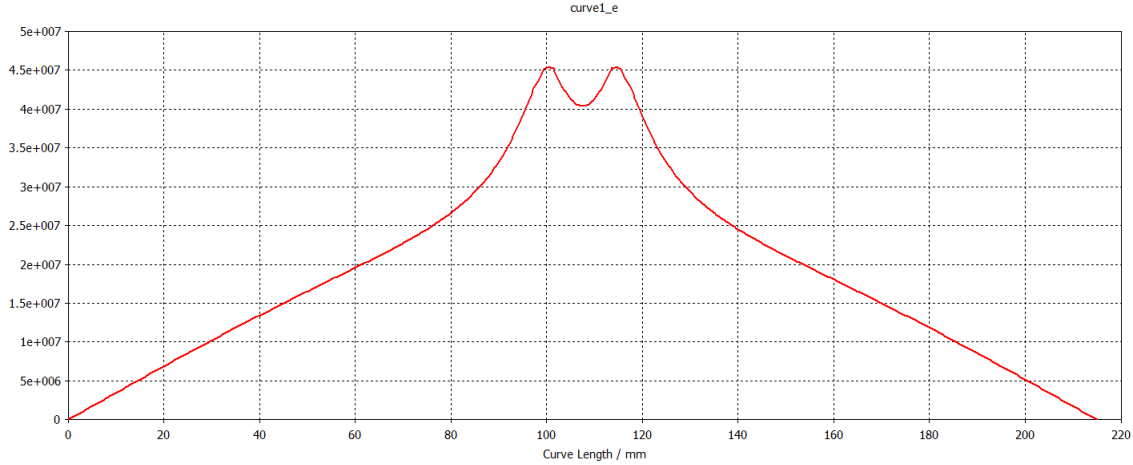


Abbildung 4.10: Elektrisches Feld entlang der Stems.

Analytisch kann man die Verbesserung der Leistung durch einige grundlegende Überlegungen der Verlustleistung darstellen. Die Verlustleistung ist gegeben durch Formel 3.3.

$$P_c = \frac{1}{2} R_s \int_S |H|^2 ds$$

Im Falle des Doppel-Quarterwave-Resonators befindet sich auf jedem Stem näherungsweise nur halb so viel Ladung wie auf dem einzelnen Stem des Quarterwave-Resonators. Analog fließt auf jedem Stem des Doppel-Quarterwave-Resonators nur halb so viel Strom wie entlang des einzelnen Stems des Quarterwave-Resonators.

$$Q_{\text{qwr}} = 2 \cdot Q_{\text{dqwr}} \quad (4.3)$$

$$I_{\text{qwr}} = 2 \cdot I_{\text{dqwr}} \quad (4.4)$$

Somit ist auch das Magnetfeld, welches vom Stem erzeugt wird, im Doppel-Quarterwave-Resonator nur halb so groß wie das Magnetfeld des Quarterwave-Resonators.

$$H_{\text{qwr}} = 2 \cdot H_{\text{dqwr}} \quad (4.5)$$

Daraus folgt für die Leistungsdichte:

$$\frac{dP}{dA} = \frac{1}{2} R_s |H|^2 \quad (4.6)$$

$$\frac{dP_{\text{qwr}}}{dA_{\text{qwr}}} = 4 \frac{dP_{\text{dqwr}}}{dA_{\text{dqwr}}} \quad (4.7)$$

Da allerdings auch die Oberfläche des Doppel-Quarterwave-Resonators näherungsweise doppelt so groß ist wie die Oberfläche des Quarterwave-Resonators, ergibt sich schlussendlich für

den Vergleich von Gesamtfläche und Gesamtleistung:

$$A_{\text{qwr}} = \frac{1}{2} \cdot A_{\text{dqwr}} \quad (4.8)$$

$$P_{\text{qwr}} = 2 \cdot P_{\text{dqwr}} \quad (4.9)$$

Dies gilt natürlich nur näherungsweise, denn das erste Modell konnte nur teilweise als Quarter-wave-Resonator beschrieben werden, da der Kondensator nicht zwischen der Induktivität und dem Tankdeckel besteht, sondern als Plattenkondensator vor dem Tankdeckel sitzt. Insgesamt sind die Daten des Quarterwave- und Doppel-Quarterwave-Resonators in Tabelle 4.3 zusammengefasst. Dabei wurde die Verlustleistung auf eine feste Spannung von 100 kV normiert, um die beiden Strukturen zu vergleichen.

Parameter	Beschreibung	Quarterwave	Doppel-Quarterwave
f	Frequenz	625,2 MHz	583,7 MHz
U	Spannung	981291 V	1296018 V
P <sub>Loss</sub>	Verlustleistung	487039 W	446478 W
P <sub>Loss, Norm</sub>	Normierte Verlustleistung	5058 W	2658 W

Tabelle 4.3: Kenndaten der beiden Quarterwave-Modelle.

Wie zu sehen ist, verbessert sich die Leistung bei den beiden Quarterwave-Modellen um einen Faktor 1,9. Auch bei dem 5-MHz-Kicker des FRANZ-Projektes sollte sich die Leistung wesentlich verbessern, sodass ein zweites 5-MHz-Modell erstellt wurde, welches aus zwei Spulen mit je 8 Windungen bestand, die von 4 Teflon-Stützen getragen wurden:

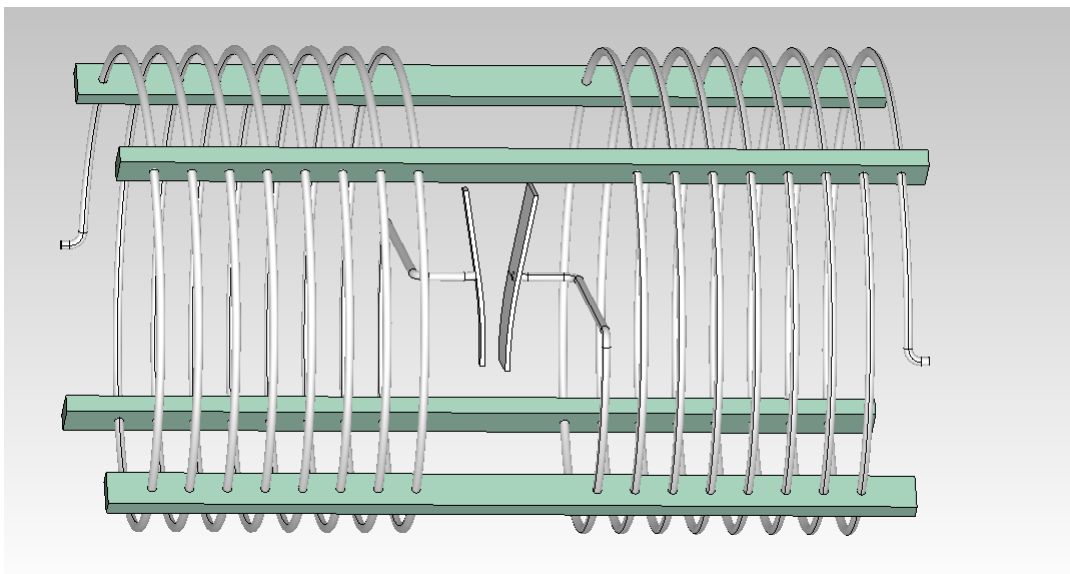


Abbildung 4.11: Das zweite Modell.

Nun kann man im direkten Vergleich zum ersten Modell folgende Daten aus CST Microwave Studio auslesen:

Parameter	Beschreibung	Kicker mit 1 Spule	Kicker mit 2 Spulen
f	Frequenz	5,198 MHz	5,195 MHz
U	Spannung	175830 V	267683 V
$U_{\text{Norm}}$	Normierte Spannung	140 kV	140 kV
$P_{\text{Loss}}$	Verlustleistung	20209 W	16347 W
$P_{\text{Loss, Norm}}$	Normierte Verlustleistung	12.812 W	4472 W

Tabelle 4.4: Kenndaten des zweiten Modells.

Wie man erkennen kann, konnte die Verlustleistung deutlich reduziert werden, sodass alle weiteren Untersuchungen mit diesem Geometrie-Prinzip durchgeführt wurden. Analog zu den Vergleichsmodellen konnte bei dem Modell mit zwei Spulenpaaren eine deutlich höhere Spannung zwischen den Kondensatorplatten bei fast gleicher Verlustleistung erreicht werden. Dadurch verbessert sich die normierte Verlustleistung schon deutlich. Die Tatsache, dass die Verlustleistung um einen Faktor 2,86 verbessert werden konnte, liegt unter anderem daran, dass die Kondensatorplatten gedreht wurden, sodass sie parallel zu den Enddeckeln stehen und somit ein besseres Schwingungsverhalten aufweisen und natürlich an der größeren Spannung, die zwischen den Platten erreicht wird. Der Hauptgrund für die deutlich stärkere Verbesserung der Verlustleistung ist jedoch die Vergrößerung des Tankradius im Falle des Kickers mit 2 Spulen, um die Frequenz wieder auf den geforderten Wert anzupassen. Da die Spulen einen starken Induktionsstrom in der Resonatoroberfläche erzeugen, wie in Abbildung 4.12 zu sehen ist, kann man die Verlustleistung durch einen größeren Abstand zwischen Spule und Tankwand deutlich reduzieren.

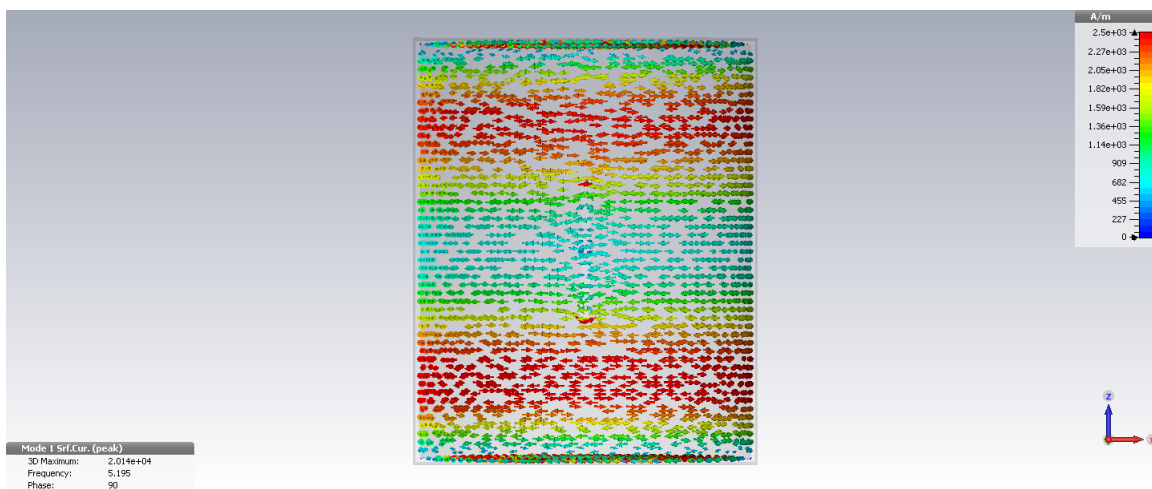


Abbildung 4.12: Oberflächenstrom des 5-MHz-Kickers.

Um den Induktionsstrom und die Verlustleistung zu verringern, wurde der Tankradius des Modells schrittweise vergrößert. In Abbildung 4.13 ist die auf 140 kV normierte Verlustleistung gegen den Tankradius aufgetragen. Wie man gut erkennen kann, lässt sich mit dieser Veränderung die Verlustleistung um einen Faktor 2 verbessern, bei einer Erhöhung des Durchmessers um einen Faktor 1,8.

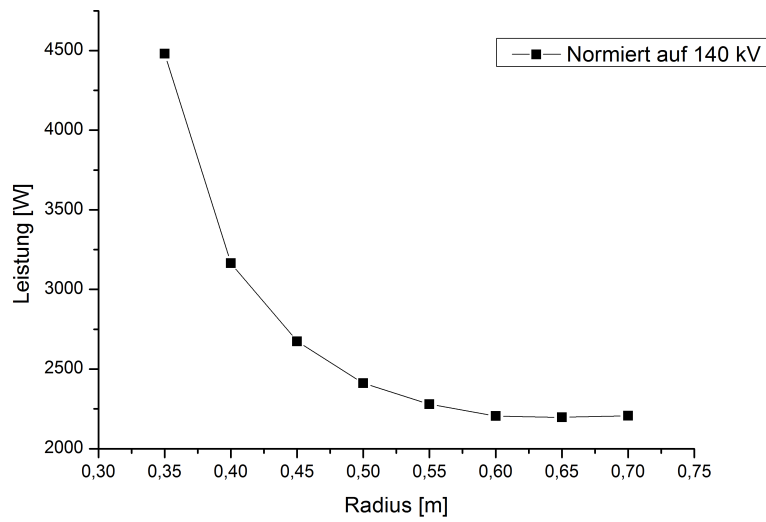


Abbildung 4.13: Verlustleistung gegen Tankradius.

Aus diesem Grund wurde für die weiteren Untersuchungen ein Tankradius von  $r = 400$  mm gewählt, bei dem die Verlustleistung ca. 3,25 kW beträgt. Einen größeren Tankradius kann man durch den vorhandenen Platz am späteren Einsatzort nicht realisieren. Des Weiteren wurden die Spulen so angeordnet, dass sie gegenläufig gedreht sind und sich somit kein durchgängiges Magnetfeld mehr durch die gesamte Struktur ausbildet. Das hat den Vorteil, dass sich im Bereich der Kondensatorplatten, in dem die Auslenkung der Mikro-Bunche geschieht, nahezu kein störendes magnetisches Feld mehr befindet.

### 4.3 Berechnung der Winkeldifferenzen mit CST-Microwave-Studio

Sowohl die Modenberechnung als auch das Particle-Tracking, welches im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurde, wurden mit dem Programm CST-Microwave-Studio berechnet. Dazu ist

zu sagen, dass CST-Microwave-Studio einen Modus besitzt, in dem man einzelne Teilchen-trajektorien, bestehend aus einzelnen geladenen Teilchen, durch ein vorher berechnetes elektromagnetisches Feld simulieren kann. Dabei wird das vorher berechnete elektromagnetische Feld in CST-Particle-Studio eingespeist und über einen sogenannten Feldfaktor gewichtet. Mit diesem Feldfaktor steuert man die Stärke der Felder und somit auch die Spannung zwischen den Kondensatorplatten. Auswerten kann man das Ganze mit Hilfe sogenannter “Teilchen-Detektoren”. Dies sind Ebenen, die man einfügen kann und die registrieren, an welchen Koordinaten sie von den einzelnen Trajektorien getroffen wurden. Somit kann man, sobald die Trajektorien nach der Auslenkung linear verlaufen, mit Hilfe zweier “Detektor-Ebenen” den Ablenkwinkel  $\alpha$  bestimmen.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x}{z}\right) \quad (4.10)$$

Dabei ist X der Abstand zwischen der Position der Trajektorie auf der ersten und zweiten “Detektor-Ebene” und Z ist der Abstand zwischen den beiden “Detektor-Ebenen” (siehe Abbildung 4.14).

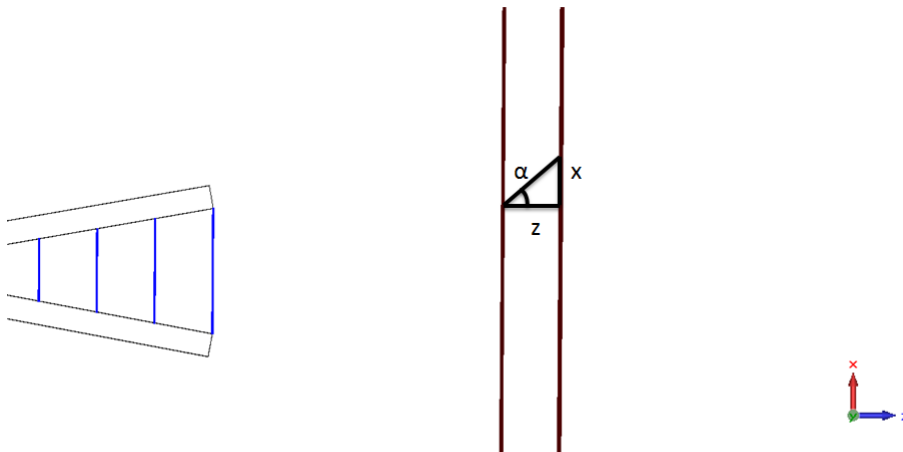


Abbildung 4.14: Berechnung der Winkel mit Hilfe von “Teilchen-Detektor-Ebenen”.

Bevor also die Auswertung der einzelnen Trajektorien stattfinden konnte, musste zunächst der Abstand gefunden werden, ab dem die einzelnen Trajektorien linear verlaufen, sich also nicht mehr im Randfeld des Plattenkondensators befinden. Dazu wurden in regelmäßigen Abständen von 20 mm hinter den Kondensatorplatten solche “Detektor-Ebenen” definiert, welche die X- und Z-Position der Trajektorien aufgezeichnet haben. Danach wurde die Differenz in X-Richtung der einzelnen “Detektor-Ebenen” gegen den Abstand zu den Kondensatorplatten aufgetragen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.15 lediglich für eine Trajektorie dargestellt, da die Diagramme für jede Trajektorie den gleichen Verlauf zeigen.

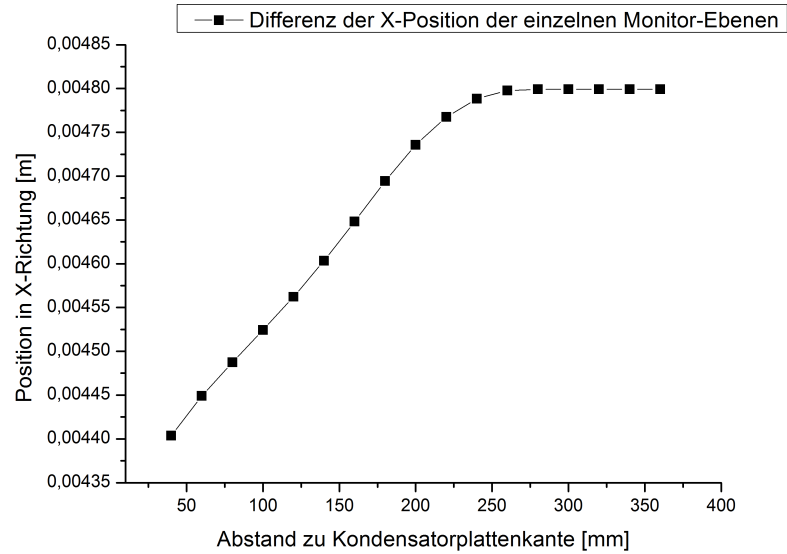


Abbildung 4.15: Abstand, ab dem die Trajektorien linear verlaufen.

