

Masterarbeit

Thomas Wamsat

Entwicklung und Aufbau einer Schaltung zur
Bestimmung der Elektronenbündellänge im
Linearbeschleuniger über verschiedene Moden
eines Resonators

Thomas Wamsat

Entwicklung und Aufbau einer Schaltung zur
Bestimmung der Elektronenbündellänge im
Linearbeschleuniger über verschiedene Moden eines
Resonators

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung
im gemeinsamen Studiengang Mikroelektronische Systeme
am Fachbereich Technik
der Fachhochschule Westküste
und
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Ralf Wendel
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. Hans-Dieter Schütte

Abgegeben am 9. Dezember 2011

Thomas Wamsat

Thema der Masterarbeit

Entwicklung und Aufbau einer Schaltung zur Bestimmung der Elektronenbündellänge im Linearbeschleuniger über verschiedene Moden eines Resonators

Stichworte

Detektor, Resonator, Moden, Filter, Richtkoppler, Ausgangskennlinien, Messfehler, Fehlerbestimmung, minimale Bunchlänge

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird eine Schaltung entworfen, um die Elektronenbündellänge im Linearbeschleuniger zu bestimmen. Des Weiteren wird der mathematische Hintergrund hierzu erläutert und die minimal bestimmbare Bunchlänge bedingt durch die Messungenauigkeit ermittelt.

Thomas Wamsat

Title of the master thesis

Development and realization of a front-end electronics for the determination of the electron bunch length in a linear accelerator with different modes of a resonator

Keywords

Detector, resonator, modes, filter, directional coupler, output characteristics, measurement error, error determination, minimal bunch length.

Abstract

Within this work a circuit is designed to determine the electron bunch length in a linear accelerator. Furthermore, this explains the mathematical background and calculates the minimum identifiable bunch length determined by the measurement uncertainty.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Verzeichnis der Abkürzungen	vi
Einleitung	1
1 Grundlagen	2
1.1 Linearbeschleuniger FLASH	2
1.2 Bunchlänge	4
2 Entwicklung der Hardware zur Amplitudenbestimmung	8
2.1 Voraussetzungen	8
2.1.1 DESY Analog-Digital-Wandler	8
2.1.2 Beschleuniger Zeitsystem.....	9
2.1.3 Ausgangsspektrum Resonator.....	9
2.2 Trennung der Frequenzen.....	10
2.2.1 Richtkoppler	10
2.2.2 Bandpassfilter	11
2.3 Konzept Amplitudenbestimmung	14
2.3.1 RF Detektor.....	15
2.3.2 „Track and Hold“	19
2.3.3 „Levelshift“	20
2.4 Schaltplan.....	21
2.5 Layout.....	21
2.6 Gehäuse	23
2.7 Überprüfung der HF-Anpassung	25
3 Charakterisierung der Hardware	27
3.1 Ausgangskennlinien Detektorschaltung	27
3.2 Funktionstest Detektorschaltung	29
4 Bestimmung der Bunchlänge	34
4.1 Rechnung im Idealfall.....	34
4.2 Bestimmung der minimal messbaren Bunchlänge.....	36
4.2.1 Minimal messbare Bunchlänge bei gaußförmiger Ladungsverteilung.....	39
4.2.2 Minimal messbare Bunchlänge bei rechteckförmiger Ladungsverteilung	44
4.3 Unterscheidung von gaußförmiger und rechteckförmiger Ladungsverteilung	46
5 Vergleich mit anderen Verfahren	50
6 Zusammenfassung	52

7	Ausblick	53
	Anhang A Gesamtkonzept	54
	Anhang B Schaltplan	55
	Anhang C Layout.....	56
	Anhang D Bauteilübersicht	57
	Anhang E Bemaßung Einschub.....	58
	Anhang F Messdaten Ausgangskennlinien.....	60
	Anhang G Matlab Code.....	61
	Anhang H Graphen zur Bestimmung der minimalen Bunchlänge.....	71
	Anhang J partielle Ableitungen	74
	Literaturverzeichnis	76
	Danksagung	77

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1 Resonator im FLASH	3
Bild 1.2 Schematischer Aufbau vom FLASH [2].....	4
Bild 1.3 Halbwertsbreite bei gaußförmiger Verteilung [4].....	6
Bild 2.1 Ausgangsspektrum des Resonators [3]	9
Bild 2.2 Richtkoppler und Filter	10
Bild 2.3 Frequenzgang 1,3GHz Bandpassfilter	12
Bild 2.4 Frequenzgang 3,24GHZ Bandpassfilter.....	13
Bild 2.5 Frequenzgang 5,07GHz Bandpassfilter	13
Bild 2.6 Mode bei 1,3GHz im Zeitbereich mit 0,34nC Ladung	14
Bild 2.7 Konzept Leiterplatte.....	15
Bild 2.8 Mode bei 1,3GHz im Frequenzbereich, Ladung 0,4nC	16
Bild 2.9 Mode bei 3,24GHz im Frequenzbereich, Ladung 0,4nC	16
Bild 2.10 Mode bei 5,07GHz im Frequenzbereich, Ladung 0,4nC	16
Bild 2.11 Ausgangskennlinie AD8318 bei 1,3GHz.....	19
Bild 2.12 Differenzverstärker	20
Bild 2.13 Layout Oberseite	22
Bild 2.14 Weißblechgehäuse L-Stück Vorderseite.....	23
Bild 2.15 Weißblechgehäuse L-Stück Rückseite.....	23
Bild 2.16 Stromlaufplan 19" Einschub	24
Bild 2.17 komplettes Front-End.....	25
Bild 2.18 Reflexionsfaktor S11 Front-End	26
Bild 3.1 Messaufbau zur Bestimmung der Ausgangskennlinien.....	27
Bild 3.2 Ausgangskennlinien.....	28
Bild 3.3 Ausgangspuls 1,3GHz AWG, $\tau = 28,8\text{ns}$	30
Bild 3.4 Ausgangspuls 1,3GHz AWG, $\tau=100\text{ns}$	31
Bild 3.5 Rechteckspannung als Taktsignal	32

Bild 3.6 Messaufbau zur Pulsmessung	32
Bild 3.7 Antwort der Detektorschaltung auf 1,3GHz Puls	32
Bild 3.8 falsch eingestellte Verzögerung	33
Bild 4.1 Messaufbau zur Bestimmung des Fehlers.....	36
Bild 4.2 Signale der Fehlerbestimmung	37
Bild 4.3 Standardabweichungen der Ausgangsspannung.....	41
Bild 4.4 Ablauf der Rechnung zur Ermittlung der minimalen Bunchlänge	42
Bild 4.5 Fehlerkurven gaußsche Ladungsverteilung, Eingangsleistung $0\text{dBm} < P < 10\text{dBm}$	43
Bild 4.6 Fehlerkurven rechteckförmige Ladungsverteilung, Eingangsleistung $0\text{dBm} < P < 10\text{dBm}$	46
Bild 4.7 Gauß-Rückrechnung mit Gauß-Amplituden.....	48
Bild 4.8 Gauß-Rückrechnung mit Rect-Amplituden	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Charakteristiken Narda Richtkoppler	11
Tabelle 2.2 Bandbreiten der TM _{0x} Moden	12
Tabelle 2.3 Bandbreiten der Filter	12
Tabelle 2.4 Dämpfungen des Tunnelkabels [8]	17
Tabelle 2.5 Dämpfungen der Messleitung	17
Tabelle 2.6 Wellenwiderstände koplanare Leitung	22
Tabelle 4.1 Eigenschaften des Resonators [8]	35
Tabelle 4.2 Standardabweichungen der Ausgangsspannungen	38
Tabelle 4.3 minimale Bunchlänge in Abhängigkeit des Eingangsleistungsbereiches....	44
Tabelle 4.4 Spannungsamplituden mit Fehler	47

Verzeichnis der Abkürzungen

FHW	Fachhochschule Westküste Heide
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
FLASH	Freier-Elektronen-Laser Hamburg
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron
T&H	Track and Hold
Bunch	Elektronenbündel
FEL	Freie-Elektronen-Laser
CCD	Charge-Coupled Device (ladungsgekoppeltes Bauteil)

Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Front-End zu entwickeln, mit dessen Hilfe eine Bestimmung der durch einen Resonator erzeugten Spannungsamplituden möglich ist, um mit diesen auf die Länge des den Resonator anregenden Elektronenbündels, dem sogenannten Bunch, zu schließen.

Hierzu werden im ersten Kapitel vorerst einige Grundlagen über Elektronenbeschleuniger und über die Theorie zur Ermittlung der Bunchlänge aufgezeigt. Das zweite Kapitel befasst sich mit der Entwicklung der Elektronik zur Amplitudenbestimmung, dies umfasst die Vorstellung des Konzepts sowie die Beschreibung der einzelnen Komponenten. Weiterhin werden hier der Schaltplan und das Layout der Leiterplatte sowie die Konstruktion der verwendeten Gehäuse beschrieben. Das dritte Kapitel definiert die Charakteristik des entwickelten Front-Ends und zeigt auf, dass die Funktion erfüllt wird. Im vierten Kapitel wird als erstes das Verfahren zur Bestimmung der Bunchlänge vorgestellt. Im Anschluss wird die durch das Rauschen der Elektronik minimale bestimmbare Bunchlänge ermittelt und weiterhin untersucht, ob eine Unterscheidung der Form des anregenden Bunches möglich ist. Das fünfte Kapitel stellt weitere Verfahren zur Bestimmung der Bunchlänge mit deren Kerneigenschaften kurz vor. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

1 Grundlagen

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY betreibt sowohl Ringbeschleuniger zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung, als auch Linearbeschleuniger zur Erzeugung hoch intensiver Photonenstrahlung durch Elektronen. Diese Strahlung wird für Untersuchungen in verschiedensten Wissenschaftsbereichen genutzt, z.B. in der Festkörperphysik, der Chemie, der Materialwissenschaften, der medizinischen Diagnostik und der Molekularbiologie.

Im Ringbeschleuniger bleibt das beschleunigte Elektronenbündel, der sogenannte Bunch, bis zu 10 Stunden im Ring erhalten, wohingegen der Bunch im Linearbeschleuniger nur einmalig zur Erzeugung von kohärenter Strahlung verwendet werden kann. Voraussetzung für einen konstanten gleichmäßigen Betrieb ist die gleichförmige Erzeugung von Bunchen im Linearbeschleuniger. Weltweit gibt es an verschiedenen Standorten sogenannte FEL (Freie-Elektronen-Laser), zum Beispiel in Kalifornien am „Stanford Linear Accelerator Laboratory (SLAC)“, am SPring-8 in Japan und bald auch am DESY in Deutschland den „European XFEL“, welcher sich derzeit im Bau befindet und voraussichtlich 2015 in Betrieb genommen wird.

Die laufenden FEL haben verschiedenste Methoden, die Bunchlänge im Beschleuniger zu bestimmen, die meisten sind jedoch destruktiv, was bedeutet, dass der Bunch durch die Messung zerstört wird. Eine nicht destruktive Methode ist die Verwendung von Synchrotronstrahlung in einem Dipolmagneten und Messung mittels einer sogenannten Streak-Kamera [1]. Dieses Verfahren ist sehr aufwendig und nur von Experten durchführbar, außerdem ist mit dem Verfahren keine automatische Bestimmung möglich. Wünschenswert für den European XFEL ist eine Bestimmung der Bunchlänge ohne Beeinflussung des laufenden Betriebs, um direkt während des Betriebs Unregelmäßigkeiten erkennen zu können. Der Linearbeschleuniger FLASH (Freie-Elektronen-Laser in Hamburg) am DESY steht zum Test vieler Verfahren der Diagnostik zur Verfügung.

1.1 Linearbeschleuniger FLASH

Auf die genaue Beschreibung der Funktionsweise von Beschleunigern wird im Detail verzichtet, da dies nicht maßgeblich für diese Arbeit ist. Doch sollte kurz erwähnt sein,

wie ein Bunch erzeugt wird. Am Anfang eines solchen Beschleunigers befindet sich eine Photokathode und ein Lasersystem. Trifft nun der Laser nach einer vorgegebenen zeitlichen Struktur auf die Photokathode, so werden Elektronenbündel freigesetzt, die in etwa der zeitlichen Struktur des Laserpulses entsprechen. Da sich die Kathode in einem Hohlraumresonator befindet, in dem gleichzeitig eine hohe elektrische Feldamplitude anliegt, werden die Elektronenbündel beschleunigt. Durch weitere Beschleunigerstrukturen werden hohe kinetische Elektronenenergien erreicht. Am Ende werden die hochenergetischen Elektronen in sogenannten Undulatoren zur Erzeugung von kohärenter Photonenstrahlung verwendet.

Im FLASH gibt es ein Verfahren zur Bestimmung des Dunkelstroms, welcher durch freie parasitäre Elektronen erzeugt wird. Hierzu wurde in das Strahlrohr von FLASH ein Resonator eingefügt, in welchem durch die passierenden Elektronen verschiedene Moden angeregt werden. In Bild 1.1 ist der Resonator im eingebauten Zustand im FLASH zu sehen.

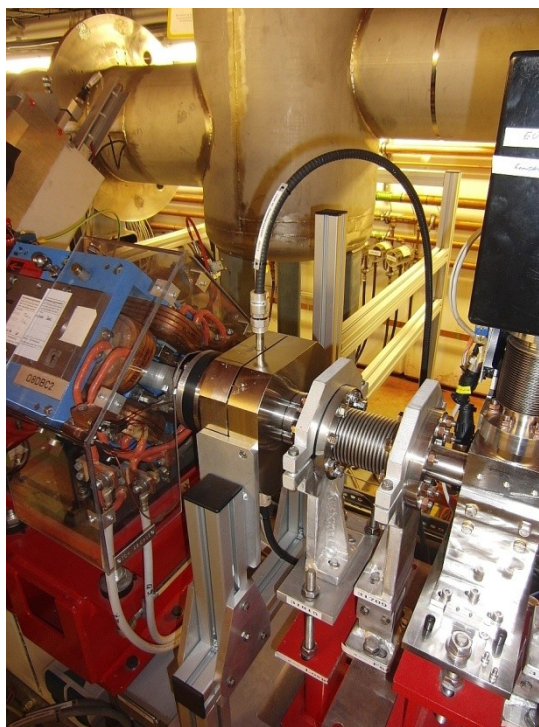


Bild 1.1 Resonator im FLASH

An der Ober- und Unterseite sind die Hochfrequenz-Kabel an die Antenne im Resonator angeschlossen, um das Signal außerhalb des Beschleunigertunnels während des Strahlbetriebes aufnehmen zu können.

In Bild 1.2 ist ein Überblick über den Gesamtaufbau von FLASH dargestellt, der Resonator befindet sich an der Stelle des ersten grünen Rechtecks, welches mit „Diagnostics“ gekennzeichnet ist, hinter dem ersten Bunchkompressor.

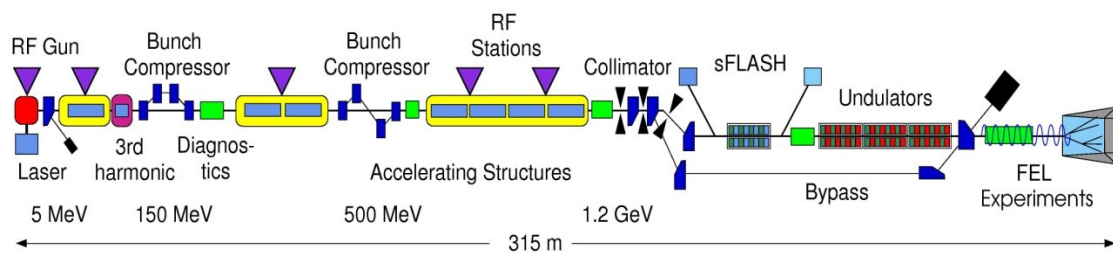


Bild 1.2 Schematischer Aufbau vom FLASH [2]

Beim Betrieb des Resonators zeigte sich, dass, sobald ein Bunch den Resonator passiert, auch noch viele andere Frequenzen entstehen. Außerdem fand man heraus, dass diese für die Bestimmung der Bunchlänge benutzt werden könnten, dazu mehr im nächsten Kapitel.

Beim European XFEL wird der Resonator vor dem ersten Beschleunigungsmodul eingesetzt werden, da die Bunchlänge nämlich nicht exakt der den Bunch erzeugenden Laserpulslänge entspricht. Insofern ist es an dieser Stelle wichtig die Bunchlänge zu bestimmen, um eine optimale Einstellung der Phase des Lasers und des Beschleunigerfeldes zu erreichen, damit der Bunch schon optimale Eigenschaften vor der ersten Einheit zur Verkürzung der Bunchlänge, dem sogenannten Bunchkompressor, besitzt.

Typischerweise werden Bunchlängen von einer zeitlichen Länge, also einer Verweildauer bedingt durch die physikalische Länge, von 5ps bis 18ps vor dem ersten Bunchkompressor erreicht, dies entspricht nach Gl. (1.1)

$$s = ct \quad (1.1)$$

einer physikalischen Länge von ca. 1,5mm bis 5,4mm, da der Strahl schon fast die Lichtgeschwindigkeit erreicht hat.

1.2 Bunchlänge

Beim Betrieb des Resonators werden verschiedene Moden erzeugt. Nach [3] sind die ersten drei Moden zur Bunchlängenbestimmung die TM_0x Moden (mit $x=1, 2$ und 3) bei den Frequenzen 1,3GHz, 3,24GHz und 5,07GHz. Bei Betrachtung der folgenden Gleichungen (1.2), (1.3), (1.4) und (1.5) wurde klar, dass es möglich sein muss, die Bunchlänge unter Verwendung der Amplituden der Moden zu bestimmen.

$$U_0 = qSF(\omega, \sigma) \quad (1.2)$$

Gl. (1.2) steht für die erzeugte Amplitude des Resonators mit der Sensitivität S und anregender Ladung q . Die Ladung q ist ein Maß für die Anzahl der Elektronen in einem Bunch. Außerdem ist die Amplitude abhängig von der Form bzw. der Ladungsverteilung des anregenden Bunches parallel zur Bewegungsrichtung, welche durch den Formfaktor F beschrieben wird. Die Sensitivität im Resonator zur Messung der Frequenzen ist durch Gl. (1.3) beschrieben.

$$S = \frac{\omega}{2} \sqrt{\frac{Z}{Q_{ext}} \frac{R}{Q}} \quad (1.3)$$

Das ω ist die Kreisfrequenz des Modes, Z ist die Leitungsimpedanz und Q_{ext} die externe Güte der Ankopplung der Antenne. $\frac{R}{Q}$ beschreibt die normalisierte „shunt“ Impedanz. Eine Gleichung für den Formfaktor ist in Gl. (1.4) angegeben

$$F(\omega, \sigma_z) = \frac{\sin(\omega\sigma_z/2c)}{\omega\sigma_z/2c} \quad (1.4)$$

Diese Gleichung bestimmt den Formfaktor für eine rechteckige Ladungsverteilung im Bunch, im Unterschied zu Gl. (1.5), welche den Formfaktor für eine gaußförmige Ladungsverteilung angibt.

$$F(\omega, \sigma_z) = e^{(-\frac{\omega^2 \sigma_z^2}{2c^2})} \quad (1.5)$$

Das σ_z in Gl. (1.4) und Gl. (1.5) beinhaltet die Bunchlänge in Form der Standardabweichung, welche sich in die Länge der Halbwertsbreite FWHM (vgl. Bild Bild 1.3) der Verteilung umrechnen lässt.

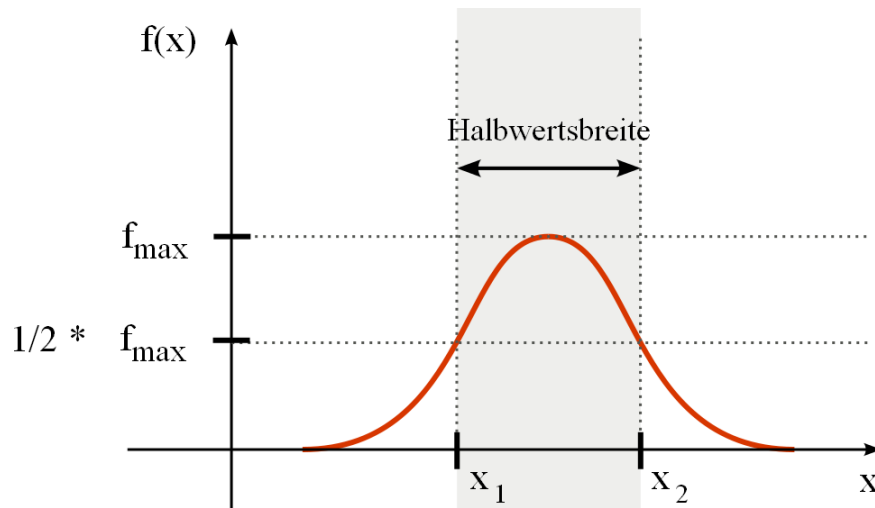


Bild 1.3 Halbwertsbreite bei gaußförmiger Verteilung [4]

Für die rechteckige Verteilung für σ_z gilt

$$\sigma_r = \frac{FWHM}{\sqrt{12}} \quad (1.6)$$

und für gaußförmige Verteilung

$$\sigma_g \approx \frac{FWHM}{2,36} \quad (1.7)$$

Setzt man nun Gl. (1.2) für zwei verschiedene Frequenzen wie folgt ins Verhältnis, ist die Bestimmung der Bunchlänge durch Umstellen nach σ wie folgt möglich

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{S_1 F_1}{S_2 F_2} \quad (1.8)$$

Bei einer gaußförmigen Ladungsverteilung im Bunch gilt dann für σ_g

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{\ln \frac{U_1 S_2}{U_2 S_1}}{\omega_2^2 - \omega_1^2}} * 2c^2 \quad (1.9)$$

Bei einer rechteckigen Ladungsverteilung ist das Umstellen nach σ bei Betrachtung von Gl. (1.4) nicht ohne eine Approximation durchführbar, da das σ sowohl im Argument vom Sinus als auch im Nenner steht. Um dennoch eine Lösung zu erhalten wurde die zweite Näherung der Taylorreihe für den Sinus verwendet, die in diesem Fall lautet [5]

$$\frac{\sin x}{x} \approx 1 - \frac{x^2}{6} \quad (1.10)$$

Um zu prüfen, ob die Näherung akzeptabel ist, wurde der Quotient aus dem korrekten Formfaktor und der Näherung mit den maximal auftretenden Werten bestimmt. So ist $x = \frac{\omega\sigma_z}{2c}$ mit $\omega = 2\pi * 5,07GHz$ die höchste Frequenz und $\sigma_z = 5,3mm$ die größte auftretende Bunchlänge, dann ergibt sich

$$1 - \frac{\frac{\sin x}{x}}{1 - \frac{x^2}{6}} = 52,994 * 10^{-6} \quad (1.11)$$

Die Abweichung der Näherung ist wie aus dem Ergebnis in Gl. (1.11) ersichtlich vernachlässigbar klein.

Durch Anwendung der Näherung auf Gl. (1.8) mit Gl. (1.4) für einen Formfaktor für rechteckförmige Ladungsverteilung ergibt sich folgender Ausdruck

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{6 \frac{U_1 S_2}{U_2 S_1} - 6}{\frac{U_1 S_2}{U_2 S_1} \left(\frac{\omega_2}{2c}\right)^2 - \left(\frac{\omega_1}{2c}\right)^2}} \quad (1.12)$$

Die Bunchlänge lässt sich somit durch Bildung verschiedener Verhältnisse berechnen. Es bleibt herauszufinden, ob eine Unterscheidung zwischen rechteckiger und gaußförmiger Ladungsverteilung im Bunch mit der hier entwickelten Elektronik möglich ist.

2 Entwicklung der Hardware zur Amplitudenbestimmung

Zuerst werden in diesem Kapitel einige gegebene Daten und Schnittstellen beschrieben, danach der Aufbau und die Auswahl der gewählten Komponenten und Bauteile und letztlich das fertige Front-End definiert.

2.1 Voraussetzungen

Für die Hardware stehen 2HE in einem 19“ Rack zur Verfügung. Ebenso endet das Kabel vom Resonator an diesem Rack. Außerdem stehen mehrere Kanäle eines Analog-Digital-Wandlers (ADC) und TTL-Signale aus der Zeitsteuerung des Beschleunigers zur Verfügung.

2.1.1 DESY Analog-Digital-Wandler

Der DESY ADC ist ein am DESY entwickeltes System in VME Standard. Es hat acht Kanäle, die über LEMO-Buchsen kontaktiert werden. Die wichtigsten Daten sind in Kürze aufgelistet [6]:

Auflösung:	14bit
Abtastrate:	9MHz
wählbarer Eingangsbereich:	+/- 1V, +/- 5V
wählbare Eingangsimpedanz:	50Ω, 1kΩ

Die Daten werden von einem Server über das DESY Netzwerk zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung gestellt.

2.1.2 Beschleuniger Zeitsystem

Zur Beschleunigung sowie zur Erzeugung der Bunche werden hochfrequente Felder benutzt. Um dieses zu ermöglichen ist eine synchrone Steuerung aller beteiligten Komponenten notwendig. Als Basis hierzu dient ein Muttergenerator, der eine Frequenz vom 9MHz erzeugt.

