



---

**Forschungszentrum Karlsruhe**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

---

**Wissenschaftliche Berichte**  
FZKA 7023

# **Schnelle Leistungsmessung an einem 30 GHz / 15 kW Gyrotron**

**G. Saala**

**Institut für Hochleistungsimpuls- und  
Mikrowellentechnik**

**September 2004**

# **Forschungszentrum Karlsruhe**

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7023

## Schnelle Leistungsmessung an einem 30 GHz / 15 kW Gyrotron

G. Saala

Institut für Hochleistungsimpuls-  
und Mikrowellentechnik

Studienarbeit an der Fakultät für Elektrotechnik  
und Informationstechnik, Universität Karlsruhe (TH)

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe  
2004

**Impressum der Print-Ausgabe:**

**Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

**ISSN 0947-8620**

**urn:nbn:de:0005-070232**

# **Schnelle Leistungsmessung an einem 30 GHz / 15 kW Gyrotron**

## **Kurzfassung**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Studienarbeit an der Universität Karlsruhe (TH). Die Durchführung erfolgte am Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM) am Forschungszentrum Karlsruhe (FZK).

Ziel der Arbeit war die Untersuchung der Möglichkeit der schnellen Leistungsmessung an einem industrienahen kompakten Gyrotron-System. Zur Leistungsmessung wird ein Teil der Mikrowellenstrahlung des Gyrotrons ausgekoppelt und einer Detektordiode zugeführt. Als Koppeleinrichtung stand zu Beginn der Arbeit ein Spiegel der quasi-optischen Übertragungsstrecke mit integriertem  $\lambda/4$ -Langlochkoppler zur Verfügung. Die Funktion dieses Langlochkopplers und weiterer, im Lauf der Arbeit aufgebauter, Koppeleinrichtungen wurde charakterisiert. Für die notwendigen Messungen an der Anlage wurden Computerprogramme zur Messwerterfassung und Steuerung der Anlage erstellt. Das Signal der Detektordiode wurde jeweils bei verschiedenen Betriebsparametern des Gyrotrons auf seine Kurz- und Langzeitstabilität untersucht. Außerdem wurde die Abhängigkeit des Diodensignals mit der kalorimetrisch gemessenen Leistung des Gyrotrons kalibriert.

# **Fast Power Measurement on a 30 GHz / 15 kW Gyrotron**

## **Abstract**

This work has been developed in the scope of a study-thesis at the Universität Karlsruhe (TH). The realization took place at the Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM) at the Forschungszentrum Karlsruhe (FZK).

The aim was to investigate the possibilities of a fast power measurement at a compact, industrial gyrotron-system. To measure the output-power a small fraction of the gyrotron microwave radiation is coupled out and analyzed using a diode-detector. At the beginning of the work a mirror of the quasi-optical transmission line with a built in  $\lambda/4$ -coupler was available. This built-in coupler and other coupling structures which have been set up during this work have been characterized. To be able to perform reproducible measurements several computer programs have been developed. Using these programs the gyrotron-system can be remote-controlled from a PC. The diode-detector signal has been analyzed under different conditions of gyrotron operation with respect to its short-term- and long-term-stability. After that the dependency of the calorimetrically measured output-power of the gyrotron has been used to calibrate the diode-voltage.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Beschreibung der Anlage</b>	<b>3</b>
2.1	Gyrotron . . . . .	4
2.1.1	Elektronenstrahlerzeuger . . . . .	6
2.1.2	Strahlkompressionszone . . . . .	6
2.1.3	Resonator . . . . .	7
2.1.4	Ausgangshohlleiter, Kollektor und Röhrengehäuse . . . . .	8
2.2	Quasioptische Übertragungsleitung . . . . .	8
2.3	Applikator . . . . .	10
2.4	Steuer-, Mess- und Sicherheitseinrichtungen . . . . .	11
2.4.1	Geräte zur Steuerung der Anlage . . . . .	11
2.4.2	Messgeräte . . . . .	12
2.5	Sicherheitseinrichtungen . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Erstellte Computer-Programme</b>	<b>16</b>
3.1	Gerätetreiber . . . . .	17
3.1.1	Keithley Digitalmultimeter . . . . .	19
3.1.2	Fluke Messwert Scanner . . . . .	19
3.2	Subroutinen . . . . .	20
3.2.1	Funktionen zur Skalierung . . . . .	20
3.2.2	Funktionen zur Erstellung von Steuerkennlinien . . . . .	21
3.2.3	Funktionen zur Gerätesteuerung . . . . .	21
3.3	Aufbau und Funktion der Programme . . . . .	23
3.3.1	Grundsätzlicher Programmablauf . . . . .	23
3.3.2	Sicherheitsroutinen . . . . .	24
3.3.3	„Measurement“ - Programm zur Signalanalyse . . . . .	25
3.3.4	„Calibration“ - Programm zur Kalibration . . . . .	31
3.3.5	„Characteristics“ - Programm zur Aufnahme von Kennlinien . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Messaufbau</b>	<b>47</b>
4.1	Strahlprofil am Ausgang des Gyrotrons . . . . .	48
4.2	Spiegel mit integrierter Koppelstruktur . . . . .	48
4.3	Pickup-Antenne mit nachfolgendem Richtkoppler . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Messungen und Ergebnisse</b>	<b>56</b>
5.1	Messungen am Spiegel mit integriertem Koppler . . . . .	57

5.1.1	Fehlerbetrachtung zur Beurteilung der Kurzzeitstabilität des Signals	57
5.1.2	Einfluss des Modenrührers . . . . .	58
5.1.3	Änderung der Last im Applikator . . . . .	59
5.1.4	Kondensator parallel zur Detektordiode . . . . .	60
5.1.5	Verbesserung der Signalstabilität durch Mittelwertbildung . . . . .	61
5.1.6	Feldverteilung auf dem Spiegel . . . . .	62
5.1.7	Richtwirkung des Spiegelkopplers . . . . .	64
5.2	Provisorischer Aufbau mit Pickup-Antenne . . . . .	65
5.2.1	Erste Messungen . . . . .	65
5.2.2	Mittelwertbildung . . . . .	67
5.2.3	Kalibrierung . . . . .	67
5.2.4	Untersuchungen zur Langzeitstabilität . . . . .	69
5.3	Endgültiger Aufbau der Koppeleinrichtung . . . . .	71
5.3.1	Niederleistungsmessung . . . . .	73
5.3.2	Messungen bei verschiedenen Antennenpositionen . . . . .	74
5.3.3	Drift der Diodenspannung . . . . .	76
5.3.4	Einfluss der Kühlung . . . . .	79
5.3.5	Feldverteilungen am Horn des Gyrotrons und Fenster des Appli- kators . . . . .	80
5.3.6	Frequenzverhalten des Gyrotrons . . . . .	81
5.3.7	Stabilität der Kalibrierkennlinie . . . . .	82
5.3.8	Vergleich der Diodenspannung mit großer und kleiner Last im Applikator . . . . .	84
5.4	Fazit . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>87</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>90</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>91</b>

# 1 Einleitung

Die erste Mikrowellenröhre, die die Erzeugung von Mikrowellen hoher Leistung bei Frequenzen über 200 MHz ermöglichte, war das Klystron. Erwähnt wurde das Grundprinzip des Klystron erstmals 1935 in einem Artikel von A. und O. Heil [1]. Die Brüder R.H. und S.E. Varian berichteten dann 1939 erstmals von der Realisierung einer solchen Röhre [2]. Die Funktion des Klystrons beruht auf der berührungslosen Kopplung der Energie von einem dichtemodulierten Elektronenstrahl in eine elektromagnetische Welle zur Erzeugung hochfrequenter Strahlung hoher Energie. Bis heute wurden weitere Mikrowellenröhren wie Wanderfeldröhren, Magnetrons und Gyrotrons entwickelt, die ebenfalls das Prinzip der Kopplung zwischen dichtemoduliertem Elektronenstrahl und Hochfrequenzwelle nutzen. Für die Erzeugung von Millimeterwellen sehr hoher Leistungen bis in den Megawatt-Bereich werden Gyrotrons als Quellen eingesetzt. Ihre Funktionsweise wird im nächsten Kapitel erklärt.

Neben dem Einsatz in Rundfunksendern oder der Radartechnik finden Röhren zur Erzeugung von Mikrowellenstrahlung hoher Leistung heute auch vielfach Anwendung in der Materialprozesstechnik. Eine der wichtigsten Anwendungen von Gyrotrons ist die Erzeugung, Elektron-Zyklotron-Resonanz-Heizung, Stabilitätskontrolle und Diagnostik von Plasmen in der Fusionsforschung. Hier werden Quellen mit Frequenzen von 110 GHz bis 170 GHz bei Leistungen bis zu 2,2 MW eingesetzt [3].

Weit verbreitet ist der Einsatz von Mikrowellen im ISM-Band (Industrial Scientific Medical) von 2,4–2,5 GHz. Zu dieser Klasse gehören auch die Haushaltsmikrowellenöfen zur Erwärmung von Speisen. Als Quelle kommen bei diesen Geräten ausschließlich Magnetrons zum Einsatz. Der wichtigste Vorteil bei der Erwärmung mittels Mikrowellen ist die direkte Absorption der Energie im Material, wo sie durch Mechanismen wie Ionenleitung, Dipol-Relaxation und Photonen-Phononen-Interaktion in Wärme umgewandelt wird. Dadurch wird das komplette Volumen des zu erwärmenden Materials beheizt, wodurch die Wärmeleitung im Material an Bedeutung verliert. Die Absorptionsfähigkeit ist aber nicht allein vom Material und dessen Temperatur sondern auch bedeutend von der Frequenz abhängig. So weisen viele Materialien wie z.B. Keramiken erst bei höheren Temperaturen ein ausreichendes Absorptionsvermögen für Mikrowellen einer Frequenz von 2,45 GHz auf, wodurch konventionelle Zusatzheizungen im Bereich niedriger Temperaturen erforderlich werden. Durch den Übergang zu höheren Frequenzen kann diese konventionelle Heizung vermieden werden. Außerdem können Hotspots im Material, die durch Interferenzen entstehen, bei hohen Frequenzen leichter vermieden werden.

Am Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM) am Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) wird seit 1994 ein kompaktes Gyrotron-System eingesetzt. Das Gyrotron liefert bei einer Frequenz von 30,4 GHz eine Ausgangsleistung von bis zu 15 kW im Dauerbetrieb. Mit diesem System werden zahlreiche Experimente im Bereich

der Materialprozesstechnik durchgeführt. Die Sinterung von Keramik nimmt dabei einen großen Stellenwert ein. Es werden aber auch Versuche zum Verschweißen von Glas, der Polymerisation von Kunststoffen und ähnliches mehr durchgeführt. Auf die Besonderheiten bei der Anwendung von Mikrowellen / Millimeterwellen in der Materialprozesstechnik wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

Für sämtliche Prozesse ist eine möglichst genaue Leistungsregelung des Gyrotrons erforderlich. Bisher können Rückschlüsse auf die Ausgangsleistung nur über den Umweg von thermischen Effekten gewonnen werden. Gemessen werden dabei entweder Wassertemperaturen im Durchflusskalorimeter oder Oberflächentemperaturen z.B. des Sintergutes. Bei der Messung der Oberflächentemperatur, die meist als Führungsgröße genutzt wird, besteht das Problem der Wärmeabstrahlung, wodurch die Oberfläche meist kälter ist als das Innere des beheizten Materials. Für eine Laufzeitmessung sind Verfahren, die thermische Effekte zur Bestimmung der Mikrowellenleistung nutzen oft zu träge, ungenau oder gar nicht einsetzbar. Bei der Durchstimmung der Leistung des Gyrotrons treten oft Nichtlinearitäten auf, die bis zum Abreißen der HF-Schwingung gehen können. Mit einer Leistungsmessung auf Basis von thermischen Effekten wird dies oft zu spät erkannt. In der vorliegenden Arbeit wird der Aufbau einer schnellen Leistungsmessung am kompakten Technologie-Gyrotron des FZK behandelt. Dabei wird ein kleiner Anteil der Strahlung am Ausgang des Gyrotrons ausgekoppelt und mit einem Dioden-Detektor vermessen. Die Messeinrichtung soll dabei unempfindlich gegen Störungen durch die Rückwirkung aus dem Applikator und Streustrahlung in der quasi-optischen Übertragungstrecke und damit auch unabhängig vom jeweiligen Prozess sein.

In Kapitel 2 wird zunächst der Aufbau des Gyrotron-Systems beschrieben. Dabei werden auch die verschiedenen Methoden zur Leistungsmessung mit ihren Vor- und Nachteilen erläutert.

Alle im System verwendeten Mess- und Steuergeräte verfügen über eine GPIB-Schnittstelle (IEEE 488.2) und werden über einen PC gesteuert. Um bei der Untersuchung der Messeinrichtung zur direkten Leistungsmessung reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten wurden verschiedene Computer-Programme erstellt, die in Kapitel 3 behandelt werden.

Als Koppeleinrichtung in der quasi-optischen Übertragungstrecke stand ein Spiegel mit integriertem Lochkoppler zur Verfügung, der charakterisiert wurde. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde eine weitere Messeinrichtung auf Basis eines Hohlleiters als Pickup-Antenne und eines Richtkopplers aufgebaut. Die Beschreibung der zur Leistungsmessung verwendeten Hardware erfolgt im 4. Kapitel.

Eine Zusammenstellung und Erläuterung der Messungen und deren Ergebnisse ist in Kapitel 5 zu finden. Die abschließende Zusammenfassung der Ergebnisse findet in Kapitel 6 statt.



## 2 Beschreibung der Anlage

Seit 1994 ist am Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM) am Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) ein industrienahe kompaktes Gyrotron-System (Bild 2.1) aufgebaut. Diese Anlage ist speziell für die Anwendung in der Materialprozesstechnik konzipiert. Anwendungsgebiete liegen vor allem in der Sinterung von Keramik, aber auch in der Polymerisation von Kunststoffen oder im Verschweißen von Glas. Dabei werden nicht nur Prozesse und Experimente für wissenschaftliche Zwecke durchgeführt, sondern auch industrielle Anwendungen getestet. Im Folgenden wird der Aufbau und die Funktionsweise der Anlage beschrieben. Kernstück ist das Gyrotron, das die Quelle der Mikrowellenstrahlung darstellt. Vom Ausgang des Gyrotrons wird die Strahlung über eine äußerst kompakte, quasi-optische Übertragungsleitung in den Applikator gelenkt. Im Applikator, dem Ofenraum befindet sich das zu prozessierende Material.

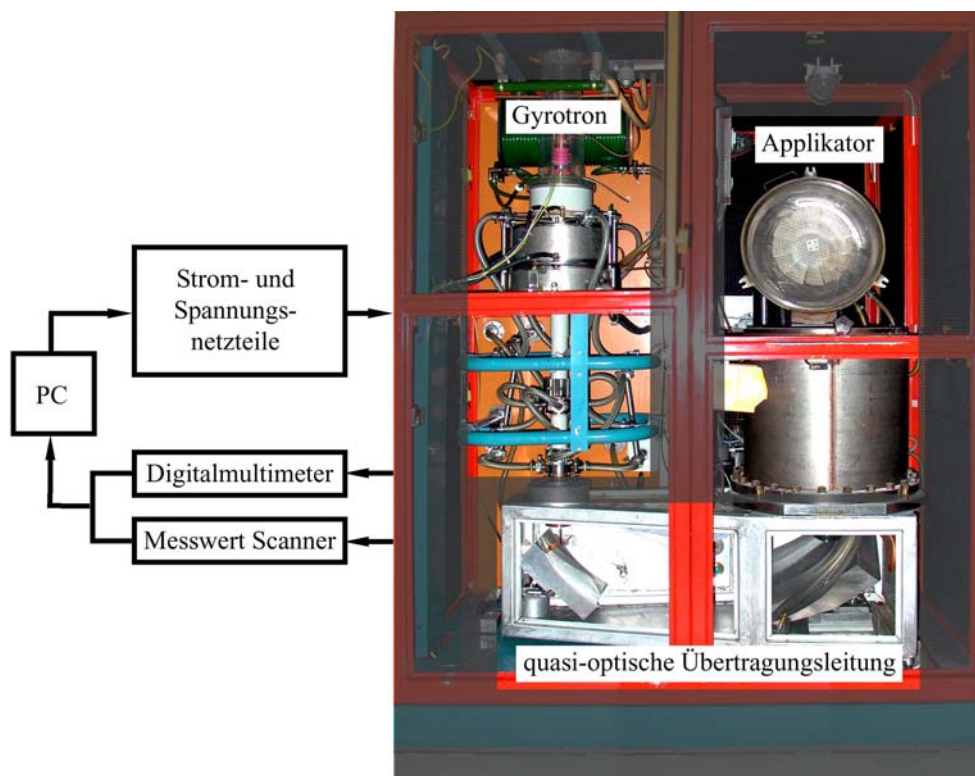


Bild 2.1: Kompaktes Gyrotron-System

## 2.1 Gyrotron

Bis 1939, als das Klystron [2] realisiert wurde, war es nicht möglich, sehr hochfrequente Strahlung hoher Leistung zu erzeugen. Bei gittergesteuerten Scheibenröhren (Trioden und Tetroden) sind die Hochfrequenz (HF)-Elektroden gleichzeitig die gleichstromführenden Elektroden. Die Größe der Elektroden muss daher wesentlich kleiner als die Betriebswellenlänge sein. Bei höheren Frequenzen werden die Elektroden zu klein um die thermische Leistung des Hochleistungselektronenstrahls abzuführen. Über 200 MHz können mit diesen Röhren daher keine hohen Leistungen mehr erreicht werden. Zur Herstellung leistungsstarker Röhren für höhere Frequenzen musste eine Möglichkeit gefunden werden, die Elektroden zur Erzeugung des Elektronenstrahls von den HF-Elektroden zu trennen.

Eine berührungslose Kopplung der Energie vom Elektronenstrahl in eine HF-Welle ist möglich, wenn im Elektronenstrahl Raumladungswolken mit definierter Phasenlage zur HF-Welle erzeugt werden können. In einem solchen dichtemodulierten Elektronenstrahl werden durch Influenz Elektronen abgebremst oder beschleunigt. Die abgebremsten Elektronen geben einen Teil ihrer Bewegungsenergie an die HF-Welle ab, deren Amplitude so erhöht wird. Elektronen die durch den Einfluss der HF-Welle beschleunigt werden, entziehen der elektromagnetischen Welle Energie. Daher ist es wichtig,

dass immer mehr Elektronen abgebremst als beschleunigt werden, damit der HF-Welle im Mittel Energie zugeführt wird. Als Wechselwirkungsraum zwischen HF-Welle und Elektronenstrahl kommen, mit Ausnahme einiger Wanderfeldröhren, Hohlraumresonatoren zum Einsatz. Dieses Grundprinzip wird von allen modernen HF-Röhren mit hohen Ausgangsleistungen bei Frequenzen über 200 MHz eingesetzt. Klystrons, Wanderfeldröhren, Magnetrons und Gyrotrons unterscheiden sich dabei hauptsächlich in der Art, wie die Dichtemodulation des Elektronenstrahls erzeugt wird. Im Folgenden wird der Aufbau und das Funktionsprinzip des Gyrotrons beschrieben [4] [5].



Das hier verwendete Gyrotron (siehe Bild 2.2) der russischen Firma Gycom hat eine Betriebsfrequenz von 30,4 GHz. Die Ausgangsleistung wird vom Hersteller mit bis zu 17,5 kW bei Beschleunigungsspannungen bis 25 kV und Strahlströmen bis 2,5 A angegeben [6]. Die Röhre lässt sich in die Baugruppen Elektronenstrahlerzeuger, Strahlkompressionszone, Resonator, Ausgangswellenleiter, Elektronenauffänger (Kollektor), HF-Austrittsfenster und Röhrengehäuse unterteilen (Bild 2.3).

Bild 2.2: Gyrotron

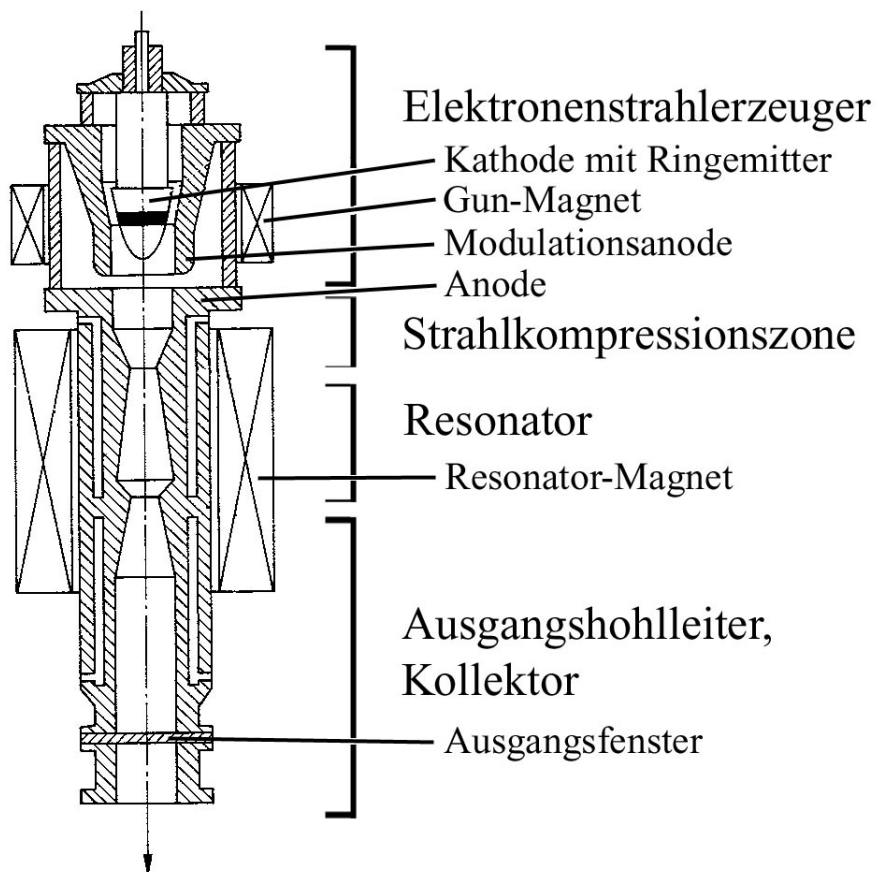


Bild 2.3: Querschnitt eines Gyrotrons mit Axialer Strahlauskopplung

### 2.1.1 Elektronenstrahlerzeuger

Im Elektronenstrahlerzeuger, auch als Elektronenkanone bezeichnet, werden aus der ringförmigen Emitterschicht einer kegelstumpfförmigen Kathode thermisch Elektronen emittiert. Die freigesetzten Elektronen werden durch eine angelegte Spannung zwischen der Kathode und der Anode beschleunigt. Unter dem Einfluss eines radialen E-Feldes und eines dazu gekreuzten Magnetfeldes (parallel zur Achse des Gyrotrons) werden die Elektronen in einen Hohlstrahl gezwungen. In diesem bewegen sich die Elektronen auf Spiralbahnen und besitzen so eine Geschwindigkeitskomponente  $v_{\perp}$  senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und  $v_z$  parallel zur Achse des Gyrotrons deren Anfangsverhältnis durch eine Modulationsanode eingestellt werden kann.

### 2.1.2 Strahlkompressionszone

Nach der Elektronenkanone folgt die Strahlkompressionszone, in der das achsenparallele Magnetfeld ansteigt. Dadurch wird der Radius des Hohlstrahles verkleinert. Die Elektronen gyrieren mit der Zyklotronkreisfrequenz  $\omega_c$ :

$$\omega_c = \frac{eB}{m} \quad (2.1)$$

mit der Elementarladung  $e$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der relativistischen Elektronenmasse  $m = \gamma m_0$ .

Der Radius der Kreisbewegung ist durch den Larmorradius  $r_L$  gegeben:

$$r_L = \frac{v_{\perp}}{\omega_c} \quad (2.2)$$

mit der Geschwindigkeit senkrecht zum Magnetfeld  $v_{\perp}$ .

Durch die relativistische Masse der Elektronen wird die Zyklotronkreisfrequenz auch von der Beschleunigungsspannung  $U_0$  abhängig. Der relativistische Faktor (Lorentzfaktor) ergibt sich zu:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_z}{c}\right)^2 - \left(\frac{v_{\perp}}{c}\right)^2}} \approx 1 + \frac{U_0/\text{kV}}{511} \quad (2.3)$$

Setzt man in Gleichung 2.1 alle bekannten Werte und Konstanten ein, so erhält man folgende Gleichung für die Zyklotronfrequenz ( $f_c$ ):

$$f_c = \frac{\omega_c \theta}{2\pi\gamma} = \frac{28B/\text{T}}{1 + \frac{U_0/\text{kV}}{511}} \quad (2.4)$$

Mit ansteigendem Magnetfeld steigt, nach Gleichung (2.1), die Zyklotronkreisfrequenz an, während nach Gleichung 2.2 der Larmorradius der Kreisbewegung kleiner wird. Durch die Erhaltung des magnetischen Momentes  $\frac{(p_{\perp})^2}{B}$  ( $p_{\perp}$  Elektronenimpuls senkrecht zu  $B$ ) wird auch die Geschwindigkeit  $v_{\perp}$  senkrecht zum Magnetfeld größer. Für das Verhältnis der Geschwindigkeitskomponenten  $\frac{v_{\perp}}{v_z}$  wird ein Wert von 1,5 angestrebt.

### 2.1.3 Resonator

Tritt ein Elektronenrohr mit statistisch verteilten, gyrierenden Elektronen in einen Hohlraumresonator, der von einem azimuthal polarisierten HF-Feld erfüllt ist, so kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen der HF-Welle und den Elektronen. Ist die Zyklotronfrequenz der Elektronen etwas kleiner als die Frequenz der HF-Welle, so werden die Elektronen auf der einen Seite der Kreisbahn, die sich in Richtung des E-Feldes bewegen, beschleunigt. Gleichzeitig werden die Elektronen auf der gegenüberliegenden Seite abgebremst. Die Elektronen erfahren also eine Geschwindigkeitsmodulation, ihre Zyklotronkreisfrequenz wird teils erhöht, teils verringert. Beim Durchlaufen des Resonators holen die schnelleren Elektronen die langsameren ein und es kommt zu einer Phasenfokussierung der Elektronen. Die phasenfokussierten Elektronen werden dann vom HF-Feld stetig abgebremst, wodurch die frei werdende Bewegungsenergie in die HF-Welle übergeht und so deren Amplitude vergrößert wird. Bei der Inbetriebnahme der Röhre facht sich die HF-Schwingung aus dem Rauschen an, so dass keine zusätzliche HF-Quelle benötigt wird. Da die Zyklotronfrequenz nach Gleichung (2.1) im wesentlichen durch die magnetische Flussdichte festgelegt ist, kann beim Gyrotron auch bei Harmonischen der Zyklotronfrequenz gearbeitet werden. Wichtig ist dabei, dass die erzeugte HF-Schwingung eine Frequenz hat, die immer etwas größer ist als ein ganzzahliges vielfaches der Zyklotronfrequenz. Im Gegensatz zu anderen Röhrentypen ist es bei der Gyro-Wechselwirkung wesentlich, dass die Elektronen eine relativistische Massenänderung erfahren, da dies nach Gleichung (2.1) bei konstantem Magnetfeld die einzige Möglichkeit ist die Zyklotronkreisfrequenz der Elektronen zu ändern. Entsprechend groß müssen daher die Beschleunigungsspannung und das Magnetfeld sein. Letzteres hat sein Maximum im Resonator und bestimmt dort die gewünschte Zyklotronfrequenz. Dadurch können die Resonatoren wesentlich größer gebaut werden, so dass eine große Querschnittsfläche für den Durchtritt des Elektronenstrahls zur Verfügung steht. Außerdem kann man in solchen überdimensionierten Resonatoren die Verluste durch Wandströme reduzieren.

Die Relation zwischen der Frequenz der HF-Schwingung und der Zyklotronfrequenz ( $f_{HF} \approx n f_c$ , mit  $n \in \mathbb{N}$ ) ermöglicht die Verwendung kleinerer Magnetfelder bei gleicher Frequenz. Beim Betrieb bei Oberschwingungen wird jedoch ein schlechterer Wirkungsgrad der Röhre in Kauf genommen.