Man erkennt deutlich, dass ab einem Abstand von 250 mm zum Ende der Kondensatorplatten die Differenz der X-Koordinaten der einzelnen Trajektorien konstant ist und sie somit linear verlaufen müssen. Aus diesem Grund wurden alle Auswertungen dieser Arbeit mit 2 “Detektor-Ebenen” durchgeführt, wobei eine Ebene 250 mm und die andere Ebene 350 mm hinter dem Ende der Kondensatorplatten erstellt wurde.

## 4.4 Das erste Design der Kondensatorplatten

Wie schon erwähnt wurde, ist der erste Schwerpunkt dieser Arbeit der Versuch, die unterschiedlichen Winkeldifferenzen des Bunch-Kompressors in einer frühen Auslegung zu erreichen. Zu Beginn der Untersuchungen waren beide Kondensatorplatten des Kickers gleich breit und besaßen sowohl die gleiche Krümmung  $g$  als auch den gleichen Steigungswinkel  $\alpha$ . Mit dieser Geometrie konnte man eine Ablenkung der Mikro-Bunche zwar problemlos realisieren, allerdings wurden die Winkeldifferenzen zu den Anfangs- bzw. End-Bunchen immer geringer. In Abbildung 4.16 sieht man, wie die Verteilung der Winkeldifferenzen aussieht, wenn die Kondensatorplatten die gleiche Breite besitzen.

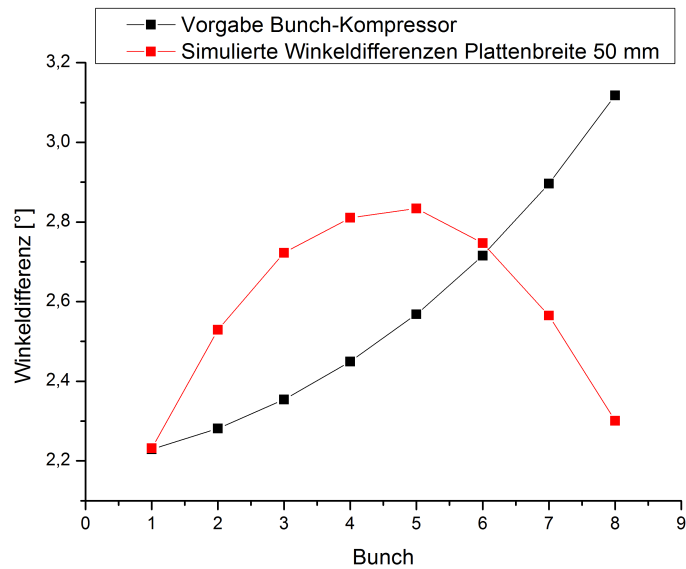


Abbildung 4.16: Simulierte Winkeldifferenzen: Plattenbreite 50 mm.

Wie man gut erkennen kann, sind die Winkeldifferenzen der ersten und letzten Mikro-Bunche in der Simulation deutlich kleiner als die der mittleren Mikro-Bunche 4, 5 und 6. Daraus ist direkt ersichtlich, dass die geforderte Winkelverteilung mit gleich breiten Kondensatorplatten nicht zu realisieren ist.

## 4.5 Optimierung der Plattenbreiten

Um die in Abbildung 4.16 dargestellte Sollverteilung zu erreichen, musste die Geometrie der Kondensatorplatten verändert und angepasst werden. In Tabelle 4.5 sind die einzelnen Winkeldifferenzen und die sich damit ergebenden Winkel noch einmal genau aufgeführt.

Mikro-Bunch	Winkel [°]	Winkeldifferenz (zum nachfolgenden Mikro-Bunch) [°]
1	-9,31	2,23
2	-7,08	2,28
3	-4,80	2,35
4	-2,45	2,45
5	0	2,57
6	2,57	2,71
7	5,28	2,90
8	8,18	3,12
9	11,30	

Tabelle 4.5: Sollwerte des Bunch-Kompressors, frühe Auslegung.



Um diese speziellen Winkeldifferenzen zu erreichen wurden die Plattenbreiten der Kondensatorplatten verändert, sodass eine der beiden Platten erheblich schmaler ist als die andere Platte. Mit Hilfe dieser Veränderung sollte ein stetig steigendes elektrisches Feld hin zur kleineren Platte erreicht werden, welches die ansteigenden Winkeldifferenzen ermöglichen sollte. Um die optimale Geometrie zu finden, wurde das Verhältnis der Plattenbreiten als Parameter  $\delta$  eingeführt.

$$\delta = \frac{b}{a} \quad (4.11)$$

Dabei entspricht  $a$  der Plattenbreite der schmalen und  $b$  der Plattenbreite der breiten Kondensatorplatte. Dieses Verhältnis wurde nun für verschiedene feste Werte von  $a = 10, 15$  und  $20$  mm variiert. Um die optimale Plattengeometrie zu finden wurden verschiedene Fehler ausgewertet. Zum Einen wurde der absolute Fehler der erreichten von der geforderten Winkelverteilung ermittelt:

$$\langle \Delta\alpha \rangle = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (\alpha_i^{\text{CST}} - \alpha_i^{\text{BC}}) \quad (4.12)$$

Dabei entspricht  $\alpha_i^{\text{CST}}$  der Winkeldifferenz, die mit Hilfe von CST ermittelt wurde und  $\alpha_i^{\text{BC}}$  der Winkeldifferenz der Akzeptanz des Bunch-Kompressors.

Neben dem absoluten Fehler wurde auch der relative Fehler der Winkeldifferenzen ermittelt:

$$\langle \delta\alpha \rangle = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \left( \frac{\alpha_i^{\text{CST}}}{\alpha_i^{\text{BC}}} - 1 \right) \quad (4.13)$$

Als dritter Fehler wurde auch der maximale Fehler, also die größte Abweichung, der erreichten von den geforderten Winkeldifferenzen ermittelt. Anhand dieser 3 Fehler sollte nun die bestmögliche Geometrie der Kondensatorplatten gefunden werden, die der geforderten Winkelverteilung durch den Bunch-Kompressor so nahe wie möglich kommt.

Für  $a$  wurden zunächst 3 verschiedene Werte angenommen, wobei bei jedem Wert das Verhältnis  $\delta$  im Bereich von 0,5 bis 10 variiert wurde. Allerdings zeigte sich schon bei den Voruntersuchungen, dass die Plattenbreite von 20 mm keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte, da das elektrische Feld zur kleineren Platte hin nicht mehr stark genug anstieg. Somit blieben nur noch die Plattenbreiten  $a = 10$  mm bzw.  $a = 15$  mm, bei denen das Plattenbreiten-Verhältnis  $\delta$  variiert und die verschiedenen Fehler ausgewertet wurden.

Nach der Variation der Plattenbreiten sollte die Variation der Krümmung  $g$  und des Steigungswinkels  $\alpha$  die gewünschte Verteilung ermöglichen. Dazu wurde nach der Optimierung der Plattenbreiten zunächst die Krümmung  $g$  beider Platten gemeinsam variiert, um sie danach für jede Platte einzeln zu variieren, wobei die jeweils andere Plattenkrümmung bei einem festen Wert gehalten wurde. Nach der Optimierung der Krümmung  $g$  der Kondensatorplatten wurde der Steigungswinkel der Kondensatorplatten variiert. Auch hier wurde  $\alpha$  zunächst

für beide Platten gleichzeitig und danach einzeln für beide Platten variiert, wobei der jeweils andere Steigungswinkel wieder konstant gehalten wurde. Bei all diesen Variationen wurde die Fehleranalyse verwendet, die zuvor beschrieben wurde.

## 4.6 Voruntersuchungen mit geringer Maschenzahl

Bevor man die verschiedenen Parameter mit zeitaufwendigen Rechnungen mit hoher Maschenzahl untersucht, wurden zunächst mehrere Rechnungen mit geringer Maschenzahl durchgeführt, um die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf die Verteilung abzuschätzen. Durch die verkleinerte Kondensatorplatte konnte man die Verteilung der Winkeldifferenzen deutlich beeinflussen. Abbildung 4.17 zeigt die Verteilung des Parameters  $\delta$  bei  $a = 10$  mm.

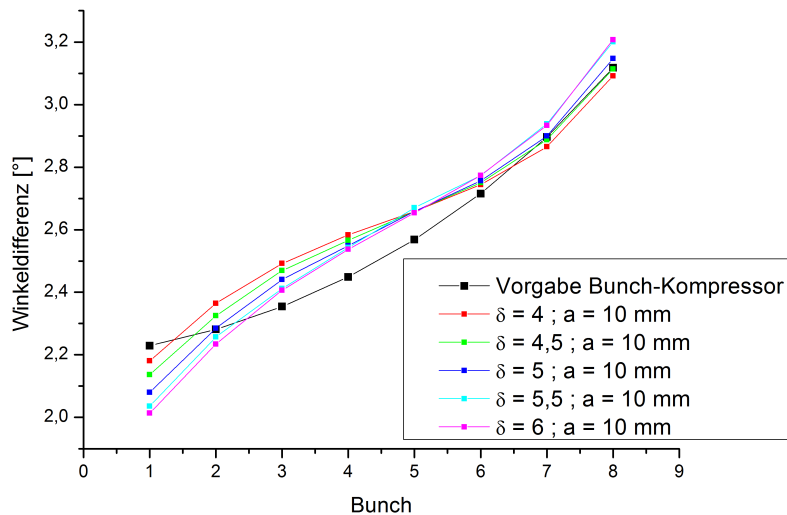


Abbildung 4.17: Winkeldifferenzen: Variation von  $\delta$  mit  $a = 10$ .

Man kann gut erkennen, dass das ansteigende Feld zwischen den Kondensatorplatten die Verteilung stark beeinflusst und in die gewünschte Richtung bringt. Allerdings weicht die Verteilung immer noch von der Vorgabe des Bunch-Kompressors ab. Bei größer werdendem  $a$  nähert sich die Verteilung wieder dem runden Verhalten aus Abbildung 4.16 an und weicht dadurch immer mehr von der gewünschten Verteilung ab.

Um die Winkeldifferenzen nun noch näher an die benötigte Verteilung anzupassen, wurde als nächster Parameter die Krümmung  $g$  der Platten variiert. Wenn die Krümmung von beiden Platten gleichermaßen variiert wird, wandern die Platten mit kleiner werdender Krümmung im hinteren Bereich immer näher zusammen, wie in Abbildung 4.18 zu sehen ist. Dabei ist in Abbildung 4.18 nur die erste Hälfte der Kondensatorplatten dargestellt, d.h. nur der parabelförmige Anteil der Platten, mit einer Länge von 100 mm.

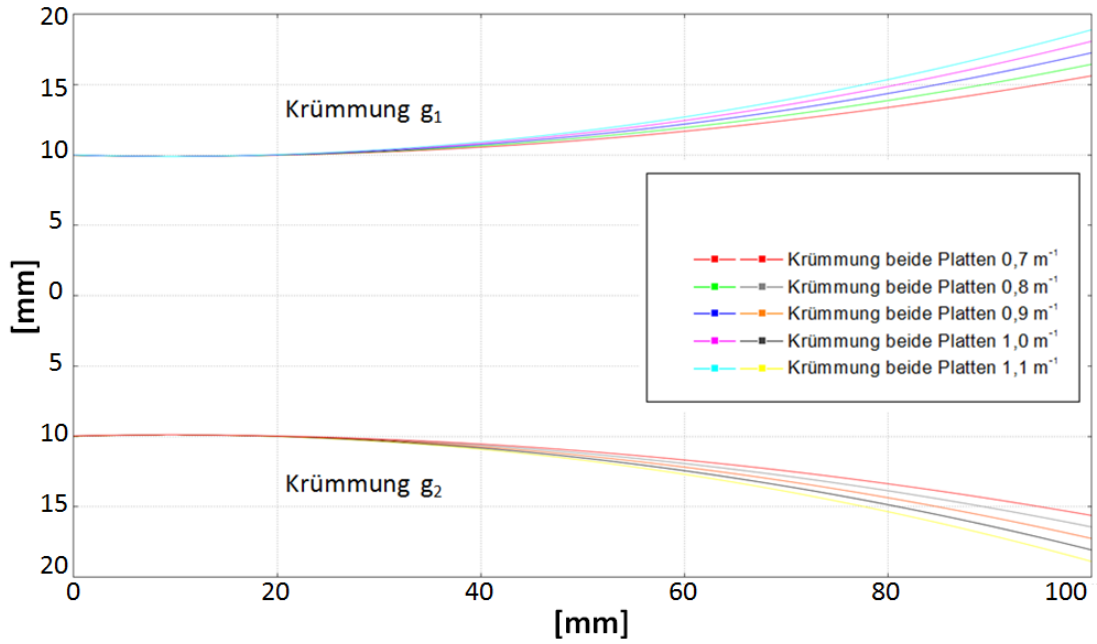


Abbildung 4.18: Geometrie der Kondensatorplatten: Variation von  $g$  für beide Kondensatorplatten  $\delta = 5$  ;  $a = 10$  mm.

Bei der Variation der Krümmung, beider Platten gleichermaßen konnte eine große Beeinflussung der Winkeldifferenzen erreicht werden, was in Abbildung 4.19 dargestellt ist.

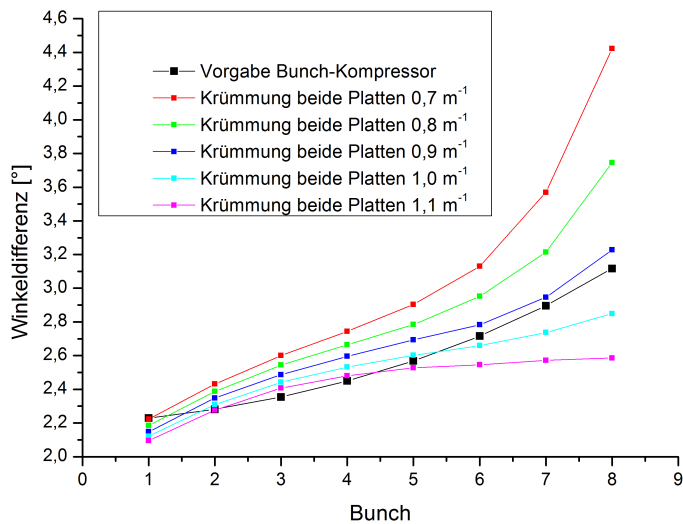


Abbildung 4.19: Winkeldifferenzen: Variation von  $g$  für beide Kondensatorplatten  $\delta = 5$  ;  $a = 10$  mm.

Wie man sieht, beeinflusst die Krümmung das Verhalten der Winkeldifferenzen am stärksten im hinteren Bereich, da der Plattenabstand dort am stärksten variiert, verschiebt allerdings auch den ersten Abschnitt mit nach oben. Nach dieser Variation wurde die Krümmung für jede Kondensatorplatte unabhängig von der Anderen variiert. Dabei zeigte sich, dass die Variation der Krümmung  $g_2$  der breiteren Kondensatorplatte so gut wie keine Auswirkungen auf die Winkeldifferenzen hatte, da in diesem Bereich das Feld deutlich schwächer ist als im Bereich der schmalen Platte. Dagegen konnte die Verteilung, vor allem im hinteren Bereich der Bunche 6 bis 9, am besten mit der Variation der Krümmung  $g_1$  der schmalen Platte beeinflusst werden, da sich in diesem Fall nur der hintere Teil der Verteilung den geforderten Werten anpasste, ohne den vorderen Abschnitt der Verteilung zu verschieben (siehe Abbildung 4.20) .

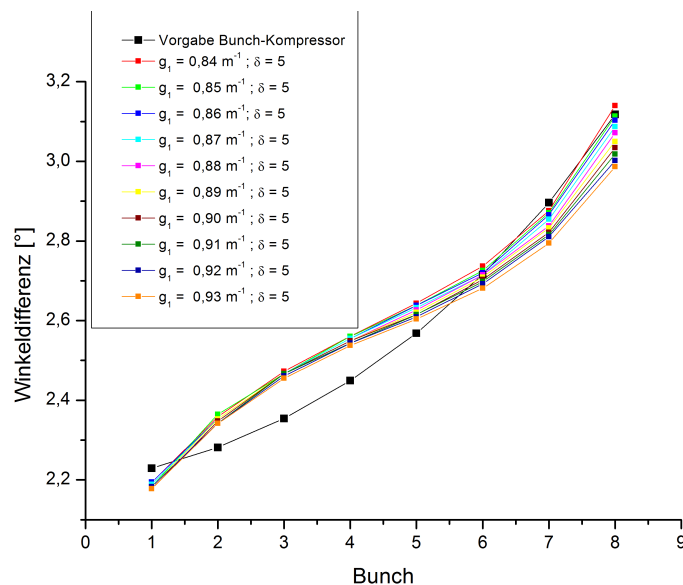


Abbildung 4.20: Winkeldifferenzen: Variation von  $g_1$  mit  $g_2 = 0,9 \frac{1}{\text{m}}$  ;  $\delta = 5$  ;  $a = 10 \text{ mm}$ .

Als letzter Parameter stand nun noch die Steigung  $\alpha$  der Kondensatorplatten zur Verfügung. Auch hier wurden, wie bei der Krümmung, erst beide Platten gleichermaßen und danach jede Platte einzeln variiert, wobei die breite Kondensatorplatte wieder keinen wesentlichen Einfluss auf die Winkeldifferenzen hatte. Auch die Variation von beiden Platten gleichermaßen erzeugte in diesem Fall keine wesentliche Verbesserung, sodass lediglich die Veränderung der schmalen Platte die Verteilung wieder im hinteren Bereich der Bunche 5 bis 9 merklich beeinflussen konnte, wie in Abbildung 4.21 zu sehen ist. Die Änderungen der Geometrie bei Variation der Steigung  $\alpha_1$  sind in Abbildung 4.22 dargestellt. Dabei sind diesmal beide Bereiche der Kondensatorplatten dargestellt, d.h. sowohl der parabelförmige erste Teil als auch der lineare zweite Teil, mit einer Gesamtlänge von 200 mm.

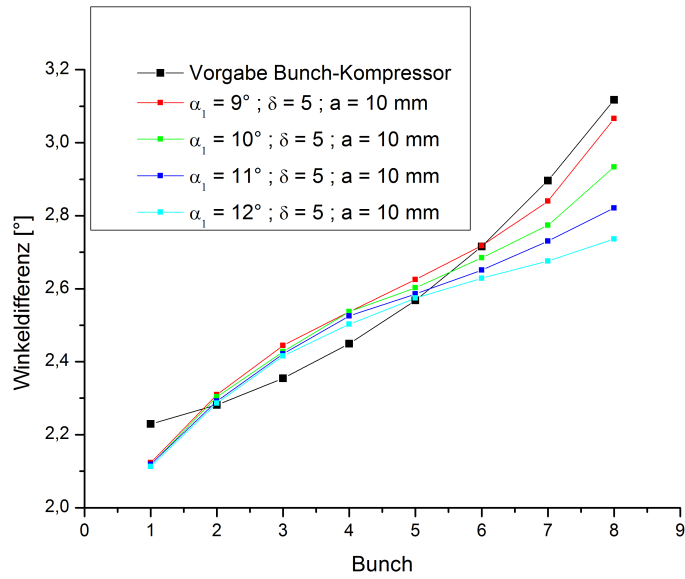


Abbildung 4.21: Winkeldifferenzen: Variation von  $\alpha_1$  mit  $\alpha_2 = 10^\circ$  ;  $g_1 = 0,86 \frac{1}{m}$  ;  $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$  ;  $\delta = 5$  ;  $a = 10 \text{ mm}$ .