Die Bunchwiederholrate, also in welchem Abstand die Bunche beschleunigt werden, kann in unterschiedliche Teiler von 1MHz eingestellt werden. Die Beschleunigung erfolgt innerhalb einer sogenannten Bunchtrainlänge, von bis zu etwa 0,8ms. Die Makrofrequenz, auch Bunchtrainwiederholrate, von 10Hz gibt an, mit welcher Frequenz der Bunchtrain wiederholt wird. Ab steigender Flanke bis Abfall des Rechteckpulses der Makrofrequenz können bis zu 800 Bunche in einem Bunchtrain mit der Bunchwiederholrate beschleunigt werden, während der anderen Zeit sind keine Bunche im Beschleuniger.

2.1.3 Ausgangsspektrum Resonator

Um einen Überblick zu erhalten, welche Frequenzen das Ausgangsspektrum des Resonators nach Anregung durch einen Bunch aufweist, wurde das Ausgangsspektrum des Resonators mit einem Spektrumanalyzer aufgezeichnet und ist in Bild 2.1 dargestellt.

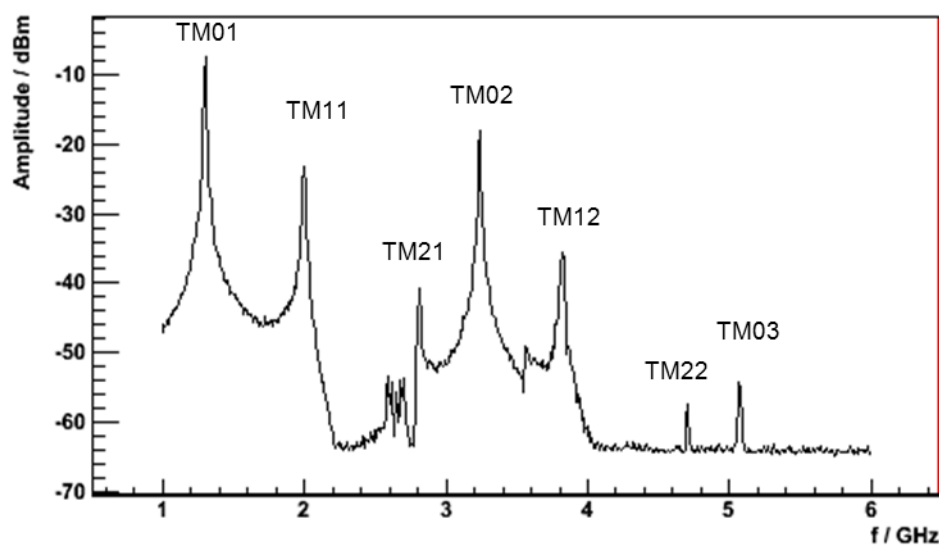


Bild 2.1 Ausgangsspektrum des Resonators [3]

Wie schon erwähnt, sind nur die TM01, TM02 und TM03 Moden für die Bestimmung der Bunchlänge interessant, da die anderen Modenamplituden zusätzlich von der Position der Elektronen abhängig sind. Diese Positionsabhängigkeit würde eine Messung der Bunchlänge zusätzlich erschweren. Also ist es notwendig, nur die positionsunabhängigen Moden aus dem Spektrum zu selektieren.

2.2 Trennung der Frequenzen

Um die Amplituden der einzelnen Frequenzen bestimmen zu können ist es wichtig, die Frequenzen voneinander zu trennen und zu filtern.

2.2.1 Richtkoppler

Die Idee ist, Richtkoppler zur Aufspaltung des Frequenzbereiches zu benutzen. Der Vorteil hierbei ist, dass eventuelle Reflexionen aufgrund der Funktionsweise von Richtkopplern keinen Einfluss auf die anderen Frequenzen haben können und viel wichtiger, auch nicht zurück in den Resonator gelangen und somit das Signal verfälschen können. Außerdem ist die Anpassung an 50 Ohm des Resonators sicher gegeben.

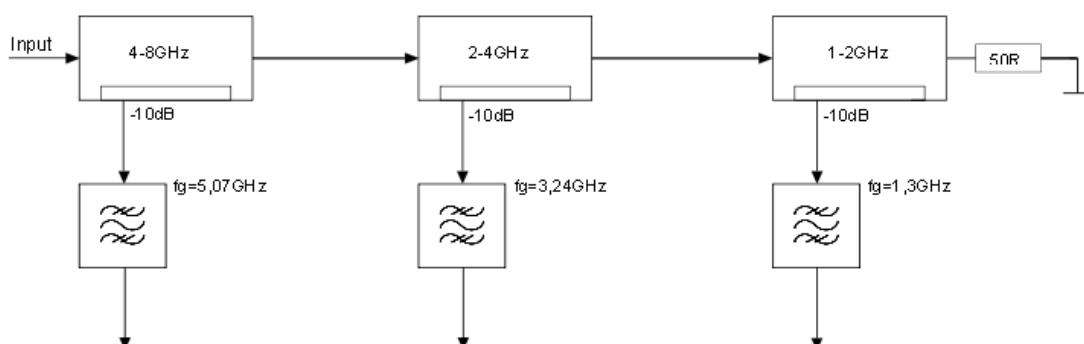


Bild 2.2 Richtkoppler und Filter

Durch die Richtkoppler werden die Frequenzbänder vorselektiert, die in Bild 2.2 eingezeichneten Filter werden im nächsten Kapitel näher beschrieben Eine Übersicht

über die verwendeten Richtkoppler der Firma Narda mit den wichtigsten Daten ist in Tabelle 2.1 aufgezeigt.

Tabelle 2.1 Charakteristiken Narda Richtkoppler

Model	4012C-10	4013C-10	4014C-10
untere Frequenz (GHz)	1,0	2,0	4,0
obere Frequenz (GHz)	2,0	4,0	8,0
Kopplung (dB)	10 +/- 1,25	10 +/- 1,25	10 +/- 1,25
Einfügedämpfung (dB)	0,9	0,8	1,0

2.2.2 Bandpassfilter

Um die Leistungen der jeweiligen einzelnen Moden bestimmen zu können und nicht kumulativ dazu die der benachbarten Moden, müssen diese weiter selektiert werden. Hierzu werden Bandpassfilter eingesetzt.

Als möglicher Lieferant für die Filter wurde die Firma K&L microwave empfohlen [7] und speziell auf die dort angebotenen Tubular Filter hingewiesen. Die Filter werden dort nach den Spezifikationen des Kunden gefertigt.

Die Mittenfrequenzen der Filter ergeben sich aus den Frequenzen der einzelnen Moden. Die Bandbreite der Moden wird über die belastete Güte des Resonators und der Frequenz des jeweiligen Modes ermittelt und ist durch folgende Gleichung zu bestimmen:

$$BW = \frac{f}{Q_L} \quad (2.1)$$

Die Güte des Resonators bei der jeweiligen Frequenz ist durch den Entwickler des Resonators ermittelt worden. Daraus ergeben sich die in Tabelle 2.2 aufgelisteten Bandbreiten der Moden. [8]

Tabelle 2.2 Bandbreiten der TM0x Moden

Mode	Mittenfrequenz f	Güte Q_l	Bandbreite BW
TM01	1,3GHz	117,763	≈11MHz
TM02	3,24GHz	337,226	≈10MHz
TM03	5,07GHz	325,84	≈15MHz

Die minimale Bandbreite der K&L Filter beträgt laut Hersteller 4% der Mittenfrequenz, die Bandbreiten ergeben sich dann wie in Tabelle 2.3 aufgelistet.

Tabelle 2.3 Bandbreiten der Filter

Mittenfrequenz f	Bandbreite $BW_{4\%}$
1,3GHz	≈52MHz
3,24GHz	≈130MHz
5,07GHz	≈203MHz

Die Bandbreiten der Filter sind höher als die für die Moden benötigte Bandbreite. Wenn man das Spektrum des Resonators in Bild 2.1 betrachtet, ist die Bandbreite der Filter dennoch ausreichend, um die Moden von den umgebenden Frequenzen zu trennen. Die Bandbreite etwas breiter zu wählen sichert außerdem die Funktion des Systems, sollte die Mittenfrequenz durch unvorhersehbare Einflüsse nachgefertigter Resonatoren geringfügig anders sein.

Die Filter wurden mit dem Netzwerkanalyzer Agilent 8753ES vermessen und die Daten mit Matlab visualisiert. Die Frequenzgänge der einzelnen Filter sind nachfolgend abgebildet.

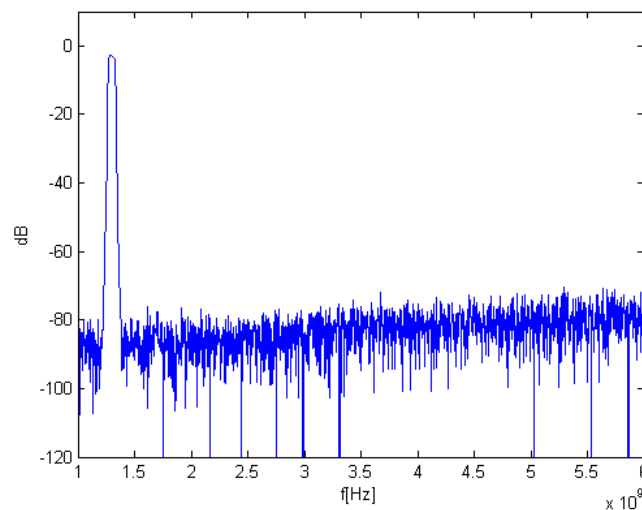
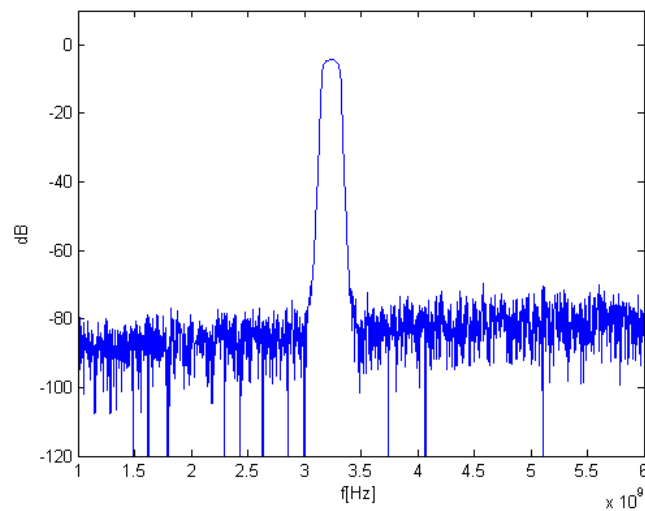
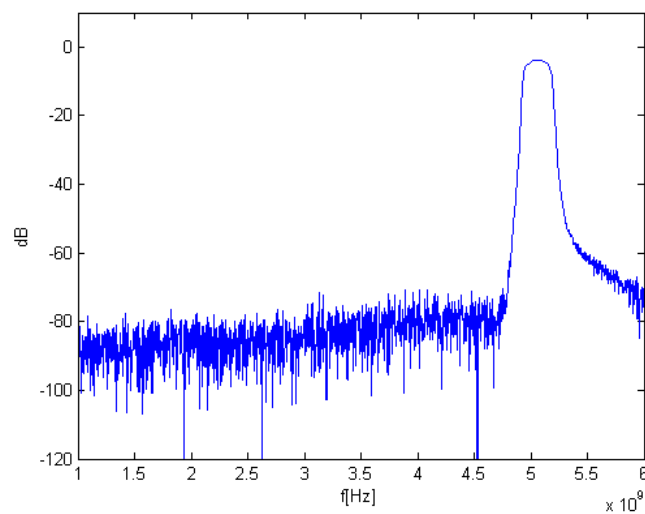


Bild 2.3 Frequenzgang 1,3GHz Bandpassfilter

**Bild 2.4** Frequenzgang 3,24GHz Bandpassfilter**Bild 2.5** Frequenzgang 5,07GHz Bandpassfilter

Es ist zu erkennen, dass alle Filter im Sperrbereich eine Dämpfung um die 80dB aufweisen. Die 80dB sind jedoch die untere Auflösung des Netzwerkanalyzers, was vermuten lässt, dass die Filter eine noch größere Dämpfung aufweisen. Somit sind die jeweiligen benachbarten Moden in jedem Fall ausreichend gedämpft, um eine Bestimmung der einzelnen Moden zu erreichen.

2.3 Konzept Amplitudenbestimmung

Um die Moden zur Bestimmung der Bunchlänge nutzen zu können, müssen die Signale so aufbereitet werden, dass diese vom DESY ADC verarbeitet werden können. Da die Moden im Gigahertz Bereich liegen, ist es nicht möglich, diese direkt mit dem ADC abzutasten. Außerdem soll das Maximum der Amplitude bestimmt werden, das Maximum ist aber nur für einige Nanosekunden vorhanden. Der Mode bei 1,3GHz ist in Bild 3.3 im Zeitbereich abgebildet. Es ist zu erkennen, dass das Signal nach etwa 200ns abgeklungen ist, also nahezu der Rauschwert des genutzten Oszilloskops vor Eintritt der Amplitude erreicht ist und die maximale Amplitude kaum gehalten wird [3].

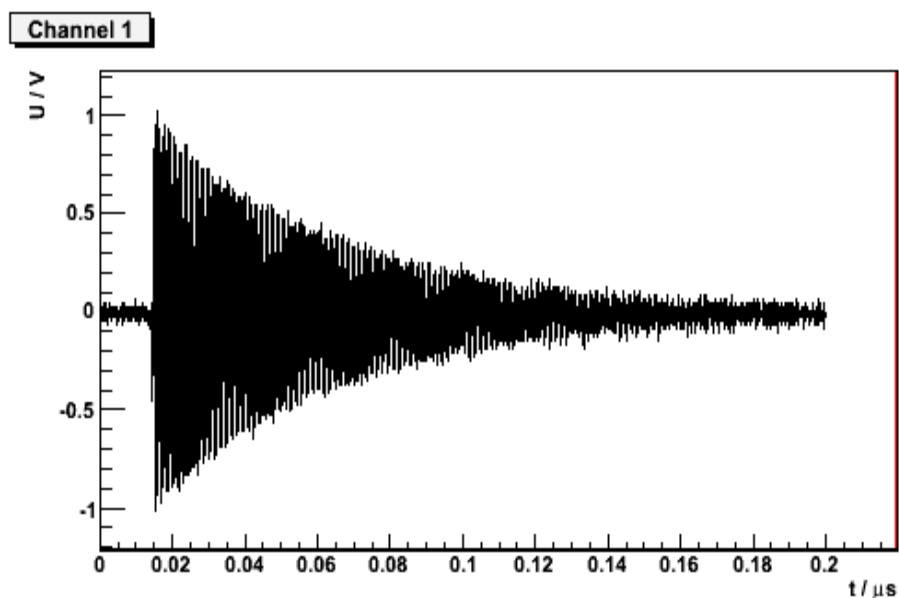


Bild 2.6 Mode bei 1,3GHz im Zeitbereich mit 0,34nC Ladung

Berücksichtigt man die Gegebenheiten aus Kapitel 2.1, so kommt man auf in Bild 2.7 dargestelltes Konzept für die Leiterplatte zur Amplitudenbestimmung.

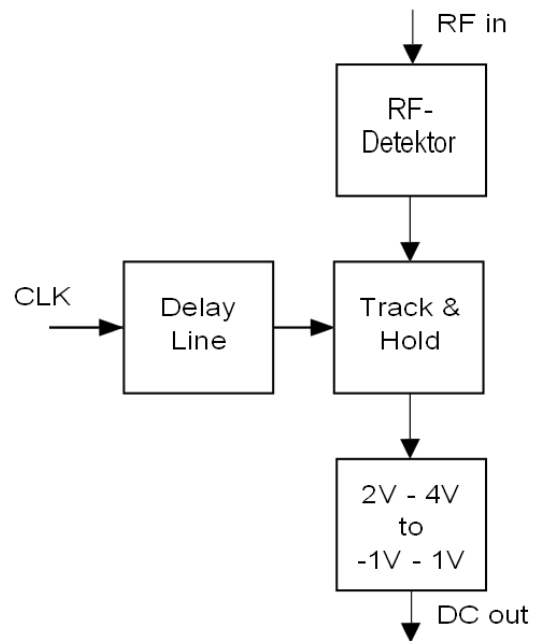


Bild 2.7 Konzept Leiterplatte

Das erste Bauteil nach dem Bandpassfilter ist ein RF-Detektor zur Bestimmung der Eingangsleistung, darauf folgt ein „Track and Hold“-Baustein zur Verlängerung der maximalen Amplitude des Detektors. Ein Verzögerungsglied (Delayline) zum Einstellen des optimalen „Hold“-Zeitpunkts und eine Schaltung zur Anpassung des Pegels an den DESY ADC. Mit dem in Bild 2.2 gezeigten Aufbau ergibt sich zusammen mit Bild 2.7 ein in Anhang A gezeigtes Gesamtkonzept.

Eine genauere Beschreibung der einzelnen Komponenten erfolgt in den folgenden Kapiteln.

2.3.1 RF Detektor

Um einen geeigneten Detektor zu finden muss ermittelt werden, wie groß der zu bestimmende Leistungsbereich ist. Wie in Gl. (1.2) zu erkennen, ist die Amplitude der Moden linear abhängig von der Ladung q . In folgenden Bildern sind die Spektren der einzelnen Moden abgebildet. Das Spektrum wurde jeweils mit einem Echtzeit-Spektrumanalyzer Tektronix RSA9114A am Resonator im FLASH gemessen.

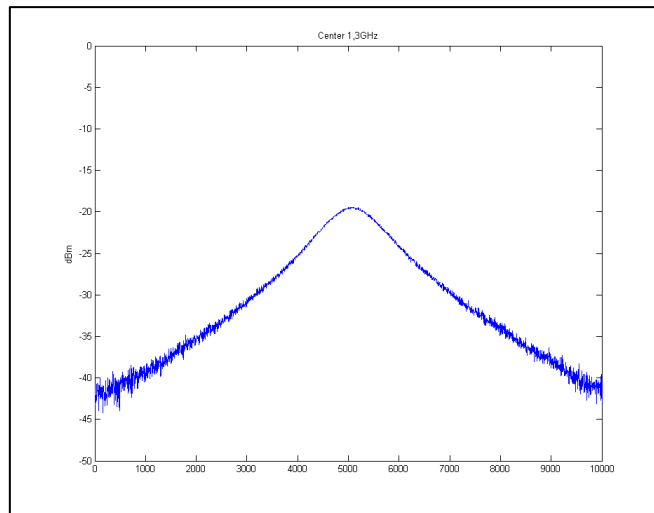


Bild 2.8 Mode bei 1,3GHz im Frequenzbereich, Ladung 0,4nC

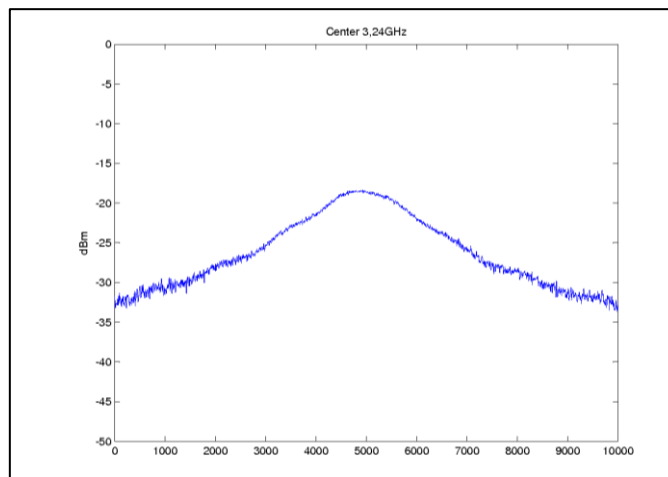


Bild 2.9 Mode bei 3,24GHz im Frequenzbereich, Ladung 0,4nC

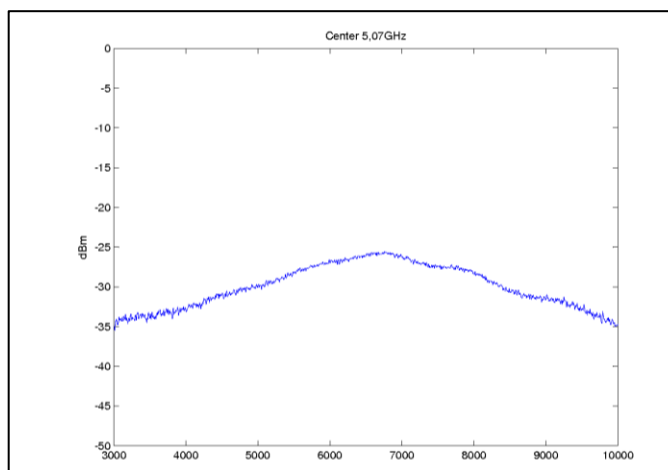


Bild 2.10 Mode bei 5,07GHz im Frequenzbereich, Ladung 0,4nC

Um den Spektrumanalyzer zu schützen, wurde ein 20dB Dämpfungsglied verwendet, die Dämpfungen des 30m Tunnelkabels sind in Tabelle 2.4 aufgelistet.

Tabelle 2.4 Dämpfungen des Tunnelkabels [8]

Frequenz	Dämpfung
1,3GHz	2,34dB
3,24GHz	3,4dB
5,07GHz	5,02dB

Die Dämpfungen für die verwendete Messleitung sind in Tabelle 2.5 angegeben.

Tabelle 2.5 Dämpfungen der Messleitung

Frequenz	Dämpfung
1,3GHz	1,15dB
3,24GHz	2dB
5,07GHz	2,7dB

Somit ergeben sich für die tatsächlich gemessenen Leistungen am Resonator der Moden die in folgender Tabelle aufgelisteten Werte.

Frequenz	Leistung
1,3GHz	3,99dBm
3,24GHz	3,7dBm
5,07GHz	-0,2dBm

Da die Ladung im FLASH zwischen 0,1nC und 3nC variiert werden kann und die Amplitude der Moden nach Gl. (1.2) linear abhängig von der Ladung ist, ist der Leistungsbereich wie folgt zu ermitteln.

$$P_{[W]} = 0,001 * 10^{\frac{P_{[dBm]}}{10}} = 0,001 * 10^{\frac{3,99}{10}} = 2,506mW \quad (2.2)$$

Dementsprechend die Spannung an 50 Ohm

$$U_{0,4nC} = \sqrt{P * R} = \sqrt{2,506mW * 50\Omega} = 354mV. \quad (2.3)$$

Bei einer Ladung von 0,1nC ergibt sich dann eine Spannung von

$$U_{0,1nC} = \frac{U_{0,4nC}}{4} = 88,5mV \quad (2.4)$$

und bei einer Ladung von 3nC eine Spannung von

$$U_{3nC} = U_{0,1nC} * 30 = 2,655V. \quad (2.5)$$

Daraus ergeben sich die Leistungen nach

$$P = 10 \log\left(\frac{U^2}{R} * 1000\right) \quad (2.6)$$

für 0,1nC

$$P_{0,1nC} = 10 \log\left(\frac{(88,5mV)^2}{50\Omega} * 1000\right) = -8,05dBm \quad (2.7)$$

und 3nC

$$P_{3nC} = 10 \log\left(\frac{(2,655V)^2}{50\Omega} * 1000\right) = 21,5dBm. \quad (2.8)$$

Daraus folgt ein Dynamikbereich von

$$P_{3nC} - P_{0,1nC} \approx 30dB. \quad (2.9)$$

Die Rechnung wurde nur für den Mode bei 1,3GHz durchgeführt, durch die lineare Abhängigkeit der Amplitude zur Ladung gilt der Dynamikbereich auch für die anderen Moden.

Für die Bestimmung der Leistung eines Modes wird ein logarithmischer Detektor verwendet, der logarithmisch zum Eingangspegel eine Gleichspannung zwischen 2,2 und ca. 0,5V ausgibt. Der AD8318 von Analog Devices ist ein passender Detektor mit einem Frequenzbereich von 1MHz bis 8GHz, kann also für alle drei Moden eingesetzt werden, die gemessene Ausgangskennlinie ist in Bild 2.11 dargestellt.

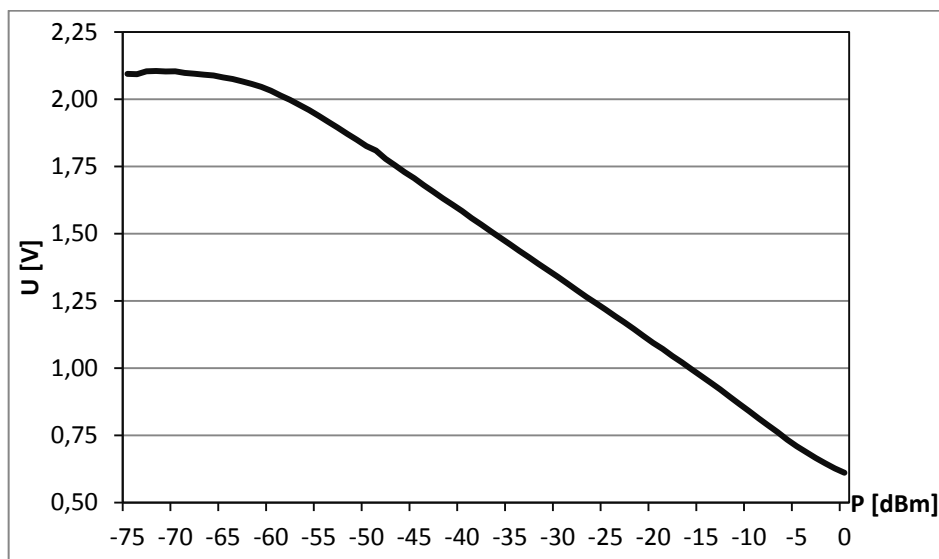


Bild 2.11 Ausgangskennlinie AD8318 bei 1,3GHz

Es ist zu erkennen, dass der Arbeitsbereich des Detektors zwischen -55dBm und -5dBm liegt und somit ist der Dynamikbereich dieses Bauteils für diese Anwendung ausreichend.