Der Resonator ist so gebaut, dass er sich zur Elektronenkanone hin verjüngt, um durch aperiodische Dämpfung eine Ausbreitung der HF-Welle in dieser Richtung zu vermeiden. In Richtung des Ausgangswellenleiters ist der Resonator hingegen aufgeweitet, so dass die stehende Resonatormode in eine fortschreitende Welle übergeht. Für eine möglichst gute Wechselwirkung zwischen Elektronen und HF-Feld wird der Elektronenrohrstrahl so positioniert, dass die Elektronen den Resonator im Bereich des maximalen E-Feldes der gewünschten Ausgangsmode durchqueren. Wegen der geforderten azimuthalen Polarisation kommen für die Resonatormode nur  $TE_{m,n,1}$ -Moden in Frage. Der Resonator schwingt dabei immer in der Nähe der Grenzfrequenz der gewählten Mode.

Der Resonator des verwendeten Gyrotrons schwingt in der  $TE_{0,2}$ -Eigenmode bei einer Frequenz von 30,4 GHz. Damit bei dieser Frequenz noch gut mit normalleitenden Magne-

ten gearbeitet werden kann, wird das Gyrotron bei der 2. Harmonischen der Zyklotronkreisfrequenz betrieben. Nach Gleichung (2.4) ergibt sich also eine magnetische Flussdichte von 0,56T, bei Beschleunigungsspannungen bis zu 25kV (*Lorentzfaktor*  $\approx 1,03$ ). Für die Grenzfrequenz  $f_{cutoff}$  eines zylindrischen Hohlraumresonators gilt für  $TE_{m,n}$ -Moden folgende Beziehung:

$$f_{cutoff} = \frac{cX'_{m,n}}{\pi D} \quad (2.5)$$

wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $X'_{m,n}$  die entsprechende Nullstelle der Ableitung der Bessel-Funktion und  $D$  der Durchmesser des Resonators ist.

Für  $f_{cutoff} = 30,4$  GHz ergibt sich für die  $TE_{0,2}$ -Mode ( $X'_{0,2} \approx 7,016$ ) also ein Durchmesser des Resonators von 22,02 mm

### 2.1.4 Ausgangshohlleiter, Kollektor und Röhrengehäuse

Nach dem Resonator schließt sich der Ausgangshohlleiter an, der hier gleichzeitig als Kollektor dient. Das Magnetfeld fällt direkt hinter dem Resonator stark ab. Dadurch weitet sich der Elektronenstrahl auf und die abgearbeiteten Elektronen treffen auf die Wand des Ausgangshohlleiters auf. Die elektromagnetische Welle wird somit vom Elektronenstrahl getrennt. Die HF-Welle breitet sich weiter in der  $TE_{0,2}$ -Mode aus. Der Ausgangshohlleiter wird von außen mit Wasser gekühlt, um die thermische Leistung der auftreffenden Elektronen abzuführen. Am Ende ist der Hohlleiter durch ein vakuumdichtes, für HF-Strahlung durchlässiges dielektrisches Fenster aus Bornitrit (BN) abgeschlossen.

## 2.2 Quasioptische Übertragungsleitung

Die Welle im Ausgangshohlleiter des Gyrotrons ist eine  $TE_{0,2}$ -Welle. Damit die Leistung über Spiegel quasi-optisch übertragen werden kann muss sie zuerst in eine Freiraumwelle transformiert werden. Die Feldverteilung (im Querschnitt) der Freiraumwelle soll dabei der im Hohlleiter ähnlich sein. Als Eigenmode der Freiraumwelle wurde hier ein Gaußscher Strahl ( $\psi_m^n$ ) gewählt. Um die benötigte Feldverteilung zu erhalten, kommen nur zwei lineare  $\psi_m^1$ -Moden in Frage, die um  $90^\circ$  zueinander verdreht sind. Durch den Phasenversatz von  $90^\circ$  erhält man einen kreissymmetrischen Strahl. Hier wurde die  $\psi_0^1$ -Mode gewählt, mit dem ein komplett azimuthal polarisierter konischer Hohlstrahl erreicht wird. Die Transformation der Hohlleiterwelle in die Freiraumwelle wird durch einen Modenwandler direkt hinter dem HF-Fenster des Gyrotrons erreicht, der von einem hornartig aufgeweiteten Hohlleiter (Taper) gefolgt wird. Um Platz zu sparen, ist der Taper jedoch nicht zu einem vollständigen idealen Horn ausgeformt. Der Taper hat eine Länge von 170 mm. Am Ende des Tapers hat der Hohlstrahl eine Taillenweite von 11,65 mm [7]. In Bild 2.4(a) ist der Modenwandler mit Taper und daneben in Bild 2.4(b) die Feldverteilung am unteren Ende des Horns zu sehen. Zur Prüfung der Feldverteilung wurde ein Thermopapier über den Taper geklebt und mit einem kurzen Puls niedriger Leistung (2 s bei ca. 600 W) belichtet.

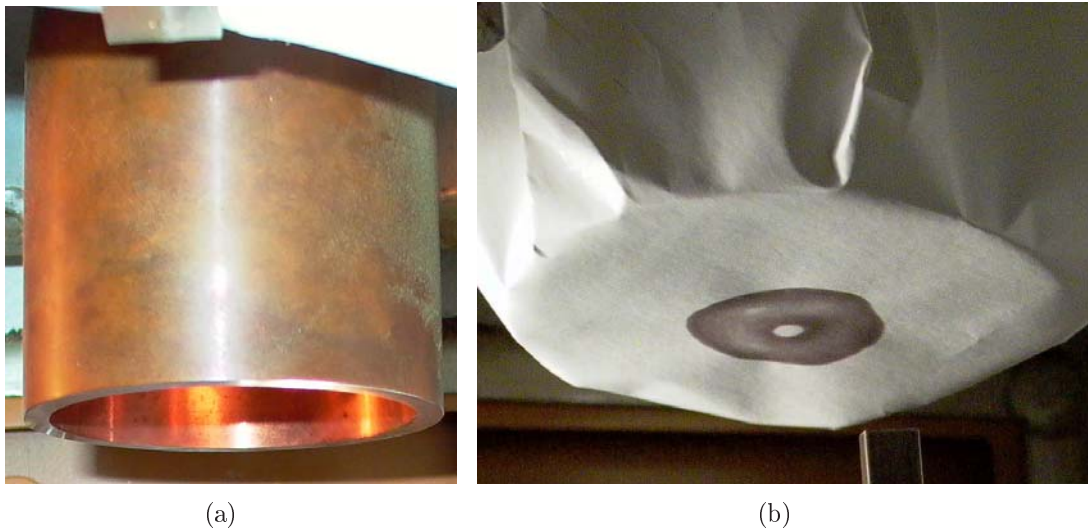


Bild 2.4: Modenwandler und Feldverteilung

Der Gaußsche Strahl wird über zwei Spiegel in den Applikator gelenkt. Die Ausdehnung der Spiegel muss groß genug sein, damit Verluste durch Beugung an den Spiegelkanten gering gehalten werden. Reflexionen aus dem Applikator sollen möglichst stark gestreut werden (hohe Rückwärtsisolation), um eine Störung des Gyrotronbetriebes zu vermeiden. Trotzdem soll die Übertragungsleitung tolerant gegen leichte Fehlausrichtung der Spiegel sein. Erreicht wird dies durch Spiegel mit elliptischer Oberfläche, die genau auf die Mode und die Taille des HF-Strahls ausgelegt sind (Bild 2.5).

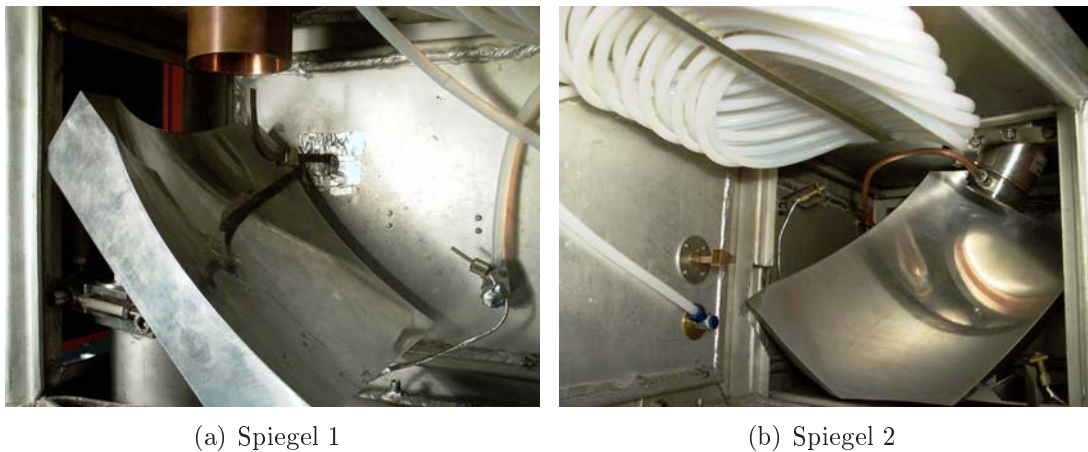


Bild 2.5: Spiegel der Übertragungsleitung

Die Spiegel sind etwa 1 m voneinander entfernt, die Taille des Strahls liegt ca. in der Mitte zwischen den Spiegeln. Der zweite Spiegel bündelt den Strahl direkt auf das Eingansfenster des Applikators. Wie im Bild 2.5(b) zu sehen, ist die Übertragungsleitung von einer metallenen Box umgeben, die Streustrahlung von der Umgebung abschirmt. An der Oberseite der Box ist ein gewendelter Teflonschlauch angebracht, der von Kühl-

wasser durchflossen wird und so Streustrahlung absorbiert. An beiden Enden des Schlauches sind Temperaturfühler angebracht, so dass die absorbierte Leistung kalorimetrisch gemessen werden kann.

### 2.3 Applikator

Der Applikator (Bild 2.6(a)) ist ein Metallzylinder mit einem Volumen von ca. 100l, der direkt auf der Box der Übertragungsleitung aufsitzt. Sein Deckel schließt HF- sowie luftdicht und ist, wie auch der Applikator selbst, zur Wasserkühlung doppelwandig ausgeführt. Der Ofenraum kann evakuiert oder mit Gasen geflutet werden, weshalb ein HF-Fenster notwendig ist. Im Applikator soll eine möglichst homogene Feldverteilung

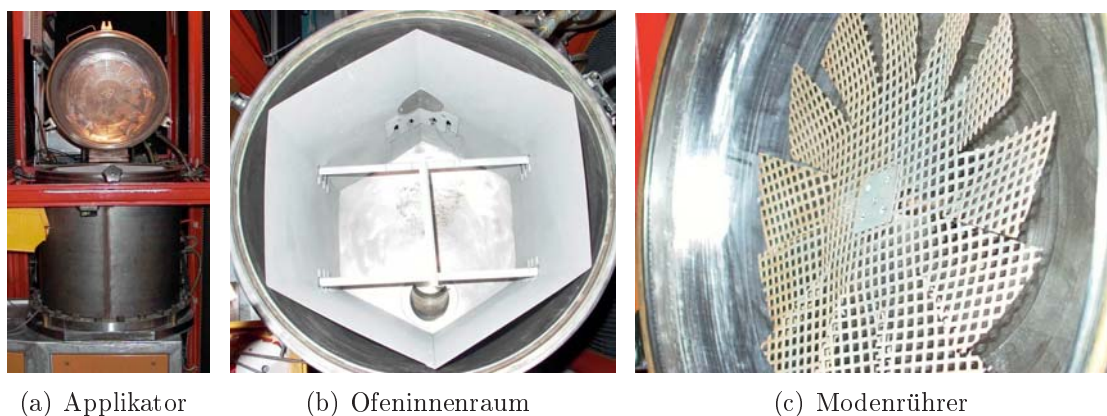


Bild 2.6: Applikator

herrschen, damit möglichst sein komplettes Volumen genutzt werden kann. Um dies zu erreichen, werden verschiedene Mittel eingesetzt.

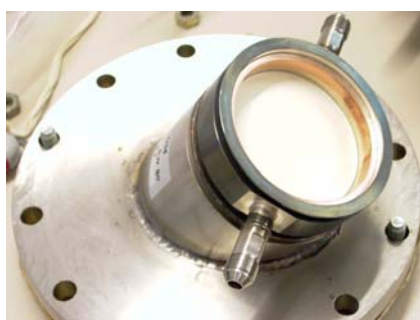


Bild 2.7: HF-Fenster

Damit der gesamte Ofenraum gut vom Mikrowellenstrahl ausgeleuchtet wird, wird dieser vom Rand aus schräg eingestrahlt. Bild 2.7 zeigt das HF-Fenster des Applikators, dessen Grundplatte, im eingebauten Zustand, parallel zum Boden des Ofenraums ist. In Bild 2.6(b) ist es in der unteren Ecke des Hexagons zu sehen. Untersuchungen [8] haben gezeigt, dass mit einer hexagonalen Wand im Vergleich zu Zylindern, quadratischen, pentagonalen und anderen Strukturen die beste Feldhomogenität erreicht wird. Dabei wird die Mikrowelle direkt schräg in eine Ecke des Sechsecks eingestrahlt. Eine stark erhöhte Feldstärke tritt dabei

nur relativ eng begrenzt in der Umgebung des Fensters bis zur ersten Reflexion auf. Auf mittlerer Höhe des Hexagons sind Metallschienen angebracht, die als Objektträger genutzt werden. Damit kann das zu erwärmende Material in der Mitte des Ofenraums platziert werden, wo die günstigste Feldverteilung zu erwarten ist. Das Hexagon kann



bei Bedarf, wie zum Beispiel beim Einbau eines Kalorimeters, aus dem Applikator entnommen werden.

Im Deckel des Applikators ist außerdem ein Modenrührer installiert (Bild 2.6(c)), der die Feldhomogenität weiter verbessern soll. Er ist als Flügelrad, bestehend aus einem Metallgitter, ausgeführt, das sich um seine eigene Achse dreht. Durch die somit wechselnde Reflexionen am Modenrührer wird ständig eine Änderung der Feldverteilungen bewirkt.

Zur Überwachung des bearbeiteten Materials während des laufenden Prozesses besteht die Möglichkeit Sonden wie z.B. Temperaturfühler in den Applikator einzubringen.

## 2.4 Steuer-, Mess- und Sicherheitseinrichtungen

Nahezu alle der im Folgenden genannten Geräte zur Steuerung und Messwerterfassung verfügen über eine GPIB-Schnittstelle (IEEE 488.2) und können damit vom Laborrechner (PC) aus gesteuert bzw. ausgelesen werden. Dies ermöglicht eine sehr flexible und schnelle Steuerung und Messwerterfassung. Bei Bedarf können eigene Programme geschrieben werden, in denen Mess- und Steuergrößen erfasst und bei Bedarf miteinander verknüpft werden. So können auch aufwendige Prozesssteuerungen und Regelungen realisiert werden. Die Werte, die eingestellt oder ausgelesen werden können, werden bei der Beschreibung des jeweiligen Gerätes genannt. Bei Geräten, die keine GPIB-Schnittstelle (IEEE 488.2) besitzen, wird dies bei deren Nennung angegeben.

### 2.4.1 Geräte zur Steuerung der Anlage

Die Ausgangsleistung des Gyrotron wird vor allem durch die Stärke und den Verlauf des Magnetfeldes und den Betrag der Beschleunigungsspannung und des Strahlstromes gesteuert.

Durch das Magnetfeld wird die Lage des Hohlstrahles im Resonator sowie das Verhältnis der Geschwindigkeitskomponenten  $\frac{v_{\perp}}{v_z}$  der Elektronen beeinflusst. Es wird von zwei Elektromagneten, dem Gun-Magneten um die Elektronenkanone und dem Magneten um den Resonator, erzeugt. Die Stärke der Magnetfelder wird also durch den Strom durch die Wendeln der Elektromagnete eingestellt. Der Gun-Magnet arbeitet mit Stromstärken um 3 A, welche vom Stromnetzteil „NTN 1400 SUM-10“ der Firma „FuG“ erzeugt werden. Der Resonator magnet, der eine magnetische Flussdichte von ca. 0,56 T erzeugt, benötigt Ströme um 112 A. Diese hohe Stromstärke wird vom Stromnetzteil „D-MN 120/120“ der Firma „Brucker“ bereitgestellt. In den meisten Fällen werden die Ströme manuell fest eingestellt (z.B. 3,2 A am Gun-Magneten und 112,73 A am Resonator magneten). An beiden Netzteilen können nur die jeweiligen Stromwerte gesetzt und ausgelesen werden.

Die kinetische Energie der Elektronen wird durch die Beschleunigungsspannung bestimmt. Sie wird mit dem Hochspannungsnetzteil „HCH 59500 M-26000“ der Firma „FuG“ erzeugt. Mit diesem Netzteil sind Spannungen bis zu 26 kV und Ströme bis zu 2,3 A möglich. Über die Rechnerschnittstelle ist der Spannungswert in Schritten von 10 V einzustellen. Ausgelesen werden können die aktuellen Spannungs- und Stromwerte.

Meist wird die Ausgangsleistung allein durch die Beschleunigungsspannung eingestellt. Für die oben genannten Stromwerte z.B. mit Spannungen von 12,5 kV bis 18,5 kV. Unterhalb und oberhalb bestimmter Spannungswerte, abhängig vom eingestellten Magnetfeld, kommt keine elektromagnetische Schwingung zustande. Der Betrieb bei solchen Spannungswerten kann die Röhre überlasten und beschädigen. Die Elektronen können dann ihre Energie nicht abgeben, sie werden nicht abgearbeitet, wodurch der Kollektor zu stark erhitzt und beschädigt werden kann.

Der Strahlstrom hängt von der Anzahl der freien Elektronen ab, die zum Elektronenstrahl geformt werden. Damit wird er durch die Temperatur des Kathodenemitters und somit vom Heizstrom der Kathode eingestellt. Bereitgestellt wird der Strahlstrom allerdings vom Hochspannungsnetzteil, das die Beschleunigungsspannung zur Beschleunigung der Elektronen liefert. Die Energie des Heizstroms wird komplett in Wärme gewandelt, die zur thermischen Anregung des Emitters benötigt wird. Erzeugt wird der Strom für die Kathodenheizung von einem Stromnetzteil der Firma „Gycom“, das keine GPIB-Schnittstelle besitzt. Der Heizstrom wird hier von Hand eingestellt, wobei er beim Anfahren der Anlage in mehreren Schritten langsam auf den Endwert gesteigert wird. Am IHM wird üblich mit einem Wert von 1,34 A für den Strahlstrom gearbeitet. Vom Hersteller der Gyrotrons ist für den Strahlstrom ein maximaler Wert von 2,5 A angegeben.

### **2.4.2 Messgeräte**

Als Messgeräte sind ein Messwertscanner, ein digitales Multimeter (DMM) und ein Oszilloskop dauerhaft direkt in der Anlage eingebaut. Das Oszilloskop ist als einziges der drei Geräte nicht an den GPIB-Bus angeschlossen. Es kommt z.B. bei der Analyse der Signalqualität von Messsonden zum Einsatz. An das Oszilloskop ist meist eine Detektordiode angeschlossen mit der, mittels einer kleinen Hornantenne, die Streustahlung im hinteren Teil der Übertragungsleitung gemessen wird. Zur Leistungsmessung kommen hier zwei verschiedene Kalorimeter zum Einsatz. Des Weiteren wurde während dieser Arbeit kurzzeitig ein Spektrum-Analysator „494 P“ der Firma „Tektronix“ zur Prüfung des Frequenzverhaltens des Gyrotrons verwendet.

#### **2.4.2.1 Digitalmultimeter**

Beim „Keithley 199 System DMM / Scanner“ handelt es sich um ein Digitalmultimeter (DMM) mit 8 Kanälen, das vollständig per GPIB-Schnittstelle gesteuert werden kann. Dabei stehen auch zahlreiche Funktionen wie z.B. Mittelwertfilter und die schnelle Erfassung von ganzen Messwert-Arrays zur Verfügung. Eine nähere Beschreibung der in dieser Arbeit benötigten Funktionen des Gerätes folgt im nächsten Kapitel bei der Beschreibung der erstellten Computerprogramme. Mit dem DMM wurde in dieser Arbeit ausschließlich die Gleichspannung der zur Leistungsmessung eingesetzten Detektordiode gemessen.

### 2.4.2.2 Messwertscanner

Der Messwertscanner, „Fluke Hydra 2620 A Data Aquisition Unit“ verfügt über 20 Kanäle, die über den GPIB-Bus ausgelesen werden können. Mit ihm werden die Beschleunigungsspannung, sowie über angeschlossene Temperaturfühler die Ein- und Ausgangstemperaturen der beiden Kalorimeter gemessen.

### 2.4.2.3 Kalorimeter

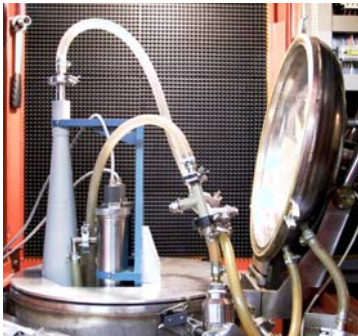


Bild 2.8: Kalorimeter

Einerseits wird der Teflonschlauch zur Absorption der Streustrahlung in der Übertragungsleitung als Durchflusskalorimeter genutzt. Zum Anderen kann ein Kalorimeter direkt an das HF-Fenster des Applikators angebaut werden (Bild 2.8 zeigt das Kalorimeter im eingebauten Zustand). Beide zusammen werden zur Messung der Ausgangsleistung des Gyrotrons verwendet.

Da das Kalorimeter im Applikator dessen HF-Eingangsfenster HF-dicht abschließt und einen großen Teil des Ofenraums erfüllt, kann damit keine Leistungsmessung während eines laufenden Prozesses durchgeführt werden.

Die kalorimetrische Leistungsmessung in der Übertragungsleitung weist eine sehr niedrige Empfindlichkeit und hohe Fehler auf. Da sie auf der Absorption der Streustrahlung basiert weist sie eine starke Abhängigkeit zur Last im Applikator auf. Bei niedrigen Leistungen ist die Messung in der Übertragungsleitung wegen der geringen Leistungspegel der Streustrahlung nicht möglich. Nach einem Leistungssprung sind Messwerte erst nach Zeiten in der Größenordnung einer Minute verfügbar.

Bei der kalorimetrischen Leistungsmessung wird die Temperaturerhöhung von Wasser und damit die von ihm pro Zeiteinheit aufgenommene Wärmeenergie gemessen. Der Zusammenhang zwischen Temperaturerhöhung und Wärmeleistung ist durch

$$P_{th} = \frac{c_p m \Delta T}{t} \quad (2.6)$$

mit der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$ , der Masse  $m$ , dem Temperaturunterschied  $\Delta T$  und der Zeit  $t$  gegeben.

Dabei ist zu beachten, dass die spezifische Wärmekapazität temperaturabhängig ist. Nun kann entweder die Temperaturerhöhung in einer bestimmten Zeit (statisches Kalorimeter) oder die Erwärmung einer Flüssigkeit mit konstanter Strömungsgeschwindigkeit (Durchflusskalorimeter) gemessen werden. Bei Leistungen  $> 1 \text{ W}$  bis zu höchsten Leistungen werden Durchflusskalorimeter verwendet.

Die hier verwendeten Kalorimeter sind beide mit einer elektrischen Zusatzheizung ausgestattet. Zur Bestimmung der HF-Leistung wird eine Vergleichsmessung durchgeführt. Bei abgeschaltetem Gyrotron wird zunächst elektrisch geheizt, wobei die Temperaturdifferenzen und die dem Netz entnommene elektrische Leistung gemessen werden. Aus

den gemessenen Werten wird anschließend ein Kalibrierfaktor  $c_{cal}$  berechnet, der den Faktor  $\frac{c_p m}{t}$  in Gleichung 2.6 ersetzt. Im Anschluss kann nun die HF-Leistung, bei abgeschalteter elektrischer Zusatzheizung und gleichem Durchfluss, gemessen werden. Sie ergibt sich dann zu:

$$P_{HF} = c_{cal} \Delta T \quad (2.7)$$

Da in beiden Kalorimetern Temperaturdifferenzen  $< 5\text{ K}$  auftreten, kann die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität und damit von  $c_{cal}$  vernachlässigt werden. Fehler bei der kalorimetrischen Leistungsmessung entstehen vor allem durch Wärme die vom Kalorimeter selbst gespeichert oder nach außen abgestrahlt wird. Bei den durchgeführten Experimenten kommt es nicht auf den exakten Absolutwert der Mikrowellenleistung an, da als Führungsgröße für die Prozesse meist die Temperaturen des erwärmten Materials verwendet werden. Für eine möglichst genaue Leistungsregelung ist aber eine möglichst schnelle und exakte Messung der relativen Leistungsänderung wichtig. Mit den hier beschriebenen Kalorimetern sind Messungen mit einer relativen Genauigkeit von etwa 5% möglich.

## 2.5 Sicherheitseinrichtungen

Keine Sicherheitsvorrichtung kann vollkommenen Schutz bieten. Daher kann der Benutzer, trotz aller Sicherheitsvorkehrungen in Programmen oder an der Anlage selbst, nicht der Verantwortung entzogen werden. Er muss zu jedem Zeitpunkt abschätzen können, ob getroffene Einstellungen eventuell den sicheren Betrieb gefährden könnten.

Um einen sicheren Betrieb zu ermöglichen, ist es empfehlenswert, schon in den Programmen zur Prozesssteuerung gewisse Sicherheitsroutinen zu integrieren. So kann hier z.B. auf einfache Weise sichergestellt werden, dass keine Betriebsparameter gesetzt werden, die zum Abreißen der HF-Schwingung und damit zu eventuellen Schäden am Gyrotron führen können. Sinnvoll ist dabei jedoch nur die Überwachung der für den jeweiligen Prozess notwendigen dynamischen Größen. Durch die Beschränkung auf möglichst wenige Größen, die vom Rechner aus überwacht werden, wird die Gefahr einer Überlastung und Blockierung des GPIB-Busses, z.B. durch eventuell zu lange Reaktionszeiten der Geräte, reduziert. Außerdem sollte in den Computerprogrammen hauptsächlich das Setzen unerlaubter Werte im Voraus verhindert werden, da, je nach Auslastung des Computers und des GPIB-Busses, keine Eingriffe in Echtzeit möglich sind. Bei einer Blockierung des GPIB-Busses durch ein Gerät können leicht Verzögerungen im Bereich mehrerer Sekunden entstehen, die sicherheitstechnisch nicht vertretbar wären. Auf diese Weise wird auch sichergestellt, dass ein möglichst großer Anteil der Rechenkapazität zur Auswertung von Messgrößen (z.B. Temperatur des Sintergutes), deren Darstellung am Bildschirm und eventuellen Eingriffen in den Prozessablauf zur Verfügung steht, da dies möglichst in Echtzeit geschehen sollte.

Sicherheitsrelevante Betriebsgrößen und Zustände, die nicht direkt zur Leistungssteuerung des Gyrotrons beitragen, werden von einer SIMATIC-Steuerung ständig überwacht. Zu unterscheiden sind dabei Größen, die den störungsfreien Betrieb sicherstellen und

Schäden an der Anlage während des Betriebes verhindern und Größen, die der Sicherheit von Personen in der Umgebung der Anlage dienen.

Zur ersten Gruppe gehören z.B. die Temperaturen der Kühlflüssigkeiten. Das Gyrotron, die Übertragungsleitung und der Applikator werden mit ca. 20 °C warmem Wasser gekühlt. Die Kühlung der drei Komponenten erfolgt durch einen gemeinsamen Wasserkreislauf. Wird eine Wassertemperatur von 26 °C überschritten wird die Anlage abgeschaltet. Mit Ausnahme des Brucker Stromnetzteils, das mit Wasser gekühlt wird, genügt bei den Netzteilen eine Luftkühlung.

Das Gyrotron, die Übertragungsleitung und der Applikator befinden sich, zur Abschirmung möglicher Leckstrahlung, in einer Box aus Metall. Diese besteht aus einem Metallrahmen mit herausnehmbaren Blechwänden, die durch Interlock-Schalter überwacht werden. Ist eine Wand nicht richtig geschlossen oder wird sie während des Betriebes geöffnet, so wird unverzüglich die Hochspannung abgeschaltet.