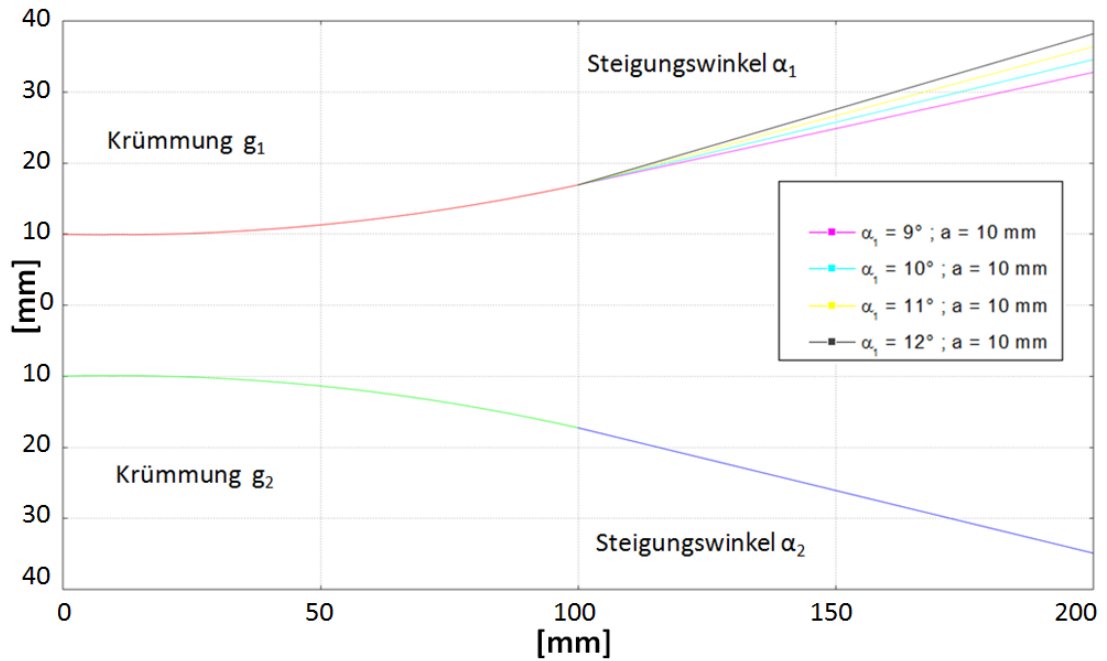


Abbildung 4.22: Geometrie der Kondensatorplatten: Variation von  $\alpha_1$  mit  $\alpha_2 = 10^\circ$  ;  $g_1 = 0,86 \frac{1}{m}$  ;  $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$  ;  $\delta = 5$  ;  $a = 10 \text{ mm}$ .

## 4.7 Simulationen mit hoher Maschenzahl

Nachdem durch die Voruntersuchungen mit geringer Maschenzahl die grundlegenden Einflüsse der verschiedenen Parameter bekannt sind, wurden die wichtigen Variationen nun nochmal mit hoher Maschenzahl durchgeführt. Dazu wurden die Rechnungen mit mehr als 20 Millionen Mesh-Zellen gerechnet, um das elektrische Feld zwischen den Kondensatorplatten mit der höchstmöglichen Auflösung zu bestimmen. Dabei waren die Mesh-Zellen zwischen den Kondensatorplatten ca. 0,5 mm breit, wogegen sie bei den Voruntersuchungen noch ca. 1,5 mm breit waren. Des Weiteren wurden die Rechnungen mit hoher Maschenzahl nur mit  $a = 15$  mm durchgeführt, da eine technische Umsetzung der Kondensatorplatten mit Kühlung und einer Plattenbreite von nur 10 mm nicht realistisch erschien. Dadurch sind die in den Voruntersuchungen beobachteten Effekte abgeschwächt, da die Voruntersuchungen mit der Plattenbreite  $a = 10$  mm erzielt wurden.

### 4.7.1 Optimierung der Plattenbreiten

Analog zu den Voruntersuchungen mit geringer Maschenzahl wurde als erstes der Parameter  $\delta$  variiert, die Fehlerauswertung ist dabei unverändert geblieben. Die dabei entstandene Verteilung der Winkeldifferenzen ist in Abbildung 4.23 dargestellt.

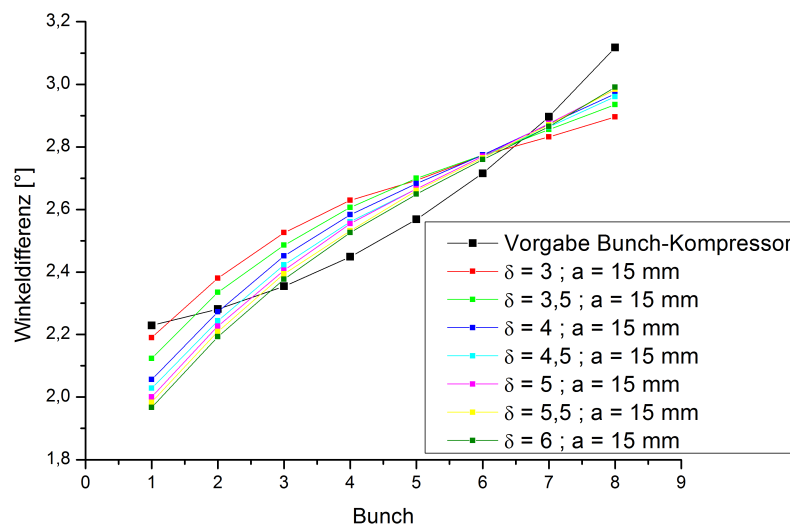


Abbildung 4.23: Winkeldifferenzen: Variation von  $\delta$  mit  $a = 15$  mm Feldfaktor 0,51.

Die ausgewerteten Fehler sind in den nachfolgenden Abbildungen für verschiedene Feldfaktoren bzw. Spannungen aufgetragen.

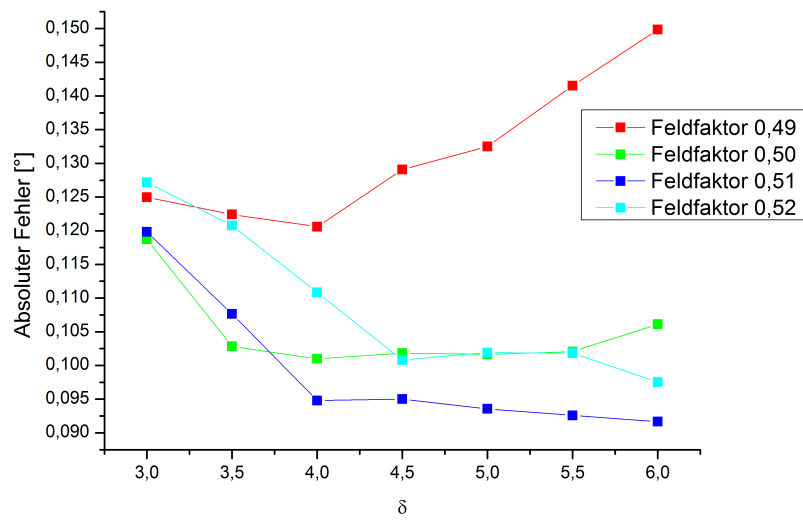


Abbildung 4.24: Absoluter Fehler: Variation von  $\delta$  mit  $a = 15$  mm.

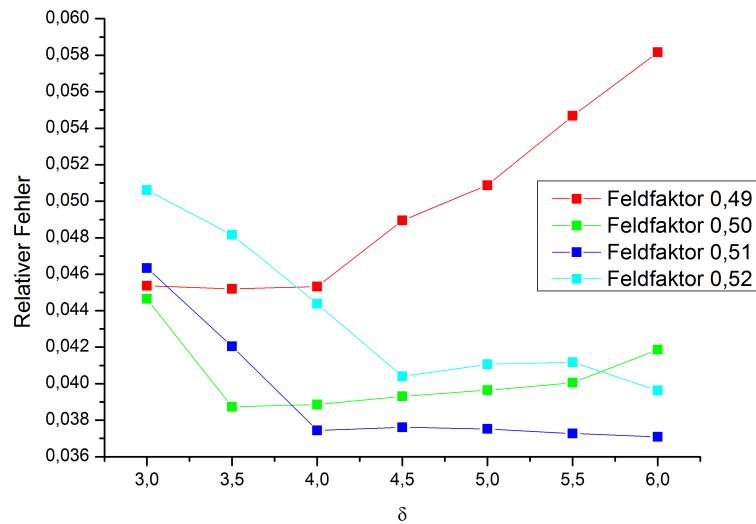


Abbildung 4.25: Relativer Fehler: Variation von  $\delta$  mit  $a = 15$  mm.

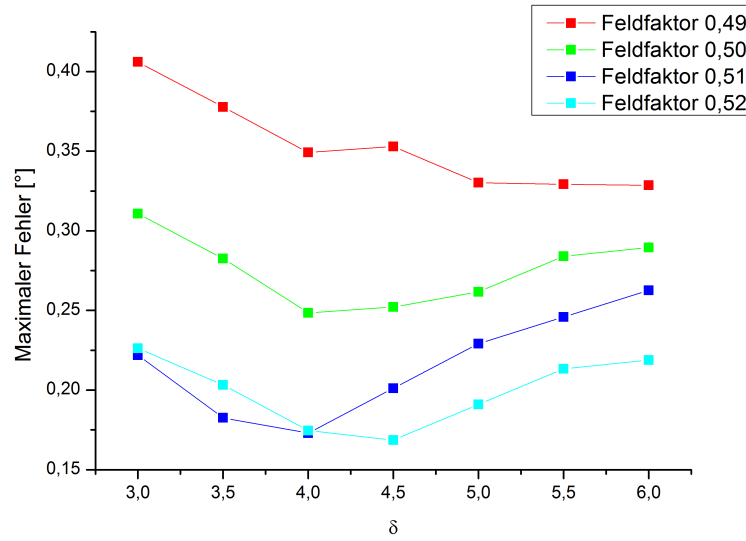


Abbildung 4.26: Maximaler Fehler: Variation von  $\delta$  mit  $a = 15$  mm.

Wie man sieht, erhält man die beste Kombination aus allen drei Fehlern bei dem Plattenbreitenverhältnis  $\delta = 4$  mit einem Feldfaktor von 0,51, was einer Spannung von ca. 136 kV entspricht. Allerdings weicht die Verteilung nach wie vor zu stark von der gewünschten Kurve ab. In Abbildung 4.27 sind die realen Winkel der einzelnen Trajektorien im Vergleich zu den geforderten Winkeln abgebildet.

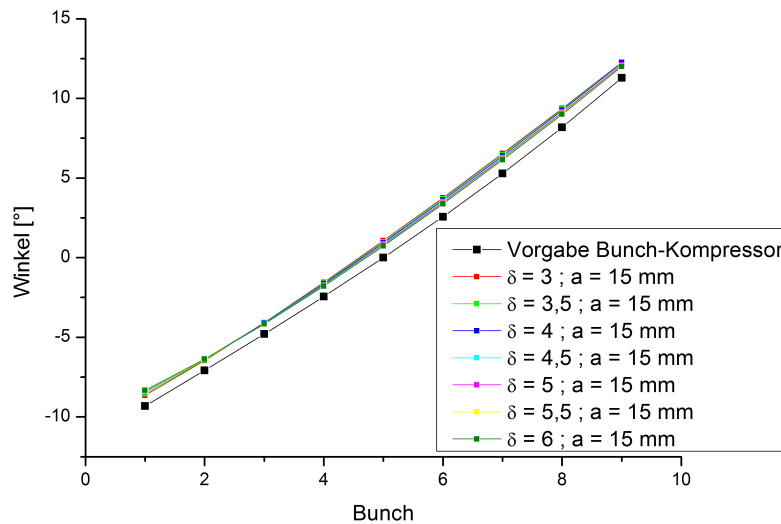


Abbildung 4.27: Winkelverteilung: Variation von  $\delta$  mit  $a = 15$  mm Feldfaktor 0,51.



Man erkennt, dass die Winkel bei allen Trajektorien um ca.  $1^\circ$  nach oben verschoben sind. Dies ist weniger problematisch, da man zunächst die Winkeldifferenzen optimieren muss und danach die einzelnen realen Winkel durch den Zeitpunkt des Eintritts der Mikro-Bunche in das Feld des Plattenkondensators relativ leicht anpassen kann.

#### 4.7.2 Optimierung der Kondensatorplatten-Krümmung

Analog zu den Voruntersuchungen wurde nun als nächster Parameter die Krümmung  $g$  der Kondensatorplatten variiert. Aus den Untersuchungen mit geringer Maschenzahl ist bekannt, dass die Variation von  $g_2$  keine merkliche Veränderung erzielt und auch die Optimierung von  $g$  bei beiden Kondensatorplatten gleichzeitig unerwünschte Effekte erzeugt, da die Verteilung im vorderen Bereich mit angehoben wird. Aus diesem Grund wurde in den Untersuchungen mit hoher Maschenzahl nur noch die Krümmung  $g_1$  der schmalen Kondensatorplatte variiert. Damit konnten die Winkeldifferenzen, wie in 4.28 zu sehen, noch weiter an die geforderten Werte angepasst werden.

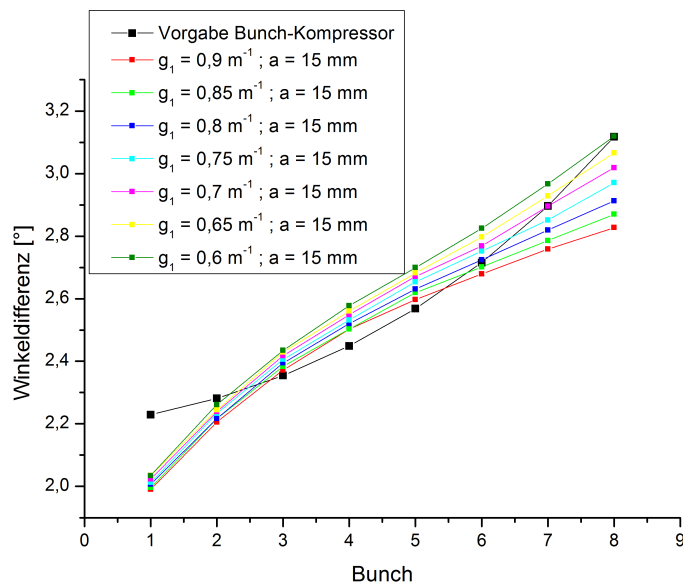


Abbildung 4.28: Winkeldifferenzen: Variation von  $g_1$  mit  $\delta = 4$ ;  $g_2 = 0,9 \frac{1}{\text{m}}$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^\circ$ ;  $a = 15 \text{ mm}$  Feldfaktor 0,49.

Die Geometrieänderungen sind in der nachfolgenden Abbildung 4.29 für einige Krümmungen dargestellt. Wie beabsichtigt, wandert die schmale Platte mit kleiner werdender Krümmung wieder an die breite Kondensatorplatte heran und beeinflusst somit die Winkeldifferenzen wie in Abbildung 4.28 gezeigt.

#### 4 Design eines Hochfrequenz-Kickers für FRANZ

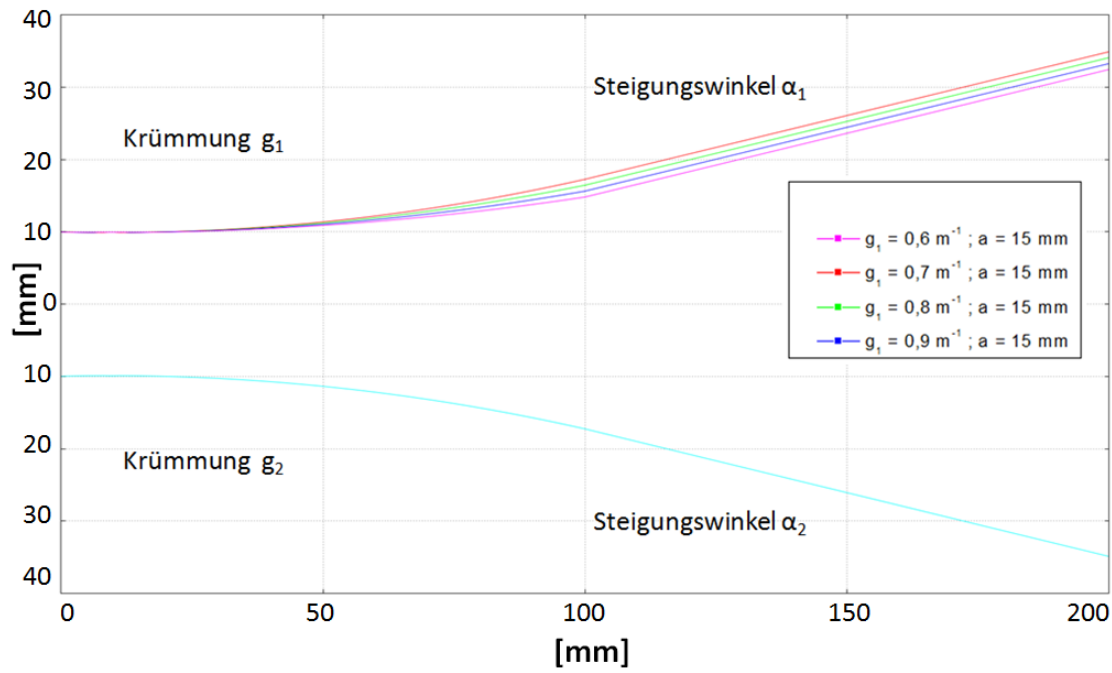


Abbildung 4.29: Geometrie: Variation von  $g_1$  mit  $\delta = 4$ ;  $g_2 = 0,9 \frac{1}{\text{m}}$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^\circ$ ;  $a = 15 \text{ mm}$ .

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen wieder die ausgewerteten absoluten, relativen und maximalen Fehler der Verteilungen bei verschiedenen Feldfaktoren.