2.3.2 „Track and Hold“

Wie in Bild 2.6 zu erkennen, ist das Maximum der Amplitude bedingt durch das Abklingverhalten des Resonators nur von kurzer Dauer vorhanden. Ebenso kurz wird das Maximum am Ausgang des Detektorbausteins sein. Um das Maximum sicher mit dem DESY-ADC bestimmen zu können, muss der Maximalwert des Ausgangssignals verlängert werden.

Dieses soll der „Track and Hold“-Baustein AL1210 der Firma Acullin übernehmen.

Der Baustein wird getaktet und friert das Eingangssignal ab steigender Flanke bis Abfall des Eingangstaktes ein. Zur Taktung wird die im Rack zur Verfügung stehende

Buchwiederholrate von 1MHz verwendet, daraus ergibt sich dann eine Haltezeit von 500ns.

Die Taktfrequenz ist wie bereits erwähnt synchron zu den Bunchen im Beschleuniger. Der Zeitpunkt des Maximums der Moden im Resonator relativ zur Bunchwiederholrate lässt sich nicht genau vorhersagen. Um den „Track“ auf das Maximum der Amplitude legen zu können, wird ein einstellbares Verzögerungsglied vor den Takteingang des „Track and Hold“-Bausteins gesetzt. Der verwendete Baustein DS1023-100 hat eine schrittweise einstellbare Verzögerung vom Eingangssignal zum Ausgang von 1ns mit 255 Schritten, also einer maximalen Verzögerung von 255ns. Bei einer Taktung von 1MHz entspricht dies einer maximalen Verschiebung um etwa ein Viertel der Periode.

2.3.3 „Levelshift“

Wie aus Bild 2.11 ersichtlich, liegt die Ausgangsspannung des Detektors zwischen ca. 0,6V bis 2,2V. Die Differenz der Spannung ist somit klein genug, um den Eingangsbereich vom DESY ADC von +/- 1V zu benutzen. Die Ausgangsspannung muss noch in diesen Bereich verschoben werden. Dies übernimmt ein einfacher Differenzverstärker mit einem Operationsverstärker, dessen Verstärkung eins ist. Durch verändern einer Referenzspannung kann somit der Pegel der Eingangsspannung verschoben werden.

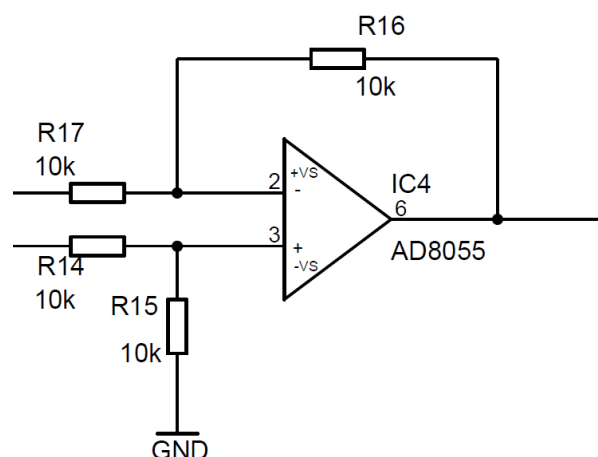


Bild 2.12 Differenzverstärker

Der AD8055 ist ein schneller Operationsverstärker mit einer Einschwingzeit von 20ns und einer Bandbreite von 300MHz. Die Verstärkung des Differenzverstärkers soll eins sein, somit wurde für alle Widerstände ein Wert von $10k\Omega$ gewählt [9].

2.4 Schaltplan

Der Schaltplan wurde mit dem Programm EAGLE entworfen.

Aus den ausgewählten Bauteilen ergibt sich der in Anhang B gezeigte Schaltplan. Für die Spannungsversorgung steht ein Netzteil mit einer Ausgangsspannung von +/- 12V zur Verfügung. Um die benötigte Versorgungsspannung der Bauteile zu erzeugen, werden Linearspannungsregler verwendet, ein 7805 (T1) für +5V und ein 7905 (T2) für -5V. Diese sind im DESY Teilelager im TO Gehäuse vorrätig und sollen hierfür verwendet werden.

Die Peripherie der Bauteile ergibt sich aus den Angaben aus den jeweiligen Datenblättern.

Am Anfang der Schaltung befindet sich gekennzeichnet mit IC1 der logarithmische Detektor. R2 ist laut Datenblattangaben des Detektors für verschiedene Frequenzen unterschiedlich zu wählen, um das Rauschen gering zu halten. Die Bauteile am Eingang des Detektors C9, C10 und R1 realisieren eine Breitbandanpassung an 50Ω . Nach dem Detektor folgt der „Track and Hold“-Baustein (IC2). Die Taktansteuerung erfolgt über den Baustein SY100ELT22 IC3/1, dieser wandelt den TTL-Eingangstakt in einen differentiellen Takt um, da der „Track and Hold“-Baustein diesen am Takteingang erwartet. IC5 ist das einstellbare Verzögerungsglied, die gewünschte Verzögerung wird über die DIL-Schalterleiste S1 binär codiert eingestellt. Hinter dem „Track and Hold“-Baustein befindet sich der Differenzverstärker mit einem AD8055 als Operationsverstärker (IC4). Mit T3, einem LM385 Spannungsregler wird die Referenzspannung für den Differenzverstärker erzeugt. Die Referenzspannung ist über das Potentiometer R21 einstellbar.

Auf dem gesamten Pfad sind Messpunkte, TP1 bis TP8, verteilt.

2.5 Layout

Das Layout der Schaltung ist in Bild 2.13 dargestellt. Eine größere Abbildung sowie die Unterseite des Layouts befinden sich in Anhang C.

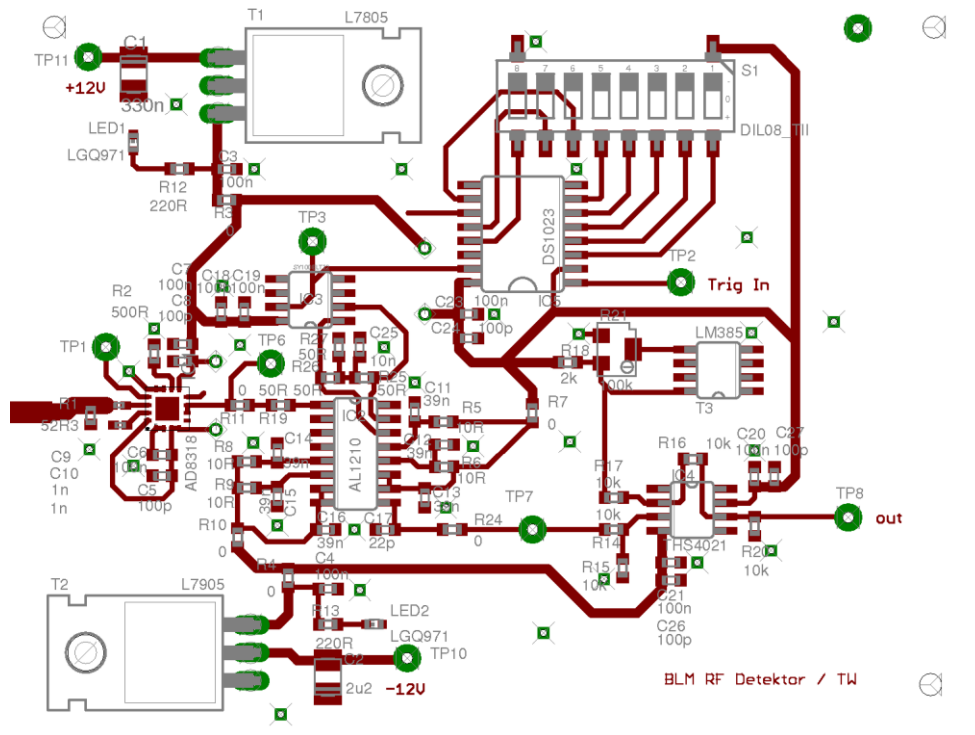


Bild 2.13 Layout Oberseite

Auf der Unterseite der Leiterplatte befinden sich lediglich zwei kurze Leiterbahnen, weshalb auf eine Abbildung an dieser Stelle verzichtet wurde.

Die Leiterplatte wird aus einer doppelseitigen 1,4mm FR4 Leiterplatte gefräst, die Kupferdicke beträgt $35\mu\text{m}$.

Die breite Leiterbahn am Eingang des Detektors ist eine koplanare 50Ω Leitung, welche mit dem Programm TX-Line der Firma AWR berechnet wurde. Für alle drei Frequenzen wird das gleiche Layout der Leiterplatte verwendet. Die koplanare Leitung ist so gewählt, dass für alle drei Frequenzen eine 50Ω Anpassung gegeben ist. Die Leiterbahnbreite beträgt 1,3mm, der Abstand zur umrandenden Massefläche, welche in obigem Bild der Übersicht halber nicht abgebildet ist, beträgt 0,3mm. Daraus ergeben sich Wellenwiderstände für die jeweiligen Frequenzen nach Tabelle 2.6.

Tabelle 2.6 Wellenwiderstände koplanare Leitung

f [GHz]	Z_0 [Ω]
1,3	50,06
3,24	50,02
5,07	50,007

Diese geringe Abweichung der Wellenwiderstände hat keinen elementaren Einfluss auf die Funktion der Leiterplatte und kann somit vernachlässigt werden.

2.6 Gehäuse

Die Leiterplatten wurden zur Abschirmung und zur besseren Handhabung in Weißblechgehäuse eingebaut. An der Vorderseite befindet sich jeweils eine SMA Einbaubuchse, an welche die Bandpassfilter angeschlossen werden. Der Kontakt wurde im Gehäuse direkt auf der Leiterplatte verlötet. An der Rückseite sind zwei Spannungsdurchführungfilter zur Minimierung eventueller Störungen auf der +/- 12V Versorgungsspannung. Für die Signalkontaktierung des Ausgangssignals und des Eingangstakts sind zwei LEMO Lötanschlüsse vorgesehen.

Die Weißblechgehäuse setzen sich zusammen aus zwei L-förmigen Wandstücken und zwei Deckel. Die Bemaßung für die Bohrlöcher der L-Stücke für die Vorder- und Rückseite sind in Bild 2.14 und Bild 2.15 angegeben.

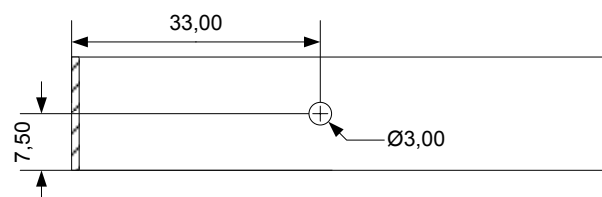


Bild 2.14 Weißblechgehäuse L-Stück Vorderseite

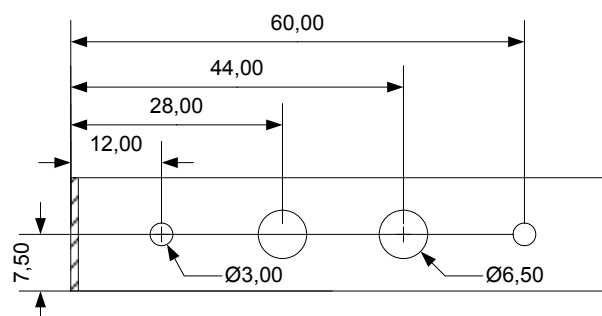


Bild 2.15 Weißblechgehäuse L-Stück Rückseite

Die gesamte Elektronik mit Leiterplatten im Weißblechgehäuse, Richtkoppler und Filter wurde in ein 2HE 19" Zoll Einschub montiert. Zur einfacheren Montage und Arretierung wurde ein Lochblech als Zwischenboden eingebaut.

Um einen eventuellen Hitzestau durch eventuell oberhalb und unterhalb dieses Einschubs im Rack befindliche wärmeerzeugende Gerätschaften zu vermeiden, wurde ein Lüfter eingebaut. Außerdem liegt die Gesamtleistungsaufnahme des Front-Ends bei etwa 10W, was ebenfalls zu einer erheblichen Wärmeerzeugung innerhalb des Einschubs führt. In Bild 2.16 ist der Stromlaufplan für den Einschub skizziert.

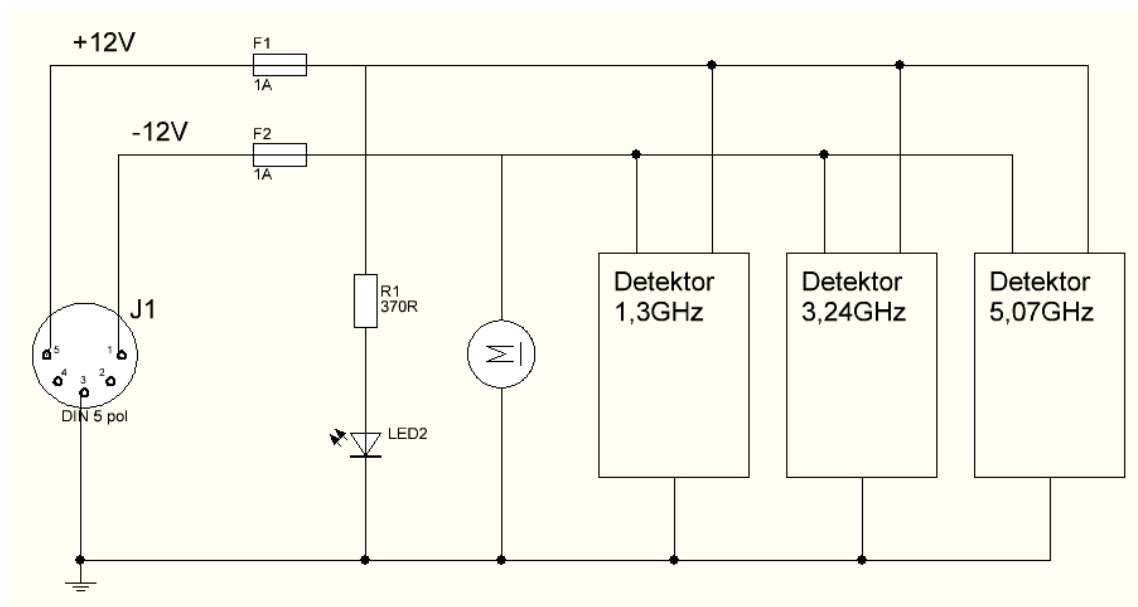


Bild 2.16 Stromlaufplan 19" Einschub

Eine in die Frontplatte eingelassene Kontrollleuchte signalisiert, dass die +12V Versorgungsspannung des Front-Ends eingeschaltet ist, der an der Rückseite des Gehäuses montierte Lüfter dient einerseits zur Belüftung, andererseits ist er ein Indikator dafür, dass die -12V Versorgungsspannung anliegt. Die Sicherungen F1 und F2 dienen dem Schutz des verwendeten externen Netzteils.

Eine Übersicht über die verwendeten Bauteile befindet sich in Anhang D.

Ein Foto des fertiggestellten Aufbaus ist in Bild 2.17 zu sehen.

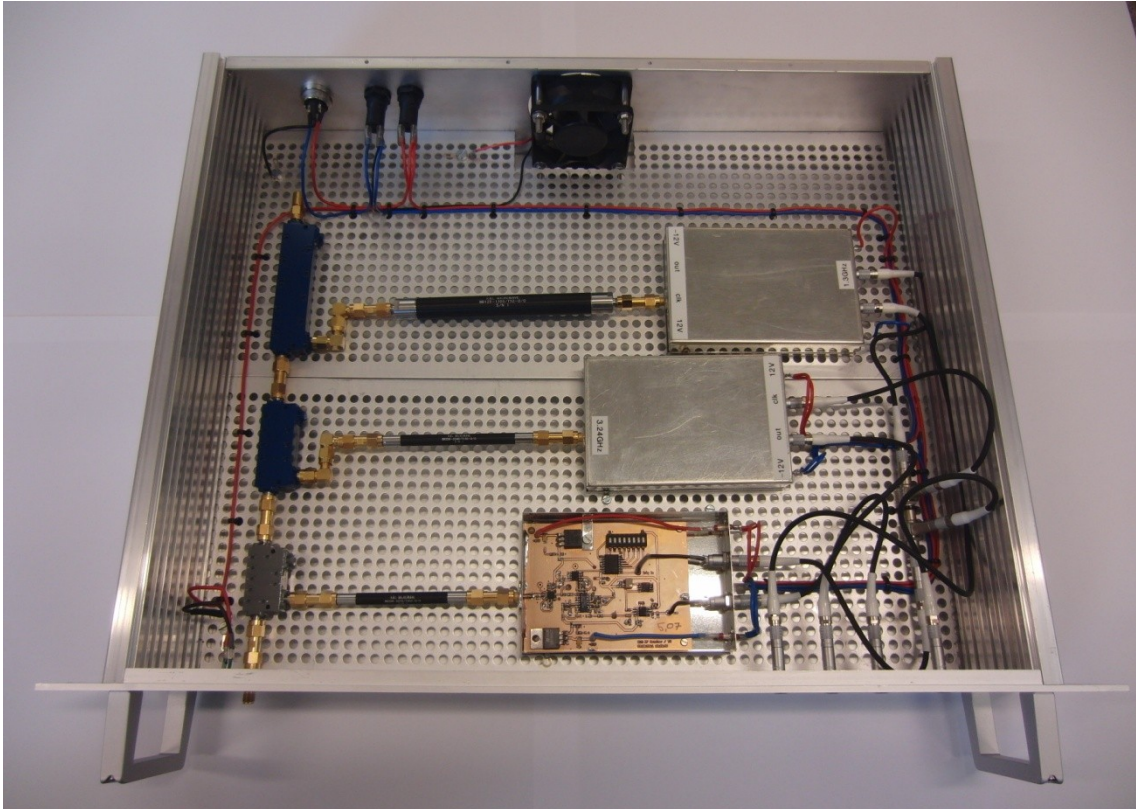


Bild 2.17 komplettes Front-End

Die technischen Zeichnungen für die Bemaßung der Bohrungen im Einschubgehäuse befinden sich in Anhang E.

2.7 Überprüfung der HF-Anpassung

An dieser Stelle wurde mit dem Netzwerkanalyzer Agilent 8753ES die gesamte Anpassung, also der Reflexionsfaktor S_{11} , des Front-Ends bestimmt, um auszuschließen, dass eventuelle Reflexionen den Resonator beeinflussen. Die gesamte Anpassung bedeutet die Vermessung des gesamten Systems mit Leiterplatten, Filtern und Richtkopplern, also der Reflexionsfaktor an der Eingangsbuchse des Einschubgehäuses. Das folgende Bild 2.18 zeigt den Reflexionsfaktor in einem Frequenzbereich von 1GHz bis 5,5GHz.



Bild 2.18 Reflexionsfaktor S11 Front-End

Die Marker 1 bis 3 markieren die Frequenzen der drei verwendeten Moden. An allen drei Markern weist das Front-End einen Reflexionsfaktor unter -10dB auf.

3 Charakterisierung der Hardware

In diesem Kapitel wird die Bestimmung der Spannungsamplitude der Moden über die Detektorschaltung beschrieben. Des Weiteren wird die Berechnung der Bunchlänge aufgrund der Labormessungen mit Hilfe von Matlab simuliert, weil der Beschleuniger FLASH während der Bearbeitungszeit dieses Themas wegen Umbauarbeiten abgeschaltet war und somit keine realen Messungen am Beschleuniger möglich waren. Wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, lässt sich die Bunchlänge über Gl. (1.9) oder Gl. (1.12) berechnen. Hierzu werden die Amplituden von mindestens zwei Moden benötigt.

3.1 Ausgangskennlinien Detektorschaltung

Die Ausgangskennlinien für die Moden wurden nach in Bild 3.1 gezeigtem Aufbau ermittelt.

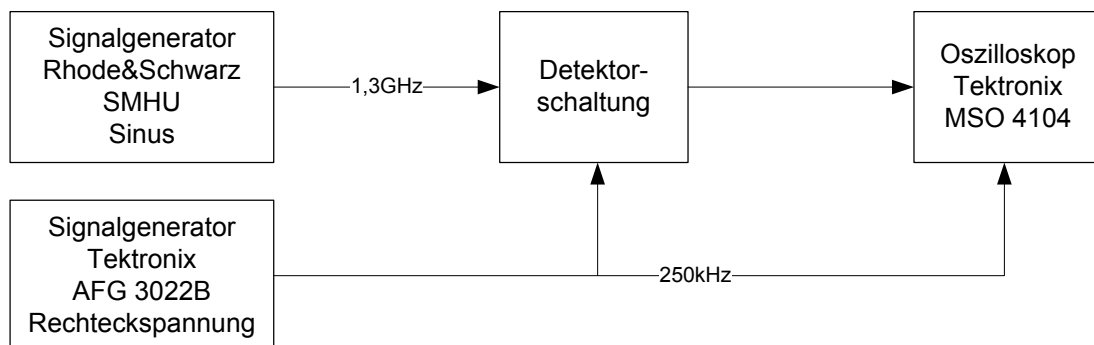


Bild 3.1 Messaufbau zur Bestimmung der Ausgangskennlinien

Die eingespeiste Sinusleistung wurde bei der jeweiligen Frequenz von -50dBm in 1dB Schritten bis auf 20dBm erhöht und die jeweilige Ausgangsspannung aufgezeichnet. Daraus ergeben sich die in Bild 3.2 dargestellten folgenden Ausgangskennlinien für die drei Frequenzen.

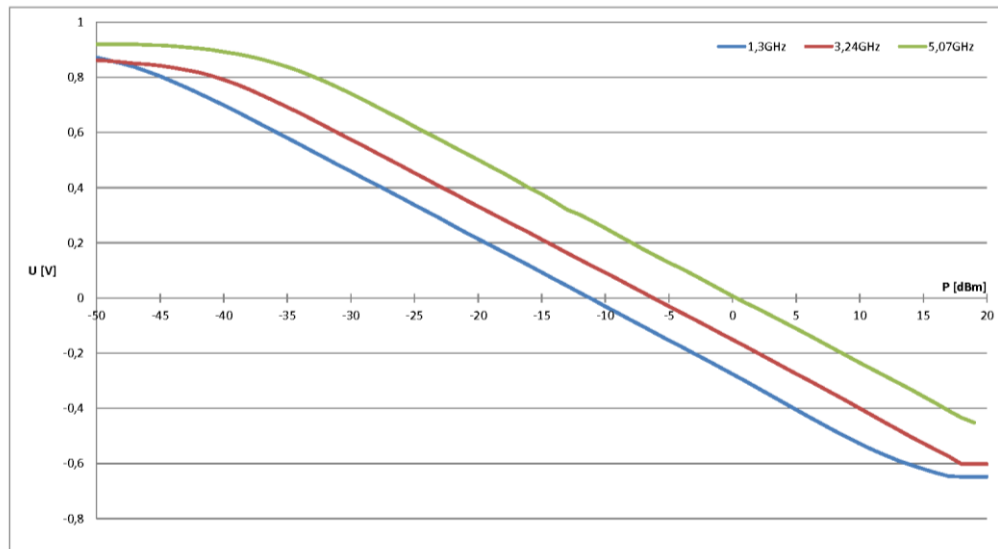


Bild 3.2 Ausgangskennlinien

Die Referenzspannung für den Differenzverstärker des „Levelshifting“ wurde auf jeder Leiterplatte gleich auf 1,3V eingestellt. Dass die Kennlinien nicht übereinander liegen, liegt in der unterschiedlichen Eingangsfrequenz am Detektor AD8313 begründet. Wichtig ist, dass jede Kennlinie einen linearen Bereich von mindestens 30dB aufweist, nämlich den Dynamikbereich der zu erwartenden Amplituden. Über Dämpfungsglieder lässt sich der Dynamikbereich für jede Frequenz in den linearen Bereich verschieben. Aus diesen Messdaten wurden Geradengleichungen erstellt, um die Leistung aus der Ausgangsspannung der Detektorschaltung zu berechnen. Somit ergeben sich die folgenden drei Gleichungen, U_{FE} steht für die jeweilige Ausgangsspannung der Detektorschaltung. Eine Tabelle mit den aufgenommenen Messwerten zur Bestimmung der Gleichungen sowieso die des Bild 3.2 zu Grunde liegenden Daten sind in Anhang F beigefügt.

$$P_{1,3GHz}[dBm] = -41,1 * U_{FE_{1G3}} - 11,27 \quad [-0,4V < U_{FE} < 0,7] \quad (3.1)$$

$$P_{3,24GHz}[dBm] = -41,49 * U_{FE_{3G24}} - 6,1826 \quad [-0,4V < U_{FE} < 0,6V] \quad (3.2)$$

$$P_{5,07GHz}[dBm] = -40,98 * U_{FE_{5G07}} - 0,37 \quad [-0,3V < U_{FE} < 0,75V] \quad (3.3)$$

Auffällig ist, dass die Steigungen der Gleichungen nicht identisch sind. Die Gleichungen ergeben dennoch die beste Reproduktion der Messwerte.