### 3 Erstellte Computer-Programme

In der vorliegenden Arbeit werden Möglichkeiten zur halbleiterbasierten Leistungsmessung an einem Gyrotron untersucht. Bei der Charakterisierung der verschiedenen Messanordnungen ist es wichtig, Messabläufe gezielt und reproduzierbar durchführen zu können. Wie im vorigen Kapitel beschrieben, verfügen alle für die Leistungssteuerung und Messungen notwendigen Geräte über eine GPIB-Schnittstelle (IEEE 488.2). Dadurch können Messungen teilweise automatisiert und vollständig über einen Laborrechner (PC) gesteuert werden. Dies ermöglicht eine Ansteuerung der Netzteile und Aufnahme der Messwerte in kurzen Zeitabständen. Außerdem können alle Daten für die spätere Auswertung gespeichert werden. Für diese Zwecke wurden im Rahmen dieser Arbeit drei Computer-Programme erstellt:

- „Measurement“ zur Signalanalyse der Gleichspannung der Detektordiode bei unterschiedlichen Betriebszuständen der Gyrotronanlage.
- „Calibration“ zur Leistungskalibrierung der Diodenspannung mit Hilfe der Kalorimeter.
- „Characteristics“ zur automatisierten Aufnahme von Gyrotronkennlinien.

Alle drei Programme sind sich im Grundaufbau sehr ähnlich, sind aber auf unterschiedliche Aufgaben zugeschnitten. Erstellt wurden sie mit „LabWindows/CVI“ der Firma „National Instruments“. Diese Entwicklungsumgebung ermöglicht die Programmierung in C. Zur Einbindung der GPIB-Funktionalität steht eine ausführliche Bibliothek mit entsprechenden Funktionen zur Verfügung. Im Folgenden wird der strukturelle Aufbau der Programme beschrieben, wobei wichtige Funktionen sowie die Handhabung der Programme ausführlicher dargestellt werden. Die einzelnen Abschnitte der Quelltexte sind mit umfangreichen Kommentaren versehen, daher wird hier auf eine Wiedergabe im Text verzichtet.

Alle drei Programme sind modular aufgebaut (siehe Bild 3.1). Ihre Beschreibung erfolgt von der Geräteseite hin zur Benutzeroberfläche sowie der eigentlichen Funktion und Verwendung der Programme. Die Ansteuerung der einzelnen Geräte ist durch Gerätetreiber (gesonderte Include-Dateien) realisiert, die jeweils alle notwendigen Funktionen bereitstellen. Dem Programmierer werden damit leicht verständliche Schnittstellen zur Verfügung gestellt, die unabhängig von gerätespezifischen GPIB-Befehlen sind. Abgesehen von der Geräteansteuerung, sind eine Reihe weiterer Funktionen erforderlich, die in allen drei Programmen gleich sind. Diese sind in einer weiteren Include-Datei, den Subroutinen zusammengefasst. Hierzu zählen z.B. Funktionen zur Skalierung von Messwerten für die spätere visuelle Darstellung. Mit den Subroutinen wird außerdem

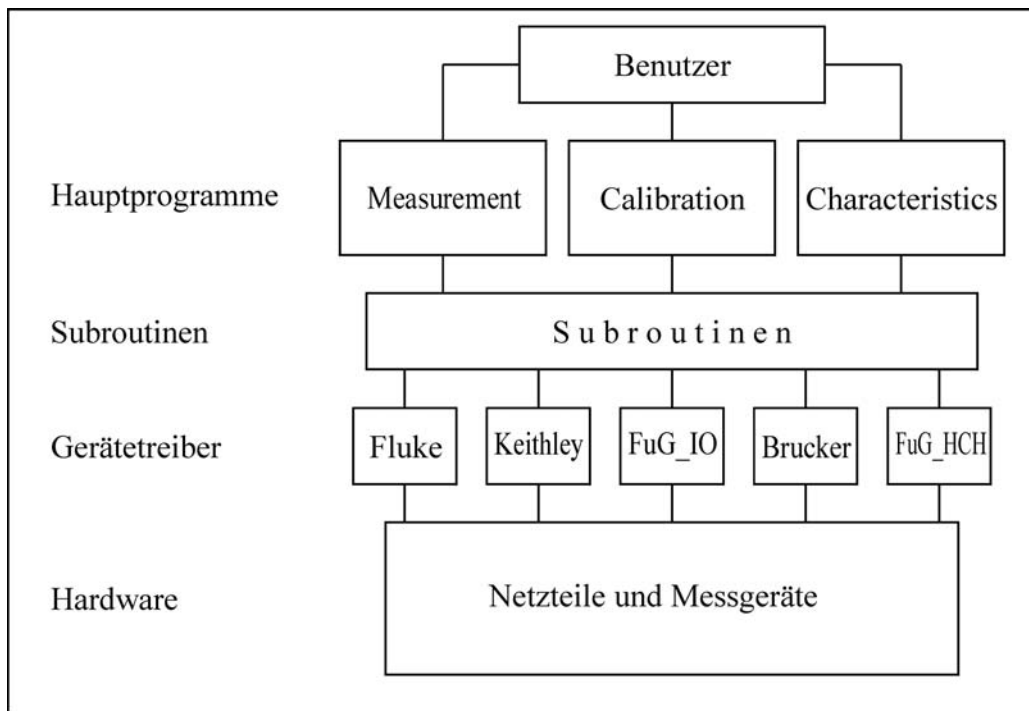


Bild 3.1: Struktur der Programme

die Geräteansteuerung abgewickelt und für den Gebrauch in höheren Programmebenen weiter vereinfacht. In den Programmen selbst sind die Funktionen definiert, die für deren spezifischen Ablauf verantwortlich sind. Diese umfassen hauptsächlich Aufgaben zur Steuerung der grafischen Benutzeroberfläche (User Interface, UI) und zur genauen Darstellung und Verarbeitung der Mess- und Steuerwerte.

### 3.1 Gerätetreiber

Zu den hier durchgeführten Messungen werden folgende Geräte vom Rechner aus gesteuert:

- Das Hochspannungsnetzteil „FuG HCH“ zur Einstellung der Beschleunigungsspannung.
- Das „Brucker“-Stromnetzteil zur Einstellung des Magnetfeldes am Resonator.
- Das Stromnetzteil „FuG IO“ zur Einstellung des Magnetfeldes an der Elektronenkanone.
- Das Digitalmultimeter „Keithley 199 System DMM / Scanner“ zur Messung der Gleichspannung der Detektordiode.

- Der Fluke Messwert Scanner zur Messung der Ein- und Ausgangstemperaturen der beiden Kalorimeter.

In den Gerätetreibern werden die unterschiedlichen spezifischen GPIB-Befehle der einzelnen Geräte in Funktionen zusammengefasst, die für den Programmierer einfacher verständlich sind. Dadurch entstehen Schnittstellen, die nach einem einheitlichen Schema organisiert sind. Die Benennung dieser Schnittstellen orientiert sich dabei immer an der vom Gerät erbrachten Funktion. Die Funktionen der Gerätetreiber sind nach folgendermaßen benannt:

- `(Gerät)_Init(void)` - um das Gerät mit den benötigten Grundeinstellungen zu initialisieren und in den Remote-Betrieb zu versetzen. In dieser Funktion wird grundsätzlich der Befehl `ibclr(...)` ausgeführt, um eventuell aus früheren Remote-Verbindungen verbliebene Aktivitäten der GPIB-Schnittstelle des Gerätes zu löschen. Dies ist notwendig, um Kommunikationsprobleme zwischen PC und Endgerät zu vermeiden. Die beiden Stromnetzteile müssen vor dem Ansprechen per GPIB-Bus zusätzlich manuell auf Remote-Betrieb umgeschaltet werden.
- `(Gerät)_aus(void)` - diese Funktion steht nur bei den Netzteilen zur Verfügung und dient dem Abschalten von Strom bzw. Spannung. Danach verbleibt das Gerät im Remote-Betrieb.
- `(Gerät)_Close(void)` - dient dem Abschalten des Gerätes und anschließendem Verlassen des Remote-Betriebes. Bei den Netzteilen wird dabei zuerst der Befehl `(Gerät)_aus(void)` ausgeführt. Bei den beiden Messgeräten wird lediglich der Remote-Betrieb beendet.
- `(Gerät)_set_(Wert)(var, ...)` - hiermit werden Spannungs- und Stromwerte der Netzteile gesetzt. Die Geräte werden bei den hier besprochenen Programmen im Abstand von wenigen Sekunden oder gar Bruchteilen von Sekunden angesprochen. Um eine Überlastung des Busses zu vermeiden, wird in den Gerätetreibern sichergestellt, dass nur Werte gesetzt werden, die sich auch verändert haben. Bei den Messgeräten dienen solche `..._set_...`-Funktionen zum Setzen von Gerätefunktionen. Dazu zählt z.B. das Zuschalten von geräteinternen Filtern.
- `(Gerät)_measure_(Wert)(var, ...)` - beim Spannungsnetzteil können damit der Spannungs- und Stromwert, beim „Brucker“-Stromnetzteil der Strom und beim Digitalmultimeter der Wert der Ausgangsspannung der Detektordiode ausgelesen werden.

Auf eine genauere Darstellung z.B. der verwendeten gerätespezifischen Befehle wird hier verzichtet. Die zum Verständnis notwendigen Elemente sind im Quelltext auskommentiert.

Für eine reibungslose Messwerterfassung sind einige Besonderheiten der Messgeräte oder auch der Messumgebung selbst zu beachten. In den folgenden Abschnitten wird daher auf die Funktionsweise dieser beiden Geräte näher eingegangen.



### 3.1.1 Keithley Digitalmultimeter

Mit dem Keithley Digitalmultimeter wird die Gleichspannung gemessen, die von der Detektordiode geliefert wird. Unter anderem stellte sich die Frage, ob und in welchem Ausmaß verrauschte Spannungswerte durch Mittelung geglättet werden können. Beim Keithley DMM stehen dazu mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Für eine sehr schnelle Mittelwertbildung werden interne Filter verwendet. Die Nutzung der internen Filter wird über die Funktion `Keithley_Set_Filter(var)` ermöglicht.

Um einen zuverlässigen Mittelwert zu erhalten müssen die einzelnen Werte statistisch unabhängig voneinander sein. Je nach Quelle des Rauschens ist diese Voraussetzung bei sehr kurzen Zeitkonstanten jedoch nicht erfüllt. In diesem Fall wird nach einer Möglichkeit gesucht, über eine variable Anzahl von Messwerten bei verschiedenen Verzögerungszeiten zwischen den Messwerten zu mitteln. Das Keithley DMM besitzt einen internen Speicher der maximal 500 Messwerte fasst. Unter Verwendung dieses internen Speichers können die vergleichsweise langen Zeiten zum Ansprechen via GPIB-Bus für je ein Intervall umgangen werden. Einzelne Messwerte können dabei im Abstand von minimal 15 Millisekunden gewonnen werden, die anschließend als Zahlenfeld (Array) an den PC übertragen werden. Eine grössere Verzögerung tritt also spätestens nach 500 Werten bzw. nach Aufnahme eines Intervalls auf. Der Zeitversatz zwischen den einzelnen Messwerten kann zwischen 15 ms und 999999 s beliebig eingestellt werden. Um komplette Intervalle auslesen zu können, steht die Funktion `Keithley_Measure_Diode_Voltage_multivalued(var, ...)` zur Verfügung. Diese Funktion ist nicht auf höchste Geschwindigkeit optimiert. So werden die Geräteparameter nach jedem Durchlauf der Funktion wieder auf den Stand der Initialisierung zurückgesetzt und zu Beginn der Funktion jedes mal erneut gesetzt. Dies ist vertretbar, da einzelne gemittelte Messwerte nur in Abständen von Sekunden benötigt werden.

### 3.1.2 Fluke Messwert Scanner

Beim Fluke Messwert Scanner werden die Messwerte aller Kanäle mit der Funktion `Fluke_Scan(var-array)` immer komplett ausgelesen. Um Zeit zu sparen, wird dabei das Auslesen der Kanäle zeitlich von der Datenübermittlung getrennt. Das Triggersignal zum Scannen der Daten wird stets am Ende der Initialisierung und jeweils nach der Datenübertragung zum PC gesendet. Das Scannen der Messdaten nimmt dabei bis zu drei Sekunden in Anspruch. Durch eine Reduzierung der Anzahl der gescannten Kanäle, kann die Scanzeit nur unwesentlich verkürzt werden. Würde das Triggersignal zu Beginn des Auslesevorgangs gesendet, wäre der Datenbus während der kompletten Scanzeit blockiert. Für die Messung der Temperaturen an den Kalorimetern ist der Versatz um einen Messwert vertretbar, solange der Abstand der Messpunkte im Bereich weniger Sekunden liegt. Der Zeitversatz um einen Wert muss jedoch bei der späteren Auswertung berücksichtigt werden.

## 3.2 Subroutinen

In der Include-Datei `subroutinen` sind die Funktionen zusammengefasst, die für alle Programme, die während dieser Arbeit erstellt wurden, gleich sind. Dies umfasst Funktionen zur Skalierung von Mess- und Steuerwerten zur späteren visuellen Darstellung in einem Graphen, zur Erstellung von Steuerkennlinien und für die Gerätesteuerung. Außerdem wird eine Funktion zur Generation von Wertetabellen und zum Einblenden von Popup-Fenstern mit Meldungen, z.B. für Fehlermeldungen oder Hinweisen an den Benutzer, bereitgestellt.

### 3.2.1 Funktionen zur Skalierung

Die Entwicklungsumgebung „LabWindows/CVI“ bietet Funktionen zum Plotten von Wertereihen in Graphen, wobei auch verschiedene Funktionen zur Skalierung verfügbar sind. In den hier durchgeführten Untersuchungen ist es teilweise notwendig, mehrere Messwerte in einen Graphen zu zeichnen. Dabei können sich die einzelnen Wertebereiche sehr stark unterscheiden (z.B. Beschleunigungsspannung in kV und Diodenspannung in mV). Hinzu kommt, dass einige Werte in der richtigen Relation zueinander dargestellt werden müssen (z.B. Leistungen der beiden Kalorimeter). Damit man die aufgetragenen Werte auch am Bildschirm richtig beurteilen kann, sollte außerdem eine dynamische Skalierung während der Messung durchgeführt werden können. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden eigene Skalierungsfunktionen erstellt. Mit ihnen werden die jeweiligen Originalwerte umgerechnet und in ein zweites Zahlenfeld kopiert. Die Werte dieses neuen Zahlenfeldes werden dann, nach Wahl des richtigen Ausschnittes, unter Verwendung der Funktionen von „LabWindows/CVI“ in den Graphen der Benutzeroberfläche eingezeichnet. Die Achsenbeschriftung des Graphen kann dabei mit den Funktionen `make_x_labels` bzw. `make_y_labels` der dynamischen Darstellung der Werte angepasst werden.

Bei der Skalierung wird zunächst immer der Skalierungsfaktor der Folge mit Hilfe der Funktion `find_scale_factor(var, ...)` berechnet. Diese Funktion gibt mit ihrem Rückgabewert an, ob sich der Skalierungsfaktor geändert hat (0 = *unverändert*; 1 = *verändert*). Man könnte bei einem Rückgabewert von 0 also immer nur den aktuellsten Wert umrechnen. Der Einfachheit halber wird beim Skalieren einer Wertefolge hier grundsätzlich die komplette Folge neu umgerechnet und kopiert. Für die ausreichend schnelle Darstellung ist diese Vorgehensweise hier kein Problem. Besteht eine Abhängigkeit zwischen mehreren Werten, wie bei den Leistungen, die mit den beiden Kalorimetern gemessen werden, so soll deren Relation nach der Skalierung erhalten bleiben. Dabei wird zuerst geprüft, welche Wertefolge den größten Wert enthält bzw. den kleinsten Skalierungsfaktor aller abhängigen Funktionen hat. Danach werden alle Folgen mit diesem Faktor umgerechnet.

### 3.2.2 Funktionen zur Erstellung von Steuerkennlinien

In manchen Fällen kann es sinnvoll sein, eine Steuerkennlinie vorzugeben. So wird z.B. bei der Messung von Kennlinien mindestens ein Wert linear von seinem Startwert zum Endwert durchlaufen. Werden Kennlinienfelder aufgenommen, so wird die Steuerkennlinie sogar mehrdimensional, weil dann verschiedene Werte nach einem vorgegebenen Muster verändert werden. Um in diesen Fällen die benötigten Steuerwerte schon vor Beginn der Messung zu generieren, wurden zwei Funktionen erstellt, die das entsprechende Zahlenfeld erzeugen:

- Bei der Funktion `make_static_values(var, ...)` werden alle Werte auf den gleichen Wert gesetzt. Als Eingabevariablen werden lediglich der Startwert, die Anzahl der Messpunkte und der Pointer auf das Zahlenfeld übergeben. Man könnte, bei gleich bleibendem Steuerwert, diesen natürlich auch nur ein einziges mal setzen, um den Speicherplatz für das Zahlenfeld einzusparen. Dadurch wäre aber ein höherer Programmieraufwand für die Umschaltung zwischen linearem und statischem Verlauf der Werte nötig, da der Steuermechanismus geändert werden müsste. An der Ansteuerung der Geräte selbst ändert sich durch das hier gewählte Vorgehen nichts, da von den Gerätetreibern nur Steuerwerte gesetzt werden, die sich auch wirklich geändert haben.
- Mit der Funktion `make_linear_values(var, ...)` können entweder lineare Kurven oder treppenförmige Kurven erzeugt werden. Die einzelnen Stufen der Treppenfunktion sind dann linear zwischen Start- und Endwert verteilt. Als Variablen werden dazu die Anzahl der Messpunkte, die Anzahl der Schaltstufen, der Startwert, der Endwert und der Pointer auf das Zahlenfeld übergeben.

Da die Steuerwerte an den Geräten nicht beliebig genau einstellbar sind, muss das Feld der Steuerwerte noch auf entsprechende Werte gerundet werden. Dies kann mit der Funktion `rounding_array(var, ...)` geschehen. Die Eingangsvariablen sind hier der Pointer auf das Zahlenfeld, die Anzahl der Messpunkte und der Wert auf dessen Vielfaches gerundet werden soll.

### 3.2.3 Funktionen zur Gerätesteuerung

In den Gerätetreibern werden jeweils mehrere gerätespezifische GPIB-Befehle in, für den Programmierer leichter verständliche Funktionen zusammengefasst. Auf der Ebene der Gerätetreiber sind diese Funktionen noch stark an die jeweilige Gerätefunktion angelehnt. In den Subroutinen werden nun die gerätenahen Funktionen der Treiber in programmnahe Funktionen zusammengefasst. Die Funktionsnamen beschreiben durch welches Bedienungselement der Benutzeroberfläche sie angesprochen werden bzw. welche Aufgabe sie im Programm erfüllen.

- So initialisiert z.B. die Funktion `magnet_remote(var, ...)` die beiden für die Elektromagnete benötigten Stromnetzteile für den Remote-Betrieb und stellt die entsprechenden Startwerte ein. Zuvor müssen diese beiden Geräte manuell für den Remote-Betrieb freigegeben werden.

- Mit `remote_(Gerät)` wird das entsprechende Gerät in den Remote-Betrieb versetzt bzw. dieser beendet. Befindet sich ein Gerät schon zuvor im geforderten Endzustand, so wird der Schaltbefehl nicht erneut gesendet. Tritt beim Umschalten ein Fehler auf, so kann dies durch den Rückgabewert der Funktion erkannt werden ( $0 = \text{nicht umgeschaltet}$ ;  $1 = \text{umgeschaltet}$ ).
- Die Steuerwerte werden mit der Funktion `set_control(var, ...)` gesetzt. Dabei wird automatisch berücksichtigt, ob sich die Stromnetzteile im manuellen oder im Remote-Betrieb befinden. Außerdem wird überprüft, ob sich die Steuerwerte, im Vergleich zu den aktuellen Werten geändert haben. Hat sich ein Wert nicht verändert, so wird er nicht erneut gesetzt und somit die unnötige Verwendung des GPIB-Busses vermieden.
- Beim Verlassen eines Programms werden mit der `quit(void)`-Funktion die vom Rechner aus gesteuerten Netzteile abgeschaltet, das heißt die Ströme und Spannungen auf null gesetzt, und der Remote-Betrieb aller Geräte beendet.

### 3.3 Aufbau und Funktion der Programme

In den Stammdateien der einzelnen Programme werden alle programmspezifischen Aufgaben realisiert. Hier werden Funktionen zur Erfassung, Verarbeitung und Darstellung der Messwerte definiert, die komplette Organisation der Benutzeroberfläche geregelt und der Ablauf der Programme festgelegt. Dabei sind die einzelnen Programmteile durch Zustands-Flags so gegeneinander abgesichert, dass es durch den Benutzer nicht zu Fehlern innerhalb der Programme oder gar kritischen Zuständen der Anlage kommen kann. Im Folgenden wird zunächst der generelle Ablauf der Programme beschrieben. Auf die Sicherheitsroutinen, wie die Verwendung von Zustands-Flags wird in Abschnitt 3.3.2 näher eingegangen. Nach der Beschreibung der gemeinsamen Eigenschaften werden die programmspezifischen Funktionen dargestellt.

#### 3.3.1 Grundsätzlicher Programmablauf

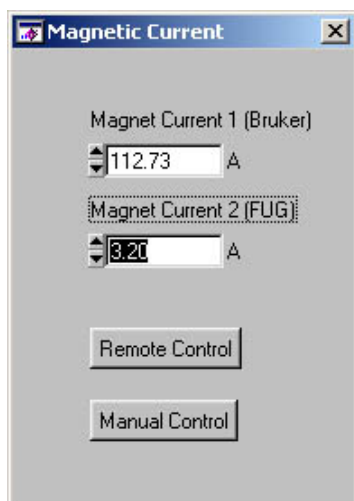


Bild 3.2: Startfenster

Beim Start aller drei Programme wird zuerst ein Fenster eingeblendet, in dem die Stromwerte für die Einstellung des Magnetfeldes abgefragt werden (Bild 3.2). Hier wird auch entschieden, ob die Stromnetzteile manuell oder vom PC aus gesteuert werden. Zu beachten ist, dass bei der Inbetriebnahme der Anlage der Hauptmagnet am Resonator des Gyrotrons, noch vor Einschalten der Kathodenheizung, einen Strom  $> 90$  A erreicht haben muss. Das Magnetfeld des Hauptmagneten wird zum Betrieb der Ionen-Getter-Pumpe zur Erzeugung des Vakuums benötigt. Im Betrieb wird durch die Simatic überwacht, dass der Schwellwert von 90 A nicht unterschritten wird, damit ein ausreichendes Vakuum in der Röhre sichergestellt ist. Werden die Stromnetzteile im Remote-Betrieb gesteuert, so muss also das entsprechende Programm vor Inbetriebnahme der Anlage gestartet werden.

Bei Start im Remote-Betrieb erscheint das Hauptfenster des Programmes erst mit einer Verzögerung von ca. 15s. Nach dieser Zeit haben die Ströme normalerweise ihre Endwerte erreicht. Im nächsten Schritt muss nun jedoch erst noch die Kathodenheizung manuell eingeschaltet werden. Erst wenn die Kathode ausreichend beheizt ist, darf auch die Beschleunigungsspannung eingeschaltet werden.

Bevor allerdings eine Messung gestartet werden kann, müssen immer zuerst die Einstellungen der Optionswerte bestätigt werden. Dies gilt auch nach Ablauf einer Messung. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Parameter der vorherigen Messung, nach einer eventuellen Änderung am Messaufbau nicht versehentlich für die nächste Messung übernommen werden. Außerdem muss sichergestellt werden, dass sich alle benötigten Geräte vor Beginn der Messung im Remote-Betrieb befinden. Ob dies vor oder nach dem Setzen der Optionen geschieht ist prinzipiell egal, einige Werte lassen sich jedoch nur setzen, wenn sich bestimmte Geräte im Remote-Betrieb befinden. Danach kann

die Messung gestartet werden. Nach Start der Messung läuft diese automatisch bis ein Abbruchkriterium des Programms erreicht oder vom Benutzer abgeschaltet wird. Zum Testen der Programme können die Messabläufe auch gestartet werden, ohne dass sich die Geräte im Remote-Betrieb befinden. Dann werden die Messwerte simuliert und in den entsprechenden Graphen ausgegeben. Dabei stehen alle Programmfunktionen zur Verfügung.

Nach Abschluss einer Messung können die Ergebnisse zum Teil im entsprechenden Graphen genauer dargestellt werden. Zur späteren exakten Auswertung können sie in eine Datei abgespeichert werden, wobei die zugehörigen Optionswerte ebenfalls abgespeichert werden. Im Fall des Kennlinienschreibers können die im Graphen dargestellten Kennlinien auch direkt gedruckt werden. Gespeicherte Ergebnisse früherer Messungen können im entsprechenden Programm wieder geladen werden. Beim Öffnen einer Datei werden alle Ergebnisse und die zugehörigen Optionswerte der gespeicherten Messung geladen. Der Zustand direkt nach der Messung wird also wieder hergestellt.

Zum Beenden eines Programms muss im Menü **File** der Eintrag **quit** angeklickt werden. Damit werden alle noch im Remote-Betrieb befindlichen Geräte in den Ruhezustand geschaltet, der Remote-Betrieb beendet, die Benutzeroberfläche ausgeblendet und das Programm beendet.

### 3.3.2 Sicherheitsroutinen

Um einen möglichst sicheren Betrieb zu garantieren sind in den Programmen Vorkehrungen auf verschiedenen Ebenen getroffen. Einerseits muss sichergestellt sein, dass keine Fehlfunktionen in den Programmen selbst auftreten. Durch unerlaubte Zustände im Programmablauf könnte eventuell die Kontrolle über eine laufende Messung verloren gehen und damit die Anlage sowie Personen in ihrer Umgebung gefährdet werden. Andererseits muss verhindert werden, dass durch den Benutzer Einstellungen gesetzt werden können, durch die ein kritischer Betriebszustand der Anlage hervorgerufen wird. Dies kann durch die Begrenzung der möglichen Eingabewerte und einen sinnvoll geführten Programmablauf geschehen. Zu jedem Zeitpunkt muss sichergestellt sein, dass immer nur die im jeweiligen Programmzustand sinnvollen Funktionen für den Benutzer freigegeben sind. Alle Zustände der Geräte und des Programms selbst müssen also bekannt sein. Keine Sicherheitsvorrichtung kann jedoch vollkommenen Schutz bieten. Daher kann der Benutzer, trotz aller Sicherheitsvorkehrungen im Programm oder an der Anlage selbst, nicht der Verantwortung entzogen werden. Er muss zu jedem Zeitpunkt abschätzen können, ob getroffene Einstellungen eventuell den sicheren Betrieb gefährden könnten.

Um Zustände und deren Änderung festzuhalten, wurden Flags definiert. Ändert sich ein Zustand, wird der Wert eines Flags verändert. So wird z.B. beim erfolgreichen Umschalten des Hochspannungsnetzteils in den Remote-Betrieb das `fug_hch_flag` von 0 auf 1 gesetzt. Der Zustand eines Gerätes muss dabei nicht eindeutig mit dem Zustand des Programms oder eines Elementes der Benutzeroberfläche verknüpft sein. Es gibt daher Flags, die den Gerätezustand beschreiben und solche, die dem Zustand z.B. eines Schalters der Benutzeroberfläche oder einem nach außen nicht ersichtlichen Programmzustand zugeordnet sind. Durch die funktionelle Verknüpfung von Geräten und Benutzerober-

fläche werden manche Zustände doppelt registriert. Wird z.B. mit einem Schalter der Benutzeroberfläche der gleichzeitige Remote-Betrieb von mehreren Geräten veranlasst, werden die Flags der einzelnen Geräte nacheinander bei erfolgter Umschaltung gesetzt. Erst wenn alle Flags der Geräte auf 1 gesetzt sind, wird das Flag des Schalters gesetzt. Die Flags der Geräte bleiben auch danach gesetzt, da es zum Beispiel möglich wäre, dass der Remote-Betrieb nur eines der Geräte zu einem späteren Zeitpunkt z.B. durch einen weiteren Schalter beendet wird. Dann muss das Flag dieses Gerätes und das des ersten Schalters auf 0 zurückgesetzt werden, die Zustandsinformation der anderen Geräte bleibt jedoch erhalten. Diese Meldung von Zuständen wird auf allen Programmebenen unterstützt. Tritt z.B. beim Umschalten mehrerer Geräte bei einem ein Fehler auf, so wird dies vom Gerätetreiber durch seinen Rückgabewert signalisiert. Daraufhin wird das Flag dieses Gerätes und folglich das des Schalters nicht gesetzt. Dem Benutzer wird dies durch das Zurücksetzen des Schalters in den ursprünglichen Zustand und durch eine Fehlermeldung signalisiert.