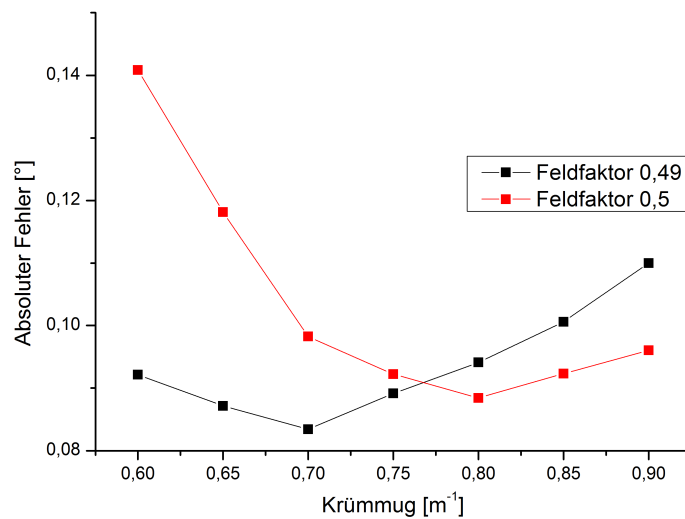


Abbildung 4.30: Absoluter Fehler: Variation von  $g_1$  mit  $\delta = 4$ ;  $g_2 = 0,9 \frac{1}{\text{m}}$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^\circ$ ;  $a = 15 \text{ mm}$ .

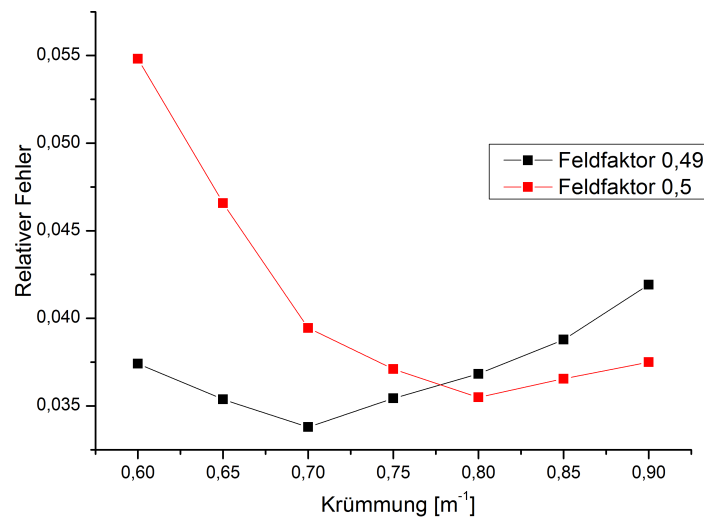


Abbildung 4.31: Relativer Fehler: Variation von  $g_1$  mit  $\delta = 4$  ;  $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$  ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^\circ$  ;  $a = 15$  mm.

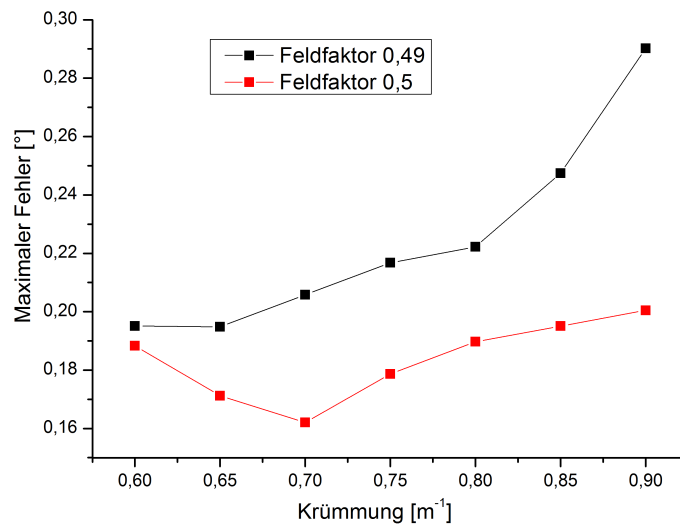


Abbildung 4.32: Maximaler Fehler: Variation von  $g_1$  mit  $\delta = 4$  ;  $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$  ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^\circ$  ;  $a = 15$  mm.

Man erhält die kleinsten Fehler bei einer Krümmung von  $g_1 = 0,7 \frac{1}{m}$  und einem Feldfaktor von 0,49, was einer Spannung von ca. 130 kV entspricht. Auch wenn die Verbesserung nur relativ gering ist, weicht die somit erreichte Verteilung etwas weniger von der geforderten

ab. Allerdings fällt die Winkeldifferenz zwischen dem ersten und zweiten Mikro-Bunch nach wie vor störend auf, da diese Winkeldifferenz ca.  $0,2^\circ$  zu klein ist. Bis jetzt konnte noch kein Parameter diesen Bereich beeinflussen. Nachdem nun die Krümmung der Kondensatorplatten optimiert wurde, bleibt nur noch die Untersuchung der Steigung  $\alpha$  des linearen Abschnitts der Kondensatorplatten mit hoher Maschenzahl.

### 4.7.3 Optimierung der Kondensatorplatten-Steigung

Auch hier wurde bei den Rechnungen nur der Steigungswinkel  $\alpha_1$  variiert, da sich in den Voruntersuchungen gezeigt hat, dass die Variation von beiden Platten und die Variation von  $\alpha_2$  keinen Einfluss auf die Winkeldifferenzen hatte. Die dazugehörigen Verteilungen sind in Abbildung 4.33 dargestellt.

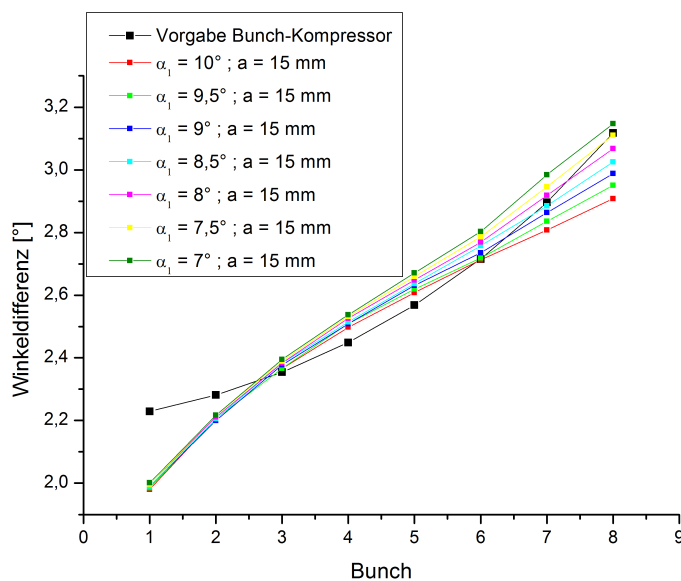


Abbildung 4.33: Winkeldifferenzen: Variation von  $\alpha_1$  mit  $\delta = 4$  ;  $g_1 = 0,7 \frac{1}{m}$  ;  $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$  ;  $\alpha_2 = 10^\circ$  ; a = 15 mm Feldfaktor 0,48.

Die Geometrieänderung ist in Abbildung 4.34 wie im Abschnitt 4.7.2 nur für einige Steigungswinkel dargestellt, damit man erkennen kann, wie die Platten bei kleiner werdendem Steigungswinkel zusammenwandern.

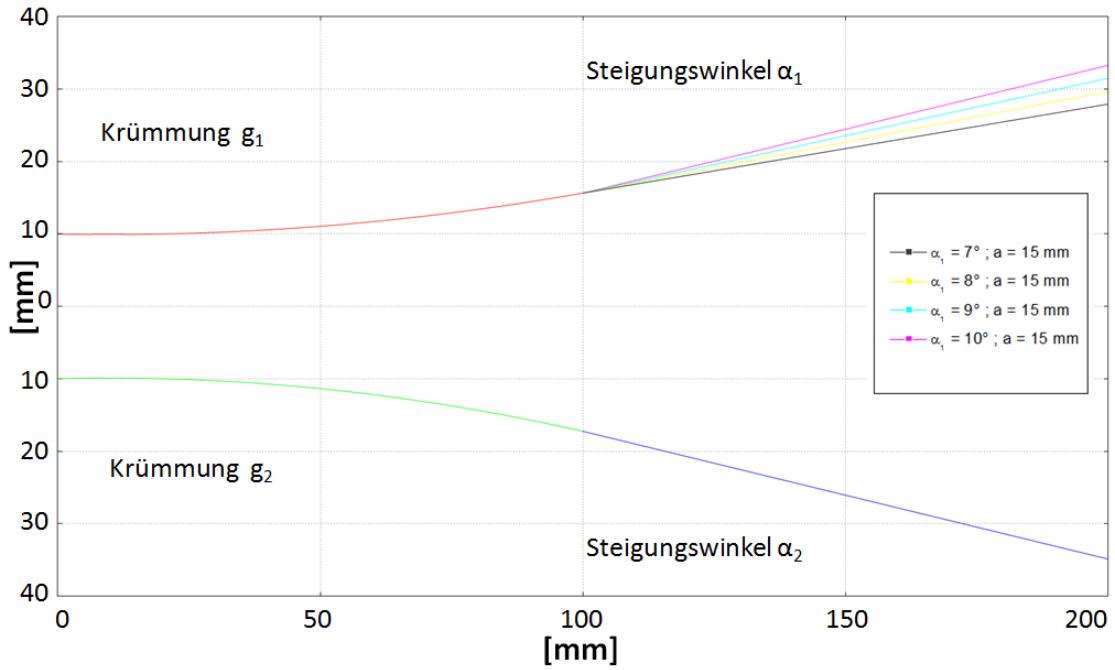


Abbildung 4.34: Geometrie: Variation von  $\alpha_1$  mit  $\delta = 4$  ;  $g_1 = 0,7 \frac{1}{\text{m}}$  ;  $g_2 = 0,9 \frac{1}{\text{m}}$  ;  $\alpha_2 = 10^\circ$  ;  $a = 15 \text{ mm}$ .

Die entsprechenden Fehler der Verteilung der Winkeldifferenzen sind wieder in den drei nachfolgenden Grafiken abgebildet.

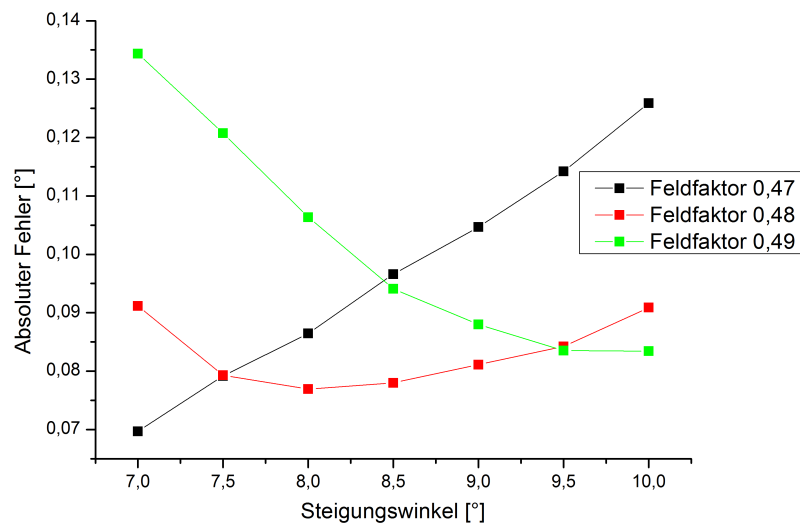


Abbildung 4.35: Absoluter Fehler: Variation von  $\alpha_1$  mit  $\delta = 4$  ;  $g_1 = 0,7 \frac{1}{\text{m}}$  ;  $g_2 = 0,9 \frac{1}{\text{m}}$  ;  $\alpha_2 = 10^\circ$  ;  $a = 15 \text{ mm}$ .

#### 4 Design eines Hochfrequenz-Kickers für FRANZ

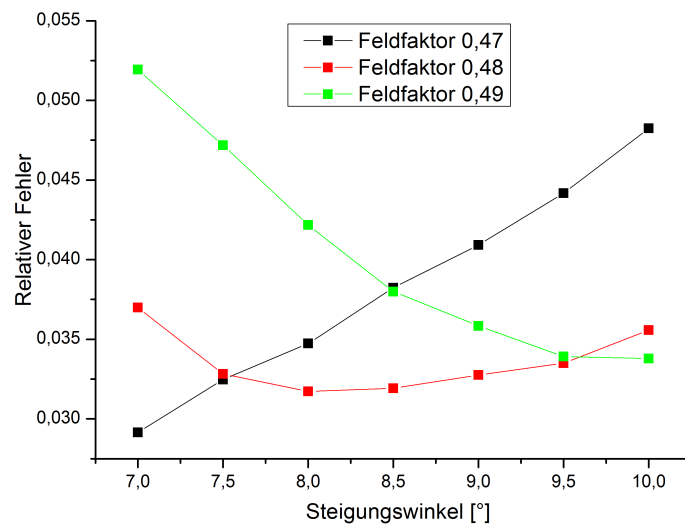


Abbildung 4.36: Relativer Fehler: Variation von  $\alpha_1$  mit  $\delta = 4$  ;  $g_1 = 0,7 \frac{1}{m}$  ;  $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$  ;  $\alpha_2 = 10^\circ$  ;  $a = 15$  mm.

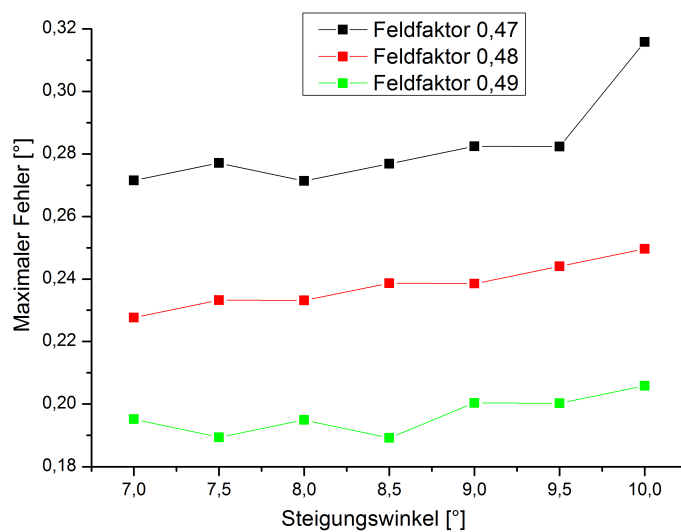


Abbildung 4.37: Maximaler Fehler: Variation von  $\alpha_1$  mit  $\delta = 4$  ;  $g_1 = 0,7 \frac{1}{m}$  ;  $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$  ;  $\alpha_2 = 10^\circ$  ;  $a = 15$  mm.

Das Optimum der Fehlerauswertung liegt bei einem Feldfaktor von 0,47 bei  $7^\circ$  und bei einem Feldfaktor von 0,48 bei  $8^\circ$ . Da eine zu geringe Steigung des linearen Teils der Platten die Ablenkung der Mikro-Bunche behindern kann, ist ein Unterschreiten von  $8^\circ$  nicht sinnvoll.

Die simulierten Trajektorien der einzelnen Protonen kommen schon bei einem Steigungswinkel von  $8^\circ$  gefährlich nahe an den Rand der Platten. Aus diesem Grund ist ein Steigungswinkel von  $8^\circ$  gerade die Grenze dessen, was realisiert werden kann. In den Abbildungen 4.38 und 4.39 ist die beste Geometrie, die mit den Optimierungen erreicht werden konnte, dargestellt.

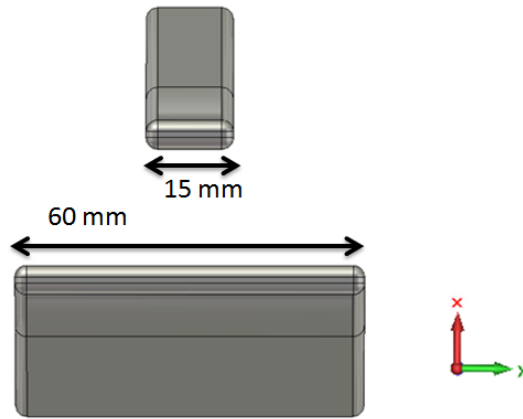


Abbildung 4.38: Beste Geometrie der Kondensatorplatten Quer.

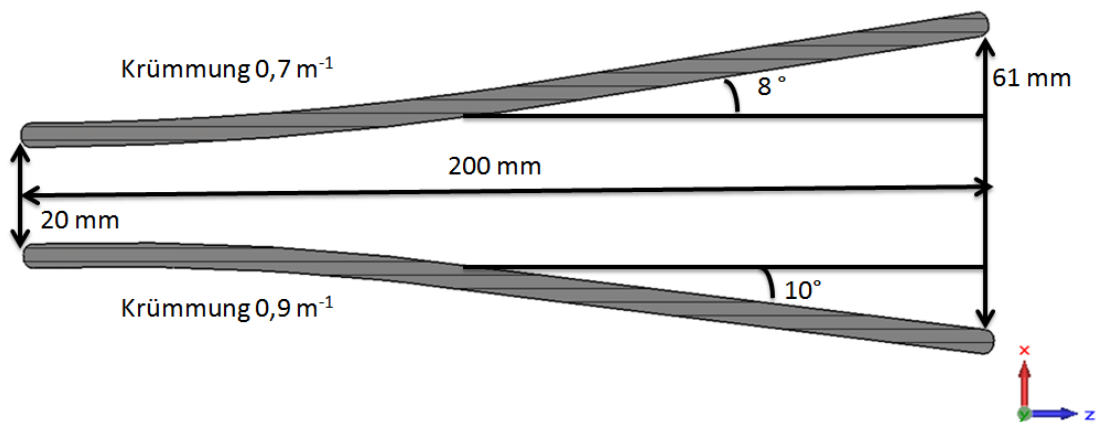


Abbildung 4.39: Beste Geometrie der Kondensatorplatten Längs.

Um zu verhindern, dass die Mikro-Bunche vor dem Austritt aus dem Kondensatorfeld auf die Platten treffen, muss der Durchmesser der Mikro-Bunche so gering wie möglich sein. Aus diesem Grund wurde auch nach diesen Optimierungen das Äußere des Tanks verändert, um dem Quadrupol-Triplett, welches zwischen dem CH-Rebuncher und dem Kicker steht [13], den nötigen Platz zu schaffen, möglichst nahe an die Kondensatorplatten heran zu kommen, um eine kurze freie Drift zwischen dem Verlassen des Triplets und dem Eintritt in das Kondensatorfeld zu ermöglichen.