Die Spannungsamplitude berechnet sich dann über die Gleichung

$$U = \sqrt{1mW * R * 10^{\frac{P[dBm]}{10}}}, \quad (3.4)$$

an 50Ω demnach

$$U = \sqrt{0,05V^2 * 10^{\frac{P[dBm]}{10}}}. \quad (3.5)$$

Über diese Gleichungen können nun die Amplituden der jeweiligen Moden über die Ausgangsspannungen der Detektorschaltungen und Betrachtung der Dämpfung der Kabel bei der jeweiligen Frequenz direkt bestimmt werden.

3.2 Funktionstest Detektorschaltung

Als nächstes wurde das Verhalten der Detektorschaltung bei der maximalen Bunchwiederholrate von 1MHz getestet. Hierzu wird der „arbitrary waveform generator“ AWG 7122C der Firma Tektronix zur Erzeugung des Eingangspulses sowie zur Erzeugung des Eingangstaktes verwendet. Der Frequenzbereich des Signalgenerators reicht nur zur Erzeugung des Modes bei 1,3GHz aus, dies soll ausreichen unter der Annahme, dass der Detektor sich bei den anderen Frequenzen mindestens ähnlich verhält.

Um den Puls zu erzeugen, muss vorher die Zeitkonstante des Resonators nach Gl. (3.6) berechnet werden.

$$\tau = \frac{Q_L}{\pi f} \quad (3.6)$$

Bei der Frequenz von 1,3GHz beträgt die Güte des Resonators nach Tabelle 4.1 117,8 und daraus ergibt sich eine Zeitkonstante von 28,8ns.

Der Signalgenerator kann über Matlab programmiert werden, der Code sieht folgendermaßen aus:

```

01 t_run = [0:83.3e-12:1e-6]; 02
03 f0_1 = 1.3e9;                %Trägerfrequenz
04 omega_1 = 2*pi*f0_1;         %resultierende Kreisfrequenz
05 tau = 28.6e-9;               %Zeitkonstante des Resonators
06
07 %Erzeugung des Pulses
08 ua1=exp(1j*omega_1*t_run).*exp(-t_run./tau);
09
10 plot(t_run,ua1)
11 xlabel('t[s]')
12 ylabel('U[V]')
13
14 y0 = ua1';
15 y1 = (ua1(1:12005))';
16
17 save decay1G3.txt y1 -ascii

```

Die Daten für den AWG werden im Abstand von 83,8ps, was den Punkteabstands des AWG entspricht, von Null bis 1µs erzeugt. Die gespeicherte Datei wird dann in Dauerschleife vom AWG über Kanal 1 abgespielt, was einer Frequenz von 1MHz entspricht. Der somit erzeugte Puls ist in Bild 3.3 abgebildet.

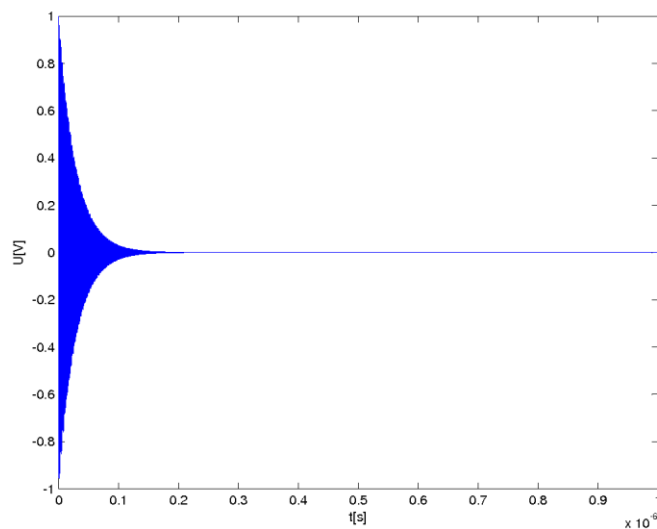


Bild 3.3 Ausgangspuls 1,3GHz AWG, $\tau = 28,8\text{ns}$

Die Simulationen wurden mit einer Zeitkonstanten von 100ns durchgeführt, bei kleineren Zeitkonstanten kam es zu Problemen mit dem Signalgenerator. Der verwendete Ausgangspuls ist in Bild 3.4 abgebildet.

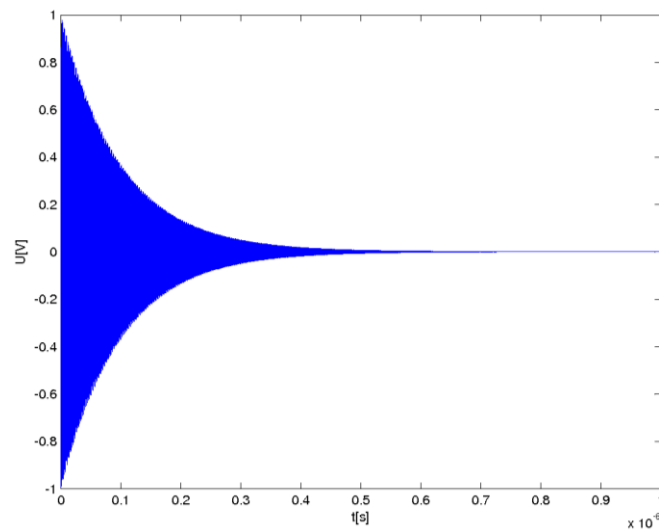


Bild 3.4 Ausgangspuls 1,3GHz AWG, $\tau=100\text{ns}$

Zusätzlich wird mit folgendem Programm synchron auf Kanal 2 des AWG eine Rechteckspannung erzeugt, die den Takt der Bunchwiederholrate von 1MHz simuliert, dazu der entsprechende Programmcode:

```

01 D = [0]; %Puls Verzögerung
02 t = 0:83.3e-12:12003*83.3e-12; %Berechnungsdauer
03 w = 1e-6; %Länge einer Periode
04
05 yp = pulstran(t,D,@rectpuls,w);
06
07 plot(t',yp)
08 xlabel('t[s]')
09 ylabel('U[V]')
10 axis([0 1e-6 -0.5 1.5])
11
12 save clock1MHz.dat yp -ascii

```

Die somit erzeugte Rechteckspannung ist in Bild 3.5 abgebildet.

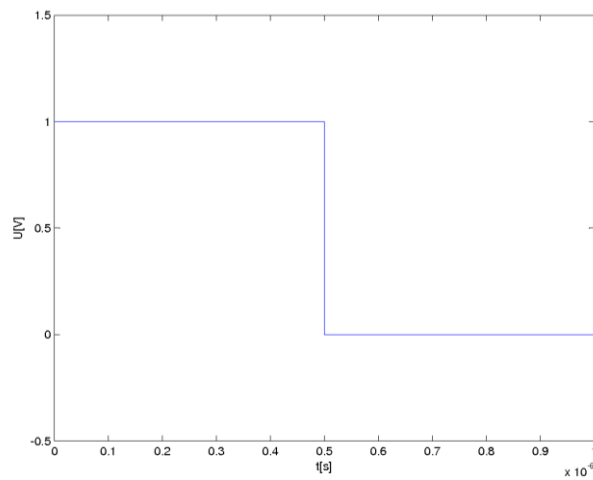


Bild 3.5 Rechteckspannung als Taktsignal

Der Messaufbau wurde nach Bild 3.6 aufgebaut.

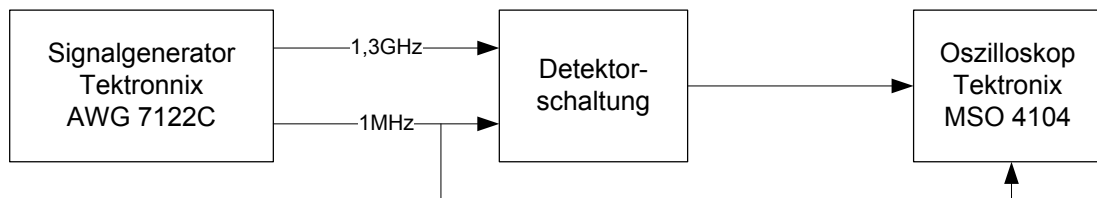


Bild 3.6 Messaufbau zur Pulsmessung

Die Messwerte wurden mit einem Vierkanal Oszilloskop der Firma Tektronix vom Typ MSO4104 aufgezeichnet und in einer Tabelle abgespeichert, um diese mit Hilfe von Matlab darzustellen.

Das Ergebnis der Messung ist in folgendem Bild dargestellt.

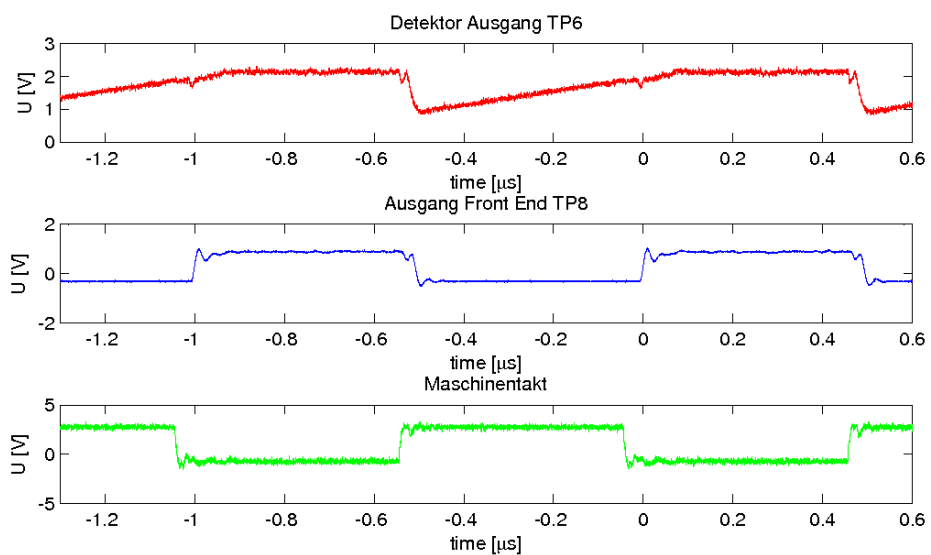


Bild 3.7 Antwort der Detektorschaltung auf 1,3GHz Puls

Der obere rote Graph ist die Spannung direkt am Ausgang des Detektors AD8318 am TP6. In der Mitte in Blau ist die Ausgangsspannung hinter dem „Levelshift“ am TP8 und unten in Grün die 1MHz Taktfrequenz aufgetragen. Die Taktverzögerung für den „Track and Hold“-Baustein ist am Schalterarray S1 auf 8ns eingestellt worden, um das Minimum zu halten. Die Verzögerung wird hervorgerufen aus der Antwortzeit des Detektorbausteins. Wie in Bild 3.7 zu erkennen, reagiert der Detektor schnell genug, um den folgenden Puls ebenso zu erkennen. Der T&H verlängert den Tiefpunkt am Detektorausgang um 500ns.

Das folgende Bild zeigt das Verhalten bei falsch eingestellter Verzögerung.

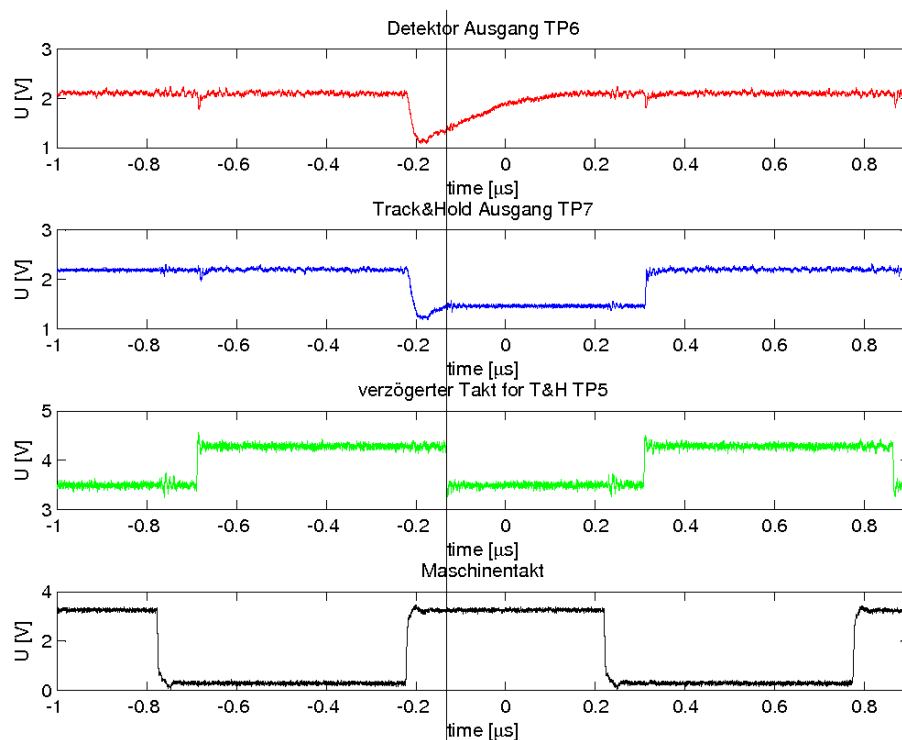


Bild 3.8 falsch eingestellte Verzögerung

Der oberste Graph ist wieder der Detektorausgang am TP6, darunter in Blau ist der Ausgang des T&H Bausteins am TP7, darunter der verzögerte Eingangstakt für den T&H am TP5 und ganz unten der Maschinentakt abgebildet. Der Zeitpunkt des Haltemodus des T&H ist durch die senkrechte Linie markiert. Die Verzögerung zwischen Maschinentakt und Eingangstakt des T&H ist zu erkennen und resultierend durch die zu große Verzögerung im blauen Graph, dass hier nicht das Minimum des Detektorausgangs getroffen wurde. Wichtig ist das genaue Treffen des Minimums aufgrund der unterschiedlichen Zeitkonstanten der Moden. Wären diese gleich, wäre es nicht relevant, an welcher Stelle das Spannungsverhältnis gebildet wird, so muss aber das jeweilige Maximum der Spannungsamplitude verwendet werden.

4 Bestimmung der Bunchlänge

Wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, lässt sich die Bunchlänge über das Verhältnis von zwei Amplituden verschiedener Moden des Resonators zueinander bestimmen. An dieser Stelle soll gezeigt werden, dass das Verfahren funktioniert und bis zu welcher minimalen Bunchlänge eine Bestimmung möglich ist.

4.1 Rechnung im Idealfall

Zur Bestimmung der Bunchlänge bei gaußverteilter Ladung entlang des Bunches wurden nach Gl. (1.9) drei verschiedene Verhältnisse gebildet:

$$\sigma_{g(U1/U2)} = \sqrt{2c^2 \frac{\ln \frac{U_1 S_2}{U_2 S_1}}{\omega_2^2 - \omega_1^2}} \quad (4.1)$$

$$\sigma_{g(U1/U3)} = \sqrt{2c^2 \frac{\ln \frac{U_1 S_3}{U_3 S_1}}{\omega_3^2 - \omega_1^2}} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{g(U2/U3)} = \sqrt{2c^2 \frac{\ln \frac{U_2 S_3}{U_3 S_2}}{\omega_3^2 - \omega_2^2}} \quad (4.3)$$

Für die rechteckige Ladungsverteilung entlang des Bunches die gleichen Verhältnisse nach Gl. (1.12):

$$\sigma_{r(U1/U2)} = \sqrt{\frac{6 \frac{U_1 S_2}{U_2 S_1} - 6}{\frac{U_1 S_2}{U_2 S_1} \left(\frac{\omega_2}{2c}\right)^2 - \left(\frac{\omega_1}{2c}\right)^2}} \quad (4.4)$$

$$\sigma_{r(U1/U3)} = \sqrt{\frac{6 \frac{U_1 S_3}{U_3 S_1} - 6}{\frac{U_1 S_3}{U_3 S_1} \left(\frac{\omega_3}{2c}\right)^2 - \left(\frac{\omega_1}{2c}\right)^2}} \quad (4.5)$$

$$\sigma_{r(U2/U3)} = \sqrt{\frac{6 \frac{U_2 S_3}{U_3 S_2} - 6}{\frac{U_2 S_3}{U_3 S_2} \left(\frac{\omega_3}{2c}\right)^2 - \left(\frac{\omega_2}{2c}\right)^2}} \quad (4.6)$$

Da eine Messung am Beschleuniger nicht möglich ist, wurden die Spannungsamplituden des Resonators in Matlab nach Gl. (1.2) bis Gl. (1.5) berechnet. Die dazu nötigen verwendeten Parameter des Resonators sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Tabelle 4.1 Eigenschaften des Resonators [8]

Mode	Externe Güte Q	$\frac{R}{Q}$
TM01	228,169	42,3479
TM02	434,358	32,4346
TM03	606,002	15,5013

Somit lassen sich die Amplituden in Matlab berechnen. Der Matlab Code befindet sich in Anhang G Matlab Code. In den Zeilen 23 bis 90 werden die Amplituden erzeugt. Um die Amplituden für gaußförmige und rechteckförmige Ladungsverteilung im Bunch bei einer Bunchlänge von 2,5mm zu berechnen, werden die Zeilen 15 und 17 einkommentiert und die for-Schleife in Zeile 13 auskommentiert. Die Amplituden werden in Volt, in Watt und in dBm berechnet. Die eingegebene Dämpfung in den Zeilen 9 bis 11 sorgt dafür, dass die Eingangsamplituden in den linearen Arbeitsbereich der Detektorschaltung verschoben werden, dies ist bei späteren

Berechnungen von Bedeutung. An dieser Stelle können später auch die Leitungsdämpfungen eingetragen werden.

Im nächsten Schritt wurden die obigen Gleichungen (4.1) bis (4.6) benutzt, um über die Amplituden wieder auf die Bunchlänge zurückzurechnen. Für die Rückrechnung der gaußschen Ladungsverteilung im Bunch geschieht dies in den Zeilen 108 bis 120 im Programmcode. Für die Rückrechnung der rechteckigen Ladungsverteilung im Bunch in den Zeilen 143 bis 150.

Die Ergebnisse stimmen mit den eingegebenen Wert von 2,5mm überein.

4.2 Bestimmung der minimal messbaren Bunchlänge

Um die mit der entwickelten Detektorschaltung minimale Bunchlänge zu bestimmen, wurde als erstes das Rauschen bzw. die Standardabweichung der Ausgangsspannung bei verschiedenen Eingangsleistungen der Schaltung gemessen. Hierzu wurde der Messaufbau nach Bild 4.1 verwendet

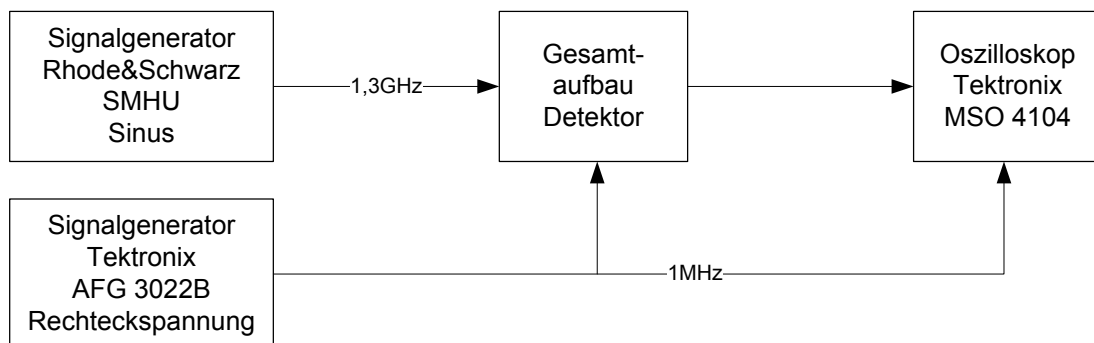


Bild 4.1 Messaufbau zur Bestimmung des Fehlers

Die Sinus-Ausgangsleistung wurde zwischen -50dBm bis 10dBm in 10dB Schritten erhöht und die jeweilige Ausgangsspannung mit dem Oszilloskop 100µs aufgezeichnet. Bei einer Taktfrequenz von 1MHz entspricht das jeweils 100 „Hold“-Phasen des T&H. Auszugsweise ist das gespeicherte Signal in Bild 4.2 dargestellt.

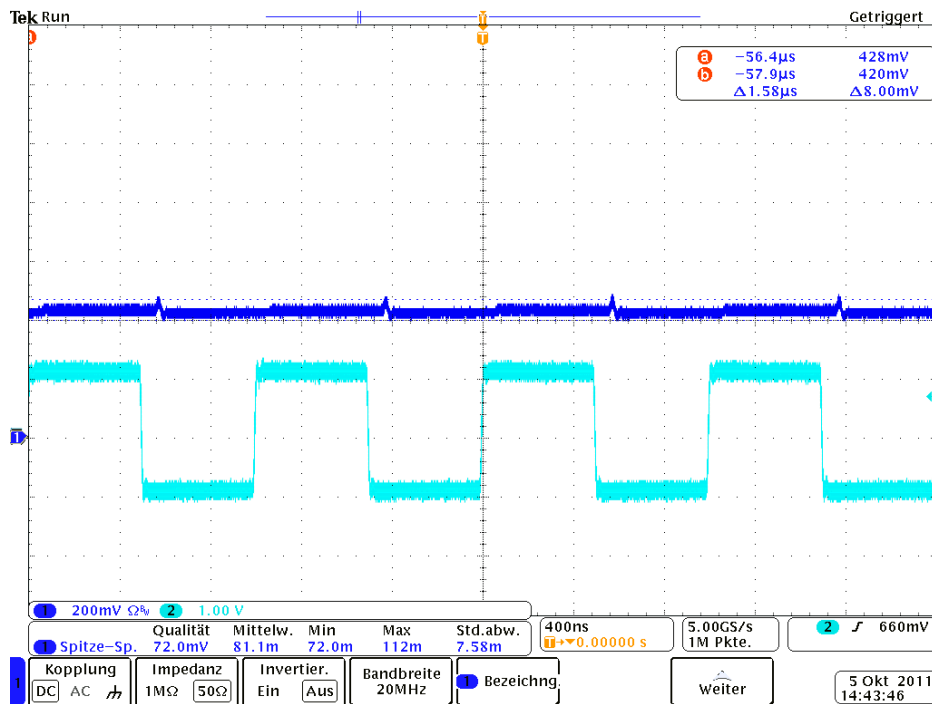


Bild 4.2 Signale der Fehlerbestimmung

Die blaue Linie ist die Ausgangsspannung des Front-Ends, da die Eingangsleistung konstant ist, ist auch die Ausgangsspannung bis auf einen minimalen Offset des T&H konstant.

Um die Standardabweichung des Signals zu bestimmen, wurde folgender Matlab Code geschrieben, um aus den 100 Messwerten jeweils zum gleichen Zeitpunkt nach Beginn der „Hold“-Phase einen Wert zu extrahieren.

```

01 load messwerte
02
03 %% einen Wert pro Hold herausholen
04 samples10{1}=[];
05 samples10{2}=[];
06 samples10{3}=[];
07 k=20; %Auswertbreite
08 s=20; %Schrittweite
09 for i = k+1 : s : (length(minus10dBm)-1000-k)
10     if ((sum(minus10dBm(i-
k:i,3))<0) && (sum(minus10dBm(i:i+k,3))>0))
11         samples10{1} = [samples10{1} minus10dBm(1250 +
i,1)];
12         samples10{2} = [samples10{2} (minus10dBm(1250 +
i,2))];
13         samples10{3} = [samples10{3} minus10dBm(1250 +
i,3)];
14         disp('Value found!')
15     end
16     disp(num2str(i))
17 end

```

```

18 samples=[samples10{1}(1,:);samples10{2}(1,:);
samples10{3}(1,:) ];
19
20 %% Berechnung der Standardabweichung
21
22 stdabw = std(samples(2,:))

```

Die Messwerte aus dem Oszilloskop wurden vorher in Matlab importiert. Die im Code verwendete Variable *minus10dB* entspricht der Messreihe bei einer Eingangsleistung von -10dBm. Die Variable hat drei Spalten, in der ersten ist die Zeit gespeichert, in der zweiten die Ausgangsspannung der Schaltung und in der dritten das Rechtecksignal. Das Programm sucht nun in zwanziger Schritten die steigende Flanke des Rechtecksignals und speichert die Werte der Zeile 1250 Punkte ab dem gefundenen Punkt entfernt ab. Bei einer Abtastrate des Oszilloskops von 5GS/s entspricht das 250ns, also bei einer Taktfrequenz von 1MHz den Wert ungefähr in der Mitte. Abschließend wird aus den 100 selektierten Messwerten die Standardabweichung θ der Ausgangsspannung des Front-Ends ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Tabelle 4.2 Standardabweichungen der Ausgangsspannungen

P [dBm]	$\theta_{U_{FE}}$ [mV]
-50	18,1
-40	9,5
-30	7
-20	4,8
-10	5,6
0	4,6
10	5,2

Um die minimale Bunchlänge zu bestimmen, wurde folgende Gleichung des gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes verwendet [10]:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (4.7)$$

Der Ausdruck $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ (mit $i=1, 2, \dots, n$) steht für die partielle Ableitung 1.Ordnung von $y = f(x_1; x_2; \dots; x_n)$. Die Variable Δx_i ist die Standardabweichung der direkt gemessenen Messgröße, von der y abhängig ist.