### 3.3.3 „Measurement“ - Programm zur Signalanalyse

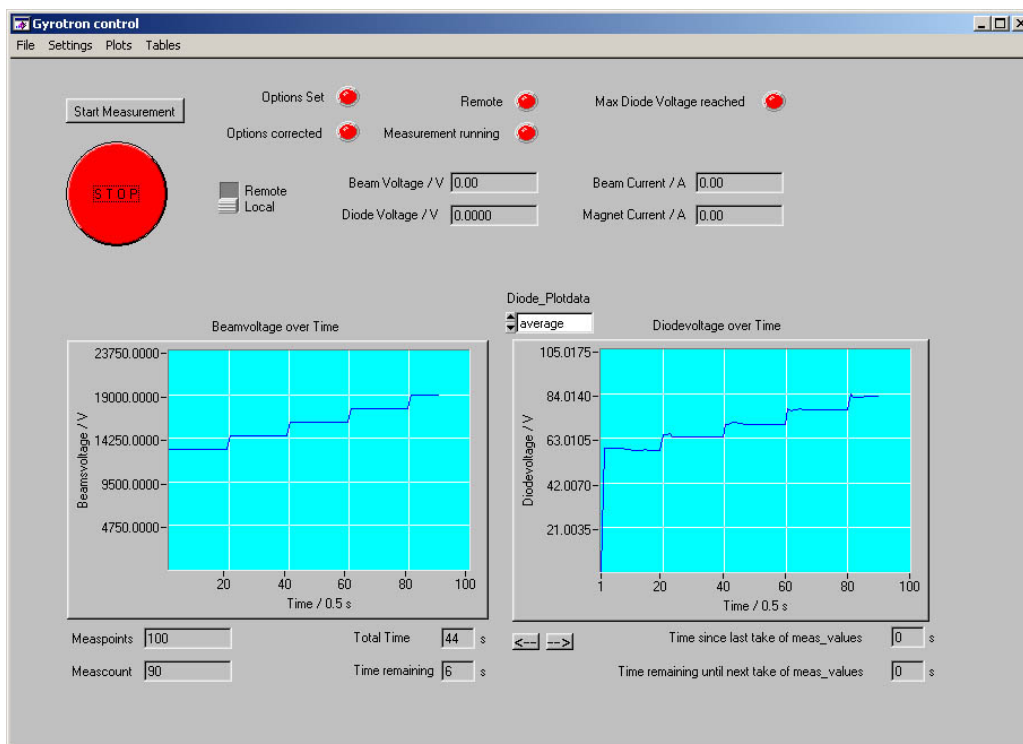


Bild 3.3: Hauptfenster von „Measurement“

Ein Signal, das bei einer Messung ausgewertet wird, muss bestimmte Eigenschaften erfüllen. Zwischen dem gemessenen Signal (hier: Diodenspannung) und der zu erfassenden Eigenschaft (hier: Ausgangsleistung des Gyrotrons) muss eine eindeutige Abhängig-

keit bestehen. Je nach Anwendung sind gewisse Grenzen des resultierenden Fehlers einer Messung einzuhalten. Mit dem Programm „Measurement“ (Bild 3.3) wird das Gleichspannungssignal der Detektordiode unter verschiedenen Betriebsbedingungen (z.B. unterschiedlicher Beladung des Applikators,...) untersucht. Bei der Analyse des Signals werden vor Beginn einer Messung alle Betriebsparameter, mit Ausnahme der Beschleunigungsspannung, fest eingestellt. Bei der Beschleunigungsspannung besteht die Möglichkeit einen ebenfalls statischen Wert einzustellen, oder sie, in einer linearen Treppenfunktion, von einem Start- zu einem Endwert durchzustimmen. Die Parameter, die den Ablauf der Messung der Diodenspannung festlegen, können zwischen einzelnen Messdurchgängen verändert werden, sind für die jeweilige Messung aber fest.

### 3.3.3.1 Elemente des Hauptfensters von „Measurement“

Beim Start des Programms wird, wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, zuerst ein Fenster zur Einstellung der Ströme für die Magnetfelder eingeblendet (Bild 3.2). Sind hier die entsprechenden Einstellungen getroffen, so wird dieses aus- und das Hauptfenster (Bild 3.3) eingeblendet. In ihm stehen alle Elemente zur Verfügung, die während dem Messablauf zur Verfügung stehen müssen. Damit das Hauptfenster übersichtlich bleibt, sind alle übrigen Funktionen über die Menüleiste zugänglich. Direkt im Hauptfenster befinden sich:

- je eine Schaltfläche zum Starten und Beenden der Messung (oben links). Der Schalter zum Beenden der Messung ist dabei, in Anlehnung an einen Notaus-Schalter, als roter Kreis ausgeführt.
- der Schalter zum Ein- und Ausschalten des Remote-Betriebes (rechts neben dem Stop-Knopf).
- mehrere Lampen, die zur Darstellung von Zuständen zwischen rot (inaktiv bzw. nicht erfüllt) und grün (aktiv bzw. erfüllt) umgeschaltet werden können (oben direkt unter der Menüleiste).
- Anzeigen für die Momentanwerte der Steuer- und Messwerte unterhalb der Zustandslampen. Angezeigt werden die Beschleunigungsspannung (in V), der Strahlstrom (in A), die Diodenspannung (in V) und der Strom zur Generation des Resonator-Magnetfeldes.
- zwei Graphen in die der Verlauf der Beschleunigungsspannung und der gemessenen Diodenspannung eingezeichnet wird.
- weitere Zahlenfelder unter den Graphen, in denen der Fortschritt der Messung angezeigt wird. Die Felder für die Anzahl der gemessenen Punkte, der verbleibenden Messpunkte, die verbleibende Gesamtzeit und die aktuelle Dauer der Messung befinden sich unter dem linken Graphen. Sind die Abstände zwischen den Messpunkten größer als 2 s werden die Zeiten seit dem letzten und bis zum nächsten Messpunkt auf der rechten Seite eingeblendet.



- ein Optionsfeld über dem rechten Graphen. Bei der Diodenspannung wird an jedem Messpunkt ein komplettes Intervall von Werten aufgenommen. Hier kann, auch während der Messung, eingestellt werden, ob der exakte Wert, das Maximum, das Minimum oder der Mittelwert des Intervalls dargestellt wird.
- zwei Schaltflächen mit Links-/Rechts-Pfeilen unter dem rechten Graphen. In den Graphen werden maximal 100 Werte gleichzeitig dargestellt. Mit den Pfeiltasten kann die Messkurve im Graphen nach Abschluß der Messung nach links bzw. rechts verschoben werden, damit auch die Messwerte in Ruhe betrachtet werden können, die bei einer längeren Messung nicht mehr im Graphen dargestellt wurden.

### 3.3.3.2 Menüleiste von „Measurement“

Der Übersichtlichkeit halber sind alle Funktionen, die während einer Messung nicht direkt verfügbar sein müssen, über die Menüleiste des Hauptfensters erreichbar.

- Unter dem Menü **File** können Werte früherer Messungen geladen (**Open File**), Messungen abgespeichert (**Save File**) oder das Programm mit **quit** verlassen werden.
- Die Optionswerte (**Set Control Values**) und das Zuschalten der internen Filter des Keithley DMM sind über das Menü **Settings** zu erreichen.
- Der Inhalt der beiden Graphen kann über **Plots** → **Reset Plots** gelöscht werden. Die Daten bleiben erhalten. Um sie wieder anzuzeigen, muss der Umweg über das Abspeichern und erneutes Laden der Daten gegangen werden. Das erneute Einblenden der gelöschten Kurven auf direktem Weg ist nicht vorgesehen.
- Sollen von einer bestimmten Messgröße die Werte der gesamten Messung angezeigt werden, können entsprechende Tabellen unter dem Menü **Tables** durch anklicken der entsprechenden Messgröße eingeblendet werden.

### 3.3.3.3 Optionswerte von „Measurement“

Vor jedem Start einer Messung müssen die Optionswerte zumindest bestätigt werden. Das Fenster zur Eingabe der Optionswerte ist in Bild 3.4 zu sehen.

Die einzelnen Eingabefelder sind:

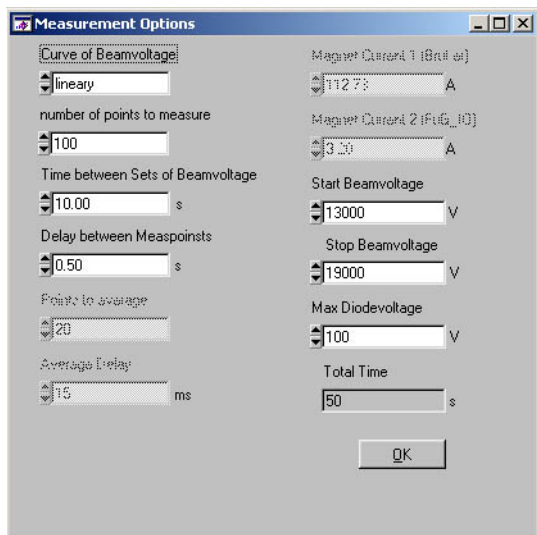


Bild 3.4: Optionen von „Measurement“

- **Curve of Beamvoltage** - hier kann gewählt werden, ob die Beschleunigungsspannung während der Messung konstant bleibt (**static**) oder treppenförmig von einem Start- zu einem Endwert durchgestimmt wird (**lineary**).
- **number of points to measure** - hier wird angegeben, wie viele Messpunkte während einer Messung insgesamt aufgenommen werden sollen. Die maximal mögliche Anzahl beträgt 1000 Messpunkte.
- **Time between Sets of Beamvoltage** - falls die Beschleunigungsspannung während der Messung verändert wird, wird hier der Abstand zwischen zwei Sprüngen des Spannungswertes in Sekunden eingegeben. Je nach Gesamtdauer der Messung kann der letzte Spannungswert nur kürzer gesetzt bleiben.
- **Delay between Measpoints** - ist der zeitliche Abstand zwischen der Aufnahme zweier Messpunkte in Sekunden. Dieser Wert kann niemals kleiner als die zur Aufnahme eines Messwertintervalls der Diodenspannung benötigten Zeit sein. Wird ein zu kleiner Wert eingegeben, wird er automatisch auf den kleinsten vertretbaren Wert korrigiert.
- **Points to average** - bei der Messung der Diodenspannung wird zur Mittelwertbildung an jedem Messpunkt ein Intervall von Werten aufgenommen. Hier wird die Größe dieses Intervalls angegeben. Die maximale Größe des Intervalls beträgt 500 Werte. Befindet sich das Digitalmultimeter nicht im Remote-Betrieb, ist dieses Feld inaktiv und matt dargestellt.
- **Average Delay** - hier wird die Zeit (in ms) eingestellt, die zwischen der Messung zweier Werte im jeweiligen Intervall liegt. Befindet sich das Digitalmultimeter nicht im Remote-Betrieb, ist dieses Feld inaktiv und matt dargestellt.
- **Magnet Current 1 (Brucker)** - falls die Stromnetzteile zur Erzeugung des Magnetfeldes vom Rechner aus gesteuert werden, können hier und im nächsten Feld die Stromwerte geändert werden. Andernfalls sind dieses und das nächste Feld

inaktiv und matt dargestellt. In diesem Feld wird die Stromstärke zur Erzeugung des Resonator-Magnetfeldes angegeben.

- **Magnet Current 2 (FuG\_I0)** - hier wird der Strom zur Erzeugung des Gun-Magnetfeldes eingestellt.

Die Stromwerte sind auf einen bestimmten Bereich beschränkt. Die beiden Magnetfelder müssen jedoch immer so eingestellt werden, dass zusammen mit den gewählten Spannungswerten das Gyrotron in einem sicheren Betriebszustand bleibt.

- **Start Beamvoltage** - hier ist der Startwert der Beschleunigungsspannung einzugeben.
- **Stop Beamvoltage** - bei konstanter Beschleunigungsspannung ist dieses Feld gedimmt, eine Eingabe kann dann nicht erfolgen. Ansonsten wird hier ihr Endwert abgefragt. Wird als Startwert ein Wert größer als der Endwert angegeben, so werden die beiden Werte vertauscht. Es ist also immer nur eine konstante oder ansteigende Beschleunigungsspannung möglich.

Die Werte der Beschleunigungsspannung sind aus Gründen der Sicherheit nach oben begrenzt. Um Schäden am Gyrotron zu vermeiden, muss aber trotzdem darauf geachtet werden, dass nur Beschleunigungsspannungen eingestellt werden, die mit dem eingestellten Magnetfeld auch zur Erzeugung einer HF-Schwingung ausreichend hoher Leistung führen! Unter keinen Umständen darf die HF-Schwingung im Gyrotron abreißen.

- **Max Diodevoltage** - die Diode kann vor Schäden geschützt werden, indem ihre Ausgangsspannung auf einen Maximalwert begrenzt wird. Wird ein größerer Wert gemessen, so erfolgt die Abschaltung der Beschleunigungsspannung und die Messung wird beendet.
- **Total time** - aus der Anzahl der Messpunkte und der Zeit zwischen der Aufnahme zweier Messpunkte wird die benötigte Gesamtzeit der Messung berechnet und hier angezeigt.

### 3.3.3.4 Format der abgespeicherten Daten in „Measurement“

Die Daten einer Messung werden beim Speichern in eine ASCII-Datei geschrieben. Dies ermöglicht die flexible Auswertung der Daten mit Programmen wie Excel, Origin, Matlab und anderen. Die Datei ist wie folgt formatiert:

```
100.0 0.5 5.0 112.73 3.2 1.0 15.0 20.0 0.0
1.0 12500.0 0.73804 0.0 0.0 -1.7e-005 -1.7e-005 -4.0e-006 4.9e-005
2.0 12500.0 2.0 0.0 0.0 -1.7e-005 -1.7e-005 -1.0e-006 4.9e-005
3.0 12500.0 2.0 0.0 0.0 -1.7e-005 -1.7e-005 -1.0e-006 4.9e-005
4.0 12500.0 1.9159 0.0 0.0 0.026727 0.026727 0.055265 0.08336
5.0 12500.0 1.7871 0.0 0.0 0.090045 0.089644 0.089894 0.090178
```

In der ersten Textzeile der Datei stehen die Optionswerte der Messung. Der Reihe nach sind dies:

1. die Anzahl der Messpunkte,
2. die Zeit zwischen zwei Messpunkten (in s),
3. die Zeit zwischen zwei Sprüngen der Beschleunigungsspannung (in s),
4. die Stromstärke des Resonatormagneten (in A),
5. die Stromstärke des Gun-Magneten (in A),
6. die maximal zulässige Diodenspannung (in V),
7. der zeitliche Abstand zwischen zwei Werten des Messintervalls der Diodenspannung (in ms) und
8. die Größe dieses Intervalls (in ms).
9. die neunte Spalte ist nicht belegt und daher immer 0.0

Darunter sind die entsprechenden Mess- und Steuerwerte, nach Spalten getrennt, aufgetragen. Die einzelnen Spalten sind dabei durch Tabulator getrennt. In den Spalten stehen der Reihe nach:

1. die Nummer des jeweiligen Messpunktes,
2. die Beschleunigungsspannung (in V),
3. der Strahlstrom (in A),
4. der Strom des Gun-Magneten (in A),
5. der Strom des Resonator-Magneten (in A).

Die Ströme für die Magnetfelder wurden hier bis jetzt nur als Platzhalter in die Datei eingefügt, falls später einmal eine Veränderung der Ströme während der Messung eingeführt werden sollte. Solange sie während der Messung konstant bleiben, genügt deren Angabe in der Kopfzeile der Datei.

6. der exakte Momentanwert der Diodenspannung (in V). Dieser entspricht dem ersten Wert des jeweiligen Messintervalls.
7. das Minimum des jeweiligen Messintervalls der Diodenspannung (in V),
8. der Mittelwert des Messintervalls der Diodenspannung (in V),
9. das Maximum der Diodenspannung im Messintervall (in V).

In einer zweiten Datei werden außerdem alle gemessenen Werte der Diodenspannung fortlaufend in einer einzigen Spalte abgelegt. Diese Datei erhält den Zusatz `exact` im Dateinamen.

### 3.3.4 „Calibration“ - Programm zur Kalibration

Sobald eine ausreichend rauscharme Gleichspannung der Detektordiode zur Verfügung steht, muss im nächsten Schritt die Abhängigkeit zwischen der Diodenspannung und der Ausgangsleistung des Gyrotrons näher untersucht werden. Dazu ist ein Programm notwendig, das neben der Ansteuerung des Gyrotrons und der Messung der Diodenspannung auch die Messung der Ein- und Ausgangstemperaturen der Kalorimeter übernimmt. Mit dem Programm „Calibration“ (Bild 3.5) werden alle für die Kalibrierung notwendigen Werte gemessen und bei Bedarf in einem Graphen dargestellt. Im Programm ist auch eine Funktion zur Durchführung einer Kalibrierung der Kalorimeter selbst enthalten.

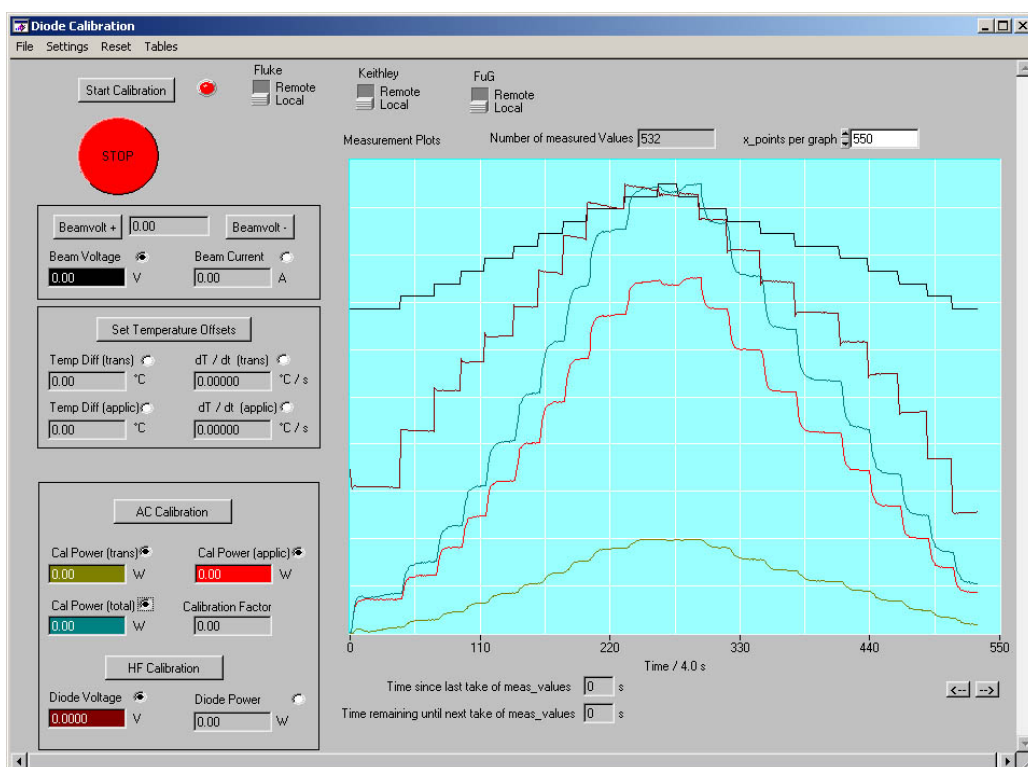


Bild 3.5: Hauptfenster von „Calibration“

Zur Durchführung einer Messung sind, nach Einbau der Kalorimeter, zunächst die Kalibrierfaktoren zu ermitteln, die nach Gleichung 2.7 die Temperaturwerte der Kalorimeter mit Leistungswerten verknüpfen. Dies kann mit der Funktion **AC Calibration** geschehen. Sind die Kalibrierfaktoren bekannt, können sie auch als Optionswerte eingegeben werden. Vor jeder Messung müssen außerdem die Temperaturdifferenzen zwischen Ein- und Ausgang der Kalorimeter im kalten Zustand zu null gesetzt werden. Dies gilt auch für die Kalibration der Kalorimeter selbst. Nach Eingabe bzw. Bestätigung der Optionswerte kann die eigentliche Messung gestartet werden. Mit Ausnahme der Beschleunigungsspannung sind alle Steuerwerte während der Messung fest eingestellt. Die

Beschleunigungsspannung kann während der Messung in Stufen erhöht oder vermindert werden. Die minimale Höhe einer Spannungsstufe ist in den Optionswerten festzulegen. Gemessen werden die Spannung der Detektordiode und die Ein- und Ausgangstemperaturen der Kalorimeter. Aus den Temperaturdifferenzen werden die entsprechenden Leistungswerte berechnet. Alle Steuer- und Messwerte werden als Momentanwerte angezeigt. Zur Beurteilung der Werteverläufe können sie in einen Graphen eingezeichnet werden. Die Dauer einer Messung ist nur durch die maximale Anzahl der Messpunkte (max 1000 Punkte) begrenzt, kann aber jederzeit manuell beendet werden. Nach Ablauf der Messung können die Daten abgespeichert werden. Die gespeicherten Werte vergangener Messungen können ebenfalls geladen und dargestellt werden.

#### 3.3.4.1 Elemente des Hauptfensters von „Calibration“

Das Hauptfenster ist, nach dem Fenster zur Einstellung der Magnetfelder, das zweite Fenster das nach Programmstart eingeblendet wird. Es enthält, wie in Bild 3.5 zu sehen:

- Je eine Schaltfläche zum Starten und Beenden der Messung (links oben). Der Stop-Schalter ist, in Anlehnung an einen Notaus-Schalter, als roter Kreis ausgeführt.
- Eine Zustandsanzeige links neben der Startschaltfläche, die angibt, ob gerade eine Messung läuft (grün) oder nicht (rot).
- Drei Schalter zum Ein- bzw. Ausschalten des Remote-Betriebes einzelner Geräte direkt unter der Menüleiste. Der Reihe nach sind dies der Messwert Scanner (Fluke), das Digitalmultimeter (Keithley) und das Hochspannungsnetzteil (FuG). Ob die Stromnetzteile manuell oder vom Rechner aus gesteuert werden, wird beim Programmstart festgelegt.
- Die Momentanwertanzeigen am linken Rand, unterhalb des Stop-Schalters. Sie sind nach Art der angezeigten Werte geordnet. Im ersten Block werden die Beschleunigungsspannung und der Strom des Hochspannungsnetzteils angezeigt. Darunter sind die Temperaturwerte der Kalorimeter dargestellt. Im dritten Block befinden sich die Leistungswerte der Kalorimeter und die Diodenspannung bzw. die von der Diodenspannung abgeleitete Leistung.

Zwischen den Momentanwertanzeigen befinden sich verschiedene Schaltflächen.

- Im ersten Block befinden sich je eine Schaltfläche zur Erhöhung (**Beamvolt +**) bzw. Verringerung (**Beamvolt -**) der Beschleunigungsspannung. Die minimale Sprunghöhe ist dabei in den Optionswerten einzustellen. Die zukünftige Beschleunigungsspannung wird zwischen den beiden Schaltflächen angezeigt. Gesetzt wird der neue Wert zum Zeitpunkt der nächsten Messwertaufnahme. Werden die Schaltflächen zwischen zwei Messpunkten mehrmals betätigt, so wird die Beschleunigungsspannung um ein entsprechendes Vielfaches der minimalen Sprunghöhe verändert. Wird dabei ein maximal zulässiger Wert überschritten, wird die Messung beendet.

- Mit der Schaltfläche `Set Temperature Offsets` im zweiten Block kann ein Fenster zum Nullsetzen der Temperaturdifferenzen eingeblendet werden (Bild 3.7). Dies sollte vor Beginn jeder Messung geschehen. Auf die Bedienung wird in Abschnitt 3.3.4.4 näher eingegangen.
  - Über die erste Schaltfläche im dritten Block der Momentanwerte (`AC Calibration`) wird das Fenster für die Leistungsvergleichsmessung zur Kalibration der Kalorimeter eingeblendet. Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise erfolgt in Abschnitt 3.3.4.5.
  - Die Diodenspannung lässt sich mit der Schaltfläche `HF Calibration linear` mit der jeweils aktuellen Gesamtleistung beider Kalorimeter verknüpfen. Der resultierende HF-Kalibrierfaktor wird dann im Feld `Calibration Factor` angezeigt. Der zugehörige Leistungswert wird im Feld `Diode Power` angegeben. Zu beachten ist, dass dieser Wert für verschiedene Betriebszustände nur dann dem korrekten Leistungswert entspricht, wenn die Diodenspannung proportional zur Ausgangsleistung des Gyrotrons ist.
- Rechts neben den Momentanwertanzeigen befindet sich ein Graph. In ihm können die gewünschten Kurven der Verlaufswerte der Messung eingezeichnet werden. Welche Kurven gezeigt werden sollen, wird mit der runden Auswahl Schaltfläche rechts über der entsprechenden Anzeige des Momentanwerts bestimmt. Zu jeder angezeigten Kurve, wird der zugehörige Momentanwert in der Farbe der Kurve unterlegt. Die einzelnen Kurven können auch während der Messung ein- oder ausgeblendet werden. Alle Kurven werden dynamisch skaliert, wobei wichtige Relationen erhalten bleiben. Die bis zu 11 Kurven mit je bis zu 1000 Punkten werden, trotz dynamischer Skalierung, nahezu in Echtzeit gezeichnet. Dazu muss in der Plotfunktion die automatische Aktualisierung der Anzeige zunächst abgeschaltet werden. Anschließend werden alle zu zeichnenden Werte übergeben und erst danach der Graph aktualisiert. Die Label der x-Achse geben die Nummern der Messpunkte an. Darunter wird die Zeit zwischen zwei Messpunkten angegeben.
  - In der Mitte über dem Graphen wird die momentane Gesamtzahl der Messpunkte angezeigt. Eine Messung ist auf je 1000 Punkte begrenzt.
  - Die Anzahl der in x-Richtung dargestellten Werte kann auch während der Messung verändert werden. Dazu wird der Wert im Zahlenfeld rechts über dem Graphen geändert. Dies ermöglicht eine genauere Beurteilung der Verläufe schon während der Messung.
  - Links unterhalb des Graphen wird in zwei Zahlenfeldern die Zeit seit der letzten bzw. bis zur nächsten Aufnahme eines Messpunktes angezeigt.
  - Mit den Pfeilen rechts unterhalb des Graphen können, nach Ende der Messung, die Kurven im Graphen seitlich verschoben werden, falls in der Breite nicht die komplette Messung dargestellt wird.

Die übrigen Funktionen des Programms sind über die Menüleiste zugänglich, und werden in Kapitel 3.3.4.2 beschrieben.

### 3.3.4.2 Menüleiste von „Calibration“

Die über die Menüleiste erreichbaren Funktionen entsprechen weitestgehend denen im Programm „Measurement“, die in Abschnitt 3.3.3.2 beschrieben sind.

- Die Funktionen zum Speichern und Laden von Daten, sowie zum Verlassen des Programms sind unter dem Menu **File** zu finden.
- Unter **Settings** → **Set Control Values** wird das Fenster zum Einstellen der Optionswerte aufgerufen.
- Der Graph bzw. der HF-Kalibrierfaktor können unter **Reset** zurückgesetzt werden. Der HF-Kalibrierfaktor sollte zurückgesetzt werden, wenn eine starke Änderung der Relation Diodenspannung - Leistung zu erwarten ist, z.B. nach Änderung der Dämpfung im Koppelpfad zur Detektordiode. Da die Leistungswerte der Kalorimeter und jene, die von der Diodenspannung abgeleitet werden, gemeinsam skaliert werden, kann die Darstellung der Kurven sonst unbrauchbar sein.
- Wertetabellen sind unter dem Menu **Tables** verfügbar. Dabei können auch die absoluten Temperaturen an den Ein- und Ausgängen der Kalorimeter angezeigt werden, deren Momentanwerte im Hauptfenster nicht angezeigt werden.

### 3.3.4.3 Optionswerte von „Calibration“

Wie beim Programm „Measurement“ müssen auch in „Calibration“ vor Beginn jeder Messung die Optionswerte zumindest bestätigt werden. Die einstellbaren Werte unterscheiden sich jedoch zum Großteil von denen in „Measurement“.