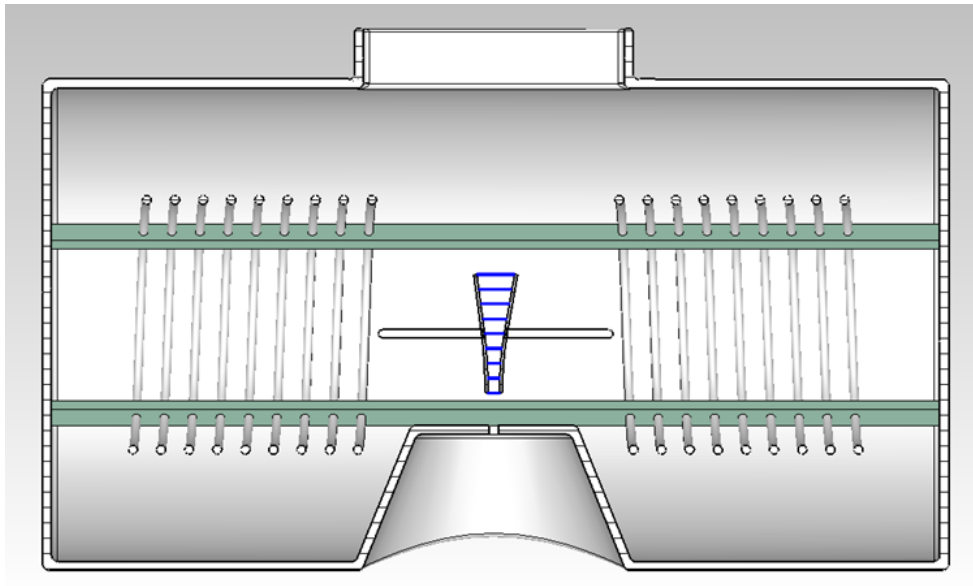


Abbildung 4.40: Neue Struktur mit Einbuchtung für Quadrupol-Triplett.

Dieses Design wurde für die weiteren Untersuchungen beibehalten, sodass der Tank nur noch in der Höhe und Windungsanzahl verändert wurde. Nachdem nun alle Untersuchungen abgeschlossen waren, war ersichtlich, dass die Anforderungen des Bunch-Kompressors nicht zur Genüge erfüllt werden können. Aus diesem Grund wird das Konzept des Bunch-Kompressors überarbeitet, sodass äquidistante Winkel zwischen den einzelnen Trajektorien akzeptiert werden können.

## 4.8 Äquidistante Winkel, 5 MHz

Um zwischen allen Trajektorien die gleiche Winkeldifferenz zu erzielen, wurden die Kondensatorplatten zunächst wieder gleich breit gemacht und in ihrer Breite gemeinsam variiert. Aus den ersten Untersuchungen ist schon bekannt, wie die Winkeldifferenzen mit gleichen Platten mit einer Breite von 50 mm aussehen (siehe Abbildung 4.16). Nun wurde die Breite der Kondensatorplatten schrittweise von 50 mm auf 20 mm verkleinert, um die Auswirkung auf die Winkeldifferenzen zu beobachten. Damit sollte das Abfallen der Winkeldifferenzen zu beiden Seiten hin vermieden werden, da die Platten mit kleinerer Breite eine Felderhöhung zu den Platten hin erzeugen, bzw. das elektrische Feld in der Mitte mehr ausbaucht.



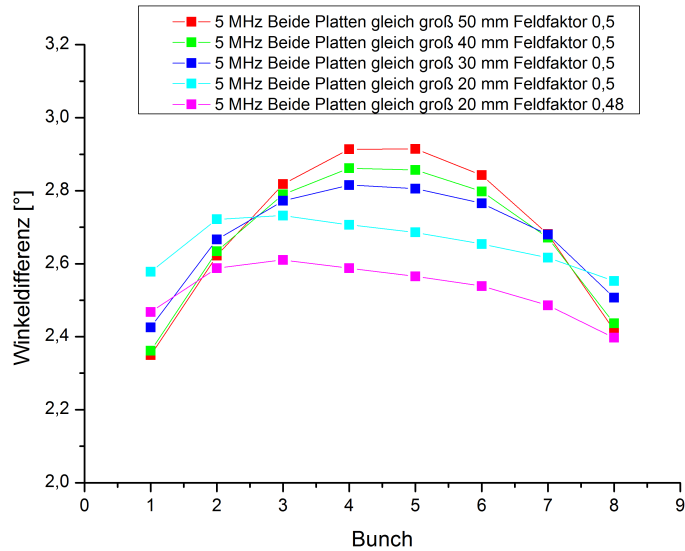


Abbildung 4.41: Winkeldifferenzen: Variation der Plattenbreite von 50 mm auf 20 mm Resonanzfrequenz 5 MHz.

Wie man in Abbildung 4.41 sieht, nehmen die Unterschiede in den Winkeldifferenzen mit abnehmender Breite ebenfalls ab und die Verteilung beginnt flacher zu werden. Dabei wurde die Krümmung der Kondensatorplatten wieder auf den Anfangswert von  $g_1 = g_2 = 0,95 \frac{1}{m}$  und der Steigungswinkel auf  $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^\circ$  festgelegt (siehe Abbildung 4.1). Allerdings erreicht man keineswegs eine äquidistante Verteilung, was an der Resonanzfrequenz von 5 MHz liegt. Der Abstand zwischen dem ersten und letzten Mikro-Bunch der 9 Soll-Bunche ist ca. 46 ns, wobei die halbe Periode der Resonanzfrequenz gerade mal 100 ns beträgt. Das bedeutet, dass der erste und letzte Mikro-Bunch sich nicht mehr im linearen Bereich der Sinusschwingung befindet und die Ablenkungswinkel zu den äußeren Bunchen kleiner werden müssen. In Abbildung 4.42 ist die Schwerpunktslage sowie die Laufzeit jedes Mikro-Bunches dargestellt. Dabei bezieht sich die Schwerpunktslage auf die Mitte der Kondensatorplatten, d.h. den Übergang zwischen dem parabelförmigen und linearen Teil, und die Laufzeit beschreibt die Zeit zwischen dem Eintritt der Mikro-Bunche in das Feld des Plattenkondensators und dem Austritt der Mikro-Bunche aus dem Kondensatorfeld. Da die Kondensatorplatten eine Länge von 200 mm besitzen, benötigen die Mikro-Bunche eine Laufzeit von ca. 10 ns.

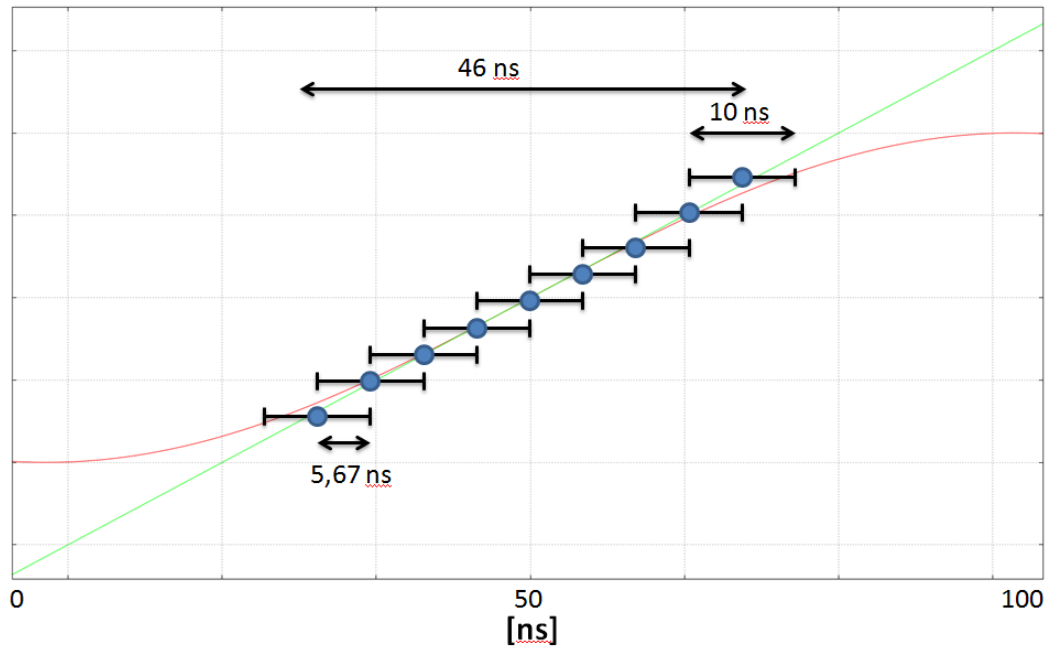


Abbildung 4.42: Schwerpunktslage und Laufzeit der Mikro-Bunche 5-MHz.

Wie man sieht, besteht eine große Abweichung zwischen der linearen und sinusförmigen Kurve beim Eintritt des ersten und Austritt des letzten Mikro-Bunches, wodurch die großen Abweichungen am Anfang und Ende der Winkeldifferenzen entstehen. Somit ist eine äquidistante Winkelverteilung mit einer Resonanzfrequenz von 5 MHz nicht vollständig möglich.

## 4.9 Äquidistante Winkel, 2,5 MHz

Um nun einen längeren linearen Bereich zu erhalten, wurde die Resonanzfrequenz des Kickers auf 2,57 MHz halbiert. Dabei musste allerdings die Spannung deutlich erhöht werden, um die gleiche Steigung des linearen Bereichs zu erreichen. Wenn man sich nun wieder die Verteilung der Mikro-Bunche bezüglich der Schwerpunktslage und der Laufzeit ansieht, wird ersichtlich, dass mit dieser Frequenz eine äquidistante Winkelverteilung relativ problemlos zu realisieren ist (siehe Abbildung 4.43).

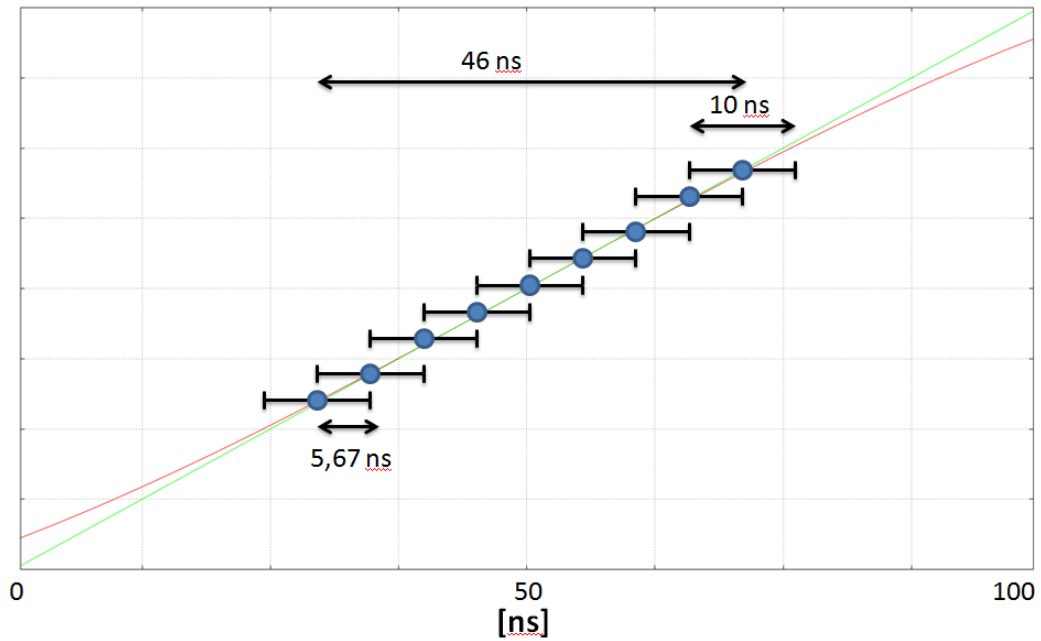


Abbildung 4.43: Schwerpunktslage und Laufzeit der Mikro-Bunche 2,5-MHz.

Die Mikro-Bunche befinden sich nun alle im näherungsweise linearen Bereich der Sinusschwingung und können somit gleichermaßen bzw. mit äquidistanten Winkeln ausgelenkt werden. Um die Resonanzfrequenz zu halbieren wurden die Anzahl an Windungen der beiden Spulen erhöht und somit die Länge des Tanks vergrößert, denn, wie schon im Abschnitt 4.2 beschrieben wurde, darf der Außendurchmesser des Tanks nicht mehr als 0,8 m besitzen, da sonst nicht genügend Platz vor dem Bunch-Kompressor zur Verfügung steht. Um die Induktionsströme in der Tankwand und damit auch die Verlustleistung nicht zu erhöhen, wurde auch der Durchmesser der Spule nicht vergrößert und ein Abstand zwischen Spule und Tankwand von ca. 165 mm beibehalten. Auch die Kondensatorplatten konnten nicht beliebig geändert werden, da sie das entscheidende Bauteil des Kickers sind, und es blieb nur die Anzahl der Windungen und die Länge des Tanks als Variable, um die Resonanzfrequenz abzusenken. Somit wurde zunächst ein Modell erstellt, bei dem jedes Spulenpaar aus 23 Windungen besteht und welches eine Tanklänge von 1,8 m hat.

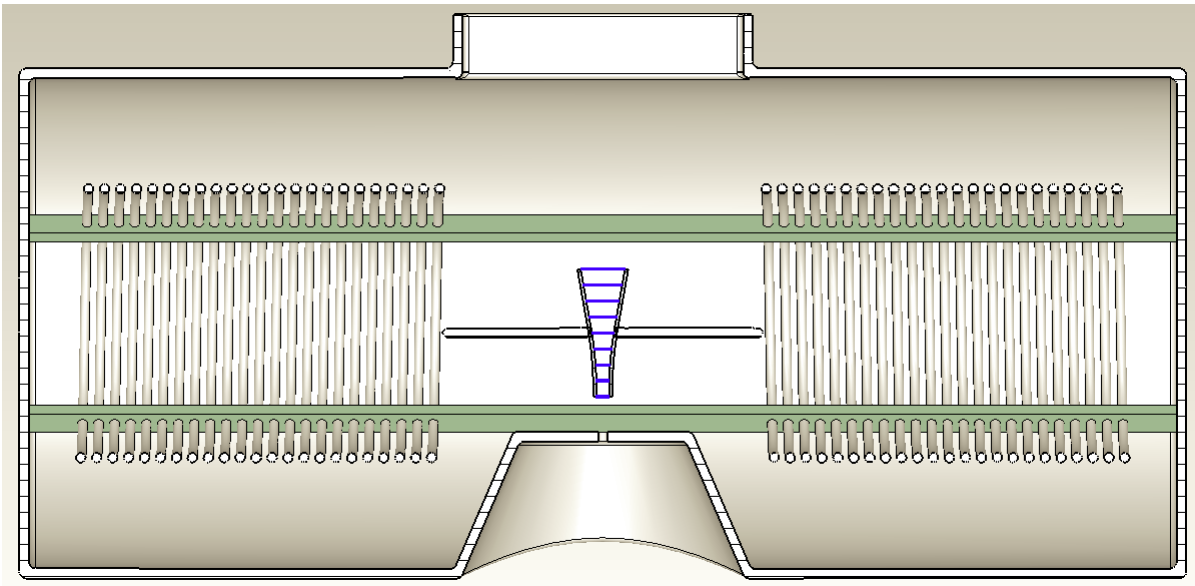


Abbildung 4.44: Neuer Tank mit Resonanzfrequenz 2,5 MHz.

Mit diesem neuen Kicker-Konzept wurde nun die gleiche Variation der Plattenbreite unternommen wie schon bei dem 5-MHz-Kicker.

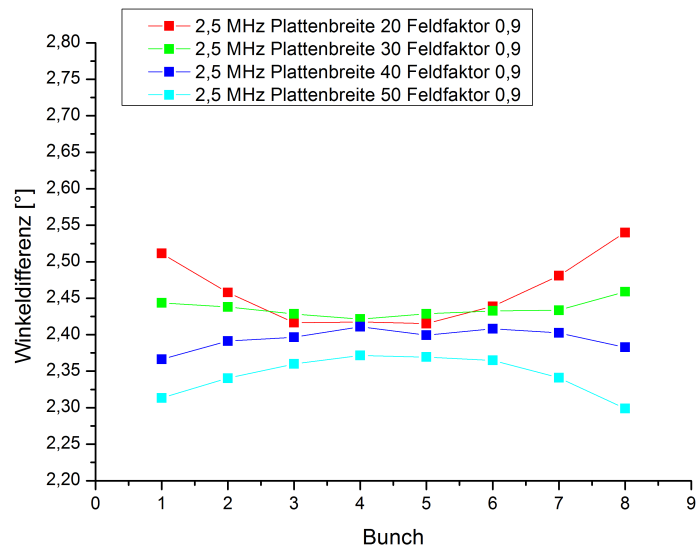


Abbildung 4.45: Winkeldifferenzen: Variation der Plattenbreite von 50 mm auf 20 mm ; Resonanzfrequenz 2,57 MHz.

Man kann gut erkennen, wie die Verteilung an den Enden nach oben gebogen ist, wenn die Platten sehr schmal sind, da dann das elektrische Feld zwischen den Platten ausbaucht und

zu den Platten hin zunimmt, wodurch die Abweichung der Sinusschwingung im linearen Bereich nicht bemerkbar ist. Dagegen wird die Verteilung am Anfang und Ende nach unten gezogen, wenn die Platten sehr breit sind, da dann die kleine Abweichung des linearen Bereichs der Sinusschwingung wieder bemerkbar wird. Für eine Plattenbreite von 40 mm erhält man eine nahezu äquidistante Winkelverteilung. Allerdings benötigt dieses Modell auch eine wesentlich höhere Leistung und Spannungsamplitude, um diese Ablenkungen zu erzielen, als das Modell mit einer Resonanzfrequenz von 5 MHz. Das 5-MHz-Modell, das in diesem Abschnitt verwendet wurde, unterscheidet sich von dem Modell aus dem letzten Abschnitt 4.7, da es durch verschiedene Variationen der Tankhöhe und des Abstandes der einzelnen Windungen voneinander bezüglich der Verlustleistung optimiert wurde. Aus diesem Grund besaß der 5-MHz-Kicker dieses Abschnitts eine Tankhöhe von 1450 mm und einen Abstand von 20 mm zwischen den einzelnen Windungen, wohingegen der 2,5-MHz-Kicker eine Höhe von 1800 mm und einen Abstand von 10 mm zwischen den einzelnen Windungen hat. Der Abstand zwischen den Windungen musste zum Einen aufgrund der hohen Anzahl an Windungen reduziert werden und zum Anderen, um die Induktivität der Spule zu erhöhen und somit die Resonanzfrequenz abzusenken. Durch die Optimierung des 5-MHz-Modells konnte ein Minimum in der Verlustleistung erzielt werden, welche im Falle des 2,5-MHz-Kickers wieder deutlich angestiegen ist. In der nachfolgenden Tabelle sind die Kenngrößen der beiden Modelle zu sehen.

	5 MHz	2,5 MHz
Spannung [kV]	ca. 130 - 140	ca. 250
Tankaufendurchmesser [mm]	800	800
Tankhöhe [mm]	1450	1800
Anzahl an Windungen pro Spule	8	23
Abstand zwischen 2 Windungen [mm]	20	10
Spulenradius [mm]	211	211
Verlustleistung [kW]	ca. 2	ca. 4

Tabelle 4.6: Kenngrößen der beiden Kicker Modelle.