4.2.1 Minimal messbare Bunchlänge bei gaußförmiger Ladungsverteilung

Als erstes wurde die minimal bestimmbare Bunchlänge für eine gaußförmige Ladungsverteilung im Bunch ermittelt. Hierzu sei Gl. (4.1)

$$\sigma_{g(U_1/U_2)} = \sqrt{2c^2 \frac{\ln \frac{U_1 S_2}{U_2 S_1}}{\omega_2^2 - \omega_1^2}} = f_1(U_1, U_2) \quad (4.8)$$

somit gilt für $\Delta \sigma_{g(U_1/U_2)}$

$$\Delta \sigma_{g(U_1/U_2)} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_1}{\partial U_1} \Delta U_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial U_2} \Delta U_2\right)^2} \quad (4.9)$$

Das gleiche angewendet auf die anderen Verhältnisbildungen aus Gl. (4.2) ($\triangleq f_2(U_1, U_3)$) und Gl.(4.3) ($\triangleq f_3(U_2, U_3)$) ergibt

$$\Delta \sigma_{g(U_1/U_3)} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_2}{\partial U_1} \Delta U_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial U_3} \Delta U_2\right)^2} \quad (4.10)$$

und

$$\Delta \sigma_{g(U_2/U_3)} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_3}{\partial U_2} \Delta U_2\right)^2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial U_3} \Delta U_2\right)^2} \quad (4.11)$$

Die hierzu benötigten partiellen Ableitungen von Gl. (4.1), Gl. (4.2) und Gl. (4.3) lauten dann

$$\frac{\partial f_1}{\partial U_1} = \frac{\sqrt{\frac{2c^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2}}}{2U_1 \sqrt{\ln\left(\frac{S_2 U_1}{S_1 U_2}\right)}} \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial U_2} = \frac{\sqrt{\frac{2c^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2}}}{-2U_2 \sqrt{\ln\left(\frac{S_2 U_1}{S_1 U_2}\right)}} \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial U_1} = \frac{\sqrt{\frac{2c^2}{\omega_3^2 - \omega_1^2}}}{2U_1 \sqrt{\ln\left(\frac{S_3 U_1}{S_1 U_3}\right)}} \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial U_3} = \frac{\sqrt{\frac{2c^2}{\omega_3^2 - \omega_1^2}}}{-2U_3 \sqrt{\ln\left(\frac{S_3 U_1}{S_1 U_3}\right)}} \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial U_2} = \frac{\sqrt{\frac{2c^2}{\omega_3^2 - \omega_2^2}}}{2U_2 \sqrt{\ln\left(\frac{S_3 U_2}{S_2 U_3}\right)}} \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial U_3} = \frac{\sqrt{\frac{2c^2}{\omega_3^2 - \omega_2^2}}}{-2U_3 \sqrt{\ln\left(\frac{S_3 U_2}{S_2 U_3}\right)}} \quad (4.17)$$

Die Spannungen U_x in diesen Gleichungen sind die Spannungsamplituden der jeweiligen Moden, in Tabelle 4.2 wurden jedoch die Standardabweichungen der Ausgangsspannung θU_{FE} des Front-Ends bestimmt. Daher wurde zunächst das resultierende Rauschen der Spannungsamplitude abhängig von der Standardabweichung der Labormessung über Gl. (3.1), Gl. (3.2) bzw. Gl. (3.3) berechnet. Beispielhaft wird hier nur das Verfahren für Gl. (3.1) vorgestellt, die anderen sind äquivalent dazu mit der jeweiligen Ausgangsgleichung.

$$P_{\min_1,3\text{GHz}}[\text{dBm}] = -41,1 * (U_{FE_1G3} + \theta U_{FE}) - 11,27 \quad (4.18)$$

$$P_{\max_1,3\text{GHz}}[\text{dBm}] = -41,1 * (U_{FE_1G3} - \theta U_{FE}) - 11,27 \quad (4.19)$$

$$\Delta U_1 = \sqrt{0,05 * 10^{\frac{P_{\max_1,3\text{GHz}}}{10}}} - \sqrt{0,05 * 10^{\frac{P_{\min_1,3\text{GHz}}}{10}}} \quad (4.20)$$

Nach Tabelle 4.2 ist θU_{FE} nicht konstant, sondern abhängig von der Eingangsleistung. Zur besseren Übersicht ist dies nochmal in Bild 4.3 veranschaulicht.

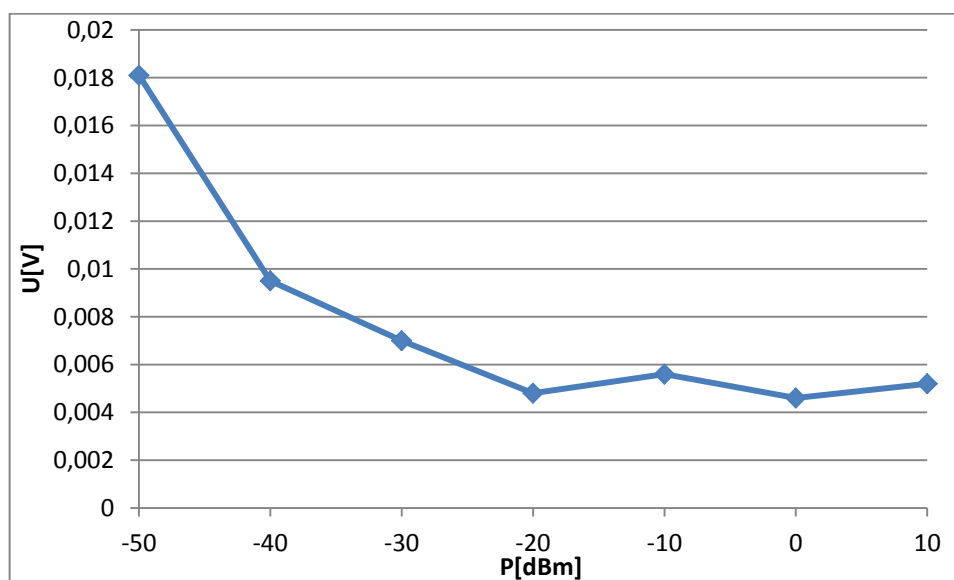


Bild 4.3 Standardabweichungen der Ausgangsspannung

Bei Betrachtung von Bild 4.3 wird deutlich, dass der Fehler bei zunehmender Eingangsleistung kleiner wird und sich ab einer Leistung von -20dBm nur noch geringfügig ändert.

Um das θU_{FE} in Abhängigkeit von der Eingangsleistung zu bestimmen, wurde von Punkt zu Punkt über Geradengleichungen wie folgt interpoliert.

$$\theta U_{FE(-50dBm < P_{in} < -40dBm)} = 0,0095 + \left| \frac{0,0181 - 0,0095}{10} \right| (P_{in} + 50) \quad (4.21)$$

$$\theta U_{FE(-40dBm < P_{in} < -30dBm)} = 0,007 + \left| \frac{0,0095 - 0,007}{10} \right| (P_{in} + 40) \quad (4.22)$$

$$\theta U_{FE(-30dBm < P_{in} < -20dBm)} = 0,0048 + \left| \frac{0,007 - 0,0048}{10} \right| (P_{in} + 30) \quad (4.23)$$

$$\theta U_{FE(-20dBm < P_{in} < -10dBm)} = 0,0056 + \left| \frac{0,0048 - 0,0056}{10} \right| (P_{in} + 20) \quad (4.24)$$

$$\theta U_{FE(-10dBm < P_{in} < 0dBm)} = 0,0046 + \left| \frac{0,0056 - 0,0046}{10} \right| (P_{in} + 10) \quad (4.25)$$

$$\theta U_{FE(0dBm < P_{in} < 10dBm)} = 0,0046 + \left| \frac{0,0052 - 0,0046}{10} \right| P_{in} \quad (4.26)$$

Für die gaußförmige Ladungsverteilung im Bunch geschieht dies in Anhang G Matlab Code in den Zeilen 152 bis 235. Mit der for-Schleife in Zeile 13 wird die Bunchlänge in 1mm-Schritten von 1mm auf 10mm erhöht. Ein Ablaufplan der Simulation ist in folgendem Bild dargestellt.

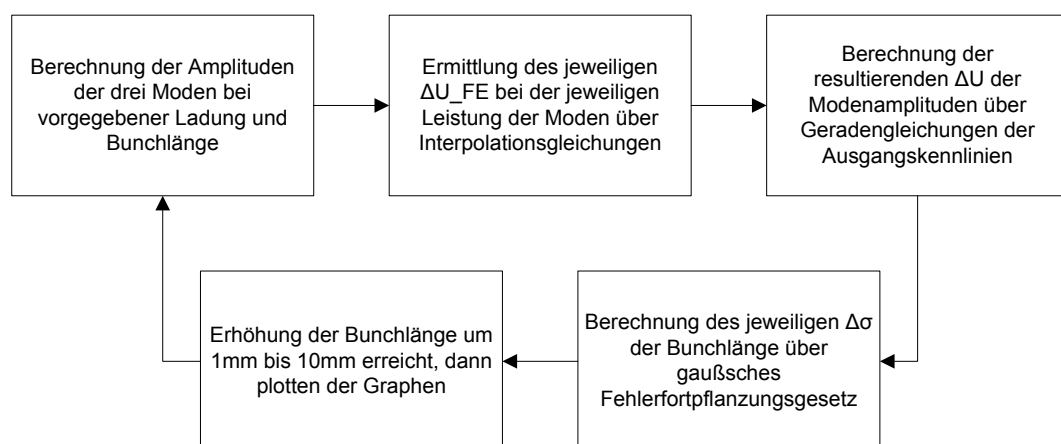


Bild 4.4 Ablauf der Rechnung zur Ermittlung der minimalen Bunchlänge

Um die simulierten Eingangsleistungen zur Bestimmung der minimal messbaren Bunchlänge in den Bereich des kleinsten Fehlers zu bringen, wurden die Dämpfungen im Matlab Code in den Zeilen 9 bis 11 auf 12dB gesetzt. Somit ergeben sich

Eingangsleistungen zwischen 0dBm und 6dBm, in welchem Bereich nach Bild 4.3 der kleinste Fehler vorliegt.

Das Ergebnis der Simulation ist in Bild 4.5 abgebildet.

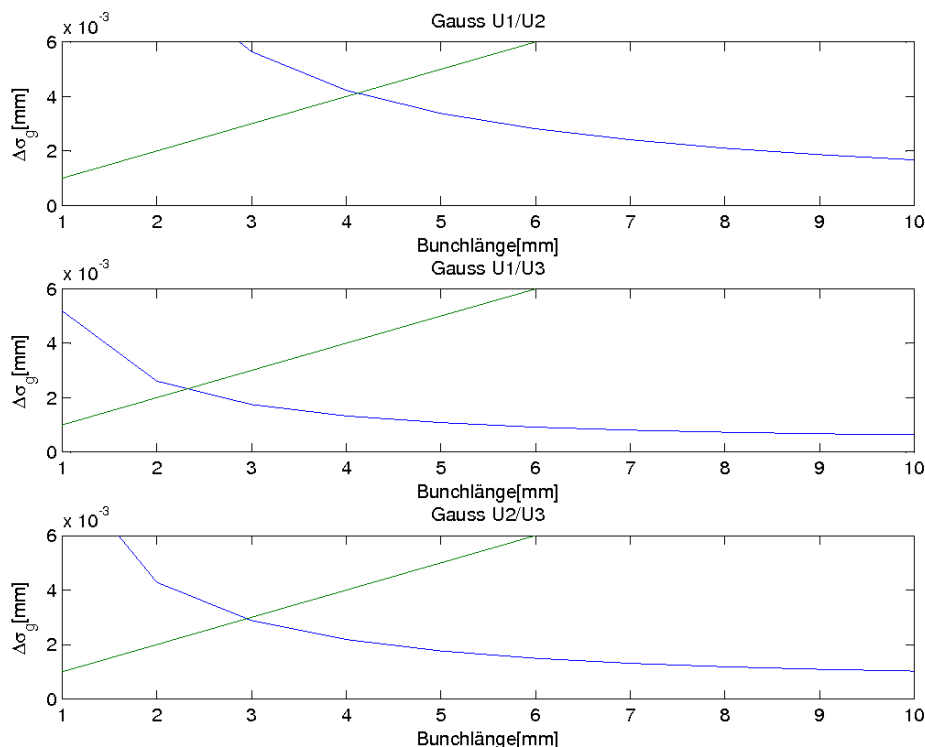


Bild 4.5 Fehlerkurven gaußsche Ladungsverteilung, Eingangsleistung 0dBm < P < 10dBm

Die blaue Kurve gibt den Fehler der berechneten Bunchlänge $\Delta\sigma_g$ in Abhängigkeit der vorherrschenden Bunchlänge an. Die Funktion der grünen Geraden in den Graphen lautet $\Delta\sigma_g = Bunchlänge$. Der Schnittpunkt mit der Geraden gibt somit die minimal bestimmbare Bunchlänge an, dass ist nämlich genau der Bereich, wo der Fehler den gleichen Wert der Bunchlänge annimmt, also keine Unterscheidung mehr zwischen dem Fehler und tatsächlicher Bunchlänge möglich ist.

Die Berechnungen nach Bild 4.4 wurden für alle Leistungsbereiche wiederholt, indem nach jeder Berechnung die Dämpfung weiter erhöht wurde, um den jeweiligen Eingangsbereich zu erreichen. In folgender Tabelle sind die Schnittpunkte, also die minimal bestimmbaren Bunchlängen in Abhängigkeit der Dämpfung bzw. des jeweiligen Leistungsbereichs der Interpolationsgleichungen für den Fehler, bei 0,1nC Ladung aufgelistet.

Tabelle 4.3 minimale Bunchlänge in Abhängigkeit des Eingangsleistungsbereiches

Dämpfung [dB]	Eingangsleistungsbereich [dBm]	$\Delta\sigma_{g(U1/U3)}$ [mm]	$\Delta\sigma_{g(U1/U2)}$ [mm]	$\Delta\sigma_{g(U2/U3)}$ [mm]
12	$0 < P_{in} < 10$	2,33	4,13	2,95
20	$-10 < P_{in} < 0$	2,4	4,3	3,08
30	$-20 < P_{in} < -10$	2,65	4,35	3,05
40	$-30 < P_{in} < -20$	2,7	4,68	3,42
50	$-40 < P_{in} < -30$	3,04	5,52	4
60	$-50 < P_{in} < -40$	3,98	7,2	5,45

Wie zu erwarten liefert der Eingangsleistungsbereich bei $0\text{dBm} < P_{in} < 10\text{dBm}$ die besten Werte, da hier wie aus Bild 4.3 ersichtlich, der kleinste Fehler vorliegt. Die minimal bestimmbare Bunchlänge wird immer größer, je geringer die Eingangsleistung wird.

Den geringsten Fehler bei der Bestimmung der Bunchlänge liefert wie aus Tabelle 4.3 ersichtlich das Verhältnis der Spannungsamplituden von U_1 und U_3 . Die kleinste bestimmbare Bunchlänge liegt bei 2,33mm bzw. bei einem Bunch der zeitlichen Länge 7,77ps.

Der Tabelle 4.3 zugrunde liegenden Graphen sind in Anhang H abgebildet.

4.2.2 Minimal messbare Bunchlänge bei rechteckförmiger Ladungsverteilung

Um die minimal messbare Bunchlänge für die rechteckförmige Ladungsverteilung im Bunch zu bestimmen, wurde wie im vorigen Kapitel 4.2.1 vorgegangen. Dazu sei Gl. (4.4) = $g_1(U_1, U_2)$, Gl. (4.5) = $g_2(U_1, U_2)$ und Gl. (4.6) = $g_3(U_1, U_2)$. Für die Fehler der jeweiligen Bunchlängen der drei Verhältnisse gilt dann jeweils

$$\Delta\sigma_{r(U1/U2)} = \sqrt{\left(\frac{\partial g_1}{\partial U_1} \Delta U_1\right)^2 + \left(\frac{\partial g_1}{\partial U_2} \Delta U_2\right)^2} \quad (4.27)$$

$$\Delta\sigma_{r(U_1/U_3)} = \sqrt{\left(\frac{\partial g_2}{\partial U_1} \Delta U_1\right)^2 + \left(\frac{\partial g_2}{\partial U_3} \Delta U_3\right)^2} \quad (4.28)$$

$$\Delta\sigma_{r(U_2/U_3)} = \sqrt{\left(\frac{\partial g_3}{\partial U_2} \Delta U_2\right)^2 + \left(\frac{\partial g_3}{\partial U_3} \Delta U_3\right)^2} \quad (4.29)$$

Die dazu benötigten partiellen Ableitungen lauten wie folgt. Hierzu seien

$$K_1 = \frac{S_2}{S_1}; K_2 = \frac{S_3}{S_1}; K_3 = \frac{S_3}{S_2} \quad (4.30)$$

und

$$W_1 = \frac{\omega_1}{2c}; W_2 = \frac{\omega_2}{2c}; W_3 = \frac{\omega_3}{2c} \quad (4.31)$$

dann lauten die Ableitungen

$$\frac{\partial g_1}{\partial U_1} = \frac{\frac{6K_1}{U_2 \left(\frac{U_1 K_1 W_2^2}{U_2} - W_1^2\right)} - \frac{K_1 W_2^2 \left(\frac{6U_1 K_1}{U_2} - 6\right)}{U_2 \left(\frac{U_1 K_1 W_2^2}{U_2} - W_1^2\right)^2}}{2 \sqrt{\frac{6K_1 \frac{U_1}{U_2} - 6}{W_2^2 K_1 \frac{U_1}{U_2} - W_1^2}}} \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial U_2} = \frac{\frac{K_1 W_2^2 U_1 \left(\frac{6U_1 K_1}{U_2} - 6\right)}{U_2^2 \left(\frac{U_1 K_1 W_2^2}{U_2} - W_1^2\right)^2} - \frac{6K_1 U_1}{U_2^2 \left(\frac{U_1 K_1 W_2^2}{U_2} - W_1^2\right)}}{2 \sqrt{\frac{6K_1 \frac{U_1}{U_2} - 6}{W_2^2 K_1 \frac{U_1}{U_2} - W_1^2}}} \quad (4.33)$$

Die Gleichungen der Ableitungen für die anderen beiden Verhältnisbildungen befinden sich in Anhang J.

Das Ergebnis ist in Bild 4.6 dargestellt, zur Berechnung dienen die Zeilen 236 bis 323 Anhang G Matlab Code.

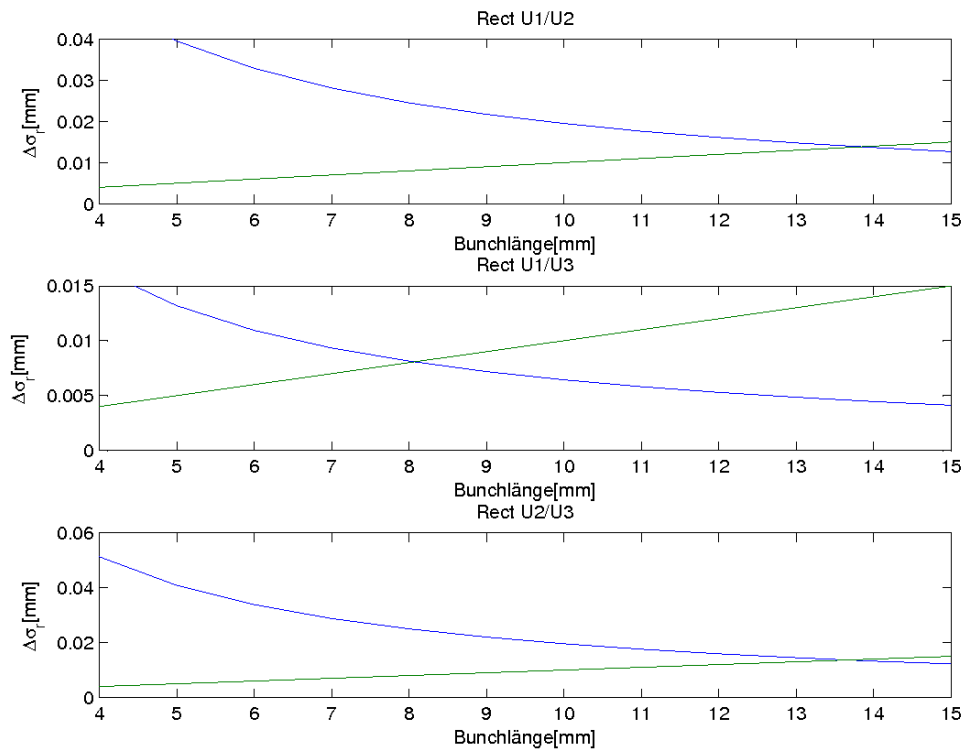


Bild 4.6 Fehlerkurven rechteckförmige Ladungsverteilung, Eingangsleistung $0\text{dBm} < P < 10\text{dBm}$

Das beste Ergebnis wird auch hier durch das Verhältnis der Spannungsamplituden U_1 und U_3 erzielt. Jedoch liegt die minimal bestimmbare Bunchlänge weit über der größtmöglichen Bunchlänge von 5,4mm, nämlich hier bei 8,07mm. Somit ist die Rückrechnung mit den Gleichungen für rechteckförmige Ladungsverteilung nicht möglich.

4.3 Unterscheidung von gaußförmiger und rechteckförmiger Ladungsverteilung

In diesem Abschnitt soll herausgefunden werden, ob eine Unterscheidung zwischen gaußförmiger und rechteckförmiger Ladungsverteilung möglich ist.

Hierzu wurde wieder der Matlab-Code aus Anhang G verwendet. Um alle Moden auf den gleichen Leistungsbereich mit dem geringsten Fehler des Front-Ends zu bringen, wurde in den Zeilen 6 bis 18 eine Ladung von 0,1nC, eine Bunchlänge von 2,5mm und

eine Dämpfung der Moden TM01 und TM03 von 10dB, des Modes TM02 von 18dB eingetragen. Dann wurden die berechneten Spannungsamplituden der Moden für gaußförmige und rechteckförmige Ladungsverteilung abgelesen, sowie der durch das Front-End resultierende Messfehler an der jeweiligen Stelle der Spannungsamplituden, welcher in den Zeilen 206 bis 219 beziehungsweise in den Zeilen 286 bis 299 berechnet wird.. Die Werte sind in Tabelle 4.4 aufgelistet.

Tabelle 4.4 Spannungsamplituden mit Fehler

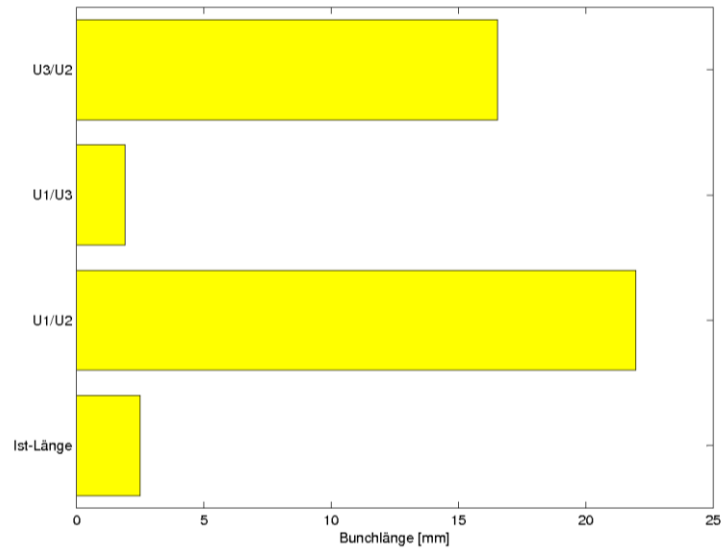
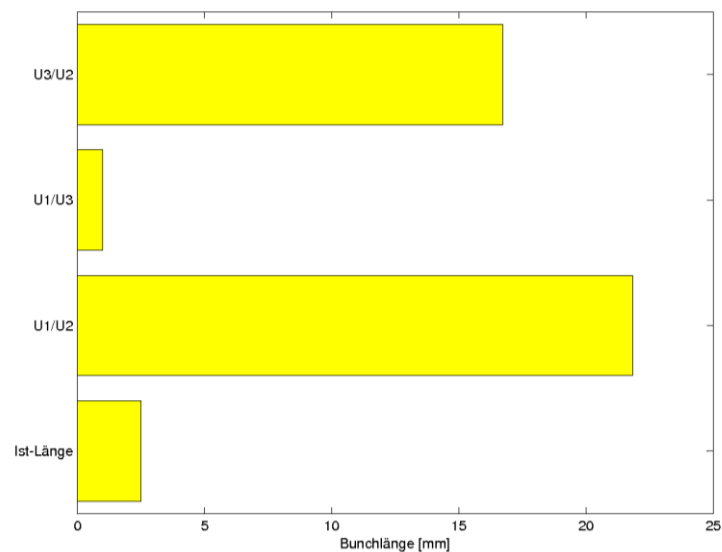
f [GHz]	$U_{\text{gauß}}$ [V]	U_{rect} [V]	$ U_{\text{gauß}} - U_{\text{rect}} $ [V]
1,3	0,3764 +/- 0,0173	0,3772 +/- 0,0173	0,0008
3,24	0,6131 +/- 0,011	0,6212 +/- 0,011	0,0081
5,07	0,5499 +/- 0,018	0,568 +/- 0,018	0,0181

Es ist zu erkennen, dass der Fehler größer ist als die jeweilige Differenz der Spannungsamplituden von gaußförmiger und rechteckförmiger Ladungsverteilung, was darauf schließen lässt, dass eine Unterscheidung nicht möglich sein wird. Dennoch wurde dies im Folgenden simuliert.

Die Fehler wurden zur Berechnung alle maximal in negativer Richtung angenommen und im Matlab-Code in die Zeilen 110 bis 112 eingetragen.