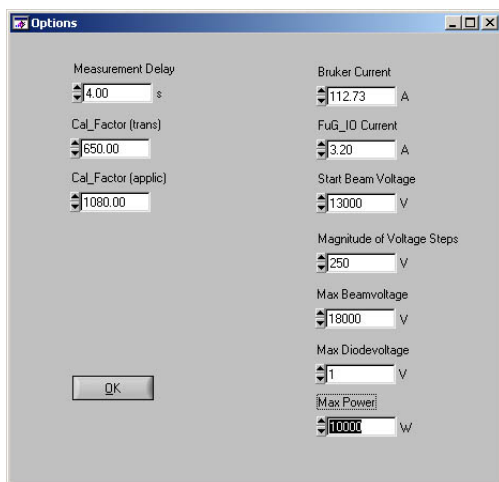


Bild 3.6: Optionen von „Calibration“

Die Werte zur Mittelung der Diodenspannung sind in „Calibration“ fest auf einen Wert eingestellt, der sich bei vorhergehenden Untersuchungen zur Kurzzeitstabilität (Kapitel 5.1.5 und 5.2.2) als brauchbar erwiesen hat. Die Beschleunigungsspannung wird hier, vom Benutzer gesteuert, während der Messung verändert. Hinzu kommen außerdem Einstellungen für die Leistungsmessung. Im Einzelnen sind die einzustellenden Werte:

- **Measurement Delay** - der zeitliche Abstand zwischen zwei Messpunkten. Dieser muss hier, wegen der langen Auslesezeit des Fluke-Messwertscanners, mindestens drei bis vier Sekunden betragen.



Der Wert ist im Programm nicht nach unten begrenzt. Werden zu kurze Zeiten gewählt, wird die Messung, durch die Reaktionszeit der Geräte bedingt, langsamer als eingestellt.

- **Cal\_Factor(trans)** - der Kalibrierfaktor für das Kalorimeter in der Übertragungstrecke, zur Verknüpfung von Temperaturdifferenzen und Leistungswerten.
- **Cal\_Factor(applic)** - der Kalibrierfaktor des Kalorimeters im Applikator.
- **Brucker Current** - der Strom für das Magnetfeld am Resonator.
- **FuG\_IO Current** - der Strom für das Magnetfeld an der Elektronenkanone.
- **Start Beamvoltage** - der Startwert der Beschleunigungsspannung.

Bei den Einstellungen der Ströme für die Magnetfelder und der Beschleunigungsspannung ist darauf zu achten, dass die gewählten Startwerte auch zur Erzeugung einer HF-Schwingung im Gyrotron führen, um die Röhre vor Schäden, z.B. durch Überschläge in der Röhre, zu schützen.

- **Magnitude of Voltage Steps** - hier wird die minimale Spannungsdifferenz für Änderungen der Beschleunigungsspannung während der Messung eingestellt. Zwischen zwei Messpunkten sind jeweils Änderungen um ein Vielfaches dieses Wertes möglich.
- **Max Beamvoltage** - der maximal für die Messung zulässige Wert der Beschleunigungsspannung. Er sollte so gewählt werden, dass bei den sonst gewählten Steuerwerten, kein Abriss der HF-Schwingung bei hohen Beschleunigungsspannungen erfolgen kann.
- **Max Diodevoltage** - die maximal zulässige Diodenspannung. Wird während der Messung ein größerer Wert der Diodenspannung gemessen, erfolgt der Abbruch der Messung, um die Diode vor Zerstörung zu schützen.
- **Max Power** - die Ausgangsleistung des Gyrotrons kann hiermit ebenfalls beschränkt werden. Dabei ist immer das Maximum der verschiedenen Leistungswerte ausschlaggebend. Das heißt, ein ungünstiger Wert des HF-Kalibrierfaktors kann eventuell auch bei eigentlich niedriger Ausgangsleistung zum Abbruch der Messung führen. In diesem Fall muss der HF-Kalibrierfaktor auf null zurückgesetzt werden und die Messung, nach Bestätigung der Optionswerte, erneut gestartet werden.

### 3.3.4.4 Temperature Offsets in „Calibration“

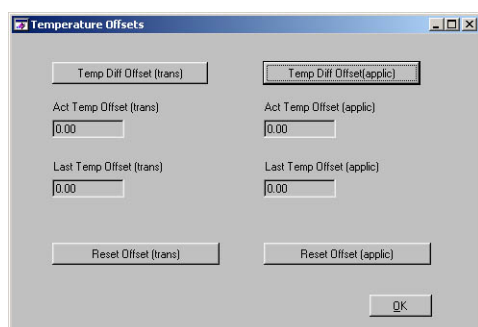


Bild 3.7: Temperaturoffsets

Durch unterschiedliche Übergangswiderstände an den Anschlüssen der PT100 Temperatursensoren bzw. der erlaubten Toleranzen ist es möglich, dass der Temperaturfühler am Eingang des Kalorimeters selbst bei ausgeschaltetem Gyrotron eine andere Temperatur hat als der Temperaturfühler am Ausgang des selben. Damit die gemessenen Leistungen nicht durch diese zusätzlichen Temperaturdifferenzen verfälscht werden, müssen sie vor der Leistungsmessung zu null gesetzt werden. Dies geschieht mit den Funktionen des Fensters in Bild 3.7.

Bei Betätigung der Schaltflächen **Temp Diff Offset (trans)** bzw. **(applic)** werden die Temperaturen an Ein- und Ausgang der jeweiligen Kalorimeter gemessen und ihre Differenz ( $T_{out} - T_{in}$ ) gespeichert. Bei späteren Messungen der Temperaturdifferenz werden diese Offset-Werte jeweils von den Ergebnissen abgezogen. Beim Einlesen der Offsets ist zu beachten, dass vom Fluke-Messwert Scanner immer die Werte übergeben werden, die zum Zeitpunkt des letzten Triggers, das heißt nach der vorangegangenen Werteübergabe an den Rechner, tatsächlich gemessen wurden. Um sicherzustellen, dass die richtigen Offset-Werte eingestellt sind müssen diese also mindestens zweimal hintereinander eingelesen werden. Zur Kontrolle, wie stark sich der aktuelle und der vorangegangene Offset unterscheiden, werden beide angezeigt. Um einen guten Wert für den Offset zu erreichen, ist es empfehlenswert, diesen solange aufzunehmen, bis er sich nur noch geringfügig ändert. Falls ein soeben ersetzter Wert sinnvoller erscheint, kann er mit **Reset Offset** wieder als Offset übernommen werden. Durch die Wärmekapazitäten des Kühlkreislaufs und der Kalorimeter selbst ist ein Fehler in der Leistungsmessung durch fehlerhafte Temperaturwerte jedoch nicht vollständig auszuschließen.

### 3.3.4.5 AC-Calibration in „Calibration“

Bevor eine Leistungsmessung stattfinden kann, müssen zunächst die beiden Kalorimeter selbst kalibriert werden. Dazu wird eine Vergleichsmessung mit einer elektrischen Zusatzheizung durchgeführt. Das Vorgehen dazu wurde in Abschnitt 2.4.2.3 beschrieben. Die Leistungsaufnahme der elektrischen Zusatzheizung aus dem Netz wird mit einem vorgeschalteten Leistungsmessgerät bestimmt. Alternativ können auch ein Amperemeter und ein Voltmeter an der Zuleitung der Heizung angeschaltet werden und der entsprechende Wert der Wirkleistung aus den Effektivwerten von Netzspannung und Heizstrom berechnet werden. Die Bezeichnung AC-Calibration ist von der Verwendung von 50 Hz-Wechselstrom zum Betrieb der Zusatzheizung bei der Kalibrierung der Kalorimeter abgeleitet.

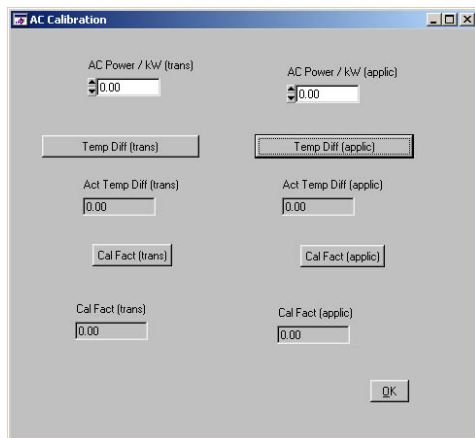


Bild 3.8: AC-Calibration

faktoren in den untersten Zahlenfeldern des Fensters. Nach Abschluss der Kalibrierung wird das Fenster durch betätigen des OK-Buttons geschlossen.

Im Fenster für die AC-Kalibration (Bild 3.8), wird der entsprechende Leistungswert im Feld **AC Power** in kW eingegeben. Anschließend werden die Temperaturwerte der Kalorimeter durch Anklicken der Schaltflächen **Temp Diff (trans)** bzw. **(applic)** ausgelesen. Achtung! Zuvor sollten die Temperatur Offsets im kalten Zustand gesetzt worden sein! Man sollte die Temperaturdifferenzen so lange auslesen, bis sie nahezu konstant sind. Ist ein stationärer Zustand erreicht, so wird durch Drücken der Schaltfläche **Cal Fact (trans)** bzw. **(applic)** der Kalibrierfaktor berechnet und in die Einstellungen des Programms übernommen. Angezeigt werden die Kalibrier-

### 3.3.4.6 Format der abgespeicherten Daten in „Calibration“

Die Formatierung der abgespeicherten Daten im ASCII-Format ist denen des Programms „Measurement“ aus Abschnitt 3.3.3.4 sehr ähnlich. In der ersten Zeile stehen hier der Reihe nach folgende Werte:

1. die Anzahl der Messpunkte,
2. die Zeit zwischen zwei Messpunkten (in s),
3. die Stromstärke für den Resonatormagneten (in A),
4. die Stromstärke für den Gun-Magneten (in A),
5. der Startwert der Beschleunigungsspannung (in V),
6. die minimale Höhe eines Spannungssprungs (in V),
7. die maximale Beschleunigungsspannung (in V),
8. die maximale Diodenspannung (in V),
9. der HF-Kalibrierfaktor, der die Diodenspannung mit den Leistungswerten verknüpft,
10. der Temperatur-Offset für das Kalorimeter in der Übertragungsleitung (in °C),
11. der Temperatur-Offset für das Kalorimeter im Applikator (in °C),
12. der zeitliche Abstand zwischen zwei Werten des Messintervalls der Diodenspannung (in ms) und

13. die Größe dieses Intervalls,
14. der Kalibrierfaktor für das Kalorimeter in der Übertragungsleitung,
15. der Kalibrierfaktor für das Kalorimeter im Applikator,
16. der Wert der letzten Spalte ist immer 0.0, da diese Spalte zum Speichern von Messwerten benötigt wird, jedoch keine weiteren Optionswerte abgespeichert werden müssen.

Ab der zweiten Zeile sind der Reihe nach folgende Werte in den einzelnen Spalten eingetragen:

1. die Nummer des jeweiligen Messpunktes,
2. die Beschleunigungsspannung (in V),
3. der Strahlstrom (in A),
4. der Strom des Resonator-Magneten (in A),
5. der Strom des Gun-Magneten (in A).  
Die Verlaufswerte dieser Ströme sind dabei immer zu null gesetzt, da die Ströme durch die Angaben in der Kopfzeile eindeutig festgelegt sind.
6. die Temperatur des Wassers am Eingang des Kalorimeters in der Übertragungsleitung (in °C),
7. die Temperatur des Wassers am Ausgang des Kalorimeters in der Übertragungsleitung (in °C),
8. die Temperaturdifferenz am Kalorimeter der Übertragungsleitung (in °C),
9. die Änderung der Temperaturdifferenz am Kalorimeter der Übertragungsstrecke (in °C/s),
10. die kalorimetrisch gemessene Leistung in der Übertragungsleitung (in W),
11. die Temperatur des Wassers am Eingang des Kalorimeters im Applikator (in °C),
12. die Temperatur des Wassers am Ausgang des Kalorimeters im Applikator (in °C),
13. die Temperaturdifferenz am Kalorimeter des Applikators (in °C),
14. die Änderung der Temperaturdifferenz am Kalorimeter des Applikators (in °C/s),
15. die kalorimetrisch gemessene Leistung im Applikator (in W),
16. die kalorimetrisch gemessene Gesamtleistung (in W),

17. die Ausgangsspannung der Detektordiode (in V),
18. die von der Diodenspannung abgeleitete Leistung (in W). Dieser Wert ist nur ungleich null wenn der HF-Kalibrierfaktor während der Messung gesetzt war.

### 3.3.5 „Characteristics“ - Programm zur Aufnahme von Kennlinien

Die Zusammenhänge zwischen den Steuerwerten und der Ausgangsleistung sind beim Gyrotron stark nichtlinear. Um den optimalen Arbeitspunkt der Röhre zu finden ist es notwendig, viele verschiedene Einstellungen durchzustimmen und die erzielten Leistungswerte zu erfassen. Dies geschieht am besten systematisch bei der Aufnahme von Kennlinienfeldern. Unter Benutzung der kalorimetrischen Leistungsmessung ist das Messen der Kennlinien ein sehr langwieriges Verfahren. Es dauert dabei oft mehr als 20 s bis die Temperaturen einen stationären Zustand erreicht haben und der Leistungswert zuverlässig ausgelesen werden kann. Strebt man eine hohe Auflösung der Kennlinien, d.h. eine große Anzahl von Messpunkten an, so werden für die Erfassung einer einzigen Kennlinie leicht Zeiten im Bereich einer viertel bis halben Stunde benötigt. Durch die schnelle Leistungsmessung, unter Verwendung einer Detektordiode, können die Abstände zwischen zwei Messpunkten leicht auf die Größenordnung einer Sekunde oder gar Sekundenbruchteile verkürzt werden, was eine sehr schnelle Aufnahme von Kennlinien erlaubt.

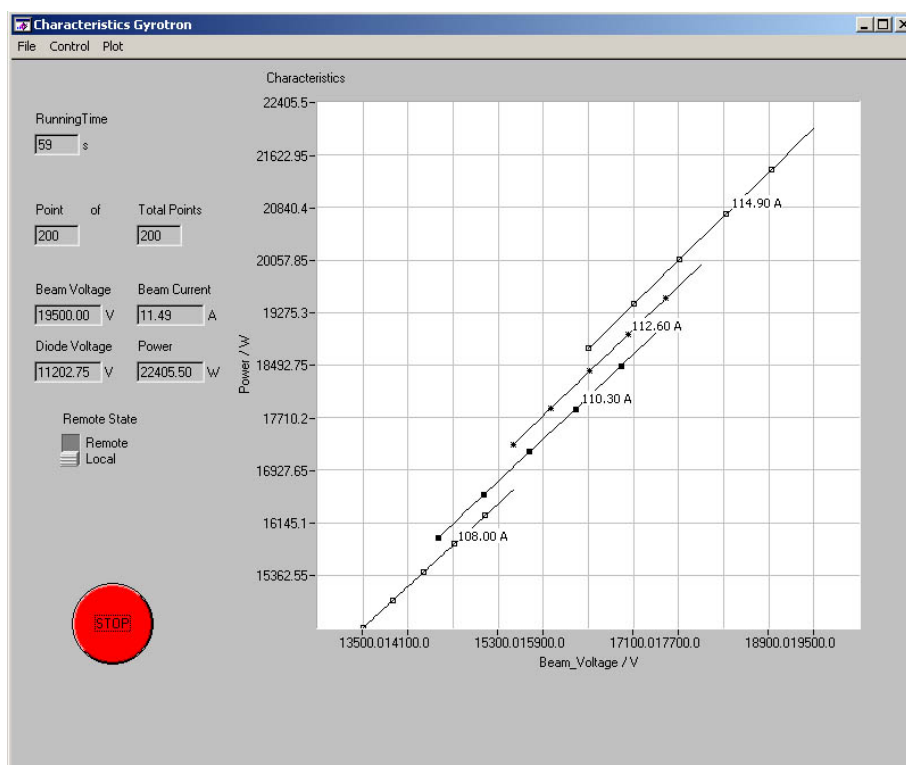


Bild 3.9: Hauptfenster von „Characteristics“

Das Programm „Characteristics“ (Bild 3.9) unterscheidet sich im Ablauf von den anderen beiden Programmen. Sind „Measurement“ und „Calibration“ noch als Programme für die reine Laborarbeit konzipiert, so orientiert sich das Erscheinungsbild von „Characteristics“ an den Erfordernissen einer Anwendungen für den Endbenutzer. Der Benutzer soll hier, durch den Programmablauf gesteuert, auf die einzelnen Schritte zur Bedienung hingeführt werden. „Characteristics“ kam während dieser Arbeit als einziges Programm nicht zum praktischen Einsatz. Es soll jedoch eine Möglichkeit aufzeigen, wie ein solches Programm, speziell unter Verwendung der erstellten Gerätetreiber und Subroutinen, aufgebaut werden kann.

Beim Start des Programms wird, wie bei den anderen Programmen zuerst das Fenster zur Einstellung der Magnetfelder (Bild 3.2) eingeblendet. Zur Aufnahme von Kennlinienfeldern sollten die Ströme zur Erzeugung der Magnetfelder vom Rechner aus gesteuert werden, da dann die Beschleunigungsspannung und das Magnetfeld verändert werden müssen. Als nächstes wird im Gegensatz zu den anderen Programmen direkt das Optionenfenster und nicht das Hauptfenster (Bild 3.9) geöffnet. Dort werden unter anderem die Wertebereiche festgelegt, die bei der Messung des Kennlinienfeldes durchfahren werden. Allerdings ist nicht immer im Voraus bekannt, bei welchen Spannungswerten das Gyrotron bei den entsprechenden Magnetfeldeinstellungen auch tatsächlich anschwingt und HF-Leistung abgibt. Um die Randwerte z.B. der Beschleunigungsspannung festzulegen, wird ein weiteres Fenster eingeblendet, in dem in einer Vorab-Messung die genauen Spannungswerte und Stromwerte für die einzelnen Kennlinien ermittelt werden (Bild 3.11, Abschnitt 3.3.5.2). Erst danach wird schließlich das Hauptfenster eingeblendet, von dem aus die eigentliche Aufnahme der Kennlinien gestartet wird. Für weitere Kennlinienmessungen wird das Hauptfenster jedoch nicht mehr ausgeblendet. Trotzdem müssen vor jeder weiteren Messung die beiden vorhergehenden Schritte durchgeführt werden. Im Folgenden werden die Fenster in der Reihenfolge ihres erstmaligen Erscheinens beschrieben.

### 3.3.5.1 Optionen von „Characteristics“

Bei der Einstellung der Optionswerte in „Characteristics“ muss das Vorgehen, im Vergleich zu den anderen beiden Programmen leicht abgeändert werden. Werden Kennlinienfelder vermessen, werden während der Messung zwei Steuerwerte verändert. Da die Arbeitsbereiche des Gyrotrons dabei meist nicht genau bekannt sind, können die Werte nicht von vornherein exakt festgelegt werden. In den Optionen werden daher zuerst einmal Parameter gewählt, die ungefähr die Messbereiche und die gewünschte Auflösung der Kennlinien betreffen. Die genauen Randwerte für die Aufnahme der Kennlinien werden dann in einer Messung festgelegt (Abschnitt 3.3.5.2).

Die einzelnen Optionswerte sind:

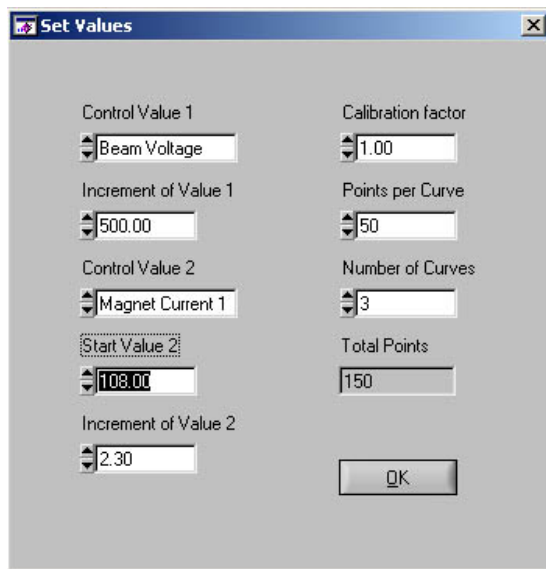


Bild 3.10: Optionen von „Characteristics“

- **Control Value 1** - die Steuergröße, die bei jeder Kennlinie von einem Start- zum Endwert durchlaufen wird. Momentan kann hier zwischen der Beschleunigungsspannung (**Beamvoltage**) oder dem Strom für das Magnetfeld am Resonator (**Magnet Current 1**) gewählt werden. Die hier nicht gewählte Größe wird im Feld **Control Value 2** eingestellt. Soll das Programm so geändert werden, dass auch der Stromwert für das Gun-Magnetfeld zur Verfügung steht, ist dafür zu sorgen, dass die hier gewählte Größe als zweite Steuergröße nicht in der Auswahl verfügbar ist.
- **Increment of Value 1** - das Inkrement für den Steuerwert 1 wird bei der Messung zur Festlegung der Randwerte verwendet. Es legt die Höhe der Schaltsprünge des Steuerwertes 1 fest. Der Wert kann aber auch bei der Randwertbestimmung selbst noch verändert werden.
- **Control Value 2** - diese Größe wird als Parameter der Kennlinien verwendet und von einer zur nächsten erhöht.
- **Start Value 2** - hier wird der Startwert des zweiten Steuerwertes angegeben, der als Parameter für die erste Kennlinie verwendet wird.
- **Incement of Value 2** - gibt an um welchen Wert der Parameterwert von einer zur nächsten Kennlinie erhöht wird.
- **Calibration Factor** - bei einem linearen Zusammenhang zwischen Diodenspannung und der Ausgangsleistung des Gyrotrons, wird hier der Kalibrierfaktor für die Diode eingegeben. Bei nichtlinearen Zusammenhängen ist eine Implementierung der Kalibrierkennlinie im Programm selbst sinnvoll.

- **Points per Curve** - bestimmt die Anzahl der Punkte die pro Kennlinie ausgemessen werden.
- **Number of Curves** - gibt die Anzahl der gewünschten Kennlinien im Kennlinienfeld an.

Im Zahlenfeld **Total Points** wird die Gesamtzahl der im Kennlinienfeld aufzunehmenden Punkte angegeben. Durch betätigen des OK-Buttons werden die Werte übernommen, das Optionen-Fenster ausgeblendet und das für die Randwertbestimmung eingeblendet.

### 3.3.5.2 Randwertbestimmung von „Characteristics“

Nach der Eingabe der Optionswerte müssen die genauen Randwerte für die einzelnen Kennlinien festgelegt werden. Dies geschieht im Fenster **Determination of Start- and Stopvalues** das in Bild 3.11 zu sehen ist.

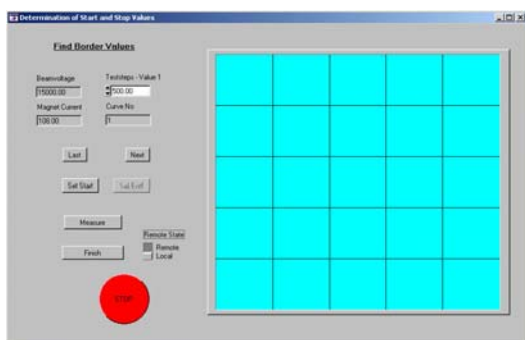


Bild 3.11: Randwertbestimmung

Das Fenster ist in das Bedienfeld (links) und den Graphen (rechts) unterteilt. Die einzelnen Elemente haben folgende Funktionen:

- In den oberen vier Zahlenfeldern werden die aktuellen Werte des ersten und zweiten Steuerwertes, die Nummer der gerade bearbeiteten Kurve und das Inkrement für den ersten Steuerwert angegeben. Das Inkrement für den ersten Steuerwert kann jederzeit verändert werden, um die Randwerte möglichst schnell und genau einstellen zu können.
- Mit den Schaltflächen **Last** und **Next** wird der erste Steuerwert um das eingestellte Inkrement verringert (**Last**) bzw. erhöht (**Next**), bis ein annehmbarer Wert gefunden ist.
- Ist ein guter Startwert gefunden, so wird dieser durch Betätigen der Schaltfläche **Set Start** übernommen und anschließend der Endwert für die Kurve gesucht.
- Für die Übernahme des Endwertes muss die Taste **Set End** betätigt werden. Damit wird die Nummer der Kurve und der Wert des zweiten Steuerwertes um dessen Inkrement erhöht und der dazu passende Startwert gesucht.
- Bevor mit der Suche nach Randwerten begonnen wird, muss mit **Measure** die Messung gestartet werden. Dazu sollte sich der Schalter **Remote State** in der Stellung „Remote“ befinden, da sonst nur simulierte Werte ausgegeben werden.



- Mit **Finish** wird die Bestimmung der Randwerte beendet. Dies kann auch vor Ende der Bestimmung aller Randwerte geschehen. Nach Ausblenden des aktuellen Fensters werden die Werte für die Kurven übernommen, deren Randwerte vollständig bestimmt wurden. Die Anzahl der zu erfassenden Kurven wird ebenfalls so korrigiert, dass nur Kennlinien mit gültigen Randwerten vermessen werden. Danach wird, beim ersten Durchlauf nach Programmstart, das Hauptfenster ein-geblendet.
- Mit dem **Stop**-Schalter kann die laufende Messung unterbrochen werden. Im Gegensatz zu den anderen Programmen kann hier die Messung direkt wieder gestartet werden. Dies bietet die Möglichkeit, zuerst einzelne Werte einzustellen, die Messung kurz zu starten und sofort wieder zu beenden falls das Gyrotron nicht anschwingt. So können auch Randwerte in Wertebereichen vermessen werden, von denen keine Erfahrungswerte vorliegen. Dabei sollte mit äußerster Vorsicht vorgegangen werden. Diese Vorgehensweise ist nur durch die kurze Zeitverzögerung des Diodensignals möglich. Die Trägheit der kalorimetrischen Messung würde dies nicht erlauben. Trotz aller Vorsichtsmaßnahmen im Programm, sollte der Benutzer immer in der Lage sein abzuschätzen, ob die jeweiligen Einstellungen die Anlage beschädigen könnten.
- Im Graphen des Fensters wird, bei laufender Messung, die mittels der Detektordiode gemessene Ausgangsleistung des Gyrotrons angezeigt. Die Anzeige ist in x-Richtung auf 100 Messpunkte beschränkt. Werden mehr Punkte gemessen, wird der Graph gelöscht und die Messwerte werden erneut vom linken Rand beginnend aufgetragen. Die bei der Randwertbestimmung gemessenen Leistungswerte können nicht abgespeichert werden, da hier nur geprüft werden soll, ob die aktuellen Werte zur Generierung von HF-Strahlung durch das Gyrotron führen.

### 3.3.5.3 Elemente des Hauptfensters von „Characteristics“

Das Hauptfenster ist in Bild 3.9 abgebildet. Von ihm aus werden die eigentliche Vermessung der Kennlinien gestartet und die Ergebnisse dargestellt, abgespeichert und bei Bedarf ausgedruckt. Die meisten Funktionen sind, der besseren Übersicht wegen, über die Menüleiste zugänglich.

Die Benutzeroberfläche selbst enthält neben den aktiven Elementen **Stop**-Schalter und **Remote**-Schalter, nur Anzeigeelemente zur Überwachung der Messung. Die einzelnen Elemente sind:

- **Running Time** - die Zeit (in s), die seit dem Beginn der Kennlinienmessung vergangen ist.
- **Point** - die Nummer des aktuell gemessenen Kennlinienpunktes. Die Messpunkte werden dabei beginnend vom ersten Punkt der ersten Kennlinie bis zum letzten Punkt der letzten Kennlinie durchgezählt.
- **Total Points** - die Gesamtzahl der Messpunkte aller zu messenden Kennlinien.

- **Beam Voltage** - die aktuell eingestellte Beschleunigungsspannung.
- **Beam Current** - der aktuelle Wert des Strahlstromes.
- **Diode Voltage** - der Spannungswert der Diode.
- **Power** - die momentane Ausgangsleistung des Gyrotrons.
- **Remote State** - der Schalter zum Ein- bzw. Abschalten des Remote-Betriebes des Keithley Digitalmultimeters und des Hochspannungsnetztes.
- **Stop** - der Notschalter zur Unterbrechung der Kennlinienmessung. Über ihn kann die Messung z.B. bei einem unerwarteten Abriss der HF-Schwingung sofort beendet werden.
- Im Graphen werden die gemessenen Kennlinien während der Messung Punkt für Punkt eingezeichnet. Dabei werden die Kurven so skaliert, dass alle Kennlinien gemeinsam möglichst groß dargestellt werden können. Ist eine Kennlinie vollständig gemessen, wird deren Parameter (Steuerwert 2) an die jeweilige Kurve angeschrieben. Über die Menüleiste sind Funktionen zugänglich, mit denen die Art der Darstellung verändert werden kann, was z.B. zum direkten Ausdrucken der Kennlinien hilfreich sein kann. Die genaue Beschreibung dieser Funktionen erfolgt in Abschnitt 3.3.5.4

#### 3.3.5.4 Menüleiste von „Characteristics“

Eine Menüleiste ist nur im Hauptfenster des Programms „Characteristics“ verfügbar. Die übrigen Fenster enthalten alle dort notwendigen Funktionen direkt in der Benutzeroberfläche.