Des Weiteren hat sich bei beiden Modellen der Rohrradius der Spule von 10 mm auf 7,5 mm verkleinert. Dies liegt daran, dass mit der Werkstatt der Universität Frankfurt verschiedene Angebote für Kupferrohre eingeholt wurden und nur Kupferrohre mit einem Durchmesser von maximal 15 mm in der benötigten Länge geliefert werden konnten.

Um nun die deutlich angestiegene Verlustleistung und Spannung wieder ein wenig zu verbessern, wurde die Plattenlänge vergrößert. Da die halbe Periode der Sinusschwingung nun ca. 200 ns lang ist, kann man die Mikro-Bunche über eine deutlich längere Zeit beeinflussen und die Platten somit länger gestalten. Dadurch benötigt man nicht so hohe Spannungen zwischen den Platten und hat folglich auch nicht so hohe Verluste. Dabei wurden die Länge des linearen und des parabelförmigen Bereichs der Kondensatorplatten unabhängig voneinander

#### 4 Design eines Hochfrequenz-Kickers für FRANZ

verlängert. Zunächst wurde die Parabellänge schrittweise von 100 mm auf 200 mm vergrößert, während die Länge des linearen Bereichs bei 100 mm blieb und danach wurde die Länge des linearen Bereichs schrittweise von 100 mm auf 200 mm vergrößert, während die Parabellänge bei 100 mm blieb. Die dabei entstandenen Ergebnisse sind in Abbildung 4.46 dargestellt.

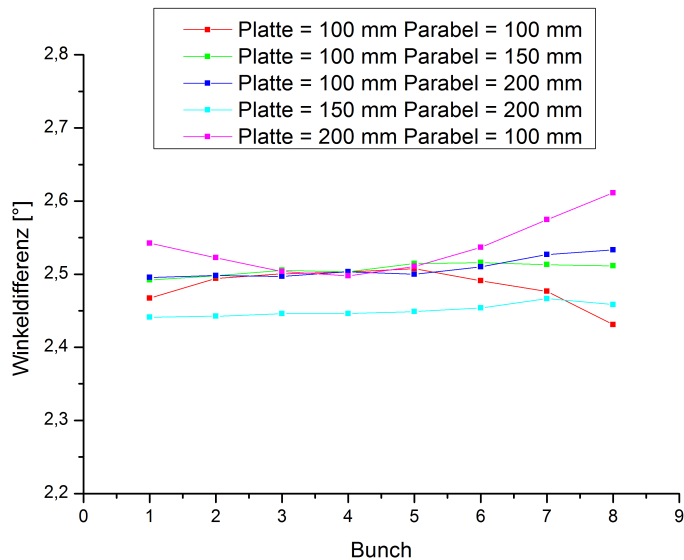


Abbildung 4.46: Winkeldifferenzen: Variation der Kondensatorlänge ; Plattenbreite 40 mm.

Die dabei benötigte reduzierte Verlustleistung ist in der nächsten Abbildung dargestellt.

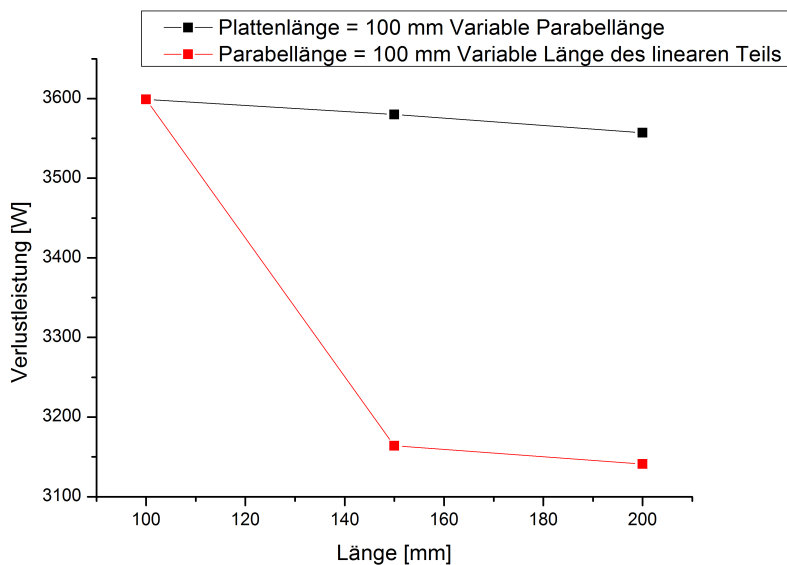


Abbildung 4.47: Verlustleistung bei Variation der Kondensatorlänge.

Wie gut zu erkennen ist, erhält man die kleinste Verlustleistung bei einer Geradenlänge von 200 mm und einer Parabellänge von 100 mm, allerdings erhält man damit nicht die geforderte äquidistante Verteilung. Da die Verteilung in diesem Fall wieder am Anfang und Ende nach oben gebogen war, wurde die Plattenbreite bei beiden Platten auf 50 mm vergrößert und für die restlichen Untersuchungen bei diesem Wert belassen. Damit ließ sich eine gute äquidistante Verteilung erreichen, wie später noch gezeigt wird. Da die Platten nun 100 mm länger geworden sind ist auch die Laufzeit auf 15 ns angestiegen, was die Verteilung der Mikro-Bunche auf der Sinunsschwingung beeinflusst.

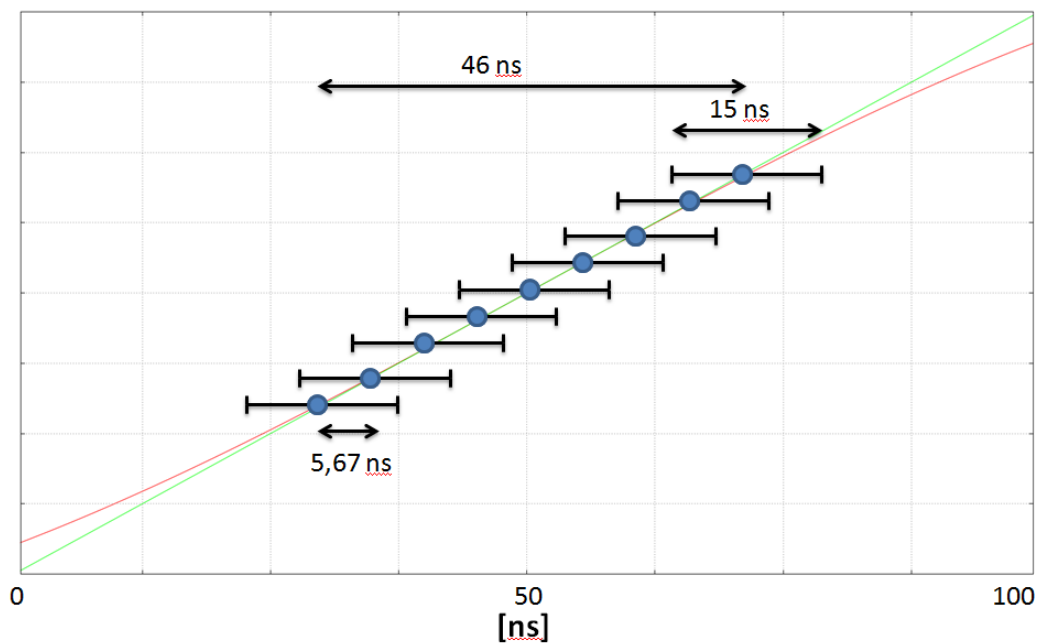


Abbildung 4.48: Schwerpunktslage und Laufzeit der Mikro-Bunche mit längeren Platten 2,5-MHz.

Wie man sieht, treten die Mikro-Bunche nun früher in das Feld des Plattenkondensators ein und verlassen es etwas später, wodurch die Abweichung der Sinusschwingung und der linearen Funktion etwas größer wird. Diese Abweichung ist allerdings immer noch vernachlässigbar klein. Die Längenvariation der Parabel verursacht kaum eine Verbesserung, was auch ersichtlich ist, wenn man sich die verschiedenen Plattenverlängerungen einmal genau anschaut.

#### 4 Design eines Hochfrequenz-Kickers für FRANZ

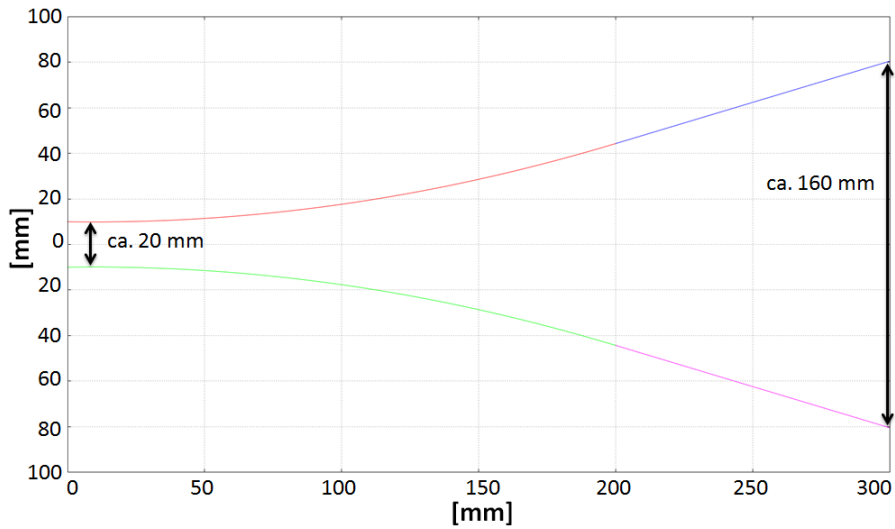


Abbildung 4.49: Parabellänge 200 mm, Länge des linearen Bereichs 100 mm.

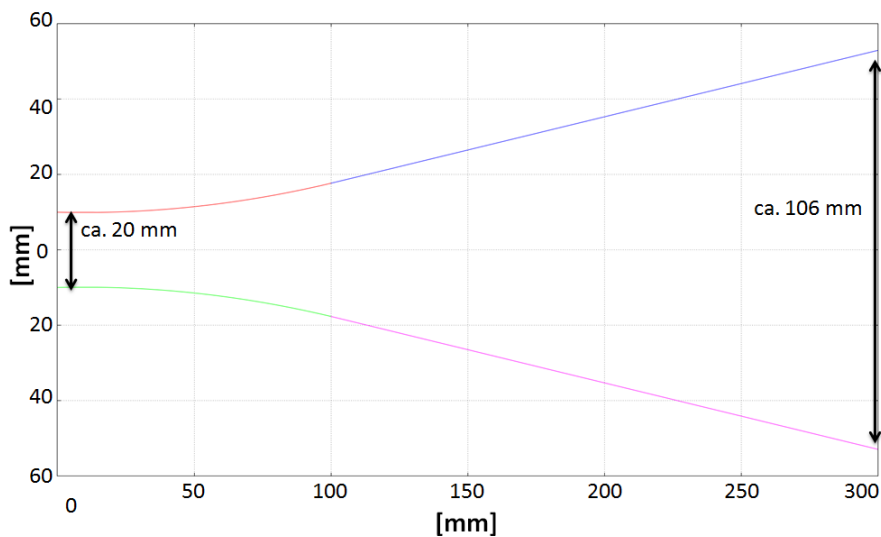


Abbildung 4.50: Parabellänge 100 mm, Länge des linearen Bereichs 200 mm.

Die Vergrößerung der Parabellänge erzeugt ein zu starkes Aufweiten der Kondensatorplatten, was keine bessere Auslenkung der Mikro-Bunche gewährt. Dabei wurde die Steigung des linearen Bereichs so angepasst, dass ein knickfreier Übergang zwischen den beiden Bereichen vorliegt (siehe Gleichung 4.15). Bei dem linearen Bereich sieht es hingegen deutlich besser aus. Durch die Verlängerung kann das Feld besser zur Auslenkung der Mikro-Bunche genutzt werden, sodass eine niedrigere Spannung (Abbildung 4.51) und Verlustleistung (Abbildung 4.47) benötigt wird.



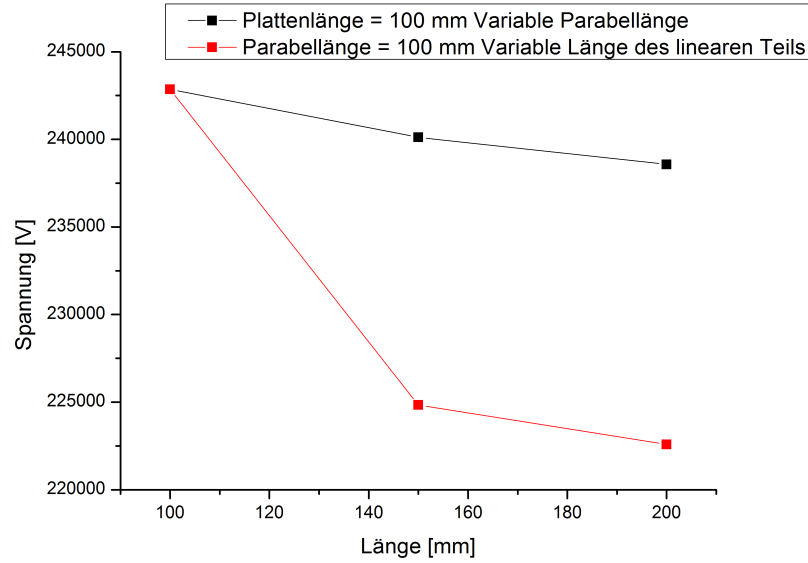


Abbildung 4.51: Spannung bei Variation der Kondensatorlänge.

Somit erhält man eine Verlustleistung von ca. 3,2 kW und benötigt eine Spannung von ca. 220 kV zwischen den Platten. Um diese Werte noch ein wenig zu verbessern, wurde die Krümmung der Kondensatorplatten noch an die neuen Bedingungen angepasst. Damit bei den Untersuchungen für die äquidistanten Winkeldifferenzen nicht wieder zwei Parameter unabhängig voneinander optimieren werden müssen (wie im Abschnitt 4.7) und um einen schönen Übergang zwischen dem parabel- und linearen-Abschnitt zu schaffen, wurde die Steigung der Geraden über die Steigung der Parabel im Endpunkt  $X_2$  definiert:

$$y_{\text{parabel}}(x) = g * (x - X_0)^2 + Y_0 \quad (4.14)$$

$$y'_{\text{parabel}}(X_2) = 2 * g * (X_2 - X_0) = m = \tan(\alpha) \quad (4.15)$$

$$y_{\text{gerade}}(x) = \tan(\alpha) * (x - X_2) + Y_2 = 2 * g * (X_2 - X_0) * (x - X_2) + Y_2 \quad (4.16)$$

Somit hängt die Form der gesamten Kondensatorplatte nur noch von der Krümmung  $g$  ab und besitzt immer einen angepassten Übergang zwischen den beiden Bereichen. Nun wurde die Krümmung, von beiden Platten gleichermaßen im Bereich von  $0,6 \frac{1}{\text{m}}$  bis  $1 \frac{1}{\text{m}}$  variiert, um die Spannung zwischen den Platten weiter zu verringern und die Auslenkung der Bunche noch effektiver zu gestalten. Dabei wurde der Feldfaktor immer so gewählt, dass eine äquidistante Winkelverteilung von ca.  $2,5^\circ$  erzeugt wird.

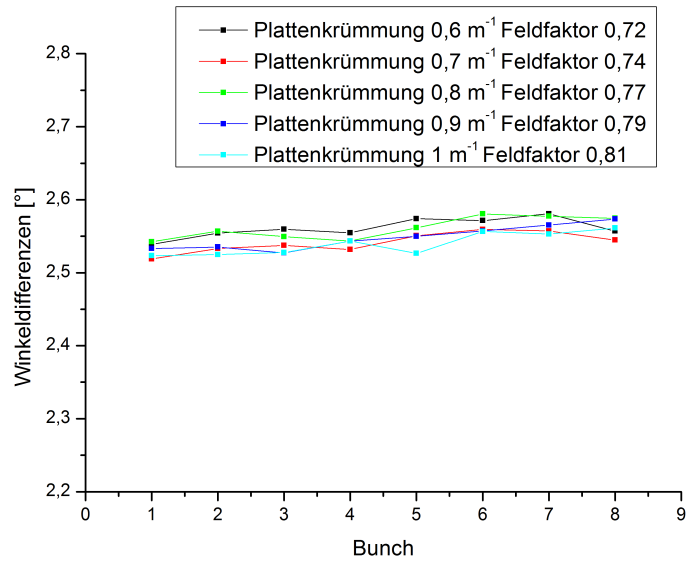


Abbildung 4.52: Winkeldifferenzen: Variation der Krümmung  $g$  ; Plattenbreite 50 mm.

Wie man schon anhand der verschiedenen Verteilungen der Winkeldifferenzen sieht, benötigt man einen immer kleineren Feldfaktor, um die gleiche äquidistante Verteilung von ca.  $2,5^\circ$  zu erreichen, je kleiner die Krümmung der Kondensatorplatten wird. Dies liegt daran, dass der lineare Teil der Platten mit kleiner werdenden Krümmungen aufeinander zu wandert, und so die Mikro-Bunche noch besser vom elektrischen Feld abgelenkt werden (siehe Abbildung 4.53).

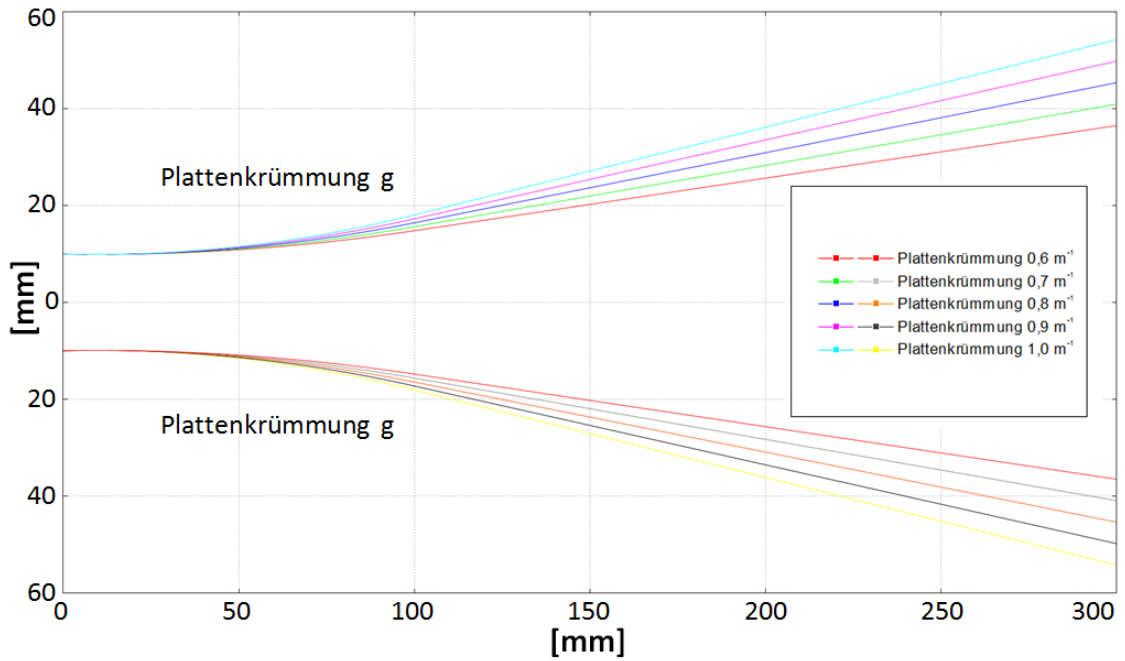


Abbildung 4.53: Geometrie: Variation der Krümmung ; Plattenbreite 50 mm.