Um nun auf die Bunchlänge und den Unterschied auf gaußförmige oder rechteckförmige Ladungsverteilung schließen zu können, wurde eine Rückrechnung mit den Gleichungen und fehlerbehafteten Amplituden für gaußförmige Verteilung, sowie eine Rückrechnung mit den fehlerbehafteten Amplituden der rechteckförmigen Ladungsverteilung ebenfalls mit den Gleichungen für Gaußamplituden durchgeführt. Das bedeutet, im zweiten Fall wurde eine gaußförmige Ladungsverteilung angenommen, tatsächlich liegt jedoch eine rechteckförmige Ladungsverteilung vor. Die Gleichungen für rechteckförmige Ladungsverteilung sind für die Rückrechnung mit Fehlern in der hier auftretenden Größenordnung unbrauchbar, da die größte auftretende Bunchlänge 5,4mm beträgt, die minimal bestimmbare jedoch bei 8,07mm liegt.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Bild 4.7 und Bild 4.8 dargestellt, die Erzeugung der Bilder erfolgt im Matlab-Code in den Zeilen 123 bis 127 und 139 bis 143.

**Bild 4.7 Gauß-Rückrechnung mit Gauß-Amplituden****Bild 4.8 Gauß-Rückrechnung mit Rect-Amplituden**

Die oberen drei Balken in den Bildern sind die Bunchlängen der jeweiligen Spannungsverhältnisse, der vierte Balken ist die eingegebene Ist-Länge des anregenden Bunches.

Wie zu erwarten sind die Bilder so ähnlich, dass eine Unterscheidung der Form des anregenden Bunches nicht möglich ist. Eine Unterscheidung wäre erst dann möglich, wenn Bunchlängen über 8,07mm auftreten würden und somit die Rückrechnungsgleichungen für rechteckförmige Ladungsverteilung verwendet werden könnten.

Als Hinweis, die Rückrechnung liefert hier kein gleiches Ergebnis für alle drei Verhältnisse, da die Spannungsamplituden mit Fehlern behaftet wurden, es zeigt aber, das durch die hier vorliegende Messungenauigkeit keine Unterscheidung zwischen gaußförmiger und rechteckförmiger Ladungsverteilung möglich ist.

Wie bereits festgestellt, liefert das Spannungsverhältnis von U_1 zu U_3 das zur wahren Bunchlänge nächste Ergebnis.

5 Vergleich mit anderen Verfahren

In diesem Kapitel werden weitere Verfahren zur Bestimmung der Bunchlänge kurz vorgestellt, um eine Aussage darüber zu treffen, wo das in dieser Arbeit beschriebene System einzuordnen ist.

Die in [11] verwendete Methode nutzt ein elektro-optisches Kristall, welches in die unmittelbare Nähe des Bunches ins Strahlrohr des Beschleunigers plaziert wird. Dieser Kristall ändert in Abhängigkeit eines einwirkenden elektrischen Feldes seinen Brechungsindex für Licht. Der Kristall wird nun mit einem Laser durchleuchtet und das austretende Licht mit und ohne Bunch verglichen. Passiert nun ein Bunch mit hoher Energie in der Nähe den Kristall, so ändert sich äquivalent zum elektrischen Feld des Bunches die Polarisation des austretenden Laserlichts. Die Polarisation des Laserlichtes innerhalb des Laserpulses ist dann äquivalent zur longitudinalen Ladungsverteilung des Elektronenbunches. Durch Messen der Polarisation wird die Ladungsverteilung und damit auch die Bunchlänge bestimmt. Die Methode

- ist sehr aufwendig und kostenintensiv.
- ist nur bei höheren Elektronenenergien einsetzbar, als die in dieser Arbeit beschriebene Methode.
- erreicht eine Auflösung von ca. $210\mu\text{m}$.

Die bereits in Kapitel 1 erwähnte Methode unter Verwendung einer Streak-Kamera [1] ist im groben folgendermaßen aufgebaut. Ein sogenanntes Aerogel wird in den Strahl eingesetzt. Sobald ein Bunch das Aerogel durchquert, produzieren die passierenden Elektronen Cherenkov-Photonen. Die Photonen werden über ein optisches System zur Streak-Kamera geleitet, dort weiter verarbeitet und ein Abbild über eine CCD-Kamera auf einem Monitor sichtbar gemacht und gespeichert. An dem entstandenen Bild kann die Bunchlänge bestimmt werden. Diese Methode

- ist sehr aufwendig, destruktiv und kostenintensiv.
- erreicht eine Auflösung von ca. $0,53\text{mm}$.

Weitere Methoden unter Verwendung einer Streak Kamera sind: Konversion der Ladungsverteilung des Bunches mit Hilfe optischer Übergangsstrahlung durch eine Metallfolie (destruktiv) und Synchrotronstrahlung erzeugt in einem Ablenkmagneten (nicht-destruktiv). Beides kann nur nach weiteren Beschleunigerstufen angewendet

werden als die in dieser Arbeit beschriebenen. Die Auflösung wird von der Streak Kamera bestimmt und ist darum gleich der Methode mit dem Aerogel.

Das in [12] beschriebene Verfahren nutzt das Spektrum des Bunches, welches über eine 30cm lange parallel zur Flugrichtung des Bunches im Beschleuniger angebrachte Streifenleitung aufgenommen wird. Über eine aufwendige Elektronik kann die Bunchlänge anhand einer Gleichspannung direkt abgelesen werden. Diese Methode

- ist aufwendig aber nicht so kostenintensiv wie die vorher beschriebenen Methoden.
- erreicht eine Auflösung von 1mm.

Die in [13] verwendete Methode nutzt direkt den zu vermessenden Bunch. Es wird ein CCD-Schirm in die Flugbahn des Bunches gebracht und der Bunch vorher in einer Vorrichtung um 90° gedreht, so dass der Bunch direkt auf den Schirm abgebildet wird, an dem der Bunch sichtbar wird und vermessen werden kann. Diese Methode

- ist aufwendig und destruktiv.
- erreicht eine minimal bestimmbare Bunchlänge 26 μ m.

Alle Methoden zur Bunchlängenbestimmung sind individuell entwickelte Verfahren und meist ohne spezielles Equipment wie der für das hier entwickelte Front-End verwendete Resonator nicht möglich. Mit einer minimal bestimmbaren Bunchlänge von 2,33mm ist das hier entwickelte Verfahren durchaus vergleichbar mit einigen anderen Methoden.

6 Zusammenfassung

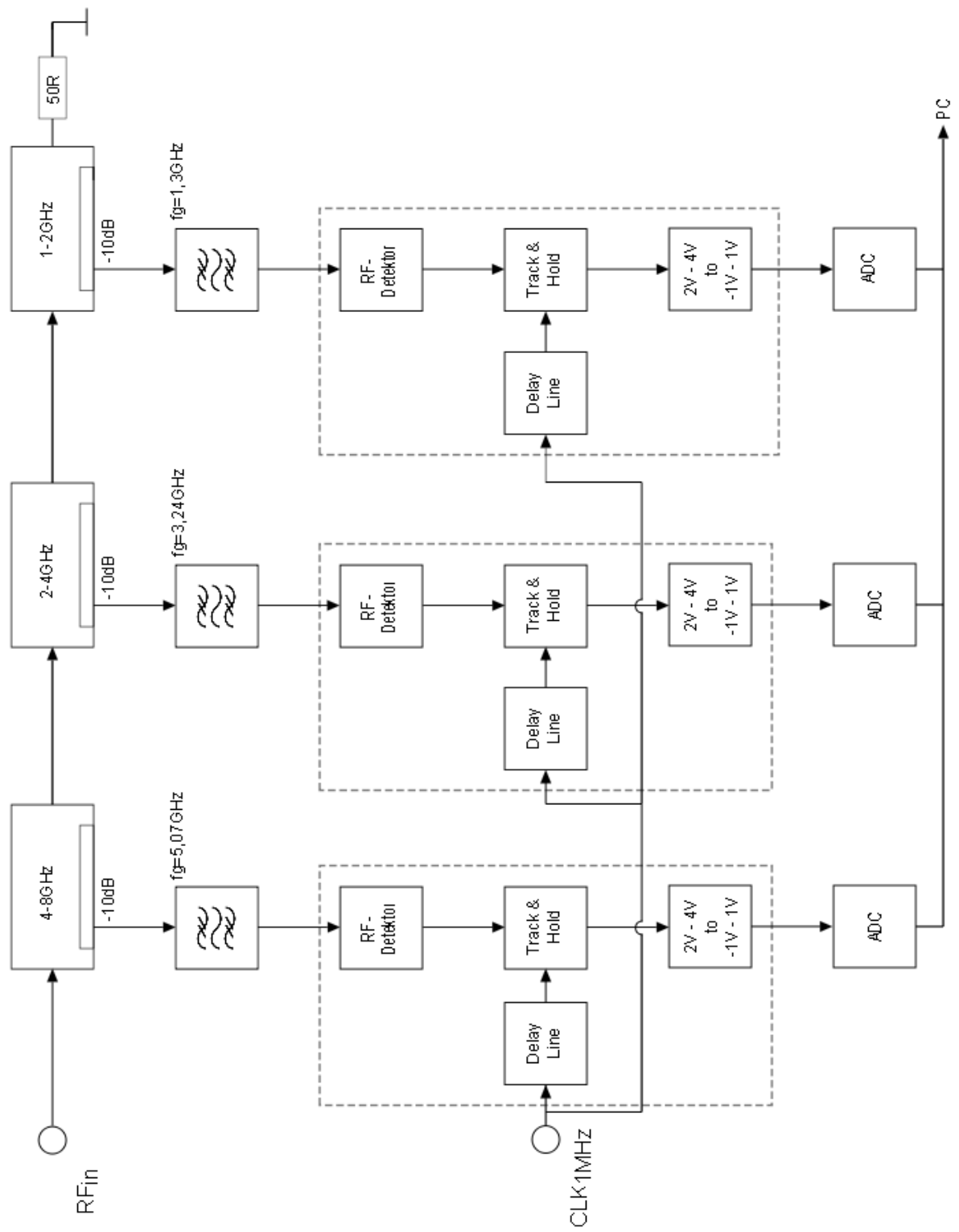
Das Ergebnis dieser Arbeit ist das fertiggestellte Front-End zur Bestimmung der Spannungsamplituden im Resonator. Außerdem wurde gezeigt, wie über die Spannungsamplituden die Bunchlänge im Beschleuniger bestimmt werden kann. Mit der hier entwickelten Elektronik ist eine Bestimmung der Bunchlänge bis zu einer Untergrenze von 2,33mm möglich.

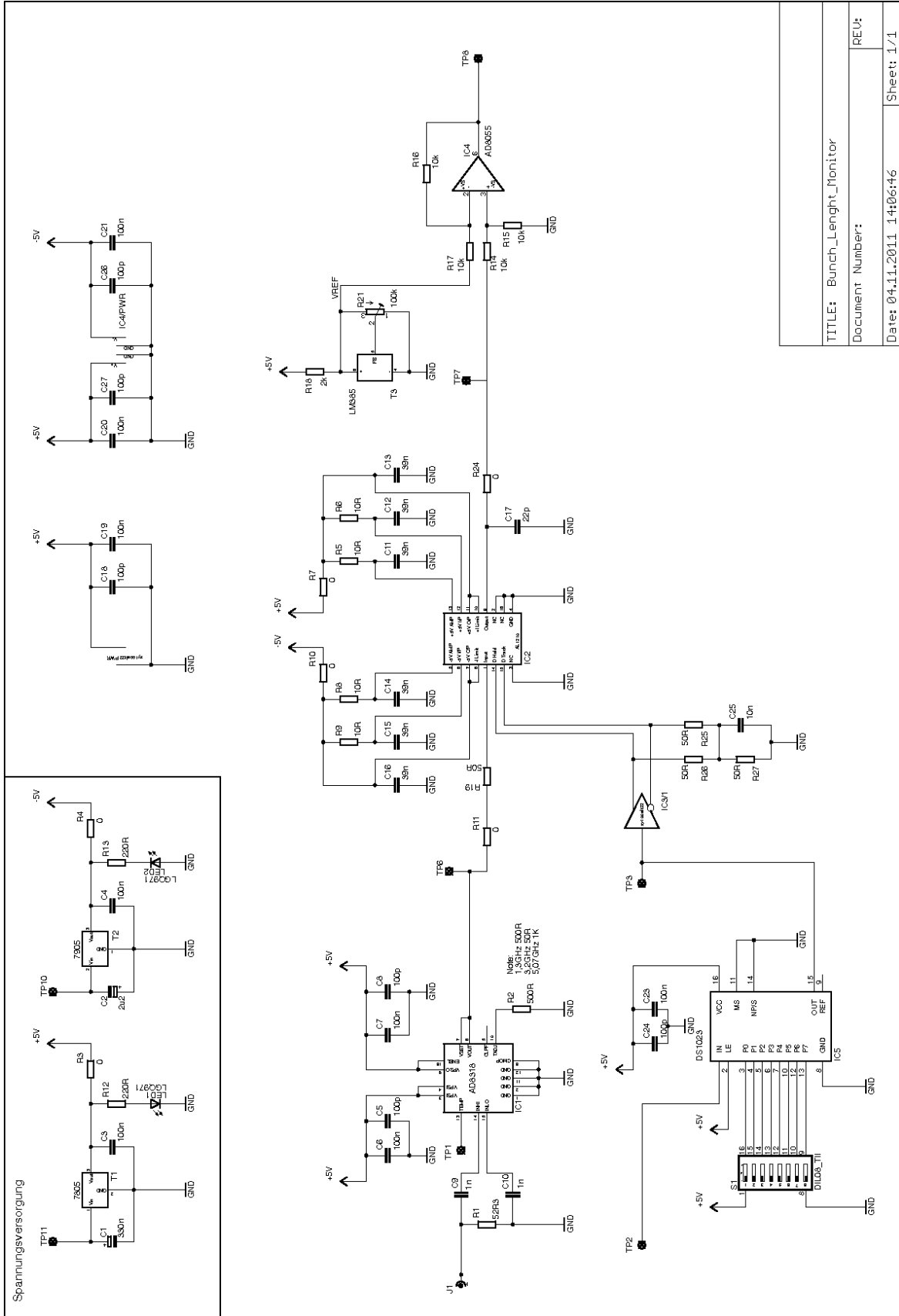
Eine Unterscheidung zwischen gaußförmiger und rechteckförmiger Ladungsverteilung im Bunch ist aufgrund des Eigenrauschens der Elektronik und des geringen Unterschieds der Spannungsamplituden zueinander bei gaußförmiger und rechteckförmiger Ladungsverteilung nicht möglich. Im Vergleich mit anderen Verfahren zur Bunchlängenbestimmung halten sich der Aufwand und die Kosten in Grenzen.

Auf der beiliegenden CD befinden sich sämtliche verwendeten Matlab-Files sowie die EAGLE-Dateien des Schaltplans und Layouts.

7 Ausblick

Während der Bearbeitungszeit des Themas ist der Linearbeschleuniger FLASH aufgrund von Umbauarbeiten abgeschaltet worden, bevor das Front-End für Messungen zur Verfügung stand. Aus diesem Grund ist es nötig, das System in naher Zukunft unter realen Bedingungen zu testen. Es sind Dämpfungsglieder in die jeweiligen Pfade hinter den Richtkopplern einzufügen, so dass der Arbeitsbereich des Detektors für alle drei Moden im linearen Bereich liegt. Die benötigten Kanäle des ADC sind im DESY-Netz freizuschalten und die Rechnung zur Bestimmung der Bunchlänge im DESY-System zu implementieren, so dass eine direkte Bestimmung der Bunchlänge im laufenden Betrieb möglich ist.



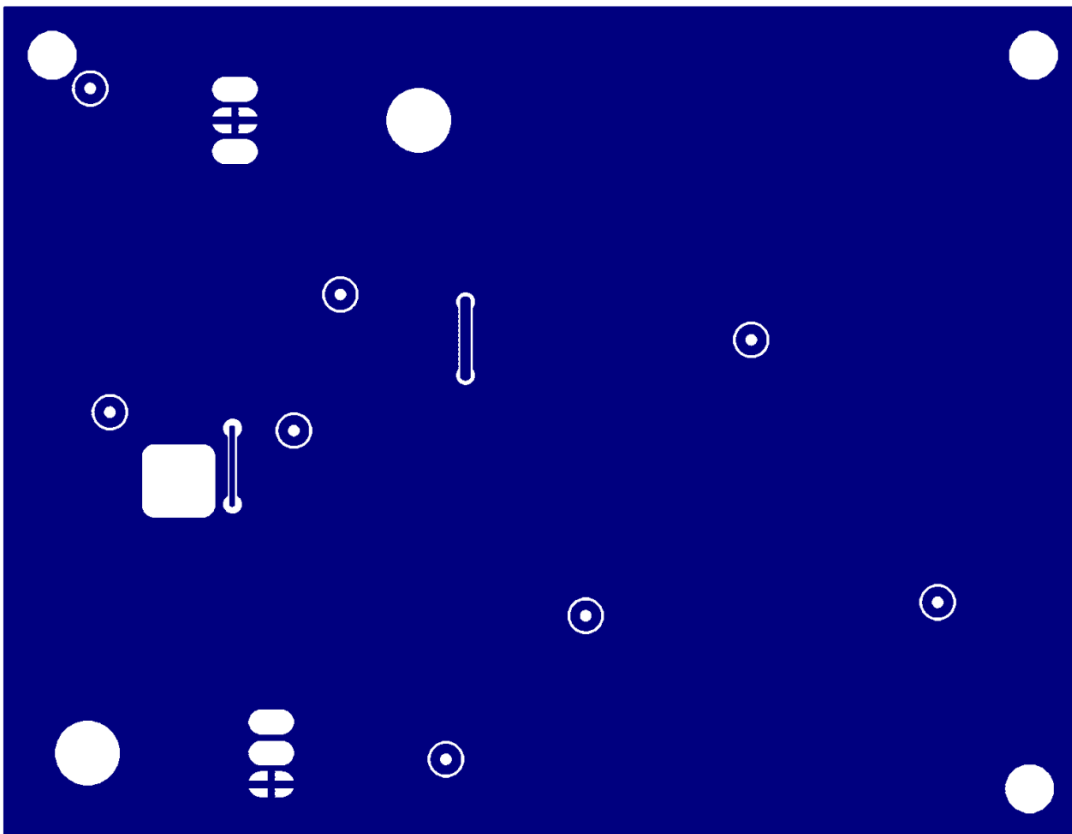
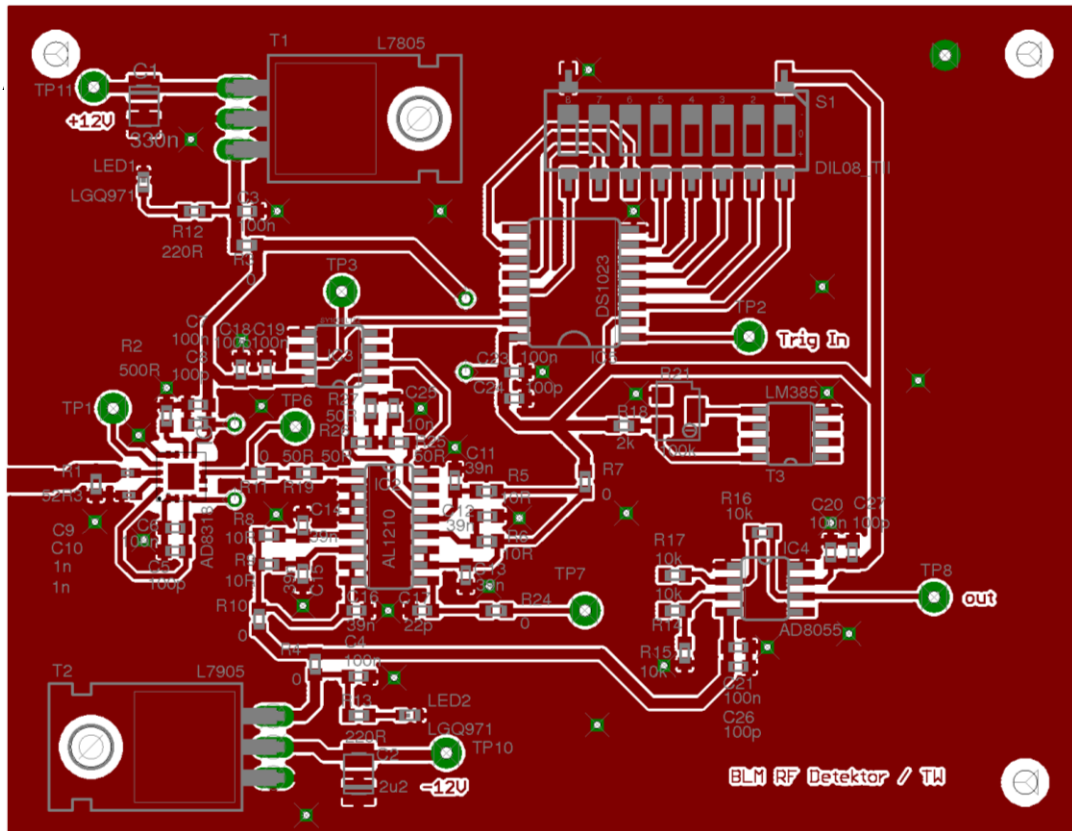


TITLE: Bunch_Length_Monitor

Document Number:

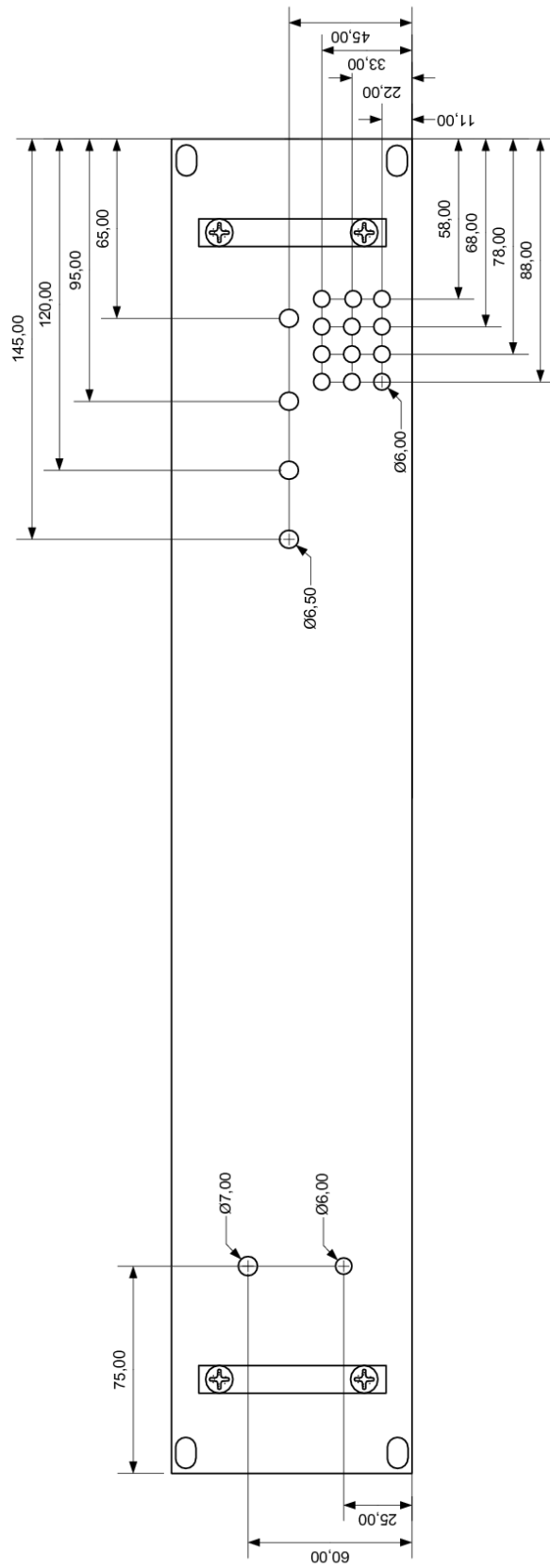
Date: 04.11.2011 14:06:46

Sheet 1/1

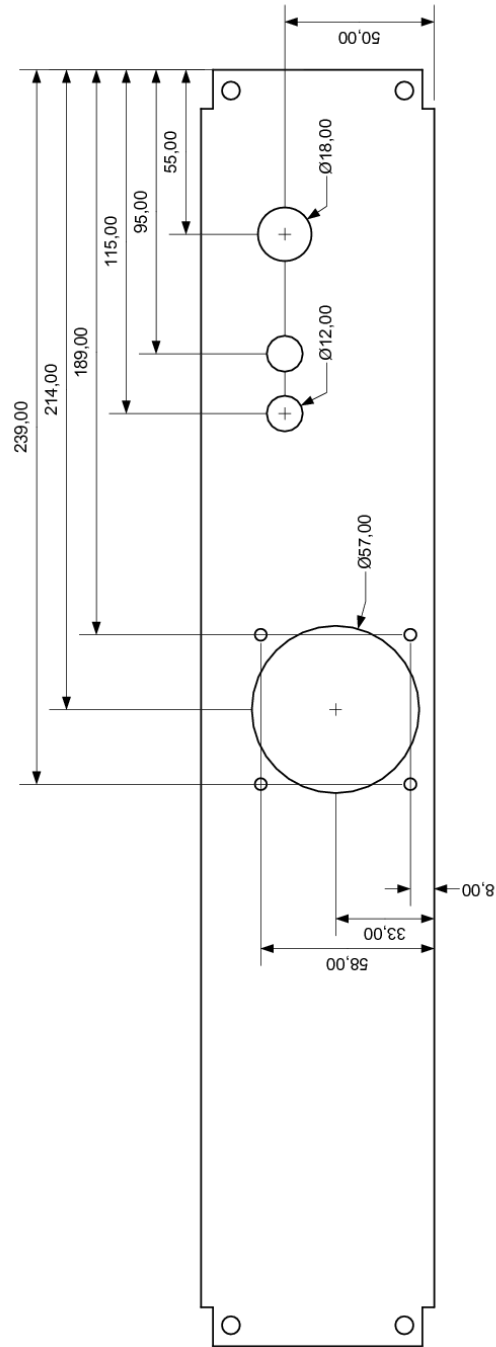


Anhang D Bauteilübersicht

Stück	Artikelbeschreibung	Hersteller	Distribut or	Bestell-Nr.	Sonstiges
10	AD8318 HF-Detektor	Analog-Devices	Farnell	1859716	IC1
10	Sy100elt22 TTL to ECL translator	Micrel	Farnell	1100682	IC3
10	RP73D1J52R3BTDG 52,30hm Widerstand, 0603	TE CONNECTIVIY	Farnell	1752345RL	R1
20	LGQ971 LED grün 0603	Osram	Farnell	1226372	LED1, LED2
5	44WR100KLF, 100K Trimmer SMD	BI technologies	Farnell	1520653	R21
10	LM385M, einstellbare Spannungsreferenz	National Semiconductor	Farnell	1215208	T3
3	DS1023S-100 Programmable delay line	Maxim	Farnell	1379797	IC5
3	MCTIMR-08 8-fachSchalter	Multicomp	Farnell	1522015	S1
10	Filter Lötmontage 5500pF	Tusonix	Farnell	1186426	
3	4012C-10 Richtkoppler 1-2GHz 10dB	Narda			
3	4013C-10 Richtkoppler 2-4GHz 10dB	Narda			
3	4014C-10 Richtkoppler 4-8GHz 10dB	Narda			
1	Einschub 2HE 340mm	Schroff	Farnell	1816036	
1	2HE Griffe	Schroff	Farnell	1370448	
20	Kondensator 1nF 0402	Murata	Farnell	1828882	
10	Kondensator 10nF 0402	Murata	Farnell	1284119	
40	Kondensator 100nF 0603	Yageo	Farnell	1362556	
10	Kondensator 22pF 0603	Kemet	Farnell	1813429	
40	Kondensator 100pF 0603	Yageo	Farnell	722080	
10	Kondensator Tantal 330nF 1206	Kemet	Farnell	1457422	
40	Kondensator 39nF 0603	Yageo	Farnell	3019536	
6	AD8055	TI	Farnell	1660980	IC4
1	PCM50UD07 Netzteil	XP Power	Farnell	1109901	
1	DIN Einbaubuchse 5Pol	Binder	Farnell	1122606	
2	Sicherungshalter	Bulgin	Farnell	3510372	
10	Feinsicherung 5x20 1A F	Bussmann	Farnell	1123100	
1	Lüfter 60mm	NMB	Farnell	9420142	
1	Schutzgitter 60mm	Sepa	Farnell	4218802	