Die Menüleiste enthält folgende Einträge:

- Unter dem Menü **File** sind Funktionen zum Speichern (**Save**) bzw. Laden (**Open**) von Kennliniendaten, zum Drucken der Kennlinien (**Print**) und zum Verlassen des Programms (**Exit**) erreichbar.
- Das Aufrufen des Optionenfensters geschieht über **Control** → **Set Values**. Die eigentliche Messung der Kennlinien wird durch **Control** → **Take Characteristics** gestartet.
- Funktionen zur Steuerung des Graphen sind unter dem Menü **Plot** zu finden.

Im ersten Block dieses Menüpunktes kann das Zoomen des Graphen ein- bzw. ausgeschaltet werden (**Enable/Disable Zoom**). Dazu werden Funktionen von LabWindows/CVI genutzt. Zum Einzoomen werden die **Strg**-Taste und die linke Maustaste zusammen gedrückt. Der Punkt über dem der Mauszeiger gerade steht wird dann kontinuierlich vergrößert. Zum Auszoomen werden die **Strg**-Taste und die rechte Maustaste gedrückt.

Im nächsten Untermenü können mit `Show / Hide...` die Achsenbeschriftung (`Labels`), das Raster (`Grid`) oder die Parameterwerte an den Kurven (`Index`) ein- bzw. ausgeblendet werden.

Außerdem kann der Inhalt des Graphen mit `Clear Plot` gelöscht werden. Die Daten der Messung bleiben dabei jedoch bis zum Start der nächsten Messung erhalten. Sollen die Kennlinien wieder dargestellt werden, muss der Umweg über das Speichern und anschließendes Laden der Daten gegangen werden.

Die Menüleiste bietet die einzige Möglichkeit das Programm zu verlassen. Soll das Programm schon direkt nach seinem Start wieder beendet werden, müssen zuerst die einzelnen vorherigen Fenster beendet werden, bis das Hauptfenster eingeblendet wird. Dort kann es dann über den Befehl `File` → `Exit` der Menüleiste verlassen werden. Die vorgeschalteten Fenster können wie folgt ohne weiteres beendet werden:

- Das Fenster zur Einstellung der Ströme für die Magnetfelder wird durch die Schaltfläche `Manual Control` beendet.
- Beim Optionenfenster genügt das Betätigen des OK-Buttons, um das Fenster auszublenden. Dadurch werden dem Programm die zu diesem Zeitpunkt eingestellten Optionswerte übergeben.
- Das Fenster zur Bestimmung der Randwerte, kann durch einen Klick auf `Finish` beendet und ausgeblendet werden. Wurden zuvor keine Kombinationen von Start- und Endwerten bestätigt, wird dem Programm als Anzahl der zu messenden Kennlinien der Wert null übergeben. Im nachfolgend eingeblendeten Hauptfenster kann das Programm über `File` → `Exit` beendet werden.

### 3.3.5.5 Format der abgespeicherten Daten in „Characteristics“

Die Daten eines Kennlinienfeldes werden, wie bei den anderen Programmen auch, als ASCII-Daten abgespeichert. Die Formatierung der Daten unterscheidet sich jedoch von der in „Measurement“ oder „Calibration“. In „Characteristics“ werden die reinen Ergebnisdaten abgelegt, der vollständige Messverlauf ist daher nicht rekonstruierbar. In den einzelnen Spalten, die durch Tabulator voneinander getrennt sind, werden der Reihe nach folgende Werte abgelegt:

1. In der ersten Spalte werden nacheinander die Anzahl der Kurven, die Anzahl der Punkte pro Kurve, die Kennung des ersten Steuerwertes (0.0 für `Beamvoltage` und 1.0 für `Magnet Current1`), die Kennung des zweiten Steuerwertes (hier gelten die gleichen Kennungen) und der Strom für das Gun-Magnetfeld abgelegt. Die restlichen Werte der Spalte werden mit 0.0 gefüllt.
2. Die zweite Spalte enthält der Reihe nach die Startwerte des ersten Steuerwertes der einzelnen Kurven. Die Zeilennummer entspricht dabei der Nummer der zugehörigen Kurve. In den nicht benötigten Spalten wird der Wert 0.0 eingetragen.

3. Die Endwerte des ersten Steuerwertes befinden sich in der dritten Spalte. Danach wird die Spalte mit 0.0 vervollständigt.
4. Für den zweiten Steuerwert (Parameterwert der einzelnen Kennlinien) genügt es die einzelnen pro Kurve festen Werte festzuhalten. Dies geschieht in Spalte vier.
5. Im Folgenden wird für jede Kurve des Kennlinienfeldes eine eigene Spalte verwendet, um die Leistungswerte aufzutragen.
6. Danach werden in einer weiteren Matrix die Werte des Strahlstroms für jede Kurve nach Spalten getrennt eingetragen. Dies kann für die genauere Auswertung der Kennlinien nützlich sein, da die Leistungswerte erheblich von der Höhe des Strahlstromes abhängen.

## 4 Messaufbau

Ziel dieser Arbeit ist der Aufbau eines Messsystems zur schnellen Leistungsmessung an einem Gyrotronsystem, das in der Materialprozesstechnik eingesetzt wird. Die Geschwindigkeit eines Messsystems ist im wesentlichen durch die Reaktionszeiten der verwendeten Geräte begrenzt. Bei der Regelung eines Systems sind Messungen jedoch ausreichend schnell durchzuführen, damit im Prozess notwendige Regeleinriffe rechtzeitig vorgenommen werden können. In der Materialprozesstechnik ist die Regelgröße meist eine Temperatur. Die Zeit, in der sich die zu regelnde Temperatur ändert, hängt nach Gleichung 2.6 von der Wärmekapazität des Materials, dessen Masse und der eingestrahlt bzw. der in Wärme umgesetzten Leistung ab. Für die Experimente, die an dieser Anlage durchgeführt werden, kann man davon ausgehen, dass Messzeitverzögerungen bis in den Bereich von wenigen Sekunden akzeptabel sind. Das in dieser Arbeit verwendete Prinzip der Leistungsmessung beruht auf der Auskoppelung eines geringen Anteils der Gesamtleistung aus dem Primärstrahl des Gyrotrons und deren Vermessung mittels einer Detektordiode. Die geforderten Messzeitverzögerungen sollten bei der Leistungsmessung mittels einer Detektordiode kein Problem darstellen. Für eine erfolgreiche, zuverlässige Leistungsmessung müssen zusätzlich mehrere Bedingungen erfüllt sein. Dies sind im einzelnen folgende:

- Der Anteil der ausgekoppelten Leistung muss einen eindeutigen Zusammenhang zur Gesamtleistung aufweisen. Dabei muss der Zusammenhang nicht zwingend proportional sein.
- Die Messungen müssen unempfindlich gegen Streustrahlung in der Übertragungsleitung und Reflexionen aus dem Applikator sein.
- Die Messanordnung darf die Strahlkonfiguration nicht merklich stören, damit der hohe Wirkungsgrad der Übertragungsleitung erhalten bleibt.
- Die Unabhängigkeit der Messung vom jeweiligen Prozess sollte gewährleistet sein.
- Um die Zerstörung der Diode zu verhindern, muss die ausgekoppelte Leistung zuverlässig auf die maximale Eingangsleistung der Diode begrenzt sein.

Während die Detektordiode als fertiges Bauteil zugekauft wurde, kommen für die Einrichtung zur Auskoppelung der Leistung mehrere Möglichkeiten in Frage. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Messanordnungen beschrieben und auf die Überlegungen, die zu ihrem Entwurf geführt haben eingegangen.

## 4.1 Strahlprofil am Ausgang des Gyrotrons

Am Übergang von der Hohlleiterwelle des Gyrotrons zur Freiraumwelle findet eine Transformation von einer  $TE_{02}$ -Mode zur gaußschen  $\Psi_0^1$ -Mode statt [7]. Das Strahlprofil stellt einen Kreisring dar, auf dem die Leistung verteilt ist. Vom Maximum auf dem Kreisring, fällt die Feldstärke zum Zentrum, sowie zum äußeren Rand des Strahls steil ab. Die HF-Welle ist azimutal polarisiert. Das Thermopapier in Bild 5.20(a) zeigt die Feldverteilung am Horn des Gyrotrons.

In Ausbreitungsrichtung weitet sich der Strahl konisch auf. An der Unterkante des Horns am Gyrotron beträgt der Radius der maximalen Feldstärke etwa 1 cm, am ersten Spiegel ist er auf ca. 5 bis 6 cm aufgeweitet. Durch die elliptische Oberfläche des Spiegels wird der Strahl dann wieder gebündelt, so dass seine Taille etwa in der Mitte zwischen dem ersten und dem zweiten Spiegel liegt. Der Anteil der Leistung, die der Detektordiode zugeführt wird, soll spätestens am ersten Spiegel ausgekoppelt werden. In diesem Bereich wird erwartet, dass das Verhältnis der Ausgangsleistung zur vom Applikator reflektierten Leistung ( $\frac{P_{aus}}{P_{ref}}$ ) ausreichend groß ist und die Strahlkonfiguration nicht zu stark durch Interferenzen von der Streustrahlung beeinflusst ist.

## 4.2 Spiegel mit integrierter Koppelstruktur

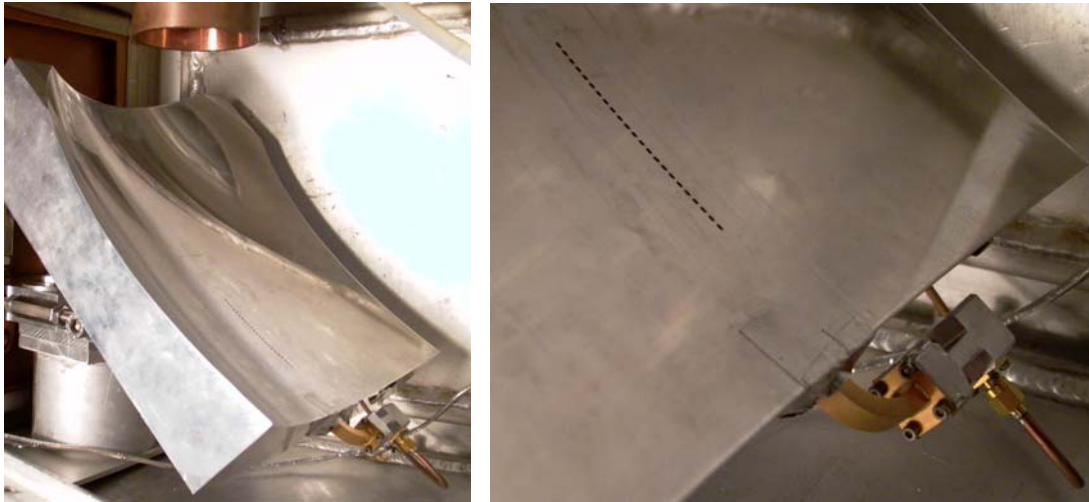
Zu Beginn der Arbeit stand ein Spiegel mit integrierter Koppelstruktur zur Verfügung. In Bild 4.1(a) ist dieser Spiegel zu sehen. Daneben ist, in Bild 4.1(b), der untere Teil des Spiegels mit den Koppellöchern abgebildet. Hinter den Koppellöchern ist ein WR28-Rechteckhohlleiter in den Spiegelkörper so eingefräßt, dass sich die Koppellöcher an seiner Schmalseite befinden. Am einen Ende des Hohlleiters ist ein Hohlleiter-Abschluss (Terminator) angeschlossen, am anderen Ende die Detektordiode, die am unteren Rand des Spiegels zu sehen ist. Die Detektordiode befindet sich also im Inneren der Metallbox, welche die Übertragungsleitung umgibt und ist daher der Streustrahlung ausgesetzt.

Beim Entwurf des Spiegels wurde davon ausgegangen, dass bei einer maximalen Ausgangsleistung des Gyrotrons von 10 kW die einfallende Leistung an den Koppellöchern 200 W beträgt. Dieser Leistungsanteil muss folglich bei der Transmission zur Diode so gedämpft werden, dass die maximale Eingangsleistung des Detektors von 10 mW nicht überschritten wird. Die Koppeldämpfung muss also mindestens 43 dB betragen und wurde hier mit 45 dB angesetzt.

Die Koppellöcher sind so ausgeführt, dass eine aperiodische Dämpfung in der benötigten Größenordnung auftritt. Im Entwurf für diesen Spiegel [9] wurde zur Berechnung der aperiodischen Dämpfung von runden Löchern ausgegangen. Für einen zylindrischen Hohlleiter gilt, für die Grundmode ( $TE_{11}$ ) folgende Gleichung [10]:

$$\alpha_z / \text{dB} = 8,69z \sqrt{\left(\frac{1,84}{R}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2} \quad (4.1)$$

mit dem Lochradius  $R$ , der Lochtiefe  $z$  und der Freiraumwellenlänge  $\lambda_0$ .



(a) Spiegel komplett

(b) Koppellöcher

Bild 4.1: Spiegel mit integriertem Lochkoppler

Für die Koppelstruktur wurden Langlöcher mit folgenden Werten gewählt:

- Lochlänge: 2 mm
- Lochbreite: 1 mm
- Lochtiefe: 3 mm
- Stegbreite zwischen den Löchern: 1 mm
- Anzahl der Löcher: 23
- Abstand des ersten Koppelloches von der Spiegelmitte: 40 mm

Mit Gleichung 4.1 erhält man, für eine Frequenz von 30,4 GHz, mit einem Radius von 2 mm eine Dämpfung von 47,5 dB für die Kopolarisation und mit einem Radius von 1 mm eine Dämpfung von 95,7 dB für die Kreuzpolarisation.

Wegen der Abmessungen der Löcher von 1 mm x 2 mm sollte die aperiodische Dämpfung der Langlöcher nach der Formel für Rechteckhohlleiter berechnet werden. Dann gilt, mit der  $TE_{10}$ -Mode als Grundmode, folgende Gleichung [10]:

$$\alpha_z / \text{dB} = 8,69z \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2} \quad (4.2)$$

mit der Lochbreite  $a$ , der Lochtiefe  $z$  und der Freiraumwellenlänge  $\lambda_0$ .

Damit ergibt sich eine Dämpfung von 40,4 dB für die Kopolarisation und 81,6 dB für die Kreuzpolarisation.

Im Folgenden wird die auf die Koppelstruktur eingestrahelte Leistung abgeschätzt. Die Ausdehnung der Lochreihe beträgt 1 mm in der Breite bei einer Länge von 68 mm.

Geht man davon aus, dass das Maximum des HF-Strahls, bei einem Radius von 74 mm, in der Mitte der Lochreihe liegt und die komplette Leistung auf einem Kreisring mit einer Breite von 68 mm gleichverteilt ist, so kann man die auf die Löcher treffende Leistung leicht abschätzen. Dazu wird der Öffnungswinkel  $\phi$  des Kreissektors berechnet, der gerade das mittlere Loch enthält:

$$\phi = 2 \arcsin \frac{a}{2r} \quad (4.3)$$

mit der Länge der Sehne  $a$  und dem Radius  $r$ .

Mit den gegebenen Werten (Sehnenlänge: 1 mm, Radius 74 mm) ergibt sich ein Winkel von  $0,7742^\circ$  und damit ein Flächenwirkungsgrad von

$$\eta_F = \frac{0,7742^\circ}{360^\circ} = 2,15 \cdot 10^{-3} \quad (4.4)$$

Mit dieser Näherung ergibt sich also eine auf die Koppelstruktur eingestrahlte Leistung von

$$P_{Koppel} = 10 \text{ kW} \cdot 2,15 \cdot 10^{-3} = 21,5 \text{ W} \quad (4.5)$$

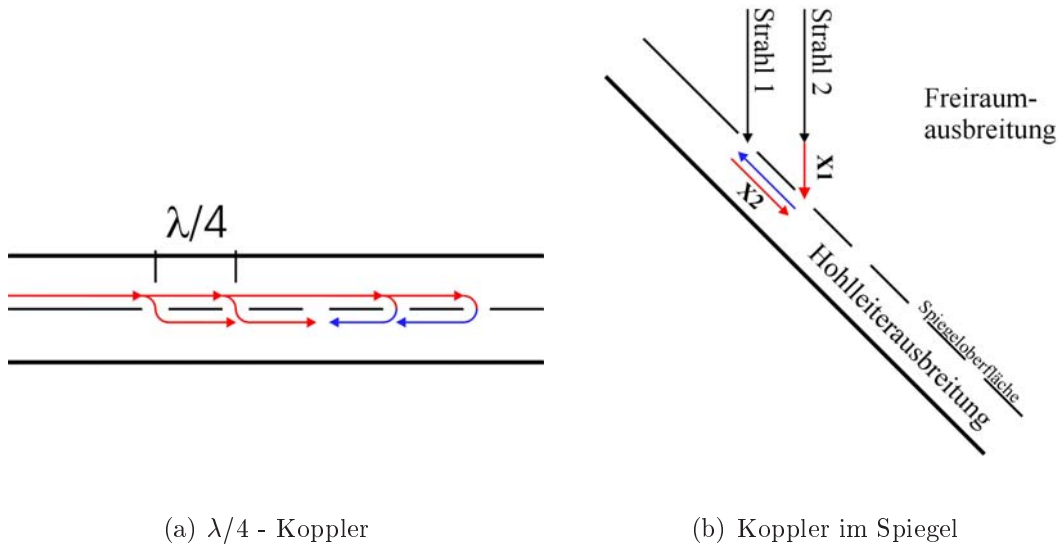
Die Annahme einer eingestrahlten Leistung von 200 W, die dem Entwurf [9] zu Grunde liegt, ist also um einen Faktor von 10 zu hoch. Selbst wenn die gesamte Leistung auf einem Kreis mit einem Radius, der genau dem Abstand von der Spiegelmitte zum obersten Loch entspricht, verteilt ist, würde dort lediglich eine Leistung von knapp 40 W einfallen.

Die Unterdrückung der Streustrahlung in der Übertragungsleitung und der Reflexionen vom Applikator sollen durch mehrere Effekte erreicht werden. Zum Ersten werden diese Störstrahlungen als komplett unpolarisiert angesehen. Dies kann man annehmen, da in der Übertragungsleitung und erst recht im Applikator unendlich viele Ausbreitungswege möglich sind. Die Welle jeder dieser Ausbreitungspfade hat ihre eigene Polarisation. Bei der Überlagerung der Wellen aus verschiedenen Richtungen ergibt sich im Mittel eine unpolarisierte Welle. Da nun die Kreuzpolarisation an der Koppelstruktur um einen Faktor von mindestens 40 dB stärker gedämpft wird, geht nur noch die Hälfte der unerwünschten Strahlung in die Messung ein.

Eine weitere Entkoppelung der Strahlung des Primärstrahls und den Reflexionen aus dem Applikator soll durch die Richtwirkung der Koppelstruktur erreicht werden.

In Bild 4.2(a) ist das Prinzip eines  $\lambda/4$ -Kopplers dargestellt, das bei der Koppelstruktur des Spiegels angenähert werden soll. Dabei treten verschiedene Probleme auf. Die Richtwirkung des  $\lambda/4$ -Kopplers ergibt sich durch die unterschiedlichen Wegdifferenzen und damit entsprechenden Phasenunterschiede der vorwärts und rückwärts laufenden Wellen im Koppelzweig. Haben die Koppellöcher einen Abstand von genau  $\lambda/4$ , so tritt für die Welle in Vorwärtsrichtung, die in der Skizze rot gezeichnet ist, keine Wegdifferenz auf, da die Weglängen im oberen und unteren Hohlleiter gleich sind. Für die Welle in Rückwärtsrichtung (in der Skizze blau gezeichnet) ergibt sich für aufeinander folgende Löcher ein Wegunterschied von  $\lambda/2$  und damit eine Phasendifferenz von  $180^\circ$ , die Wellen löschen sich also aus. Dabei ist wichtig, dass die Ausbreitungsbedingungen im oberen und unteren Hohlleiter identisch sind.





(a)  $\lambda/4$  - Koppler

(b) Koppler im Spiegel

Bild 4.2: Prinzip der Lochkopplung

Bei der Koppelstruktur im Spiegel sind die Bedingungen im Vergleich zum gewöhnlichen  $\lambda/4$ -Koppler stark verschieden. Zunächst fällt auf, dass die Ausbreitungsbedingungen auf beiden Seiten der Koppellöcher nicht identisch sein können. Auf der einen Seite breitet sich eine Freiraumwelle mit der Freiraumwellenlänge von

$$\lambda_0 = \frac{c}{30,4 \text{ GHz}} = 9,862 \text{ mm} \quad (4.6)$$

aus. Im integrierten Rechteckhohlleiter, dessen Innenabmessungen (Breite (a)  $\times$  Höhe (b))  $7,112 \text{ mm} \times 3,556 \text{ mm}$  betragen, ergibt sich die Wellenlänge aus folgender Beziehung [10]:

$$\lambda_z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (4.7)$$

mit der Freiraumwellenlänge  $\lambda_0$  und der Cutoff-Wellenlänge  $\lambda_c$ .

Mit den angegebenen Werten ergibt sich bei der  $TE_{10}$ -Mode für  $\lambda_c = 2a = 14,224 \text{ mm}$  und damit die Wellenlänge im Hohlleiter zu  $\lambda_z = 13,684 \text{ mm}$ . Wegen der unterschiedlichen Wellenlänge der Freiraumwelle und der Hohlleiterwelle unterscheiden sich auch die Phasendrehungen der Wellen bei gleicher Wegstrecke auf den beiden Seiten der Koppellöcher. Außerdem ist noch zu beachten, dass der Spiegel in einem Winkel von ca.  $45^\circ$  montiert ist, womit man die in Bild 4.2(b) dargestellte Situation erhält. Für die Wellen durch zwei benachbarte Koppellöcher ergeben sich die Wegunterschiede  $x_1$  und  $x_2$ . Dabei wird die Einfallrichtung der Welle als vertikal angenommen und die in der Realität auftretende Divergenz des Strahls vernachlässigt. Die Phasenverschiebung wird bei  $x_1$  durch die Freiraumwellenlänge bestimmt, bei  $x_2$  ist sie mit der Wellenlänge im Hohlleiter verknüpft. Bei der gegebenen Spiegelgeometrie ergibt sich, bei einem Abstand der

Koppellöcher von 3 mm, für  $x_1$  ein Wert von 2,121 mm. Dies entspricht  $0,215 \cdot \lambda_0$  und damit einer Phasendifferenz von  $77,428^\circ$ . Der Wegunterschied  $x_2$  für Wellen, die durch zwei benachbarte Löcher in den Hohlleiter einkoppeln, beträgt 3 mm. Dies entspricht  $0,219 \cdot \lambda_z$ , der Wellenlänge im Hohlleiter, und damit einer Phasendifferenz von  $78,9^\circ$ . In Vorwärtsrichtung ergibt sich also ein Phasenversatz von  $1,5^\circ$  und damit eine zu vernachlässigende Dämpfung der Welle im Koppelzweig. Für die Wellen, die sich im Koppelzweig rückwärts ausbreiten, ergibt sich, für benachbarte Löcher, eine Phasendifferenz von insgesamt  $156^\circ$ . Dadurch breitet sich weniger als 2,2% der gesamten eingestrahnten Leistung in Rückwärtsrichtung aus. Eine Messung der Reflexionen aus dem Applikator durch die Auswertung der Strahlung in Rückwärtsrichtung ist nicht möglich, da am Rückwärtszweig des Spiegelkopplers kein Platz zur Montage einer Detektordiode zur Verfügung steht.

Damit die Richtkoppelung zuverlässig funktioniert, müssen die Wellen klar definiert (vertikal oder horizontal) auf den Spiegel eingestrahlt werden. Für die Welle, die vom Gyrotron kommt, kann man diese Bedingung als erfüllt annehmen. Schwierig wird dies jedoch bei den Reflexionen aus dem Applikator. Die Spiegel der Übertragungsleitung wurden für eine möglichst hohe Isolation in Rückwärtsrichtung ausgelegt, um das Gyrotron vor Einflüssen durch diese Reflexionen zu schützen. Das bedeutet aber, dass die Strahlung aus dem Applikator möglichst stark in die Übertragungsleitung gestreut wird. Dort wird sie wiederum vom Schirm (Metallbox), der sich um die Übertragungsleitung befindet, reflektiert. Dadurch entsteht Streustrahlung, die keine definierte Ausbreitungsrichtung mehr aufweist. Somit kann diese Strahlung nicht mit Hilfe der Richtwirkung des Spiegelkopplers von der Messung entkoppelt werden. Die Streustrahlung geht dann, wie oben beschrieben, zur Hälfte in die Messung mittels der Detektordiode ein.

### 4.3 Pickup-Antenne mit nachfolgendem Richtkoppler

Im Lauf dieser Arbeit wurde nach einer Koppelstruktur gesucht, die auf die speziellen Bedingungen der sehr kompakten Übertragungsleitung zugeschnitten ist. Ziel war es die Empfindlichkeit gegenüber der Streustrahlung im Vergleich zum Spiegelkoppler weiter zu reduzieren und den Dynamikbereich der Detektordiode möglichst vollständig zu nutzen.



Bild 4.3: Pickup-Antenne

Für die Messung der Ausgangsleistung ist eine genaue Bestimmung der Pegel von Streustrahlung und Reflexionen aus dem Applikator nicht von Interesse. Zur Auskoppelung der Leistung aus dem Primärstrahl wird ein offener Rechteckhohlleiter (WR28) als Pickup-Antenne verwendet. Die Wände des Hohlleiters sind leicht hornförmig nach innen angeschrägt. Dadurch werden Reflexionen am Wandquerschnitt vermindert und gleichzeitig die Anpassung der Pickup-Antenne geringfügig verbessert. Die Pickup-Antenne wird nun so im Strahl des Gyrotrons ausgerichtet, dass die Richtung der azimuthalen Po-

larisation genau der Polarisierung der  $TE_{10}$ -Mode im Hohlleiter entspricht. Die Öffnung des Hohlleiters zeigt dabei zum Gyrotron. Streustrahlung und Reflexionen aus dem Applikator werden bei dieser Anordnung, außer in Richtung der Strahlung des Gyrotrons, durch die Wand des Hohlleiters abgeschirmt. Ein Teil der Streustrahlung kann jedoch, wegen der nicht idealen Richtwirkung der Pickup-Antenne auch aus seitlicher Richtung einkoppeln. Um eine Einstrahlung der Streustrahlung von der Seite oder direkt von oben zu minimieren, sollte sich die Pickup-Antenne möglichst nah am Horn des Gyrotrons befinden, so dass Teile der Streuleistung vom Horn des Gyrotrons abgeschirmt werden. Dadurch wird auch das Verhältnis der Ausgangsleistung zur Leistung der Streustrahlung und Reflexionen ( $\frac{P_{aus}}{P_{refl}}$ ) am Ort der Koppelung maximiert.

Zur Abschätzung der in die Pickup-Antenne eingekoppelten Leistung wird zunächst der Reflexionsfaktor am Übergang Luft-Hohlleiter bestimmt [10]:

$$r = \frac{Z_{FH} - Z_{F0}}{Z_{FH} + Z_{F0}} \quad (4.8)$$

mit dem Freiraumwellenwiderstand  $Z_{F0}$  und dem Wellenwiderstand im Hohlleiter  $Z_{FH}$ .

Für einen luftgefüllten Rechteckhohlleiter ergibt sich der Feldwellenwiderstand für H-Wellen zu [10]:

$$Z_{FH} = \frac{\underline{E}_y}{\underline{H}_x} = \frac{\omega\mu_0}{\beta_z} = \frac{Z_{F0}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (4.9)$$

Danach ergibt sich der Wellenwiderstand im WR28-Hohlleiter bei 30,4 GHz zu  $Z_{FH} = 522,77 \Omega$ . Durch das Ansträgen der Hohlleiterwand wird die Öffnung des Hohlleiters in der Breite auf ca. 8,6 mm erweitert und somit der Wellenwiderstand am Übergang auf ca. 460  $\Omega$  verringert. Für den Reflexionsfaktor ergibt sich damit ein Wert von  $r = 0,162$  für  $Z_{FH} = 522,77 \Omega$  bzw. für  $Z_{FH} = 460 \Omega$  ein Wert von  $r = 0,099$ .