Dadurch reduziert sich sowohl die Verlustleistung als auch die benötigte Spannung zwischen den Kondensatorplatten.

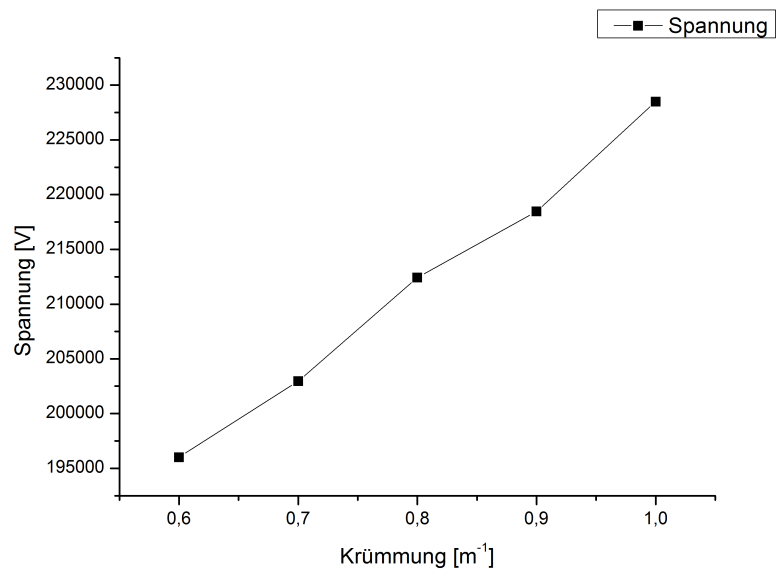


Abbildung 4.54: Spannung bei Variation der Kondensatorplattenkrümmung.

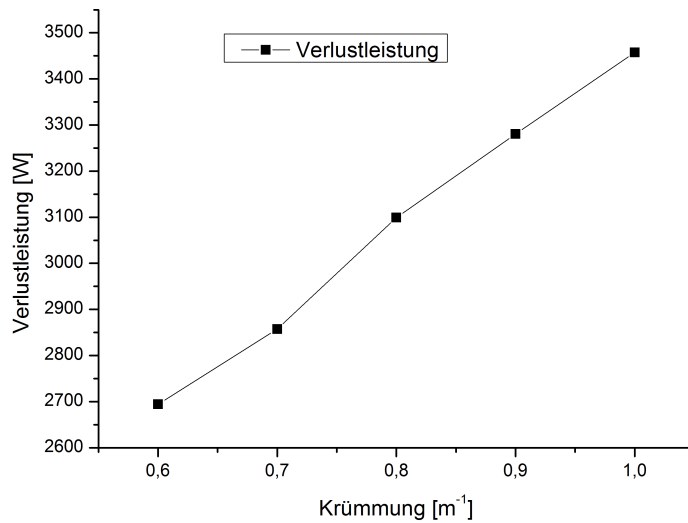


Abbildung 4.55: Verlustleistung bei Variation der Kondensatorplattenkrümmung.

Die Verlustleistung kann damit auf ein Minimum von ca. 2,7 kW reduziert werden und die minimale Spannung beträgt ca. 195 kV. Allerdings entsteht mit dieser Optimierung ein weiteres Problem, denn je kleiner der Abstand der Platten im linearen Bereich wird, desto näher kommen die Mikro-Bunche den Platten bei ihrer Auslenkung. Zwar kommen bei allen Krümmungen, die untersucht wurden, die 9 Soll-Bunche ungehindert an den Platten vorbei, aber bei einer Krümmung von  $0,6 \frac{1}{\text{m}}$  kommen sie dem Ende der Platten schon sehr nahe, sodass Strahlverluste sehr wahrscheinlich sind. Und da in den Simulationen nur jeweils die Zentralteilchen der Bunche untersucht wurden, ist eine Krümmung von  $0,6 \frac{1}{\text{m}}$  nicht wirklich empfehlenswert. Außerdem besteht ein Makro-Bunch nicht nur aus den 9 Soll-Bunchen, sondern aus einigen Mikro-Bunchen vor und nach den gewünschten 9 Mikro-Bunchen. Diese sind unvermeidbar, da die an- und absteigende Flanke des 250 kHz-Choppers nicht senkrecht ist, sondern über eine gewisse Zeit an- und absteigt, und somit ein Makro-Bunch immer aus mehr als 9 Mikro-Bunchen besteht. Die Länge des Makro-Bunches hängt von den Einstellungen des 250 kHz-Choppers ab. Das bedeutet, dass ein Makro-Bunch eine Länge von bis zu 300 ns haben kann, was ein Problem darstellt, da die Periodendauer des 2,5 MHz-Kickers 400 ns beträgt und somit der Makro-Bunch nicht zwischen das Maximum und Minimum der Sinussschwingung passt. Allerdings legen die Bunche zwischen Chopper und Kicker eine lange Flugstrecke zurück und es steht zu vermuten, dass die Enden des Makro-Bunches durch die Akzeptanz der Bauteile vor dem Kicker verloren gehen. Momentan lässt sich nicht genau abschätzen, wie lange der Makro-Bunch ist, wenn er beim 2,5 MHz-Kicker angekommen ist. Unabhängig von der Einstellung des 250 kHz-Choppers und den möglichen Verlusten in den anderen Bauteilen, ist die Situation mit dem 2,5 MHz-Konzept wesentlich entspannter als mit dem 5 MHz-Konzept, welches einen noch kürzeren Makro-Bunch vorausgesetzt hätte.

Um herauszufinden, wo die Mikro-Bunche vor und hinter den Soll-Bunchen deponiert werden, wurden weitere Teilcentrajektorien vor und hinter den 9 bestehenden Teilchenquellen mit CST-Particle-Studio ausgewertet. Dabei ergab sich, dass bei einer Krümmung von  $1 \frac{1}{m}$  2 Mikro-Bunche vor und hinter den Soll-Bunchen den Bereich der Kondensatorplatten verlassen, dabei allerdings äußerst knapp am Rand der Platten vorbeifliegen. Sie werden im Ausgangsschlitz des Kickers deponiert. Die restlichen Mikro-Bunche werden direkt auf den Platten deponiert. Bis zu einer Krümmung von  $0,8 \frac{1}{m}$  verlässt jeweils 1 Mikro-Bunch vor und hinter den gewünschten den Bereich der Kondensatorplatten, und ab einer Krümmung von  $0,7 \frac{1}{m}$  werden alle Mikro-Bunche vor und nach den 9 Soll-Bunchen auf den Platten deponiert. Dies stellt, pessimistisch abgeschätzt, eine deponierte Leistung von ca. 3,7 kW dar, die durch das Kühlungssystem bewältigt werden muss.

$$P_{\text{Loss}} = 2\text{MeV} * 75\text{mA} * 250\text{kHz} * 100\text{ns} \approx 3,7\text{kW} \quad (4.17)$$

Dabei wurde davon ausgegangen, dass von einem Makropuls mit 150 ns, neben den 9 Soll-Bunchen mit einer Länge von ca. 46 ns, 100 ns auf den Platten deponiert werden. Da die Flanken des 250 kHz-Choppers allerdings relativ schnell abfallen und die Flanken des Makropulses durch die Akzeptanzen der anderen Bauteile vermutlich verloren gehen ist davon auszugehen, dass die deponierte Leistung in Wirklichkeit deutlich geringer ist. Die Frage ist nun, ob man sich für eine kleine Krümmung mit kleinerer Verlustleistung und geringerer Spannung, dafür aber höherer deponierter Leistung entscheidet oder eher für Kondensatorplatten mit großer Krümmung. Im Rahmen dieser Masterarbeit schlage ich eine Krümmung von  $0,8 \frac{1}{m}$  vor, da sie einen guten Kompromiss zwischen den Vor- und Nachteilen darstellt. Unabhängig davon sollte eine Krümmung von  $0,7 \frac{1}{m}$  nicht unterschritten werden, da sonst keine akzeptable Auslenkung der Soll-Bunche gewährleistet ist.

## 4.10 Tuning, Kühlung und aktueller Stand der Fertigung

Nach den verschiedenen Optimierungen und Untersuchungen der unterschiedlichen Kicker-Modelle wird nun im letzten Abschnitt das vorläufige Tunerkonzept sowie der aktuelle Status der Fertigung vorgestellt. Zunächst wurde versucht, mit großen Tunern seitlich an den Spulen das Magnetfeld zu verdrängen und die Frequenz so zu regulieren. Allerdings ist das magnetische Feld so schwach, dass der Tuner sehr groß sein müsste, um einen ausreichenden Hub zu ermöglichen und des Weiteren wirkt der Tuner gleichzeitig kapazitiv zu den Spulen und somit dem Effekt des induktiven Tunings entgegen. Aus diesem Grund war dies keine sinnvolle Option und es wurde der Abschnitt, welcher die Spulen und die Kondensatorplatten miteinander verbindet, als geeigneter Ort zum tunen ausgewählt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass das elektrische Feld zwischen den Platten beim tunen nicht beeinflusst wird. Deshalb wurden die Tuner, wie in Abbildung 4.56 zu sehen ist, so ausgelegt, dass sie den Bereich der Platten großräumig umgehen.

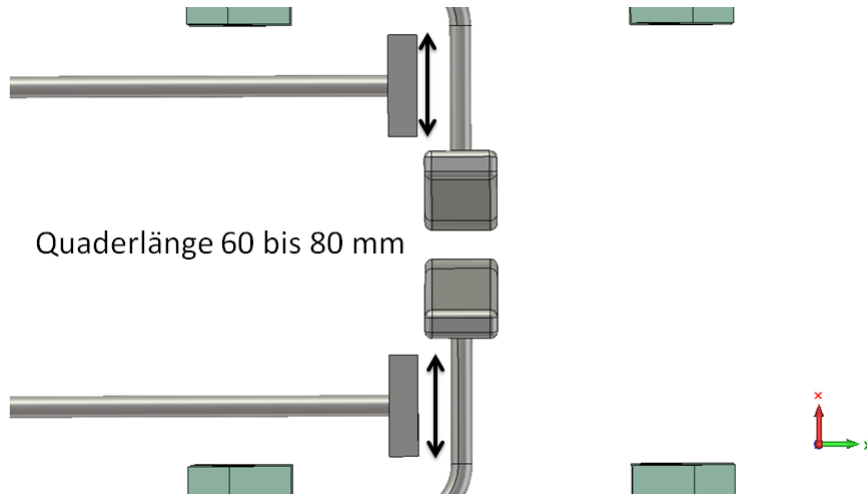


Abbildung 4.56: Tuner-Design.

Je nachdem, wie groß man den Quader am Ende der Tuner entwirft, erhält man unterschiedliche Frequenzhübe. Dabei wurde die Frequenz gegen den Abstand des Tuners von der Struktur aufgetragen.

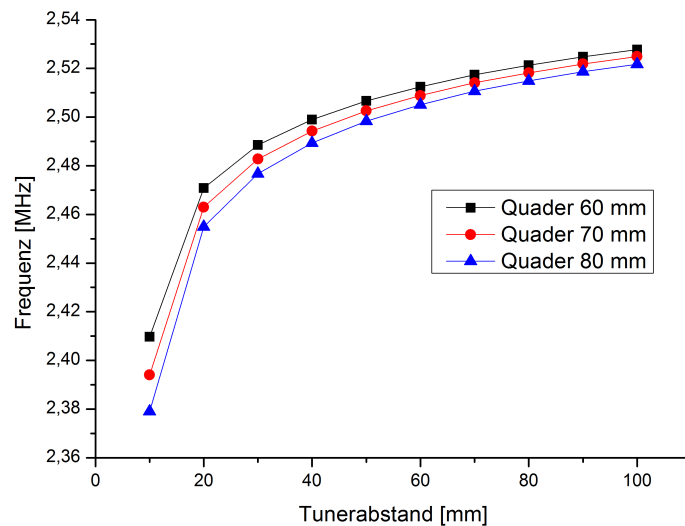


Abbildung 4.57: Frequenzhub Tunerdesign 2,5 MHz.

Um den höchsten Frequenzhub zu erhalten sollte ein Quader mit 80 mm Höhe gewählt werden, der damit einen Frequenzhub von ca. 140 kHz ermöglicht. Allerdings wird auch die Spannung zwischen den Kondensatorplatten und die Verlustleistung des 2,5 MHz-Kickers durch die

Tuner beeinflusst. Wie in Abbildung 4.58 zu sehen ist, steigt die Verlustleistung an, wenn die Tuner an die Struktur heranfahren. Analog dazu sinkt die Spannung (Abbildung 4.59) zwischen den Kondensatorplatten ab, da die Tuner eine weitere Kapazität zu den Zuführungen der Platten aufbauen.

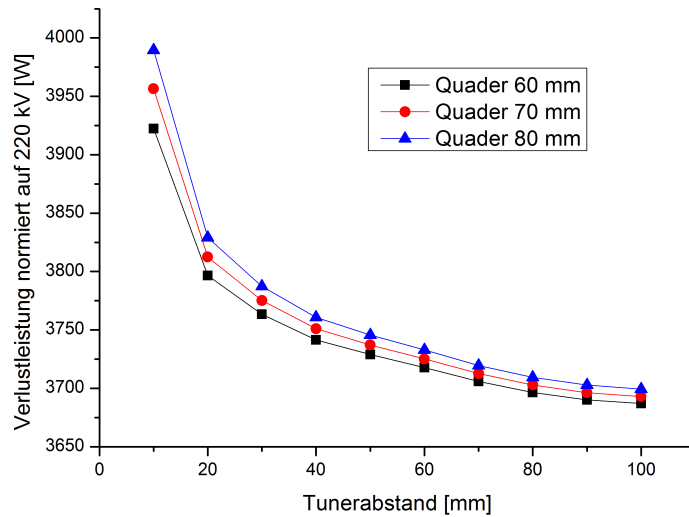


Abbildung 4.58: Verlustleistung bei Variation des Tuners auf 220 kV normiert.

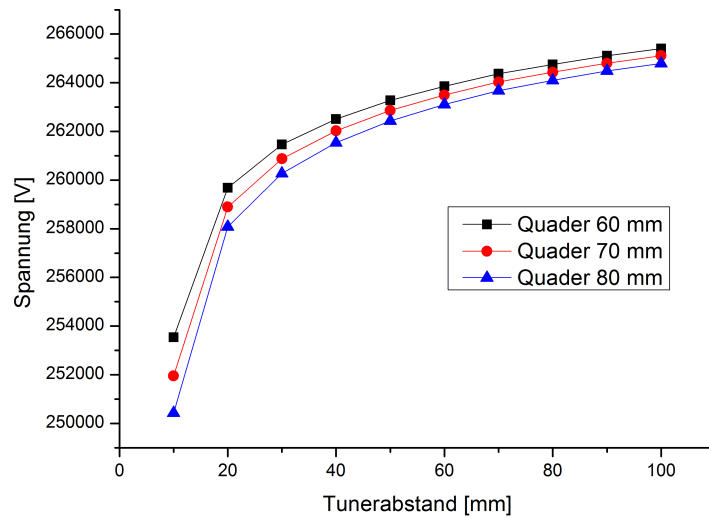


Abbildung 4.59: Spannung bei Variation des Tuners.

#### 4 Design eines Hochfrequenz-Kickers für FRANZ

Die auf 220 kV normierte Verlustleistung steigt um bis zu 8% an, wogegen die Spannung zwischen den Platten um bis zu 6% abnimmt. Insgesamt stellt dies kein Problem dar, man muss lediglich die Spannung beim Tunen entsprechend nachregulieren, um die Auslenkung der Mikro-Bunche konstant zu halten. Natürlich werden die Tuner ebenfalls gekühlt und vermutlich aus dem gleichen Kupferrohr gebaut werden, aus dem der Rest der Struktur besteht. Geplant ist, nur einen der beiden Tuner als dynamischen Tuner auszulegen, welcher die Schwankungen der Frequenz ausgleicht. Der andere Tuner dient als statischer Tuner lediglich dazu, die Zielfrequenz zu erreichen. Bezüglich der Fertigung des Kickers ist es laut Universitätswerkstatt möglich, die Spulen hier im Haus zu biegen und somit das Inlay des Kickers größtenteils hier herzustellen. Lediglich der große Tank mit einem Außendurchmesser von 800 mm muss bei einer externen Firma angefertigt werden, genauso wie die Kondensatorplatten.

Bezüglich der Kühlung wird das gesamte Design als Doppelrohr-System entworfen. Das bedeutet, innerhalb des äußeren 15 mm Rohres befindet sich ein weiteres Kupferrohr mit 8 mm Durchmesser für den Kühlwasser Rück- und Vorlauf. Beide Rohre haben eine Wandstärke von 1 mm und wurden von der Werkstatt der Universität Frankfurt im Dezember 2012 bei der Firma MVG bestellt. Sie sind bereits eingetroffen und damit bereit zur Weiterverarbeitung. Da beide Rohre an der Kondensatorplatte enden, muss in ihnen die Verbindung zwischen Vor- und Rücklauf stattfinden. Dazu wurde folgendes Konzept vorgeschlagen:

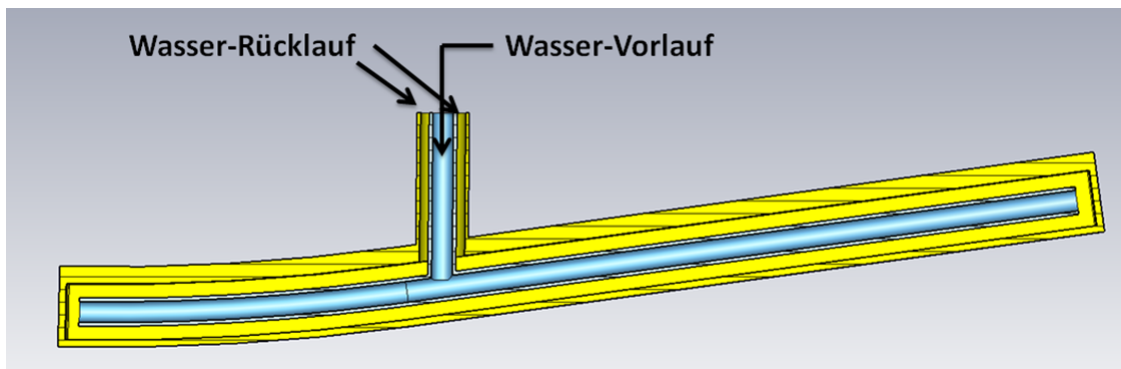


Abbildung 4.60: Kühlungskonzept der Kondensatorplatten.