1:2	Gehäuse Einschub Frontplatte	07.11.2011	mm
	Front		



1:2	Gehäuse Einschub	07.11.2011	mm
	Rückseite		

Anhang F Messdaten Ausgangskennlinien

P_{in} [dBm]	$U_{FE1,3GHz}$ [V]	$U_{FE3,24GHz}$ [V]	$U_{FE5,07GHz}$ [V]	P_{in} [dBm]	$U_{FE1,3GHz}$ [V]	$U_{FE3,24GHz}$ [V]	$U_{FE5,07GHz}$ [V]
-50	0,872	0,862	0,92	-14	0,068	0,188	0,349
-49	0,861	0,859	0,92	-13	0,044	0,163	0,32
-48	0,85	0,855	0,92	-12	0,019	0,139	0,302
-47	0,837	0,85	0,92	-11	-0,005	0,115	0,278
-46	0,821	0,847	0,917	-10	-0,031	0,092	0,253
-45	0,804	0,842	0,916	-9	-0,055	0,068	0,227
-44	0,784	0,835	0,913	-8	-0,08	0,043	0,202
-43	0,764	0,827	0,909	-7	-0,104	0,019	0,176
-42	0,743	0,818	0,905	-6	-0,129	-0,006	0,152
-41	0,721	0,806	0,9	-5	-0,154	-0,03	0,128
-40	0,699	0,791	0,892	-4	-0,177	-0,054	0,106
-39	0,676	0,775	0,885	-3	-0,202	-0,078	0,082
-38	0,652	0,756	0,876	-2	-0,226	-0,102	0,057
-37	0,628	0,735	0,865	-1	-0,251	-0,127	0,032
-36	0,604	0,714	0,852	0	-0,276	-0,151	0,007
-35	0,58	0,692	0,838	1	-0,301	-0,175	-0,017
-34	0,556	0,67	0,822	2	-0,327	-0,2	-0,039
-33	0,531	0,646	0,803	3	-0,353	-0,225	-0,063
-32	0,507	0,622	0,784	4	-0,379	-0,25	-0,087
-31	0,482	0,598	0,763	5	-0,405	-0,275	-0,111
-30	0,459	0,574	0,741	6	-0,431	-0,299	-0,135
-29	0,434	0,551	0,718	7	-0,456	-0,324	-0,16
-28	0,411	0,526	0,694	8	-0,481	-0,349	-0,185
-27	0,386	0,502	0,67	9	-0,505	-0,374	-0,21
-26	0,362	0,478	0,647	10	-0,528	-0,4	-0,235
-25	0,337	0,453	0,621	11	-0,55	-0,426	-0,259
-24	0,313	0,429	0,597	12	-0,57	-0,452	-0,283
-23	0,289	0,404	0,574	13	-0,589	-0,477	-0,307
-22	0,263	0,381	0,549	14	-0,605	-0,503	-0,331
-21	0,238	0,356	0,525	15	-0,62	-0,527	-0,357
-20	0,214	0,332	0,501	16	-0,634	-0,551	-0,382
-19	0,19	0,308	0,476	17	-0,646	-0,574	-0,409
-18	0,166	0,284	0,452	18	-0,648	-0,602	-0,434
-17	0,142	0,26	0,426	19	-0,648	-0,602	-0,452
-16	0,118	0,237	0,399	20	-0,648	-0,602	
-15	0,093	0,212	0,376				

Anhang G Matlab Code

```
001 clear
002 close all
003 clc
004
005 %Eingangsparameter:
006 q = 0.1e-9; %Ladung des Bunches
007
008 %Eingabe der Dämpfung zwischen Resonator und Front-End
Eingang
009 daempfung_U1 = 10; %Spannungsdämpfung in dB!!
010 daempfung_U2 = 10;
011 daempfung_U3 = 10;
012
013 for i = 1 : 1 : 10
014
015 %bunch_g = 2.5e-3;
016 bunch_g = i*10^-3;
017 %bunch_r = 2.5e-3;
018 bunch_r = i*10^-3;
019
020 Z = 50; %Wellenwiderstand der Leitung
021 c = 299792458; %Lichtgeschwindigkeit [m/s]
022
023 %% Mode bei 1.3GHz
024 Q1 = 248.169; %externe Güte des Resonators bei 1.3GHz
025 R_Q1 = 42.3479; %normalisierte Shunt Impedanz
026 f1 = 1.3*10^9; %Frequenz des Modes
027 w1 = 2*pi*f1; %äquivalente Kreisfrequenz
028
029 S1 = (w1/2)*sqrt((Z/Q1)*R_Q1);
030
031 %Berechnung des Formfaktors für gaußförmige
Ladungsverteilung
032 F1_gauss = exp(-w1^2*bunch_g^2/2/c^2);
033
034 %Berechnung des Formfaktors für rechteckige
Ladungsverteilung
035 F1_rect = (sin((w1*bunch_r)/2/c))/(w1*bunch_r/2/c);
036
037 %Berechnung der Ausgangsspannung und -leistung
038 U1_rect = q*S1*F1_rect / (10^(daempfung_U1/20));
039 P1_rect = U1_rect^2/Z;
040 P1_rect_dBm = 10*log10(P1_rect/0.001);
041
042 U1_gauss = q*S1*F1_gauss / (10^(daempfung_U1/20));
043 P1_gauss = U1_gauss^2/Z;
044 P1_gauss_dBm = 10*log10(P1_gauss/0.001);
045
046 %% Mode bei 3,24GHz
047 Q2 = 434.358; %externe Güte des Resonators bei 1.3GHz
```

```
048 R_Q2 = 32.4346; %normalisierte Shunt Impedanz
049 f2 = 3.24*10^9; %Frequenz des Modes
050 w2 = 2*pi*f2; %äquivalente Kreisfrequenz
051
052 S2 = (w2/2)*sqrt((Z/Q2)*R_Q2);
053
054 %Berechnung des Formfaktors für gaußförmige
Ladungsverteilung
055 F2_gauss = exp(-w2^2*bunch_g^2/2/c^2);
056
057 %Berechnung des Formfaktors für rechteckige
Ladungsverteilung
058 F2_rect = (sin((w2*bunch_r)/2/c))/(w2*bunch_r/2/c);
059
060 %Berechnung der Ausgangsspannung und -leistung
061 U2_rect = q*S2*F2_rect / (10^(daempfung_U2/20));
062 P2_rect = U2_rect^2/Z;
063 P2_rect_dBm = 10*log10(P2_rect/0.001);
064
065 U2_gauss = q*S2*F2_gauss / (10^(daempfung_U2/20));
066 P2_gauss = U2_gauss^2/Z;
067 P2_gauss_dBm = 10*log10(P2_gauss/0.001);
068
069 %% Mode bei 5.07GHz
070 Q3 = 606.002; %externe Güte des Resonators bei 1.3GHz
071 R_Q3 = 15.5013; %normalisierte Shunt Impedanz
072 f3 = 5.07*10^9; %Frequenz des Modes
073 w3 = 2*pi*f3; %äquivalente Kreisfrequenz
074
075 S3 = (w3/2)*sqrt((Z/Q3)*R_Q3);
076
077 %Berechnung des Formfaktors für gaußförmige
Ladungsverteilung
078 F3_gauss = exp(-w3^2*bunch_g^2/2/c^2);
079
080 %Berechnung des Formfaktors für rechteckige
Ladungsverteilung
081 F3_rect = (sin((w3*bunch_r)/2/c))/(w3*bunch_r/2/c);
082
083 %Berechnung der Ausgangsspannung und -leistung
084 U3_rect = q*S3*F3_rect / (10^(daempfung_U3/20));
085 P3_rect = U3_rect^2/Z;
086 P3_rect_dBm = 10*log10(P3_rect/0.001);
087
088 U3_gauss = q*S3*F3_gauss / (10^(daempfung_U3/20));
089 P3_gauss = U3_gauss^2/Z;
090 P3_gauss_dBm = 10*log10(P3_gauss/0.001);
091
092 %% angedeutetes resultierendes Spektrum
093
094 % rect = [P1_rect_dBm+daempfung_U1/2
P2_rect_dBm+daempfung_U2/2 P3_rect_dBm+daempfung_U3/2];
095 % subplot(1,2,1)
096 % bar(rect, 0.1, 'r'),
097 % title('Leistungsspektrum Rechteck'),
098 % xlabel('Mode'),
099 % ylabel('dBm'),
```

```

100 %
101 % gauss = [P1_gauss_dBm+daempfung_U1/2
P2_gauss_dBm+daempfung_U2/2 P3_gauss_dBm+daempfung_U3/2];
102 % subplot(1,2,2)
103 % bar(gauss, 0.1, 'g'),
104 % title('Leistungsspektrum Gauss'),
105 % xlabel('Mode'),
106 % ylabel('dBm'),
107
108 %% Gauss Bunch Rückrechnung
109
110 fehler_U1 = 0; % Fehler der Spannungsamplitude in Volt
111 fehler_U2 = 0;
112 fehler_U3 = 0;
113
114 bunch_g_inv_U1dU2 = sqrt(abs(log(((U1_gauss +
fehler_U1)*S2)/((U2_gauss + fehler_U2)*S1)))/(w2^2-
w1^2))*2*c^2);
115
116 bunch_g_inv_U1dU3 = sqrt(abs((log(((U1_gauss +
fehler_U1)*S3)/((U3_gauss + fehler_U3)*S1)))/(w3^2-
w1^2))*2*c^2);
117
118 bunch_g_inv_U3dU2 = sqrt(abs((log(((U2_gauss +
fehler_U2)*S3)/((U3_gauss + fehler_U3)*S2)))/(w3^2-
w2^2))*2*c^2);
119
120 % %Darstellung der einzelnen Bunchlängen und Ist-Wert
121 % var = cat(1, bunch_g*1000, bunch_g_inv_U1dU2*1000
,bunch_g_inv_U1dU3*1000 ,bunch_g_inv_U3dU2*1000);
122 %
123 % figure(10)
124 % barh(var, 'stacked', 'y')
125 % set(gca, 'YTickLabel', {'Ist-
Länge', 'U1/U2', 'U1/U3', 'U3/U2'})
126 % title('einzelne Bunchlängen Gauss und eingegebener Ist-
Wert')
127 %xlabel(' Bunchlänge [mm]')

128 %% Gauss Bunch Rückrechnung mit Rect-Amplituden am Eingang
129
130 bunch_g_inv_U1dU2_rect = sqrt(abs(log(((U1_rect +
fehler_U1)*S2)/((U2_rect + fehler_U2)*S1)))/(w2^2-w1^2))*2*c^2);

131
132 bunch_g_inv_U1dU3_rect = sqrt(abs((log(((U1_rect +
fehler_U2)*S3)/((U3_rect + fehler_U3)*S1)))/(w3^2-
w1^2))*2*c^2);

133
134 bunch_g_inv_U3dU2_rect = sqrt(abs((log(((U2_rect +
fehler_U2)*S3)/((U3_rect+ fehler_U3)*S2)))/(w3^2-w2^2))*2*c^2);

135
136 % %Darstellung der einzelnen Bunchlängen und Ist_Wert
137 % var = cat(1, bunch_r*1000, bunch_g_inv_U1dU2_rect*1000
,bunch_g_inv_U1dU3_rect*1000 ,bunch_g_inv_U3dU2_rect*1000);

```



```
138 %
139 % figure(11)
140 % barh(var,'stacked','y')
141 % set(gca,'YTickLabel',{'Ist-Länge',
142 % 'U1/U2','U1/U3','U3/U2'})
143 % title('einzelne Bunchlängen mit Gaussrückrechnung und
144 % Rectamplituden und eingegebener Ist-Wert');
145 %xlabel(' Bunchlänge [mm]')

143 %% Rect Bunch Rückrechnung
144
145 bunch_r_invers_U1dU2 = sqrt(((6*U1_rect*S2/U2_rect/S1)-
146 6)/(((U1_rect*S2/U2_rect/S1)*(w2/2/c)^2)-(w1/2/c)^2));

146
147 bunch_r_invers_U1dU3 = sqrt(((6*U1_rect*S3/U3_rect/S1)-
148 6)/(((U1_rect*S3/U3_rect/S1)*(w3/2/c)^2)-(w1/2/c)^2));

148
149 bunch_r_invers_U3dU2 = sqrt(((6*U3_rect*S2/U2_rect/S3)-
150 6)/(((U3_rect*S2/U2_rect/S3)*(w2/2/c)^2)-(w3/2/c)^2));

150
151
152 %% Fehlerrechnung für Gauss-Amplitude
153
154 %Bestimmung der Standardabweichung bei der jeweiligen
155 %Leistung durch
156 %Interpolation zwischen den Messwerten
157 if (P1_gauss_dBm > -50) && (P1_gauss_dBm < -40)
158     sigma_U1_g = 0.0095 + abs((0.0181-
159 0.0095)/10)*(P1_gauss_dBm+50);

158 elseif (P1_gauss_dBm > -40) && (P1_gauss_dBm < -30)
159     sigma_U1_g = 0.007 + abs((0.0095-0.007)/10)*(P1_gauss_dBm
160 + 40);

160 elseif (P1_gauss_dBm > -30) && (P1_gauss_dBm < -20)
161     sigma_U1_g = 0.0048 + abs((0.007-0.0048)/10)*(P1_gauss_dBm
162 +30);

162 elseif (P1_gauss_dBm > -20) && (P1_gauss_dBm < -10)
163     sigma_U1_g = 0.0056 + abs((0.0048-
164 0.0056)/10)*(P1_gauss_dBm+20);

164 elseif (P1_gauss_dBm > -10) && (P1_gauss_dBm < 0)
165     sigma_U1_g = 0.0046 + abs((0.0056-
166 0.0046)/10)*(P1_gauss_dBm+10);

166 elseif (P1_gauss_dBm > 0) && (P1_gauss_dBm < 10)
167     sigma_U1_g = 0.0046 + abs((0.0052-0.0046)/10)*
168 P1_gauss_dBm;
169 end

169
170 if (P2_gauss_dBm > -50) && (P2_gauss_dBm < -40)
```

```
171  sigma_U2_g = 0.0095 + abs((0.0181-
0.0095)/10)*(P2_gauss_dBm+50);

172  elseif (P2_gauss_dBm > -40) && (P2_gauss_dBm < -30)
173  sigma_U2_g = 0.007 + abs((0.0095-0.007)/10)*(P2_gauss_dBm
+ 40);

174  elseif (P2_gauss_dBm > -30) && (P2_gauss_dBm < -20)
175  sigma_U2_g = 0.0048 + abs((0.007-0.0048)/10)*(P2_gauss_dBm
+30);

176  elseif (P2_gauss_dBm > -20) && (P2_gauss_dBm < -10)
177  sigma_U2_g = 0.0056 + abs((0.0048-
0.0056)/10)*(P2_gauss_dBm+20);

178  elseif (P2_gauss_dBm > -10) && (P2_gauss_dBm < 0)
179  sigma_U2_g = 0.0046 + abs((0.0056-
0.0046)/10)*(P2_gauss_dBm+10);

180  elseif (P2_gauss_dBm > 0) && (P2_gauss_dBm < 10)
181  sigma_U2_g = 0.0046 + abs((0.0052-0.0046)/10)*
P2_gauss_dBm;
182  end

183
184  if (P3_gauss_dBm > -50) && (P3_gauss_dBm < -40)
185  sigma_U3_g = 0.0095 + abs((0.0181-
0.0095)/10)*(P3_gauss_dBm+50);

186  elseif (P3_gauss_dBm > -40) && (P3_gauss_dBm < -30)
187  sigma_U3_g = 0.007 + abs((0.0095-0.007)/10)*(P3_gauss_dBm
+ 40);

188  elseif (P3_gauss_dBm > -30) && (P3_gauss_dBm < -20)
189  sigma_U3_g = 0.0048 + abs((0.007-0.0048)/10)*(P3_gauss_dBm
+30);

190  elseif (P3_gauss_dBm > -20) && (P3_gauss_dBm < -10)
191  sigma_U3_g = 0.0056 + abs((0.0048-
0.0056)/10)*(P3_gauss_dBm+20);

192  elseif (P3_gauss_dBm > -10) && (P3_gauss_dBm < 0)
193  sigma_U3_g = 0.0046 + abs((0.0056-
0.0046)/10)*(P3_gauss_dBm+10);

194  elseif (P3_gauss_dBm > 0) && (P3_gauss_dBm < 10)
195  sigma_U3_g = 0.0046 + abs((0.0052-0.0046)/10)*
P3_gauss_dBm;
196  end
197
198  %Berechnung von U_FE über die Ausgangskennlinie Frontend,
199  %um an dieser Stelle der Kennlinie die resultierende
200  %Abweichung der Spannungsamplituden zu bestimmen
201
202  U1_FE_g = -0.0243*P1_gauss_dBm - 0.274;
203  U2_FE_g = -0.024*P2_gauss_dBm - 0.149;
204  U3_FE_g = -0.0244*P1_gauss_dBm - 9.028e-3;
```

```

205

206 %Berechnung des Deltas der Amplitude am Resonator über
207 %Geradengleichungen der Ausgangskennlinien Front-End
208
209 P_min_1G3_g = -41.1 * (U1_FE_g + sigma_U1_g) - 11.27;
210 P_max_1G3_g = -41.1 * (U1_FE_g - sigma_U1_g) - 11.27;
211 delta_U1_g = (sqrt(0.05*10^(P_max_1G3_g/10)))-
(sqrt(0.05*10^(P_min_1G3_g/10)));

212
213 P_min_3G24_g = -41.494 * (U2_FE_g + sigma_U2_g) - 6.1826;
214 P_max_3G24_g = -41.494 * (U2_FE_g - sigma_U2_g) - 6.1826;
215 delta_U2_g = (sqrt(0.05*10^(P_max_3G24_g/10)))-
(sqrt(0.05*10^(P_min_3G24_g/10)));

216
217 P_min_5G07_g = -40.98 * (U3_FE_g + sigma_U3_g) - 0.37;
218 P_max_5G07_g = -40.98 * (U3_FE_g - sigma_U3_g) - 0.37;
219 delta_U3_g = (sqrt(0.05*10^(P_max_5G07_g/10)))-
(sqrt(0.05*10^(P_min_5G07_g/10)));

220
221 %Berechnung der Ableitungen
222 f1_Strich_U1 = sqrt(2*c^2/(w2^2-
w1^2))/(2*sqrt(log((S2*U1_gauss)/(S1*U2_gauss)))*U1_gauss);

223 f1_Strich_U2 = sqrt(2*c^2/(w2^2-
w1^2))/((2*sqrt(log((S2*U1_gauss)/(S1*U2_gauss))))*(-U2_gauss));

224
225 f2_Strich_U1 = sqrt(2*c^2/(w3^2-
w1^2))/(2*sqrt(log((S3*U1_gauss)/(S1*U3_gauss)))*U1_gauss);

226 f2_Strich_U3 = sqrt(2*c^2/(w3^2-
w1^2))/((2*sqrt(log((S3*U1_gauss)/(S1*U3_gauss))))*(-U3_gauss));
227
228 f3_Strich_U2 = sqrt(2*c^2/abs(w3^2-
w2^2))/(2*U2_gauss*sqrt(log((S3*U2_gauss)/(S2*U3_gauss))));

229 f3_Strich_U3 = sqrt(2*c^2/abs(w3^2-
w2^2))/((2*sqrt(log((S3*U2_gauss)/(S2*U3_gauss))))*(-U3_gauss));

230
231 %Berechnung des mittleren Fehlers der Bunchlängen
232 delta_bunch_U1U2_g(i) = sqrt((f1_Strich_U1*delta_U1_g)^2 +
(f1_Strich_U2*delta_U2_g)^2);

233 delta_bunch_U1U3_g(i) = sqrt((f2_Strich_U1*delta_U1_g)^2 +
(f2_Strich_U3*delta_U3_g)^2);

234 delta_bunch_U2U3_g(i) = sqrt((f3_Strich_U2*delta_U2_g)^2 +
(f3_Strich_U3*delta_U3_g)^2);