Die auf die Querschnittsfläche der Pickup-Antenne auftreffende Leistung lässt sich wieder mit Hilfe der Sektorformel 4.3 über den Flächenwirkungsgrad abschätzen. Der Innendurchmesser des Ausgangshorns des Gyrotrons beträgt 7,5 cm. Aus den Abmessungen des Horns und der Feldverteilung ergeben sich für den Radius, auf dem die Pickup-Antenne positioniert wird, Werte von 1 cm bis 3,5 cm. Im „Worst Case“ wird hier angenommen, dass stets die gesamte Leistung auf einem Kreisring konzentriert ist, der genau die Öffnung der Pickup-Antenne abdeckt. Die maximale Leistung an der Pickup-Antenne ergibt sich dann bei einem Radius von 1 cm. Die Sehnenlänge  $a$  in der Sektorformel entspricht dann der Höhe des Rechteckhohlleiters von 3,556 mm. Der Öffnungswinkel des Kreissektors ergibt sich also zu 20,48°. Damit ergibt sich der Flächenwirkungsgrad zu 0,057 und man erhält bei einer Gesamtleistung von 10 kW eine Leistung von 570 W an der Pickup-Antenne. Davon werden bei einem Reflexionsfaktor von  $r = 0,1$  57 W reflektiert und 513 W in den Hohlleiter eingekoppelt. Bei einer maximalen Leistung von 10 mW an der Diode wäre also eine Dämpfung von 47 dB im Koppelpfad nötig.

Um die Feldkonfiguration des Mikrowellenstrahls möglichst wenig zu stören, sollte die Pickup-Antenne möglichst an der äußeren Flanke des Strahls positioniert werden, wo die

Leistungsdichte wegen dem gaußschen Profil des Ringstrahls bald stark abfällt. Bei der Abschätzung der maximal eingekoppelten Leistung wird trotzdem davon ausgegangen, dass die gesamte Leistung auf einem Kreisring mit größerem Radius verteilt ist. Bei einem Radius von  $R = 3,5 \text{ cm}$  ergibt sich ein Öffnungswinkel des Sektors von  $5,82^\circ$ , ein Flächenwirkungsgrad von  $0,016$  und damit eine Leistung an der Pickup-Antenne von  $162 \text{ W}$ . Davon werden, bei einem Reflexionsfaktor von  $r = 0,1$ ,  $16,2 \text{ W}$  reflektiert und  $145,8 \text{ W}$  in den Hohlleiter eingekoppelt. Die Dämpfung im Koppelzweig müsste also noch knapp  $42 \text{ dB}$  betragen.

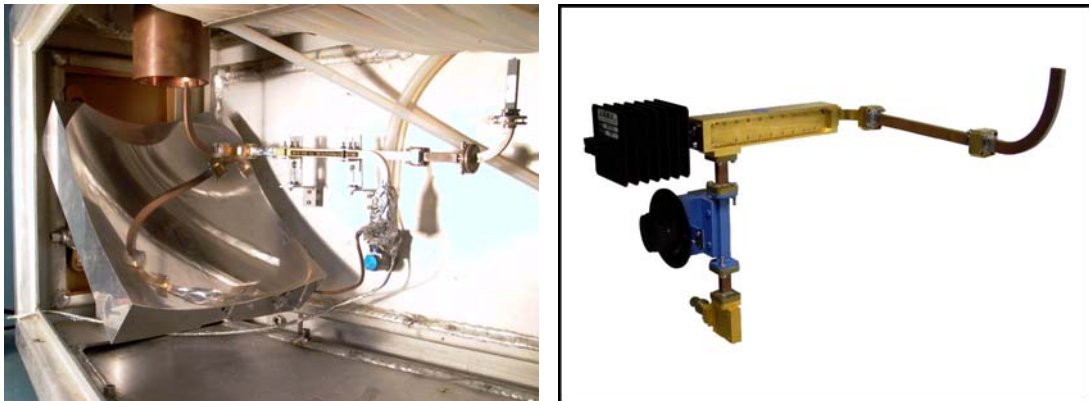
In der Realität ist der HF-Strahl jedoch stets breiter als die Pickup-Antenne. Die maximale Leistungsdichte tritt, an der Unterkante des Horns, bei einem Radius von ca.  $1 \text{ cm}$  auf (siehe Bild 2.4(b)). Die Leistungsdichte bei einem Radius von  $3,5 \text{ cm}$ , nahe an der Wand des Horns, sollte auf sehr kleine Werte abgefallen sein. In der Praxis sollten für verschiedene Antennen-Positionen also Dämpfungswerte im Koppelzweig von  $35 \text{ dB}$  bis  $50 \text{ dB}$  ausreichen.

Zum Aufbau der Koppereinrichtung wurde ein Richtkoppler mit einer Koppeldämpfung von  $40 \text{ dB}$ , ein variables Dämpfungsglied mit einer maximalen Dämpfung von  $10 \text{ dB}$ , ein Hohlleiterabschluss und eine Detektordiode (max.  $10 \text{ mW}$ ) zugekauft. Im Rückwärtskoppelpfad des  $40 \text{ dB}$ -Richtkopplers ist ein Hohlleiterabschluss integriert. Der Koppler ist für Eingangsleistungen um  $100 \text{ W}$  geeignet. Der Hohlleiterabschluss ist ebenfalls für Dauerleistungen um  $100 \text{ W}$  und Peakleistungen bis  $100 \text{ kW}$  ausgelegt. Die maximale Dauerleistung des variablen Dämpfungsgliedes beträgt  $1 \text{ W}$ .

Da die Komponenten jedoch erst gegen Ende der Arbeit geliefert wurden, wurde zunächst mit einem provisorischen Aufbau gearbeitet. Die benötigte Dämpfung im Koppelzweig wurde durch eine Kombination von verschiedenen, schon vorhandenen Richtkopplern und Dämpfungsgliedern erreicht. Diese Komponenten waren jedoch nicht auf die hier auftretenden hohen Leistungen ausgelegt.

Der Aufbau wurde anfangs innerhalb der Übertragungsleitung realisiert (siehe Bild 4.4(a)). Die Anordnung ist auf Winkelschienen an der Wand der Metallbox montiert. Dies ermöglicht eine gezielte Positionierung der Pickup-Antenne in vertikaler und horizontaler Richtung. Unter dem Horn des Gyrotrons ist die Pickup-Antenne zu sehen. Sie ist über einen  $90^\circ$ -E-Bend mit dem Richtkoppler verbunden. Am Koppelzweig wurde direkt die Detektordiode angeschlossen. Zum Schutz vor unerwünschter Streustrahlung wurden die Detektordiode und sämtliche Flansche der Hohlleiter mit Aluminiumfolie und Aluminiumklebeband abgeklebt. Weil sich die Komponenten jedoch stark erhitzen, wurden sie, abgesehen von der Antenne später außerhalb der Metallbox der Übertragungsleitung aufgebaut.

Die am Ende verwendete Koppereinrichtung, die außerhalb der Metallbox montiert wurde, ist in Bild 4.4(b) abgebildet. Hier ist ein Verlängerungsstück zwischen Antenne und Richtkoppler eingefügt. Dieses Zwischenstück führt durch ein Loch in der Wand der Metallbox nach außen. Um das Austreten von Streustrahlung zu vermeiden wurde die Öffnung in der Schirmwand stets sorgfältig mit Aluminiumfolie und Aluminiumklebeband abgedichtet. Beim Aufbau der Koppereinrichtung außerhalb der Metallbox wurde ein Laborstativ als Halterung verwendet. In Bild 4.5 ist der Aufbau im eingebauten Zustand von der Außen- (4.5(a)) und Innenseite (4.5(b)) der Metallbox zu sehen.



(a) Provisorischer Aufbau innerhalb der Übertragungsleitung (b) Endgültiger Aufbau der Koppeleinrichtung im ausgebauten Zustand

Bild 4.4: Koppeleinrichtungen



(a) Ansicht außerhalb der Übertragungsleitung (b) Ansicht innerhalb der Übertragungsleitung

Bild 4.5: Endgültiger Aufbau der Koppeleinrichtung im eingebauten Zustand

## 5 Messungen und Ergebnisse

Beim Aufbau einer Leistungsmessung am beschriebenen Gyrotronsystem sind, wie im vorigen Kapitel erwähnt, zahlreiche Bedingungen zu erfüllen. Um ein Bild von den gegebenen Randbedingungen zu erhalten und die Eignung der verschiedenen Messeinrichtungen zu beurteilen, wurden im Lauf dieser Arbeit zahlreiche Messungen durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse werden in diesem Kapitel besprochen. Insgesamt wurden folgende Arten von Messungen durchgeführt:

- Zur Beurteilung der Feldverteilung wurden an verschiedenen Stellen in der Übertragungsleitung Thermopapiere mit kurzen leistungsschwachen Pulsen belichtet.
- Der endgültige Aufbau der Koppeleinrichtung mit Pickup-Antenne wurde, bei niedriger Leistung, mit einem Vektor Netzwerk Analysator vermessen. Dabei sollten vor allem Effekte durch die zahlreichen Flansche zwischen Richtkoppler, Dämpfungsglied, Hohlleitersegmenten, Bends und der Pickup-Antenne untersucht werden. Eine ähnliche Vermessung der im Spiegel integrierten Koppelstruktur, z.B. zur Messung der Richtwirkung, ist nicht möglich.
- Die Qualität des Gleichspannungssignals der Detektordiode wurde mit dem Programm „Measurement“ untersucht. Dabei ist vor allem die Kurzzeitstabilität des Signals im Bereich weniger Sekunden von Interesse. Da hier noch keine kalorimetrischen Messungen nötig sind, können auch Abhängigkeiten von der Ofenbeladung und der Verwendung des Modenrührers untersucht werden. Mit der Veränderung der Situation im Ofen ändern sich die Reflexionen aus dem Applikator und die Streustrahlung in der Übertragungsleitung, deren Einfluss somit überprüft werden kann.
- Der Zusammenhang zwischen der Diodenspannung und der kalorimetrisch gemessenen Ausgangsleistung des Gyrotrons wurde mit dem Programm „Calibration“ untersucht. Dabei wurden auch die Langzeitstabilität des Diodensignals und die thermische Abhängigkeit der Kalibrierkennlinie untersucht.

## 5.1 Messungen am Spiegel mit integriertem Koppler

Zu Beginn der Arbeit stand der Spiegel mit integriertem Langlochkoppler zur Verfügung, um der Detektordiode einen Teil der Gesamtleistung zur direkten Leistungsmessung zuzuführen. Nach dessen Einbau in die Übertragungsstrecke, wurden zunächst Messungen zur Analyse der Signalqualität unter verschiedenen Betriebsbedingungen durchgeführt.

### 5.1.1 Fehlerbetrachtung zur Beurteilung der Kurzzeitstabilität des Signals

Zur exakten Leistungsmessung sollen die Abweichungen der Messwerte vom wahren Wert möglichst klein sein. Im Fall der Messung mittels einer Detektordiode soll die Genauigkeit der Messung etwa der Genauigkeit der kalorimetrischen Messung entsprechen. Hierbei ist die Steilheit der Kalibrierkennlinie, die zur Umrechnung der Diodenspannung in Leistungswerte verwendet wird, zu berücksichtigen. Durch eine ungünstige Kalibrierkennlinie können aus kleinen Fehlern des Diodensignals große Fehler des Leistungswertes folgen.

Bei der Untersuchung der Kurzzeitstabilität wird der relative Fehler untersucht. Der relative Fehler einer Einzelmessung ergibt sich zu [11]:

$$\epsilon_i = \frac{x_w - x_i}{x_w} \quad (5.1)$$

mit dem wahren Wert  $x_w$  und dem aktuellen Messwert  $x_i$ .

Der wahre Wert ist jedoch nicht bekannt und wird durch den Mittelwert ersetzt wodurch man den scheinbaren relativen Fehler [11]

$$\nu_i = \frac{\bar{x} - x_i}{\bar{x}} \quad (5.2)$$

mit dem Mittelwert  $\bar{x}$  erhält. Durch die Mittelwertbildung gehen reale Schwankungen des Signals verloren wodurch der Fehlerwert verfälscht wird.

In der Praxis ist jedoch nicht nur der Fehler einzelner Messwerte sondern auch deren Häufigkeit von Interesse. Eine Aussage über den mittleren Fehler erhält man mit der Standardabweichung. Da auch die Standardabweichung nicht exakt ermittelt werden kann wird sie durch den mittleren quadratischen Fehler der Einzelmessung einer Messreihe [11] ersetzt:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\nu_i^2}{n-1}} \quad (5.3)$$

Damit man auch bei Verwendung der Standardabweichung Messungen mit verschiedenen Pegeln, wie die kalorimetrisch ermittelte Leistung und die Diodenspannung der Detektordiode, vergleichen kann, wird diese auf den jeweiligen Mittelwert bezogen. Damit erhält man den Varianzkoeffizienten [12]

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (5.4)$$

Im Folgenden wird zur Fehlerabschätzung dieser Varianzkoeffizient verwendet.

### 5.1.2 Einfluss des Modenrührers

In Bild 5.1 ist eine der ersten Messungen bei relativ niedriger Leistung (ca. 1,5 kW) beim Betrieb mit und ohne Modenrührer dargestellt. Hier wird der starke Einfluß der

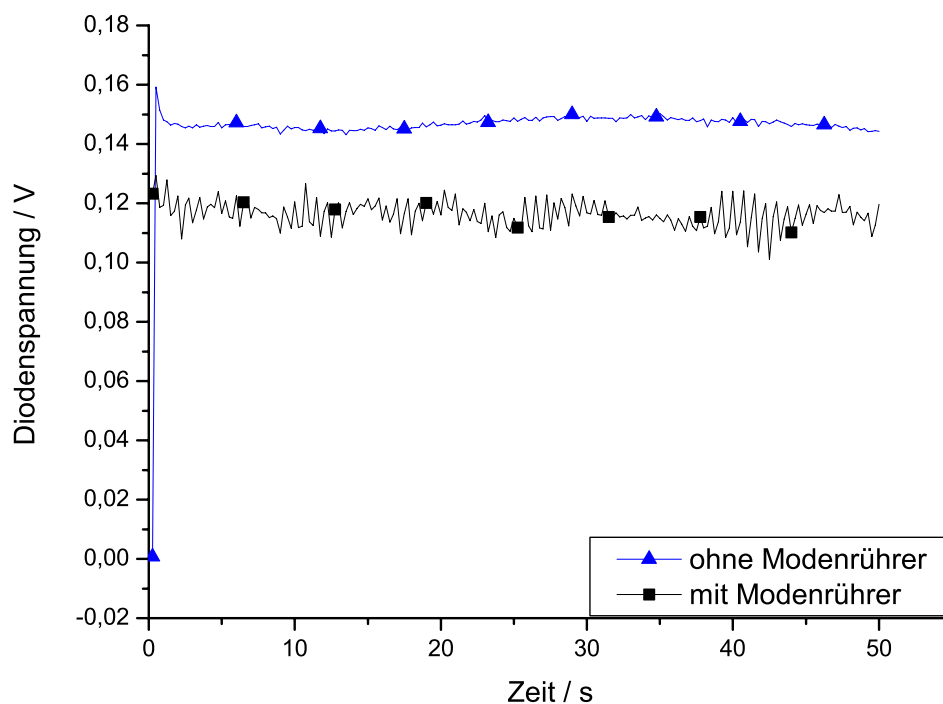


Bild 5.1: Diodensignal am Spiegel mit und ohne Modenrührer

Reflexionen aus dem Applikator auf die Messung deutlich. Der höhere Pegel bei abgeschaltetem Modenrührer ist auf eine veränderte Last im Applikator bzw. direktere Reflexionspfade aus dem Applikator zurückzuführen. Bei eingeschaltetem Modenrührer ändert sich die Feldverteilung im Applikator ständig. Dadurch werden auch die in die Übertragungsleitung reflektierten Anteile ständig unterschiedlich gestreut. Man sieht, dass dabei die Schwankungen des Gleichspannungssignals stark zunehmen. Beträgt der Varianzkoeffizient ohne Modenrührer ca. 1,24%, beträgt er mit Modenrührer 3,79%.

Für eine möglichst genaue Leistungsmessung werden Abweichungen vom exakten Wert von maximal 5% angestrebt. Dies entspricht etwa der Genauigkeit der kalorimetrischen Leistungsmessung, deren maximaler relativer Fehler etwa 3 – 5% beträgt. Der Varianzkoeffizient der kalorimetrischen Leistungsmessung beträgt etwa 1 – 1,5%. Unter Einsatz des Modenrührers wird die geforderte Signalstabilität nicht erreicht.



### 5.1.3 Änderung der Last im Applikator

In der nächsten Messung sollte untersucht werden, ob durch den Betrag des Varianzkoeffizienten bzw. des maximalen relativen Fehlers Rückschlüsse auf die Ofenbeladung und damit auf den Pegel der Reflexionen gezogen werden können. In Bild 5.2 ist das Ergebnis einer Messung mit unterschiedlichen Lasten im Applikator zu sehen. Dabei wurden mit Wasser gefüllte Kunststoffflaschen in den Ofenraum gestellt. Der Modenrührer war dabei in Betrieb. Für die erste Messung wurden 4 l Wasser als Last verwendet. Bei der zweiten Messung wurde die Wasserlast dann auf 2 l halbiert. Die Messung wurde bei höherer Leistung von ca. 7,5 kW durchgeführt.

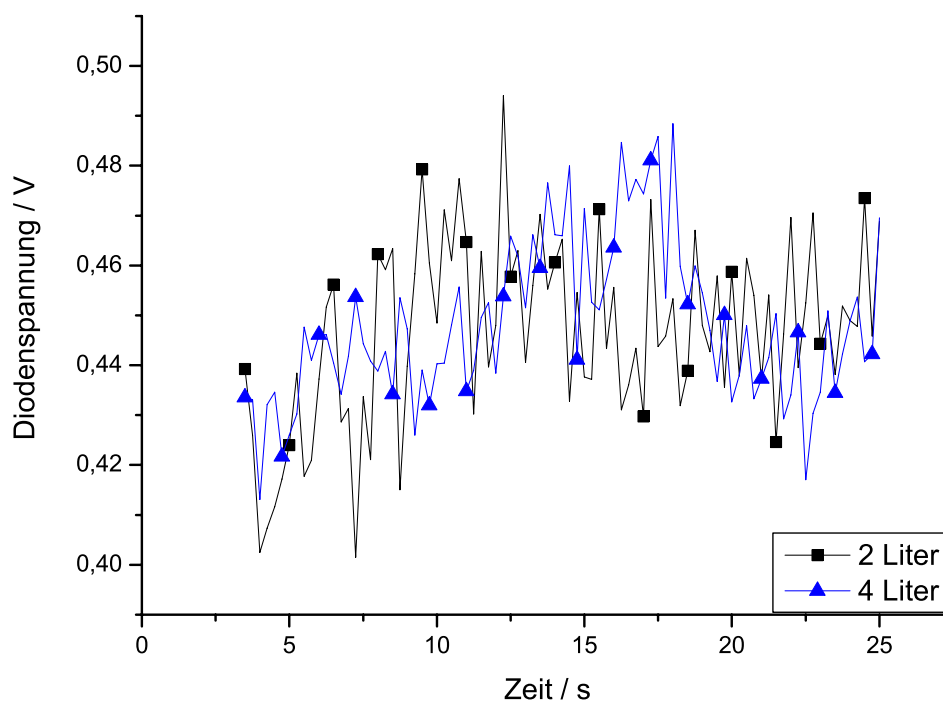


Bild 5.2: Vergleichsmessung mit 4 bzw. 2 Liter Wasser als Last

Der Varianzkoeffizient bei der Messung mit 4 l beträgt 3,47%, bei der halben Last steigt er auf 4,08%. Der etwas geringere Fehler bei höherer Last ist durch die stärkere Strahlungsabsorption im Applikator zu erklären. Um aus der Messung jedoch klare Rückschlüsse auf die von der Last absorbierten Leistung zu gewinnen, sind die Unterschiede zu gering. Man muss dabei beachten, dass die verwendete Last bei vielen Experimenten wesentlich geringer ist als die hier verwendeten Wassermengen.

### 5.1.4 Kondensator parallel zur Detektordiode

Das größte Problem bei den bisherigen Messungen ist die schlechte Kurzzeitstabilität des Signals, verursacht durch den starken Einfluss der Streustrahlung. Die Einkopplung der Streustrahlung am Spiegel ist in diesem Aufbau nicht weiter zu verringern. Um die Signalqualität dennoch zu verbessern, wird ein Kondensator parallel zur Diode geschaltet. Dadurch findet, schon vor der Erfassung der Spannung an der Diode, eine Mittelwertbildung statt. Allerdings darf die Kapazität des Kondensators nicht zu groß gewählt werden, da sich sonst, zusammen mit dem reellen Widerstand des Digitalmultimeters, eine zu große Zeitkonstante ergibt. Die Messungen in Abbildung 5.3

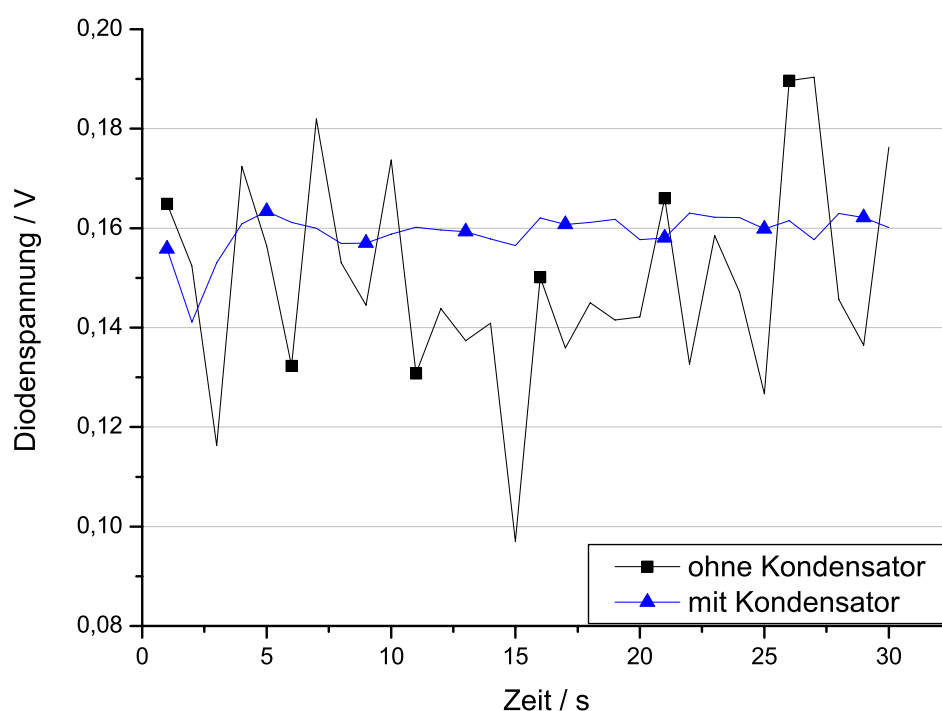


Bild 5.3: Vergleichsmessung mit und ohne Kondensator parallel zur Diode

wurden einmal mit, das zweite mal ohne Parallelkondensator bei sonst gleichen Betriebsbedingungen durchgeführt. Die Ausgangsleistung beträgt ca. 1,5 kW. Bei der Messung ohne Kondensator beträgt der Varianzkoeffizient 14,13%. Durch die Parallelschaltung eines Kondensators mit einer Kapazität von 20  $\mu\text{F}$  verringert sich der Wert des Varianzkoeffizienten auf 1,26%. Damit wäre eine Genauigkeit erreicht die besser als die der kalorimetrischen Leistungsmessung ist. Dies gilt jedoch nur dann, wenn die relative Änderung der Diodenspannung nach Umrechnung mittels einer Kalibrierkennlinie die jeweils gleiche relative Änderung des Leistungswertes ergibt.

### 5.1.5 Verbesserung der Signalstabilität durch Mittelwertbildung

Eine weitere Möglichkeit, die Kurzzeitstabilität des Signals zu verbessern, besteht in der rechnerischen Mittelwertbildung über viele Messpunkte nach der Messung. Dies hätte den Vorteil, dass die Zeitkonstante der Detektordiode zusammen mit dem Kondensator weiter verringert werden kann. Außerdem können dann weiterhin Informationen über den Rauschanteil im Signal gewonnen werden. Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, können mit dem Keithley Digitalmultimeter einzelne Intervalle mit sehr kurzen Folgezeiten der einzelnen Messwerte aufgenommen werden. Ein Vergleich von Messungen mit und ohne

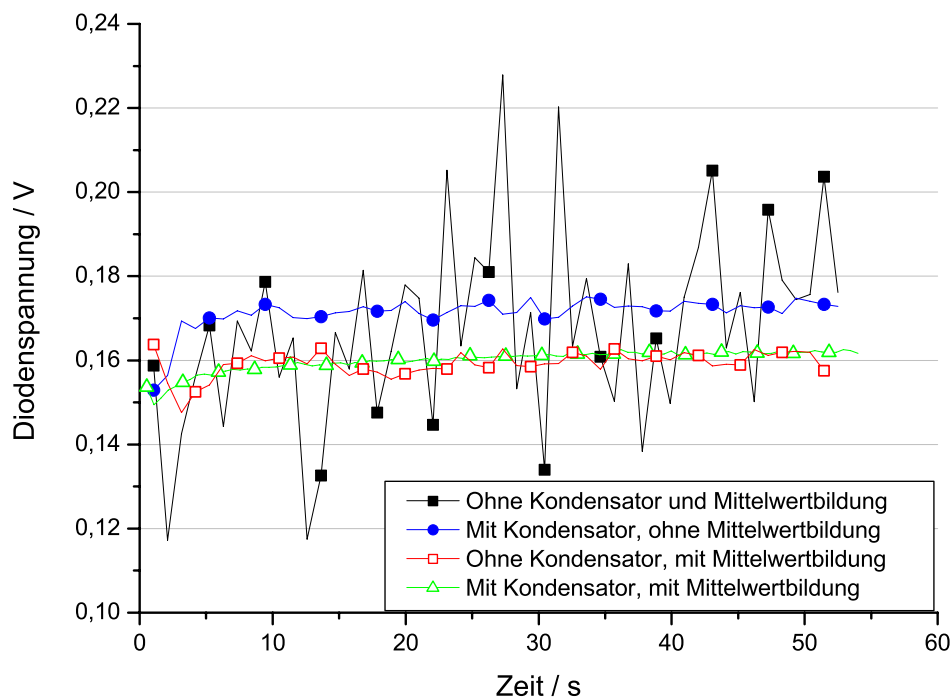


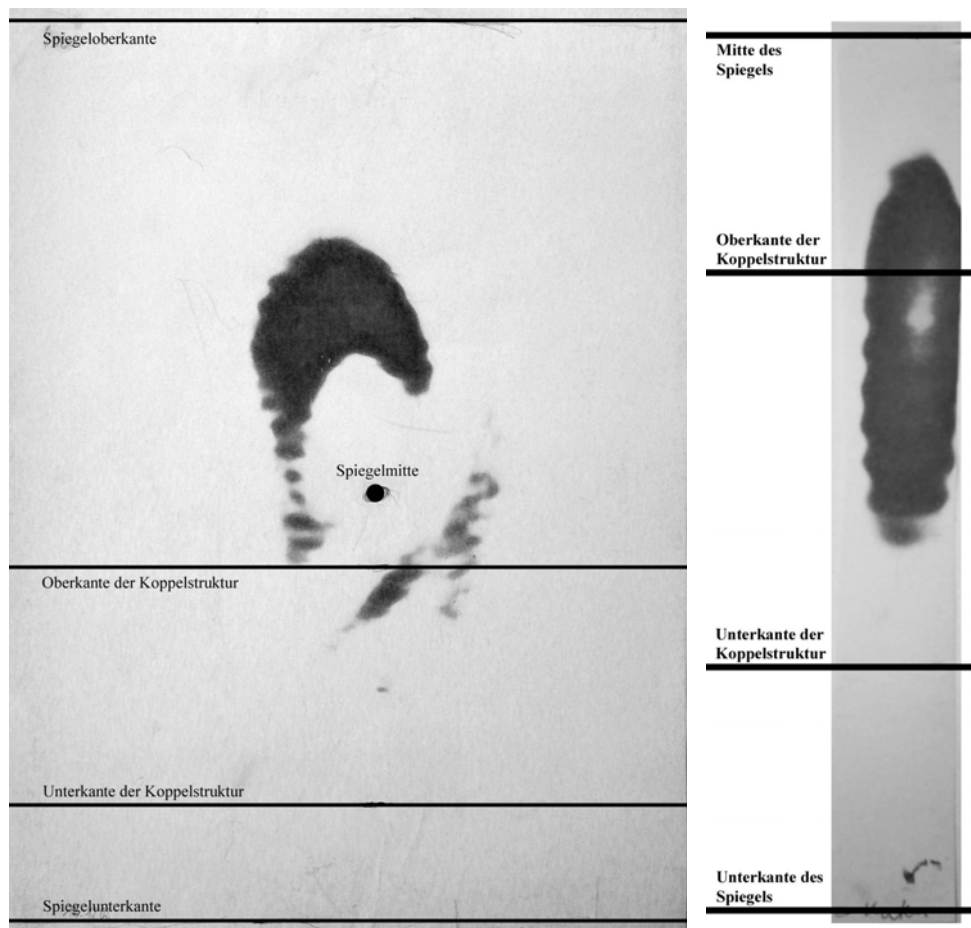
Bild 5.4: Vergleich der Signale mit und ohne Kondensator bzw. Mittelwertbildung

Kondensator bzw. Mittelwertbildung ist in Bild 5.4 zu sehen. Für die Mittelwertbildung wurde pro Messpunkt über ein Intervall von 50 Werten (ohne Kondensator) bzw. 20 Werten (mit Kondensator) gemittelt. Die Zeit zwischen der Aufnahme einzelner Messwerte liegt bei der Mittelwertbildung bei 17 ms. Die Kurven ohne Mittelwertbildung entsprechen denen in Bild 5.3. Der Unterschied der Mittelwerte kommt durch eine geänderte Situation im Applikator, z.B. durch den Austausch des Wassers und veränderte Position der Flaschen, zustande. Bei den Messungen mit Mittelwertbildung betragen die Varianzkoeffizienten 1,14% bei einem relativen Fehler von 2,54% für die Messung ohne Kondensator. Für die Messung mit Kondensator und Mittelwertbildung ergibt sich der Varianzkoeffizient zu 0,66% bei einem maximalen relativen Fehler von 1,29%. Die Kapazität des Kondensators kann, bei Einsatz der Mittelwertbildung, also ohne weiteres

reduziert werden. Um jedoch kleinere Messintervalle und damit kurze Abtastzeiten zu ermöglichen, sollte trotzdem ein Kondensator mit einer Kapazität von ca. 10  $\mu\text{F}$  parallel geschaltet werden.