Der obere Teil der Kondensatorplatten wurde dicker entworfen, um eventuell eine Halterung zwischen den Stützen der Spule und der Kondensatorplatte anzubringen, damit nicht die gesamte Last der Platte plus Kühlwasser an dem dünnwandigen Rohr hängt, sondern von einem Teflongestell unterstützt wird. Somit sollen auch unerwünschte Schwingungen vermieden werden, wenn das Wasser durch die Struktur gepumpt wird. Das Kühlwasser wird durch das innere Rohr gepumpt, strömt in den Platten heraus und wird durch das äußere Rohr zurückgeführt.

Neben der Stütze der Kondensatorplatten muss auch das gesamte Inlay des Kickers abge-



stützt werden, da die Struktur im späteren Betrieb horizontal liegt, sodass die beiden Spulen links und rechts über die Strahlführung hinausragen. Wenn die Spulen mit Wasser gefüllt sind, sind sie zu schwer, als dass die 4 Teflonstützen, die mit den Tankdeckel verschraubt sind, sie tragen könnten. Eine Lösung könnte folgendes System sein, welches die Spulen an den Seiten abstützt:

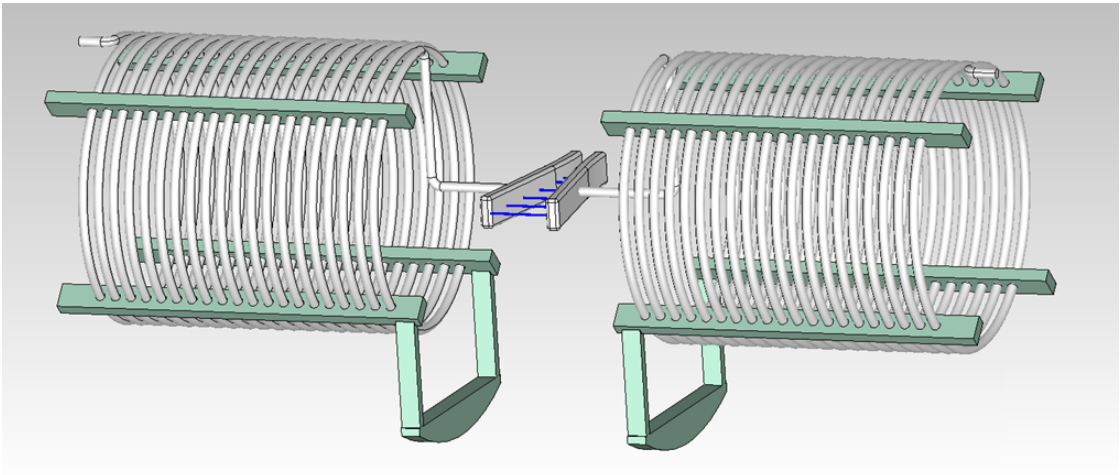


Abbildung 4.61: Stützkonzept der Spulen.

Das endgültige Design bezüglich der Abstützung der Spulen und Kondensatorplatten sowie die Auslegung des Tanks bezüglich der Öffnungen für Ein- und Auskoppler, Tunings und Diagnose müssen im Laufe der weiteren wissenschaftlichen Arbeit meinerseits im Institut für Angewandte Physik durchgeführt und abgeschlossen werden. Die endgültigen Maße für den Tank sind, nach Einrichten des Tuners und der Stützen der Spulen, in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

	2,5 MHz-Kicker
Tankaußendurchmesser [mm]	800
Tankhöhe [mm]	1550
Anzahl an Windungen pro Spule	20
Abstand zwischen 2 Windungen [mm]	10
Spulenradius [mm]	216
Abstand zwischen Kondensatorplatte und Spule [mm]	110

Tabelle 4.7: Finale Daten des 2,5 MHz-Kickers des FRANZ-Projektes.

Mit dem endgültigen Design werden die Mikro-Bunche, wie in Abbildung dargestellt, auf ihre einzelnen Bahnen ausgelenkt.

#### 4 Design eines Hochfrequenz-Kickers für FRANZ

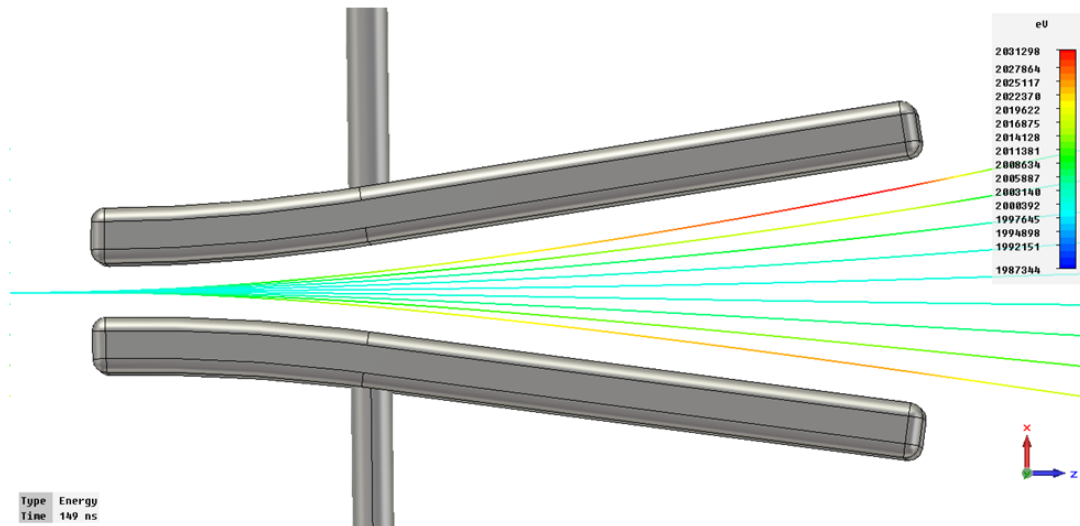


Abbildung 4.62: Finale Trajektorien des 2,5 MHz-Kickers.

## 5 Schlusswort

Mit dieser Arbeit wurde gezeigt, wie sich ein Hochfrequenz-Resonator dazu eignet, einzelne Teilchen-Pakete auszulenken und in ein nachfolgendes System zu injizieren. Dabei wurde deutlich, welche Probleme beim Entwurf eines solchen Bauteils entstehen können und welche verschiedenen Ziele damit realisiert und welche Ziele nur schwer bis gar nicht umgesetzt werden konnten. Im Laufe der Masterarbeit wurde weiter gezeigt, wie sich der Kicker vom ersten Entwurf zum endgültigen Design entwickelt hat und welche Optimierungen das Konzept des Kickers durchlaufen hat. Das abschließende Design des Kickers stellt ein gut funktionierendes System dar, um die einzelnen Mikro-Bunche mit äquidistanten Winkeln von  $2,5^\circ$  im Bereich von  $\pm 10^\circ$  auszulenken. Die Verlustleistung des Systems konnte in einem akzeptablen Bereich von maximal 4 kW (laut CST-Microwave-Studio) gehalten werden, was in der Realität in etwa 6 bis 6,5 kW entsprechen dürfte. Lediglich die Spannung zwischen den Kondensatorplatten konnte nicht unter 215 kV gebracht werden. Die einzige Möglichkeit, die Spannung zu reduzieren, wäre die äquidistanten Winkel zwischen den einzelnen Mikro-Bunchen zu verkleinern. Dies hängt von den abschließenden Untersuchungen des Bunch-Kompressors ab.



## 6 Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir ein Studium erst ermöglicht und mich immer unterstützt haben, sowohl finanziell als auch moralisch.

Bei Professor Dr. Ratzinger möchte ich mich für die Betreuung dieser Masterarbeit bedanken. Es war sowohl angenehm als auch hilfreich, die Thematik dieser Masterarbeit mit ihm in vielen physikalischen und nicht-physikalischen Diskussionen zu besprechen.

Bei Professor Dr. Podlech möchte ich mich bedanken, da er immer eine offene Tür und ein offenes Ohr für Probleme gehabt hat. Tipps und Ratschläge von ihm waren sowohl hilfreich als auch anregend, um neue Probleme zu lösen und zu verstehen.

Des Weiteren gilt mein Dank der gesamten Arbeitsgruppe des IAP, welche mir sowohl in den Seminaren als auch außerhalb mit neuen Ideen und Anregungen immer zur Seite gestanden haben.

Zum Schluss gilt mein Dank noch meiner Freundin Nadja Deutl, die mich ebenfalls zu jeder Zeit unterstützt und mir mit Rat und Tat beigestanden hat.



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Layout des FRANZ-Projektes. [12]	4
2.2	Bunch-Kompressor Konzept. [10]	5
3.1	Resonanzkurve um die Resonanzfrequenz. [6]	9
4.1	Profil der Kondensatorplatten.	14
4.2	Das erste Design des 5-MHz-Kickers.	15
4.3	Integrationspfade der Spannungen zwischen den Kondensatorplatten.	16
4.4	Auslenkung der Trajektorien.	16
4.5	Elektrisches Feld eines Quarterwave-Resonators.	17
4.6	Magnetisches Feld eines Quarterwave-Resonators.	18
4.7	Elektrisches Feld entlang des Stems.	18
4.8	Elektrisches Feld des Doppel-Quarterwave-Resonators.	19
4.9	Magnetisches Feld des Doppel-Quarterwave-Resonators.	19
4.10	Elektrisches Feld entlang der Stems.	20
4.11	Das zweite Modell.	21
4.12	Oberflächenstrom des 5-MHz-Kickers.	22
4.13	Verlustleistung gegen Tankradius.	23
4.14	Berechnung der Winkel mit Hilfe von "Teilchen-Detektor-Ebenen".	24
4.15	Abstand, ab dem die Trajektorien linear Verlaufen.	25
4.16	Simulierte Winkeldifferenzen: Plattenbreite 50 mm.	26
4.17	Winkeldifferenzen: Variation von $\delta$ mit $a = 10$ .	28
4.18	Geometrie der Kondensatorplatten: Variation von $g$ für beide Kondensatorplatten $\delta = 5$ ; $a = 10$ mm.	29
4.19	Winkeldifferenzen: Variation von $g$ für beide Kondensatorplatten $\delta = 5$ ; $a = 10$ mm.	29
4.20	Winkeldifferenzen: Variation von $g_1$ mit $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\delta = 5$ ; $a = 10$ mm.	30
4.21	Winkeldifferenzen: Variation von $\alpha_1$ mit $\alpha_2 = 10^\circ$ ; $g_1 = 0,86 \frac{1}{m}$ ; $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\delta = 5$ ; $a = 10$ mm.	31
4.22	Geometrie der Kondensatorplatten: Variation von $\alpha_1$ mit $\alpha_2 = 10^\circ$ ; $g_1 = 0,86 \frac{1}{m}$ ; $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\delta = 5$ ; $a = 10$ mm.	31
4.23	Winkeldifferenzen: Variation von $\delta$ mit $a = 15$ mm Feldfaktor 0,51.	32
4.24	Absoluter Fehler: Variation von $\delta$ mit $a = 15$ mm.	33
4.25	Relativer Fehler: Variation von $\delta$ mit $a = 15$ mm.	33
4.26	Maximaler Fehler: Variation von $\delta$ mit $a = 15$ mm.	34

4.27 Winkelverteilung: Variation von $\delta$ mit $a = 15$ mm Feldfaktor 0,51. . . . .	34
4.28 Winkeldifferenzen: Variation von $g_1$ mit $\delta = 4$ ; $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^\circ$ ; $a = 15$ mm Feldfaktor 0,49. . . . .	35
4.29 Geometrie: Variation von $g_1$ mit $\delta = 4$ ; $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^\circ$ ; $a = 15$ mm. . . . .	36
4.30 Absoluter Fehler: Variation von $g_1$ mit $\delta = 4$ ; $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^\circ$ ; $a = 15$ mm. . . . .	36
4.31 Relativer Fehler: Variation von $g_1$ mit $\delta = 4$ ; $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^\circ$ ; $a = 15$ mm. . . . .	37
4.32 Maximaler Fehler: Variation von $g_1$ mit $\delta = 4$ ; $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^\circ$ ; $a = 15$ mm. . . . .	37
4.33 Winkeldifferenzen: Variation von $\alpha_1$ mit $\delta = 4$ ; $g_1 = 0,7 \frac{1}{m}$ ; $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\alpha_2$ $= 10^\circ$ ; $a = 15$ mm Feldfaktor 0,48. . . . .	38
4.34 Geometrie: Variation von $\alpha_1$ mit $\delta = 4$ ; $g_1 = 0,7 \frac{1}{m}$ ; $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\alpha_2 = 10^\circ$ ; $a = 15$ mm. . . . .	39
4.35 Absoluter Fehler: Variation von $\alpha_1$ mit $\delta = 4$ ; $g_1 = 0,7 \frac{1}{m}$ ; $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\alpha_2 = 10^\circ$ ; $a = 15$ mm. . . . .	39
4.36 Relativer Fehler: Variation von $\alpha_1$ mit $\delta = 4$ ; $g_1 = 0,7 \frac{1}{m}$ ; $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\alpha_2 = 10^\circ$ ; $a = 15$ mm. . . . .	40
4.37 Maximaler Fehler: Variation von $\alpha_1$ mit $\delta = 4$ ; $g_1 = 0,7 \frac{1}{m}$ ; $g_2 = 0,9 \frac{1}{m}$ ; $\alpha_2$ $= 10^\circ$ ; $a = 15$ mm. . . . .	40
4.38 Beste Geometrie der Kondensatorplatten Quer. . . . .	41
4.39 Beste Geometrie der Kondensatorplatten Längs. . . . .	41
4.40 Neue Struktur mit Einbuchtung für Quadrupol-Triplett. . . . .	42
4.41 Winkeldifferenzen: Variation der Plattenbreite von 50 mm auf 20 mm Resonanzfrequenz 5 MHz. . . . .	43
4.42 Schwerpunktslage und Laufzeit der Mikro-Bunche 5-MHz. . . . .	44
4.43 Schwerpunktslage und Laufzeit der Mikro-Bunche 2,5-MHz. . . . .	45
4.44 Neuer Tank mit Resonanzfrequenz 2,5 MHz. . . . .	46
4.45 Winkeldifferenzen: Variation der Plattenbreite von 50 mm auf 20 mm ; Resonanzfrequenz 2,57 MHz. . . . .	46
4.46 Winkeldifferenzen: Variation der Kondensatorlänge ; Plattenbreite 40 mm. . . . .	48
4.47 Verlustleistung bei Variation der Kondensatorlänge. . . . .	48
4.48 Schwerpunktslage und Laufzeit der Mikro-Bunche mit längeren Platten 2,5-MHz. . . . .	49
4.49 Parabellänge 200 mm, Länge des linearen Bereichs 100 mm. . . . .	50
4.50 Parabellänge 100 mm, Länge des linearen Bereichs 200 mm. . . . .	50
4.51 Spannung bei Variation der Kondensatorlänge. . . . .	51
4.52 Winkeldifferenzen: Variation der Krümmung $g$ ; Plattenbreite 50 mm. . . . .	52
4.53 Geometrie: Variation der Krümmung ; Plattenbreite 50 mm. . . . .	53
4.54 Spannung bei Variation der Kondensatorplattenkrümmung. . . . .	53
4.55 Verlustleistung bei Variation der Kondensatorplattenkrümmung. . . . .	54



4.56 Tuner-Design. . . . .	56
4.57 Frequenzhub Tunerdesign 2,5 MHz. . . . .	56
4.58 Verlustleistung bei Variation des Tuners auf 220 kV normiert. . . . .	57
4.59 Spannung bei Variation des Tuners. . . . .	57
4.60 Kühlungskonzept der Kondensatorplatten. . . . .	58
4.61 Stützkonzept der Spulen. . . . .	59
4.62 Finale Trajektorien des 2,5 MHz-Kickers. . . . .	60



# Literaturverzeichnis

- [1] Markus Basten. Der 5 MHz-Kicker des FRANZ-Projektes. 2010.
- [2] L.P. Chau. Hf deflektor. Technical report, 2011.
- [3] Y. C. Nie, L. P. Chau, H. Podlech, O. Meusel, U. Ratzinger, et al. Scaled Model for 5-MHz Bunch Chopper used in Frankfurt Neutron Source FRANZ. Technical report, 2010.
- [4] L.P. Chau, O. Meusel, U. Ratzinger, A. Schempp, K. Volk, M. Heil. The FRAnkfurt Neutron Source at the Stern-Gerlach-Zentrum (FRANZ). 2006.
- [5] John D. Jackson. *Klassische Elektrodynamik*. Walter de Gruyter, 2006.
- [6] Prof. Dr. Holger J. Podlech. *Supraleitung in Beschleuniger- und Fusionstechnologie*. 2010.
- [7] Winfried Posselt. *Aufbau eines Nachchoppers am Garching Tandembeschleuniger*. 1984.
- [8] C. Wiesner, L.P. Chau, H. Dinter, M. Droba, O. Meusel, I. Mueller, D. Noll, U. Ratzinger. Chopping High Intensity Proton Beams using a pulsed Wien Filter. 2012.
- [9] Daniel Noll, L. P. Chau, M. Droba, H. Podlech, O. Meusel, U. Ratzinger. Rebuncher Cavities for the FRANZ Bunch Compressor. 2010.
- [10] T. Kanessue, L.P. Chau, D. Noll, O. Meusel, U. Ratzinger. Dipole Magnet Design for a Bunch Compressor. 2012.
- [11] L. P. Chau, M. Droba, O. Meusel, D. Noll, U. Ratzinger, C. Wiesner. Bunch Compressor for Intense Proton Beams. 2010.
- [12] U. Ratzinger, L. P. Chau, H. Dinter, M. Droba, M. Heilmann, N. Joshi, D. Mäder, A. Metz, O. Meusel, I. Müller, Y. Nie, D. Noll, H. Podlech, R. Reifarth, H. Reichau, A. Schempp, S. Schmidt, W. Schweizer, K. Volk, C. Wagner, C. Wiesner. The Frankfurt Neutron Source FRANZ. 2010.
- [13] U. Ratzinger, M. Basten, L. P. Chau, H. Dinter, M. Droba, M. Heilmann, M. Lotz, D. Mäder, O. Meusel, I. Müller, Y. Nie, D. Noll, H. Podlech, A. Schempp, W. Schweizer, K. Volk, C. Wiesner, C. Zhang. The Driver LINAC of the Neutron Source FRANZ. 2011.