```

```
235
236  %% Fehlerrechnung für Rect-Amplitude
237
238  %Bestimmung der Standardabweichung bei der jeweiligen
239  %Leistung durch Interpolation zwischen den Messwerten

240  if (P1_rect_dBm > -50) && (P1_rect_dBm < -40)
241      sigma_U1_r = 0.0095 + abs((0.0181-
0.0095)/10)*(P1_rect_dBm+50);

242  elseif (P1_rect_dBm > -40) && (P1_rect_dBm < -30)
243      sigma_U1_r = 0.007 + abs((0.0095-0.007)/10)* (P1_rect_dBm
+ 40);

244  elseif (P1_rect_dBm > -30) && (P1_rect_dBm < -20)
245      sigma_U1_r = 0.0048 + abs((0.007-0.0048)/10)*(P1_rect_dBm
+ 30);

246  elseif (P1_rect_dBm > -20) && (P1_rect_dBm < -10)
247      sigma_U1_r = 0.0056 + abs((0.0048-0.0056)/10)*(P1_rect_dBm
+20);

248  elseif (P1_rect_dBm > -10) && (P1_rect_dBm < 0)
249      sigma_U1_r = 0.0046 + abs((0.0056-0.0046)/10)*(P1_rect_dBm
+10);

250  elseif (P1_rect_dBm > 0) && (P1_rect_dBm < 10)
251      sigma_U1_r = 0.0046 + abs((0.0052-0.0046)/10)*
P1_rect_dBm;
252  end

253
254  if (P2_rect_dBm > -50) && (P2_rect_dBm < -40)
255      sigma_U2_r = 0.0095 + abs((0.0181-0.0095)/10)*(P2_rect_dBm
+50);

256  elseif (P2_rect_dBm > -40) && (P2_rect_dBm < -30)
257      sigma_U2_r = 0.007 + abs((0.0095-0.007)/10)* (P2_rect_dBm
+ 40);

258  elseif (P2_rect_dBm > -30) && (P2_rect_dBm < -20)
259      sigma_U2_r = 0.0048 + abs((0.007-0.0048)/10)*(P2_rect_dBm
+ 30);

260  elseif (P2_rect_dBm > -20) && (P2_rect_dBm < -10)
261      sigma_U2_r = 0.0056 + abs((0.0048-0.0056)/10)*(P2_rect_dBm
+20);

262  elseif (P2_rect_dBm > -10) && (P2_rect_dBm < 0)
263      sigma_U2_r = 0.0046 + abs((0.0056-0.0046)/10)*(P2_rect_dBm
+10);

264  elseif (P2_rect_dBm > 0) && (P2_rect_dBm < 10)
265      sigma_U2_r = 0.0046 + abs((0.0052-0.0046)/10)*
P2_rect_dBm;
```

```
266 end

267
268 if (P3_rect_dBm > -50) && (P3_rect_dBm < -40)
269     sigma_U3_r = 0.0095 + abs((0.0181-0.0095)/10)*(P3_rect_dBm
+50);

270 elseif (P3_rect_dBm > -40) && (P3_rect_dBm < -30)
271     sigma_U3_r = 0.007 + abs((0.0095-0.007)/10)* (P3_rect_dBm
+ 40);

272 elseif (P3_rect_dBm > -30) && (P3_rect_dBm < -20)
273     sigma_U3_r = 0.0048 + abs((0.007-0.0048)/10)*(P3_rect_dBm
+ 30);

274 elseif (P3_rect_dBm > -20) && (P3_rect_dBm < -10)
275     sigma_U3_r = 0.0056 + abs((0.0048-0.0056)/10)*(P3_rect_dBm
+20);

276 elseif (P3_rect_dBm > -10) && (P3_rect_dBm < 0)
277     sigma_U3_r = 0.0046 + abs((0.0056-0.0046)/10)*(P3_rect_dBm
+10);

278 elseif (P3_rect_dBm > 0) && (P3_rect_dBm < 10)
279     sigma_U3_r = 0.0046 + abs((0.0052-0.0046)/10)*
P3_rect_dBm;
280 end

281
282 U1_FE_r = -0.0243*P1_rect_dBm - 0.274;
283 U2_FE_r = -0.024*P2_rect_dBm - 0.149;
284 U3_FE_r = -0.0244*P1_rect_dBm - 9.028e-3;
285
286 %Berechnung des Deltas der Amplitude am Resonator über
287 %Geradengleichungen der Ausgangskennlinien Front-End
288
289 P_min_1G3_r = -41.1 * (U1_FE_r + sigma_U1_r) - 11.27;
290 P_max_1G3_r = -41.1 * (U1_FE_r - sigma_U1_r) - 11.27;
291 delta_U1_r = (sqrt(0.05*10^(P_max_1G3_r/10)))-
(sqrt(0.05*10^(P_min_1G3_r/10)));

292
293 P_min_3G24_r = -41.494 * (U2_FE_r + sigma_U2_r) - 6.1826;
294 P_max_3G24_r = -41.494 * (U2_FE_r - sigma_U2_r) - 6.1826;
295 delta_U2_r = (sqrt(0.05*10^(P_max_3G24_r/10)))-
(sqrt(0.05*10^(P_min_3G24_r/10)));

296
297 P_min_5G07_r = -40.98 * (U3_FE_r + sigma_U3_r) - 0.37;
298 P_max_5G07_r = -40.98 * (U3_FE_r - sigma_U3_r) - 0.37;
299 delta_U3_r = (sqrt(0.05*10^(P_max_5G07_r/10)))-
(sqrt(0.05*10^(P_min_5G07_r/10)));

300
301 %Berechnung der Ableitungen
302
303 W1 = w1/2/c;
```

```

304 W2 = w2/2/c;
305 W3 = w3/2/c;
306
307 K1 = S2/S1;
308 g1_Strich_U1 = ((6*K1/(U2_rect*((U1_rect*K1*W2^2/U2_rect)-
W1^2))) - ((K1*W2^2*(6*U1_rect*K1/U2_rect-
6))/(U2_rect*(U1_rect*K1*W2^2/U2_rect-W1^2)^2))) /
(2*sqrt((6*K1*U1_rect/U2_rect-6)/(W2^2*K1*U1_rect/U2_rect-
W1^2)));

309 g1_Strich_U2 = (((W2^2*K1*U1_rect*(6*K1*U1_rect/U2_rect-
6))/(U2_rect^2*(W2^2*K1*U1_rect/U2_rect-W1^2)^2) -
(6*K1*U1_rect/(U2_rect^2*(W2^2*K1*U1_rect/U2_rect-W1^2)))) /
(2*sqrt((6*K1*U1_rect/U2_rect-6)/(W2^2*K1*U1_rect/U2_rect-
W1^2)));

310
311 K2 = S3/S1;
312 g2_Strich_U1 = ((6*K2/(U3_rect*((U1_rect*K2*W3^2/U3_rect)-
W1^2))) - ((K2*W3^2*(6*U1_rect*K2/U3_rect+6))/
(U3_rect*(U1_rect*K2*W3^2/U3_rect-W1^2)^2))) /
(2*sqrt((6*K2*U1_rect/U3_rect-6)/(W3^2*K2*U1_rect/U3_rect-
W1^2)));

313 g2_Strich_U3 = (((W3^2*K2*U1_rect*(6*K2*U1_rect/U3_rect-
6))/(U3_rect^2*(W3^2*K2*U1_rect/U3_rect-W1^2)^2) -
(6*K2*U1_rect/(U3_rect^2*(W3^2*K2*U1_rect/U3_rect-W1^2)))) /
(2*sqrt((6*K2*U1_rect/U3_rect-6)/(W3^2*K2*U1_rect/U3_rect-
W1^2)));

314
315 K3 = S3/S2;
316 g3_Strich_U2 = ((6*K3/(U3_rect*((U2_rect*K3*W3^2/U3_rect)-
W2^2))) - ((K3*W3^2*(6*U2_rect*K3/U3_rect+6))/
(U3_rect*(U2_rect*K3*W3^2/U3_rect-W2^2)^2))) /
(2*sqrt((6*K3*U2_rect/U3_rect-6)/(W3^2*K3*U2_rect/U3_rect-
W2^2)));

317 g3_Strich_U3 = (((W3^2*K3*U2_rect*(6*K3*U2_rect/U3_rect-
6))/(U3_rect^2*(W3^2*K3*U2_rect/U3_rect-W2^2)^2) -
(6*K3*U2_rect/(U3_rect^2*(W3^2*K3*U2_rect/U3_rect-W2^2)))) /
(2*sqrt((6*K3*U2_rect/U3_rect-6)/(W3^2*K3*U2_rect/U3_rect-
W2^2)));

318
319
320 %Berechnung des mittleren Fehlers der Bunchlängen
321 delta_bunch_U1U2_r(i) = sqrt((g1_Strich_U1*delta_U1_r)^2 +
(g1_Strich_U2*delta_U2_r)^2);

322 delta_bunch_U1U3_r(i) = sqrt((g2_Strich_U1*delta_U1_r)^2 +
(g2_Strich_U3*delta_U3_r)^2);

323 delta_bunch_U2U3_r(i) = sqrt((g3_Strich_U2*delta_U2_r)^2 +
(g3_Strich_U3*delta_U3_r)^2);

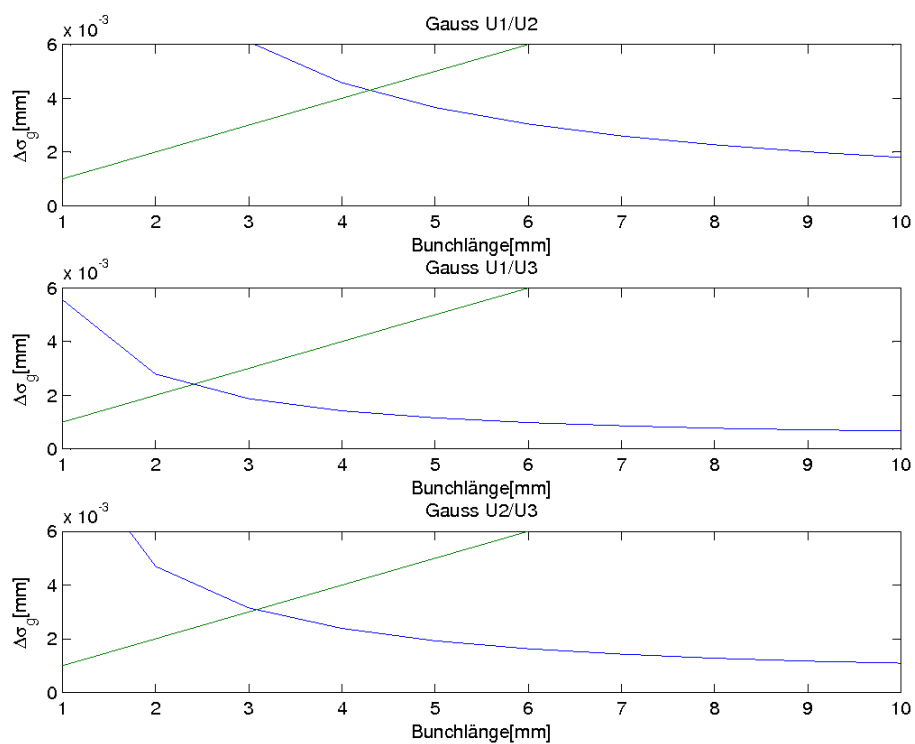
324
325 x_Achse(i) = i;

```

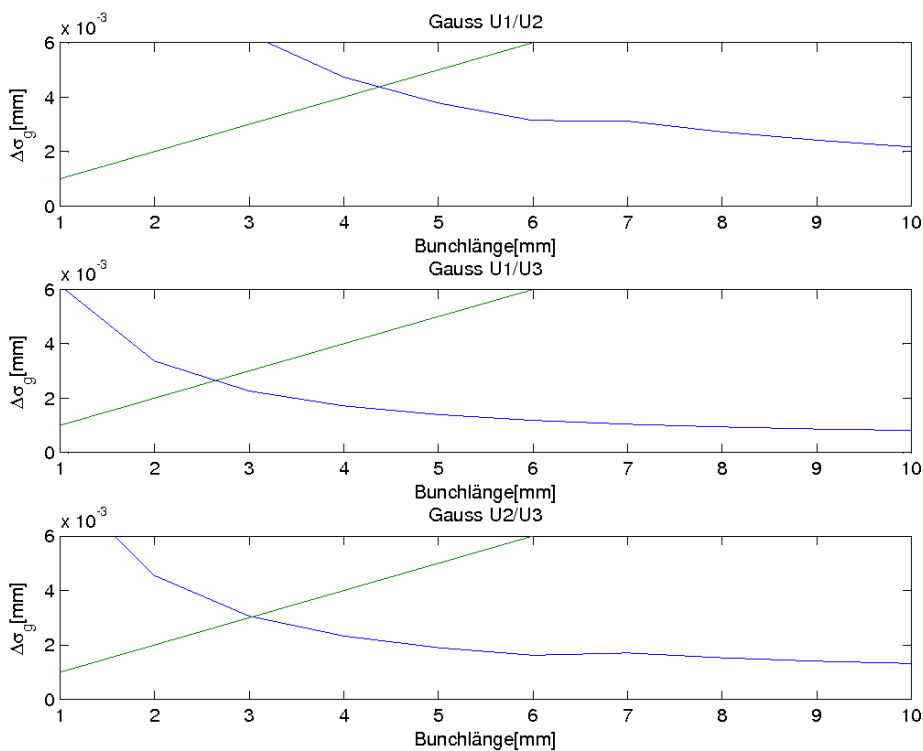
```
326 gerade45(i) = x_Achse(i)*0.001; %Einfügen der 45° Geraden
327 end
328
329 %% Ausgabe Fehlerkurven
330
331 %Gauss-Fehler
332 figure(1)
333 subplot(3,1,1)
334 plot(x_Achse,delta_bunch_U1U2_g,x_Achse,gerade45)
335 title('Gauss U1/U2'),
336 axis([1 10 0 6e-3])
337 xlabel('Bunchlänge [mm]'),
338 ylabel('\Delta\sigma_g [mm]'),
339
340 subplot(3,1,2)
341 plot(x_Achse,delta_bunch_U1U3_g,x_Achse,gerade45)
342 title('Gauss U1/U3'),
343 axis([1 10 0 6e-3])
344 xlabel('Bunchlänge [mm]'),
345 ylabel('\Delta\sigma_g [mm]'),
346
347 subplot(3,1,3)
348 plot(x_Achse,delta_bunch_U2U3_g,x_Achse,gerade45)
349 title('Gauss U2/U3'),
350 axis([1 10 0 6e-3])
351 xlabel('Bunchlänge [mm]'),
352 ylabel('\Delta\sigma_g [mm]'),
353
354 %Rect-Fehler
355 figure(2)
356 subplot(3,1,1)
357 plot(x_Achse,delta_bunch_U1U2_r,x_Achse,gerade45)
358 title('Rect U1/U2'),
359 axis([4 15 0 0.04])
360 xlabel('Bunchlänge [mm]'),
361 ylabel('\Delta\sigma_r [mm]'),
362
363 subplot(3,1,2)
364 plot(x_Achse,delta_bunch_U1U3_r,x_Achse,gerade45)
365 title('Rect U1/U3'),
366 axis([4 15 0 0.015])
367 xlabel('Bunchlänge [mm]'),
368 ylabel('\Delta\sigma_r [mm]'),
369
370 subplot(3,1,3)
371 plot(x_Achse,delta_bunch_U2U3_r,x_Achse,gerade45)
372 title('Rect U2/U3'),
373 axis([4 15 0 0.06])
374 xlabel('Bunchlänge [mm]'),
375 ylabel('\Delta\sigma_r [mm]'),
```

Anhang H Graphen zur Bestimmung der minimalen Bunchlänge

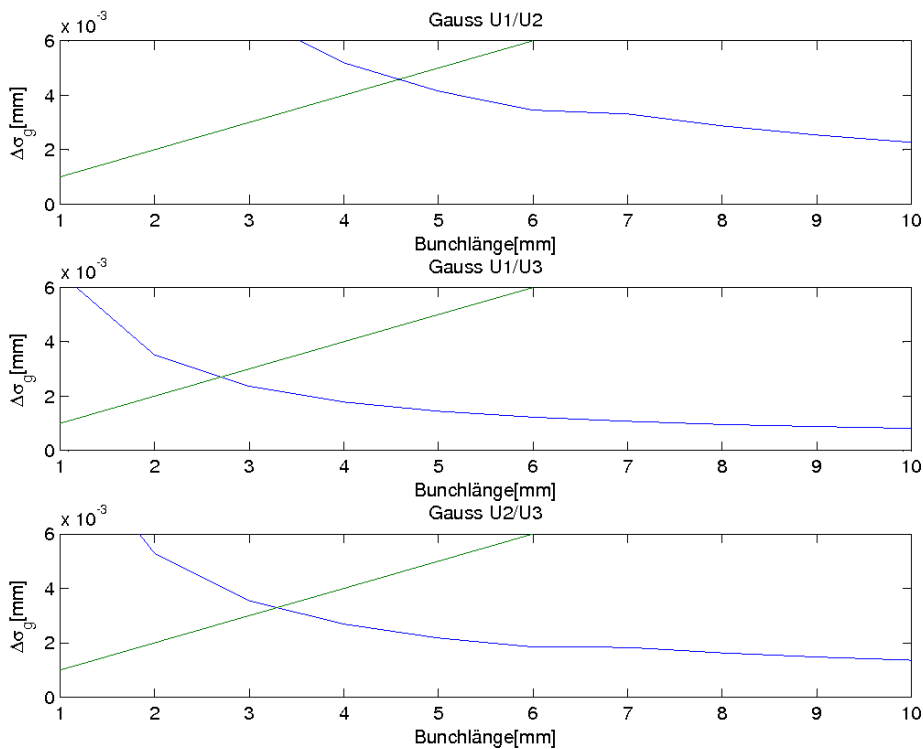
Im Folgenden sind die Graphen für die minimale Bunchlänge in verschiedenen Eingangsleistungsbereichen abgebildet.



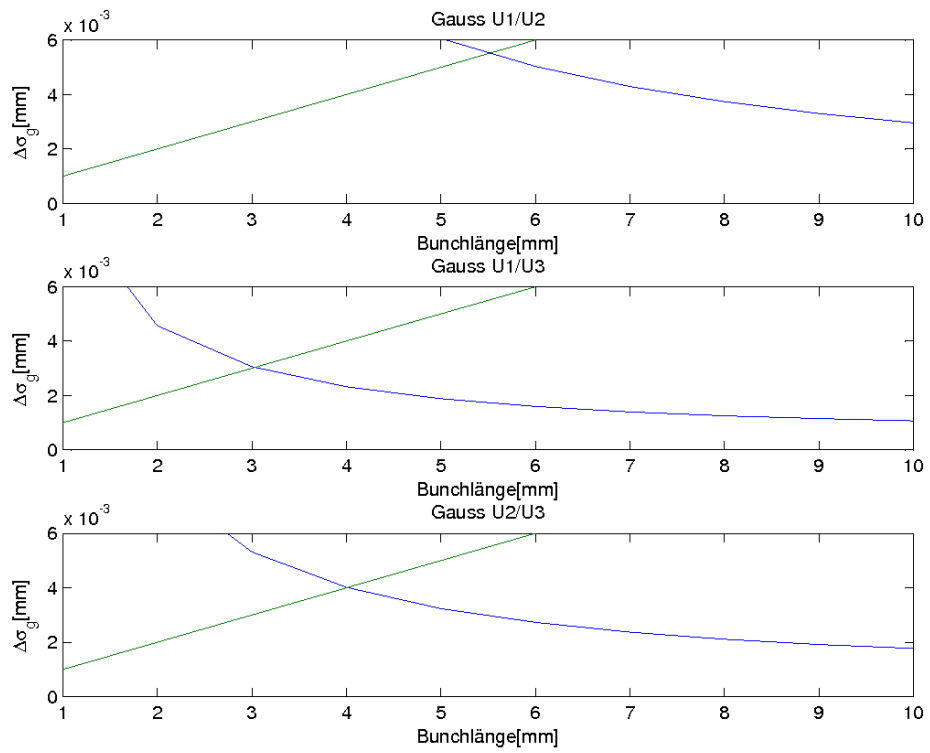
Eingangsleistungsbereich $-10 < P_{in} < 0$



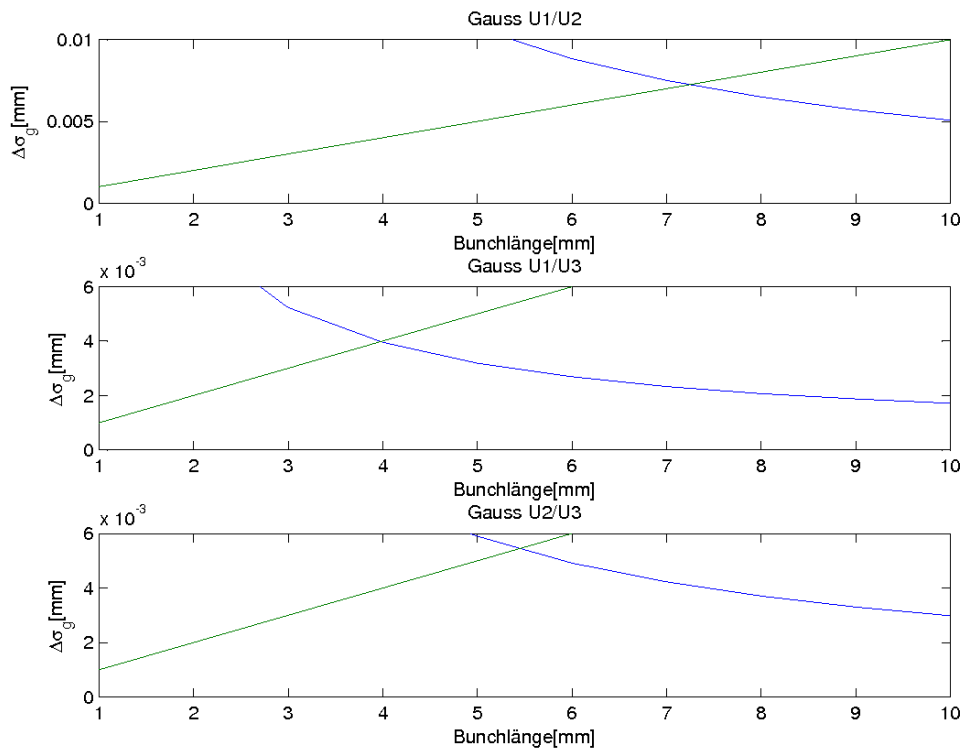
Eingangsleistungsbereich $-20 < P_{in} < -10$



Eingangsleistungsbereich $-30 < P_{in} < -20$



Eingangsleistungsbereich $-30 < P_{in} < -40$



Eingangsleistungsbereich $-50 < P_{in} < -40$

Anhang J partielle Ableitungen

Weiterhin gilt:

$$K_2 = \frac{S_3}{S_1} ; K_3 = \frac{S_3}{S_2}$$

und

$$W_2 = \frac{\omega_2}{2c} ; W_3 = \frac{\omega_3}{2c}$$

Ableitungen für das Verhältnis $\frac{U_1}{U_3}$:

$$\frac{\partial g_2}{\partial U_1} = \frac{\frac{6K_2}{U_3 \left(\frac{U_1 K_2 W_3^2}{U_3} - W_1^2 \right)} - \frac{K_2 W_3^2 \left(\frac{6U_1 K_2}{U_3} - 6 \right)}{U_3 \left(\frac{U_1 K_2 W_3^2}{U_3} - W_1^2 \right)^2}}{2 \sqrt{\frac{6K_2 \frac{U_1}{U_3} - 6}{W_3^2 K_2 \frac{U_1}{U_3} - W_1^2}}}$$

$$\frac{\partial g_2}{\partial U_3} = \frac{\frac{K_2 W_3^2 U_1 \left(\frac{6U_1 K_2}{U_3} - 6 \right)}{U_2^2 \left(\frac{U_1 K_2 W_3^2}{U_3} - W_1^2 \right)^2} - \frac{6K_2 U_1}{U_3^2 \left(\frac{U_1 K_2 W_3^2}{U_3} - W_1^2 \right)}}{2 \sqrt{\frac{6K_2 \frac{U_1}{U_3} - 6}{W_3^2 K_2 \frac{U_1}{U_3} - W_1^2}}}$$

Ableitungen für das Verhältnis $\frac{U_2}{U_3}$:

$$\frac{\partial g_3}{\partial U_2} = \frac{\frac{6K_3}{U_3 \left(\frac{U_2 K_3 W_3^2}{U_3} - W_2^2 \right)} - \frac{K_3 W_3^2 \left(\frac{6U_2 K_3}{U_3} - 6 \right)}{U_3 \left(\frac{U_2 K_3 W_3^2}{U_3} - W_2^2 \right)^2}}{2 \sqrt{\frac{6K_3 \frac{U_2}{U_3} - 6}{W_3^2 K_3 \frac{U_2}{U_3} - W_2^2}}}$$

$$\frac{\partial g_3}{\partial U_3} = \frac{\frac{K_3 W_3^2 U_2 \left(\frac{6U_2 K_3}{U_3} - 6 \right)}{U_2^2 \left(\frac{U_2 K_3 W_3^2}{U_3} - W_2^2 \right)^2} - \frac{6K_3 U_2}{U_3^2 \left(\frac{U_2 K_3 W_3^2}{U_3} - W_2^2 \right)}}{2 \sqrt{\frac{6K_3 \frac{U_2}{U_3} - 6}{W_3^2 K_3 \frac{U_2}{U_3} - W_2^2}}}$$

Literaturverzeichnis

- [1] Lipka, D., Untersuchungen zum longitudinalen Phasenraum an einem Photoinjektor für minimale Strahlemittanz, DESY-Thesis-2004-021, Juli 2004 S. 15-19 und S.83-107
- [2] Schreiber, S., FLASH today, FLASH-workshop, 2011
- [3] Lipka, D., Lund-Nielsen, J., Vogel, V., Cavity for bunch charge, length and dark current measurement, measurement at PITZ, DESY-Vortrag Hamburg, 2011
- [4] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4b/Halbwertsbreite.svg>
[08.11.2011]
- [5] Papula, L., Mathematische Formelsammlung, Vieweg Verlag (2006) S. 186
- [6] Tonisch, F., Development of a Fast ADC for TTF, Firmenschrift DESY, Zeuthen 2000
- [7] Lund-Nielsen, J.: persönliches Meeting, 06.06.2011
- [8] Lipka, D.: persönliches Meeting, 08.06.2011
- [9] Tietze, U., Schenk, Ch., Halbleiter Schaltungstechnik, Springer Verlag, 2002
- [10] Papula, L., Mathematische Formelsammlung, Vieweg Verlag (2006) S. 296-298
- [11] <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v88/i12/e124801> [07.12.2011], Wilke, I., MacLeod, A.M., Gilleseppe, W.A., Berden, G., Knippels, G.M.H., van der Meer, A.F.G., Single-Shot Electron-Beam Bunch Length Measurement, Physical review letters Volume 88 Number 12, 2002
- [12] Takao Ieiri, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Band 361, 3.Auflage, High-resolution bunch-length monitor capable of measuring an rms value of a few mm , 1995, Pages 430-435
- [13] <http://www.slac.stanford.edu/econf/C0508213/PAPERS/THPP035.PDF>
[07.12.2011], Hüning, M., Bolzmann, A., Schlarb, H., Frisch, J., McCormick, D., Ross, M., Smith, T., Rossbach, J., Observation of femtosecond bunch length using a transverse deflecting structure, 2005

Danksagung

Ich möchte mich bei allen, die mich bei dieser Arbeit mit konstruktiver Kritik und tiefgehenden Diskussionen auf technischer sowie menschlicher Ebene unterstützt haben herzlich bedanken.

Herrn Dirk Lipka möchte ich besonders danken für die hervorragende Betreuung und das Korrekturlesen der Arbeit. Herrn Bastian Lorbeer danke ich herzlichst für die Unterstützungen in sämtlichen organisatorischen und technischen Fragen.

Versicherung über die Selbständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 09. Dezember 2011

Ort, Datum

Thomas Wamsat