### 5.1.6 Feldverteilung auf dem Spiegel

Da die Spannungspegel der Detektordiode insgesamt niedriger sind als erwartet und der Einfluß der Streustrahlung zu hoch ist, wurde die Feldverteilung auf der Spiegeloberfläche untersucht. Dazu wurde Thermopapier auf die Spiegeloberfläche geklebt und mit kurzen Pulsen niedriger Leistung (ca. 2 – 3 s bei 0,5 – 1 kW) belichtet. Dabei musste darauf geachtet werden, dass das Thermopapier einen gleichmäßigen Abstand zur Spiegeloberfläche hat, da sonst das Bild durch Interferenzen über dem Spiegel verfälscht werden kann. In Bild 5.5(a) ist die Feldverteilung auf dem kompletten Spiegel zu sehen.



(a) Verteilung auf dem Spiegel

(b) Verteilung auf den Koppellöchern

Bild 5.5: Feldverteilung auf dem Spiegel

Die Ober- und Unterkante des Spiegels, sowie der Koppelstruktur ist durch Querlinien

markiert. An der Feldverteilung fällt auf, dass die Leistungsdichte in der oberen Hälfte des Spiegels erheblich höher ist als auf der unteren Hälfte. Dies wird durch die konische Aufweitung des Strahls mit zunehmender Entfernung vom Gyrotron verursacht. Die obere Spiegelhälfte liegt, in Relation zur unteren Hälfte deutlich näher am Gyrotron. Auf dem belichteten Thermopapier wird der Unterschied der Leistungsdichte, durch den engen Dynamikumfang des Papiers, visuell stark überbetont.

Die Feldverteilung auf den Koppellöchern wurde mit schmalen Streifen erfasst, die jeweils direkt über die Koppelstruktur geklebt wurden. Ein belichteter Streifen ist in Bild 5.5(b) zu sehen. Auf dem Streifen ist deutlich zu erkennen, dass das Maximum des Mikrowellenstrahls im Bereich der obersten Löcher auf den Spiegel auftrifft. Über den unteren Koppellöchern ist, auch bei längeren Belichtungszeiten, kaum eine Schwärzung zu erkennen. Für eine optimale Nutzung des Dynamikbereichs der Diode sind die Koppellöcher also zu tief angebracht. Um den Einfluß der Streustrahlung zu verringern wäre es auch sinnvoll, die Koppelstruktur in die obere Spiegelhälfte zu legen. Damit könnte das Verhältnis von Nutzleistung zur Störleistung ( $\frac{P_{aus}}{P_{refl}}$ ) erhöht werden.

### 5.1.7 Richtwirkung des Spiegelkopplers

Die Untersuchung der Richtwirkung des im Spiegel integrierten Kopplers mit einem Vektor-Netzwerk-Analysator war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Dazu wäre eine Quelle bei 30,4 GHz notwendig, die bei definierter Leistung eine ähnliche Strahlform wie das verwendete Gyrotron aufweist. Um den Nutzen durch die Richtwirkung dennoch abschätzen zu können, wurden die Koppellöcher nach und nach abgeklebt und Messungen mit sonst gleichen Betriebsparametern durchgeführt. In Bild 5.6 sind die Ergebnisse

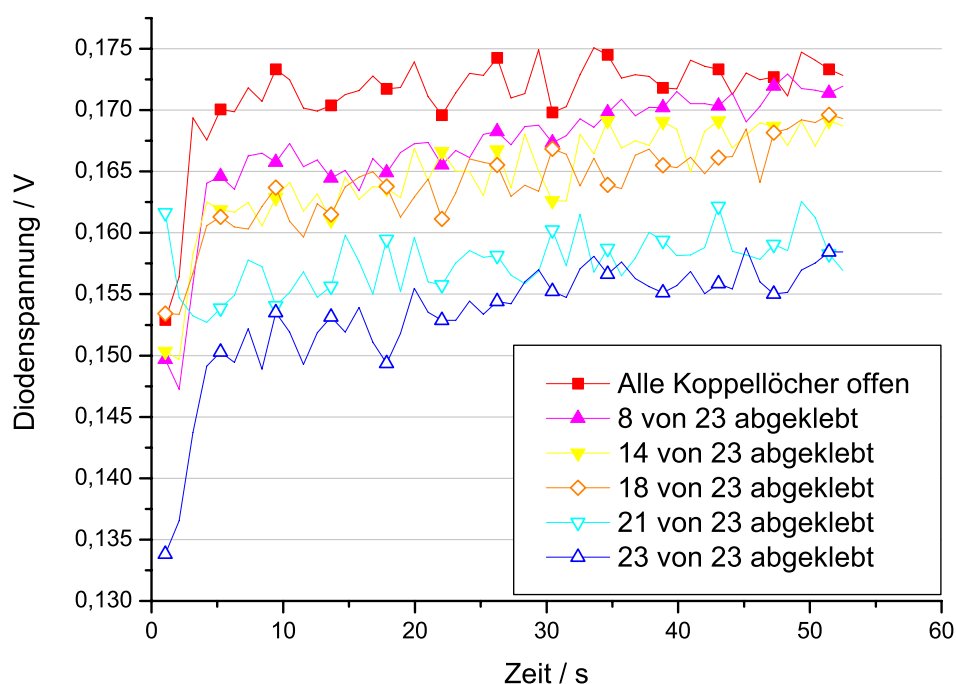


Bild 5.6: Messung mit abgeklebten Koppellöchern

dieser Messungen zu sehen. Während sich die Qualität des Signals kaum ändert, sinkt der Signalpegel statt auf Werte nahe null nur um ca. 12% ab. Bei einem deutlichen Einfluss der Richtwirkung hätte der Rauschanteil des Signals wesentlich schwächer abfallen dürfen, als dessen Mittelwert. Der größte Anteil der Leistung an der Diode wird, diesen Messungen zufolge, nicht durch die Koppelstruktur des Spiegels, sondern durch sonstige Leckstellen eingekoppelt. Solche Leckstellen können z.B. an Hohlleiterflanschen oder am Diodengehäuse selbst auftreten.

Bei der Auskoppelung der Leistung mit dem im ersten Spiegel integrierten Langlochkoppler treten verschiedene Probleme auf. So ist die Entkopplung der Strahlung aus dem Gyrotron von der Streustrahlung in der Übertragungsleitung und den Reflexionen aus dem Applikator nicht ausreichend. Durch Maßnahmen wie dem Einbau eines Parallelkondensators und der Mittelwertbildung über mehrere Messwerte, kann die Kurzzeitsta-

bilität des Signals verbessert werden. Dabei bleibt aber die Abhängigkeit der Messung zur Situation im Applikator und damit zum jeweiligen Prozess bestehen. Weiter wird der Dynamikbereich der Diode nicht optimal genutzt. Am Spiegel selbst bestehen keine Möglichkeiten zur Verbesserung der Anordnung. Daher wurde nach einem neuen Prinzip zur Auskopplung der Leistung gesucht, das die Nachteile des Spiegelkopplers in geringerem Maße aufweist. Vor allem muss die aus dem Primärstrahl ausgekoppelte Leistung deutlich erhöht werden, um den Einfluss der Streustrahlung auf die Messung zu reduzieren.

## 5.2 Provisorischer Aufbau mit Pickup-Antenne

Der grundsätzliche Aufbau der Koppereinrichtung mit Pickup-Antenne ist in Kapitel 4.3 beschrieben. Hier werden nun die Messungen für den zuerst verwendeten provisorischen Aufbau beschrieben und die Ergebnisse vorgestellt.

### 5.2.1 Erste Messungen

Bei den ersten Messungen mit der Pickup-Antenne war zwischen der Antenne und der Detektordiode lediglich ein 20 dB-Richtkoppler eingebaut. Der Durchgangszweig des Richtkopplers war vorerst nicht abgeschlossen. Die Messanordnung befand sich, wie in Bild 4.4(a) an der Wand der Metallbox. Die Antenne wurde zunächst am äußersten Rand des Gyrotron-Horns positioniert, wo mit sehr geringen Leistungsdichten zu rechnen ist. Danach wurde die Antenne in Bereiche höherer Leistungsdichte, näher an das Strahlmaximum verschoben. An dieser Position wurde, zur Analyse der Dichte der Anordnung, zuerst die Antennenöffnung mit Aluminiumklebeband abgeklebt. In einer weiteren Messung wurde dann auch der Durchgangszweig des Richtkopplers terminiert. Ergebnisse dieser Messungen sind in Bild 5.7 zu sehen. Die Ausgangsleistung des Gyrotrons lag für diese Messungen bei ca. 2 kW.

Wie bei den Messungen am Lochkoppler des Spiegels ist auch hier eine deutliche Pegeldifferenz zwischen den Messungen mit und ohne Modenrührer zu erkennen. Die Kurzzeitstabilität des Signals ist jedoch deutlich besser. Um festzustellen, wie stark die Streuleistung an der Antenne einkoppelt, wurde diese außerhalb des Gyrotron-Horns positioniert. In dieser Position entspricht der gemessene Pegel etwa der Hälfte dessen, wenn sich die Antenne direkt unter dem Horn befindet. Die Messung mit abgeklebter Pickup-Antenne zeigt, dass Streustrahlung einkoppelt, wenn der Durchgangspfad des Richtkopplers nicht abgeschlossen ist. Wird der Durchgangspfad jedoch mit einem Hohlleiterabschluss terminiert, so ist der Aufbau HF-dicht.

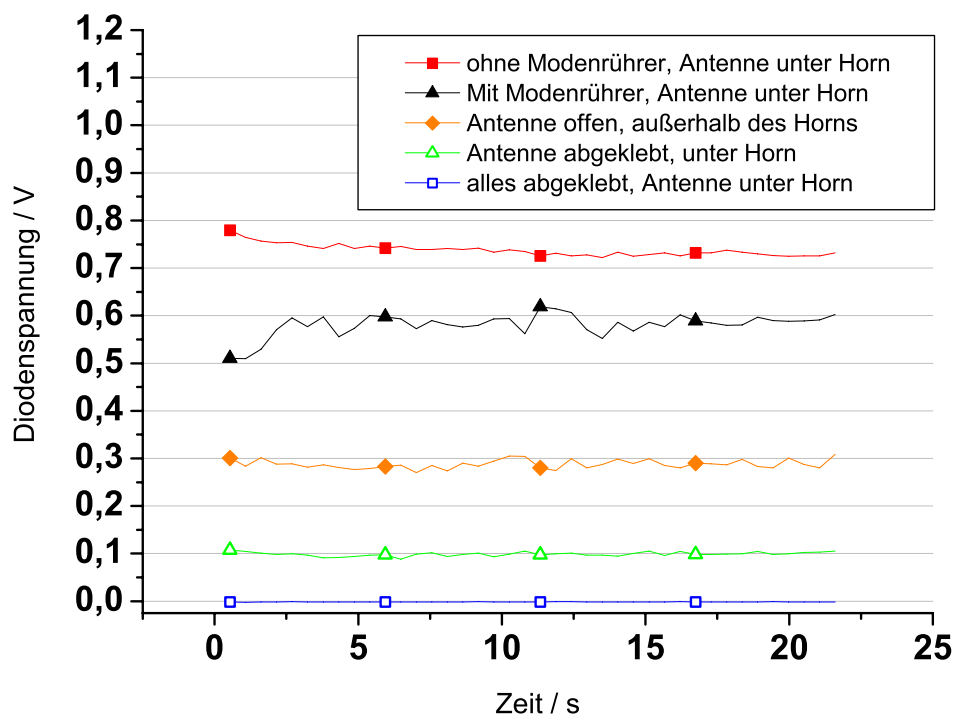


Bild 5.7: Erste Messungen mit Pickup-Antenne



### 5.2.2 Mittelwertbildung

Die Kurzzeitstabilität sollte durch Mittelwertbildung über kurze Messintervalle weiter verbessert werden. Die Instabilität des Signals wird hauptsächlich durch den Einsatz des Modenrührers verursacht. Man kann dabei annehmen, dass sich die Feldverteilungen bei gleicher Stellung des Modenrührers, also periodisch mit seiner Drehung, sehr ähnlich sind. Bei der Bildung des Mittelwertes ist es wichtig, dass die einzelnen Werte, über die gemittelt wird, statistisch unabhängig sind. Daher wurde untersucht, ob es Unterschiede in der Signalqualität bei der Wahl unterschiedlicher Abtastverzögerungen zwischen den einzelnen Messwerten des Mittelungsintervalls gibt. Ein guter Mittelwert ist dann zu erwarten, wenn sich die Position des Modenrührers bei der Abtastung eines Messwertes stark von den Positionen bei den anderen Messwerten des Intervalls unterscheidet. Einige Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 zu sehen. Die Messungen wurden ohne Parallelkapazität durchgeführt. Unter Verwendung der Mittelwertbildung lag der Varianzkoeffizient stets

Größe des Mittelungsintervalls	Zeit zwischen 2 Messwerten in <i>ms</i>	Varianzkoeffizient
1	0	2,77%
15	16	0,55%
15	18	0,54%
15	19	0,80%
20	15	0,97%
30	15	1,13%
30	17	0,39%
30	19	0,29%
30	20	0,83%
30	21	0,32%

Tabelle 5.1: Mittelwertbildung

unter 1,2%. Bei einem Intervall von 30 Messwerten ergibt sich für Abtastzeiten von 17 ms und 19 ms eine hervorragende Kurzzeitstabilität mit statistischen Fehlern  $< 0,8\%$ . In den nachfolgenden Messungen wurde daher eine Abtastzeit von 19 ms bei Intervallen von 20 bis 30 Messwerten verwendet. Durch den Einsatz eines Kondensators parallel zur Detektordiode, lässt sich die Genauigkeit, z.B. für kürzere Mittelungsintervalle, weiter steigern.

### 5.2.3 Kalibrierung

Zur Verknüpfung der Diodenspannung mit Leistungswerten wird eine Kalibrierung mit Hilfe der kalorimetrischen Leistungsmessung durchgeführt. Dabei kommt das Programm „Calibration“, das in Kapitel 3.3.4 beschrieben ist, zum Einsatz. Zunächst wurden Werte der Diodenspannung bei verschiedenen Leistungswerten aufgenommen. Während die Dauer der Messungen zur Untersuchung des Kurzzeitverhaltens des Signals zum Schutz

vor Überhitzung der Last im Applikator auf wenige Minuten begrenzt war, wurden bei der Kalibrierung erstmals Langzeitmessungen notwendig. Da dabei lediglich das durch die Kalorimeter strömende Kühlwasser um etwa  $2^\circ\text{C}$  erwärmt wird, ist die Dauer der Messung hier nicht begrenzt. Durch die Trägheit der kalorimetrischen Leistungsmessung dauert ein kompletter Durchlauf, von niedrigsten zu höchsten Leistungswerten, etwa 30 – 45 min.

Bei den ersten langen Messungen fiel auf, dass der gesamte Messaufbau, inklusive der Detektordiode, sehr heiß wird, wenn er in der Übertragungsleitung montiert ist. Um die Komponenten vor der Streustrahlung zu schützen, wurde der Aufbau so modifiziert, dass sich, außer der Pickup-Antenne, alle Komponenten der Koppereinrichtung außerhalb der Metallbox der Übertragungsleitung befinden. Dazu wurde ein Stück Hohlleiter zwischen Pickup-Antenne und Hohlleiter montiert, das durch ein Loch in der Wand der Metallbox nach außen geführt wird.

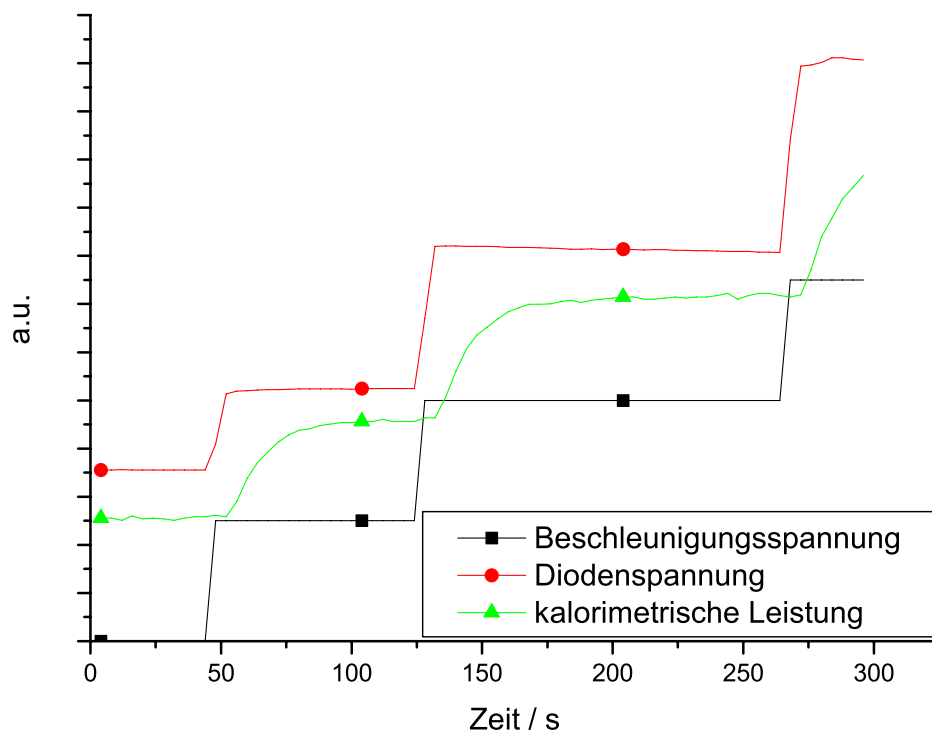


Bild 5.8: Typischer Verlauf der Messwerte bei der Kalibrierung

Ein typischer Verlauf der Beschleunigungsspannung, Diodenspannung und der kalorimetrisch gemessenen Leistung ist in Bild 5.8 zu sehen. Die einzelnen Kurven sind dabei so normiert, dass sie im gleichen Graphen gut miteinander vergleichbar sind. Die Darstellung im Bild ähnelt, durch die dort verwendete dynamische Skalierung der Messwerte, der im Programm „Calibration“ während der Messung. Die Werte der kalorimetrischen

Messung sind gerätebedingt gegenüber den anderen Größen um einen Messpunkt nach rechts verschoben. Die Zeit zwischen zwei Messpunkten beträgt bei den Messungen zur Kalibration 4 s.

Als Werte der Beschleunigungsspannung werden die im Programm gesetzten Werte angezeigt, da keine relevanten Abweichungen der realen Spannung zu befürchten sind. Daher ergibt sich für die Beschleunigungsspannung eine absolut glatte Kurve, die lediglich die entsprechenden Spannungssprünge anzeigt. Die Kurven der Diodenspannung und der kalorimetrisch gemessenen Leistung weisen dagegen eine leichte Welligkeit auf. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kurzzeitstabilität der Diodenspannung besser ist als die der kalorimetrischen Messung. Entscheidend für die Zuverlässigkeit der Leistungsmessung ist aber auch das Langzeitverhalten der Signale.

Nach einem Leistungssprung folgt der kalorimetrisch bestimmte Leistungswert mit einer Verzögerung von mehr als 20 s. Diese ist vor allem durch die Wärmekapazitäten der Kalorimeter bedingt. Erst wenn die vom Kalorimeter selbst (in Schläuchen, Gehäuse, ...) gespeicherte Energie zusammen mit der nach außen abgestrahlten Wärme der zugeführten Energie entspricht, stellt sich eine Sättigung ein. Die gemessenen Leistungen bleiben aber danach nicht exakt konstant. Die Kalorimeter erwärmen sich über sehr lange Zeit langsam weiter. Die vom Kalorimeter wieder abgestrahlte Wärme verursacht eine schnellere Erwärmung des durchfließenden Wassers. Etwa 3 min nach einem Leistungssprung, also nach Erreichen der eigentlichen Sättigung, steigen die Leistungswerte innerhalb der nächsten 6 min um weitere 3 – 4% an. Die Kurzzeitstabilität wird bei längerem Verharren bei einem Leistungswert geringfügig besser. Allerdings sind die systematischen Fehler der kalorimetrischen Messung, z.B. durch die im Kalorimeter gespeicherte bzw. von ihm abgestrahlten Wärme, nur schwer abzuschätzen.

#### 5.2.4 Untersuchungen zur Langzeitstabilität

Während die Kurzzeitstabilität der Diodenspannung, durch den Einsatz einer Parallelkapazität und durch Mittelwertbildung, hervorragende Werte annimmt, treten beim Langzeitverhalten Probleme auf. Diese werden vor allem deutlich, wenn man die Diodenspannung über der kalorimetrisch gemessenen Leistung aufträgt. In Bild 5.9 sind entsprechende Diagramme von mehreren Messungen zu sehen. Für die Langzeit-Instabilität der Diodenspannung kommen mehrere Gründe in Frage:

- Echte Leistungsschwankungen des Gyrotrons, die durch die Trägheit der kalorimetrischen Messung nicht registriert werden können. Dies betrifft Schwankungen mit einer Dauer von wenigen Sekunden und hat kaum Auswirkungen auf den späteren Verlauf der Messung.
- Änderung der Eigenschaften der Koppeleinrichtung bei Erwärmung bzw. bei unterschiedlichen Leistungspegeln.
- Änderungen der Feldkonfiguration in der Übertragungsleitung die durch thermische Effekte verursacht wird und sich somit über einen langen Zeitraum erstreckt.

Zur weiteren Analyse der Langzeit-Instabilität und ihrer Ursachen wurden zahlreiche weitere Messungen durchgeführt.

Bei Messungen, bei denen die Betriebsparameter längere Zeit unverändert blieben fiel auf, dass die Diodenspannung des öfteren beginnt monoton anzusteigen oder abzufallen. Bei den meisten Messungen stieg die Spannung bei mittleren Leistungen tendenziell eher leicht an, während sie bei hohen Leistungen meist stärker abfiel. Die kalorimetrisch gemessenen Leistungswerte blieben dabei konstant bzw. zeigten den gewohnten geringen Anstieg. Daher scheidet eine reale Schwankung der Ausgangsleistung als Ursache aus. Da die Anstiegs- bzw. Abfallzeiten im Bereich mehrerer Minuten liegen, werden Ursachen vermutet, die durch thermische Wechselwirkungen zustande kommen.

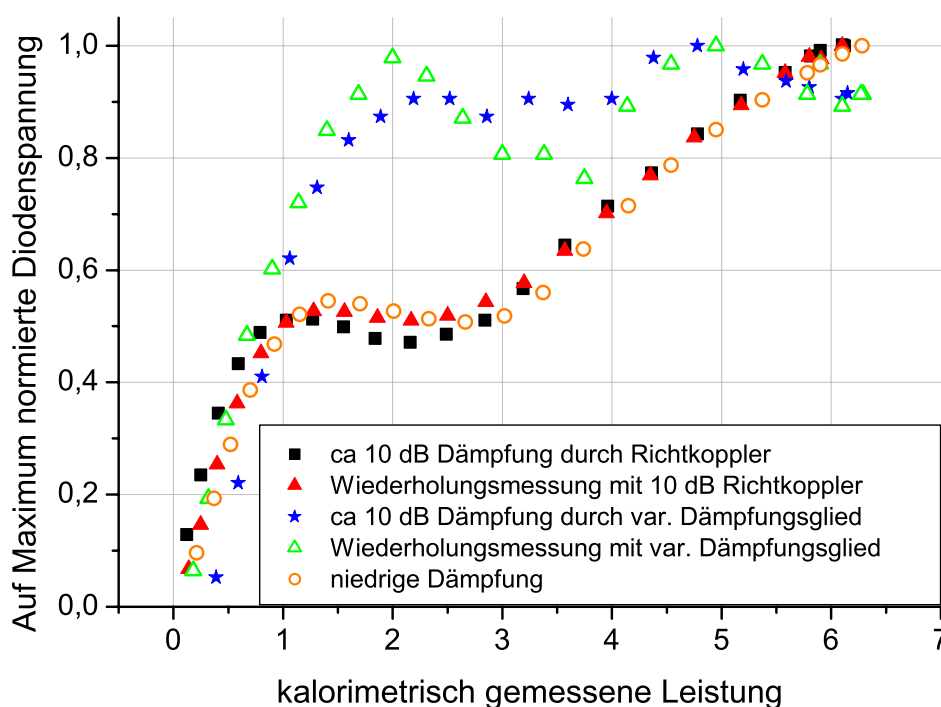


Bild 5.9: Kalibrationsversuche

Zunächst sollte der Einfluss von Absorbermaterial, wie es in Hohlleiterabschlüssen und Dämpfungsgliedern vorkommt, untersucht werden. Dazu wurden zuerst Messungen bei unterschiedlichen Einstellungen des variablen Dämpfungsgliedes durchgeführt, die in Bild 5.9 zu sehen sind. Damit die verschiedenen Messungen, die bei stark unterschiedlichen Dämpfungswerten aufgenommen wurden, qualitativ einfacher vergleichbar sind, wurden sie auf ihren jeweiligen Maximalwert normiert. Die Kurven bei zusätzlicher Dämpfung von ca. 10 dB durch das Dämpfungsglied zeigen einen flacheren Verlauf als die mit niedriger Dämpfung. Dies wird im Diagramm dadurch deutlich, dass die Diodenspannung ihren Maximalwert schon bei kleinen Leistungen nahezu erreicht. Die

Absorberfolie, die zur Dämpfung unterschiedlich weit in den Hohlleiter eingebracht wird, zeigt also vor allem bei hohen Leistungen eine deutliche Temperaturabhängigkeit.

Zur Bestätigung dieses Ergebnisses wurden Messungen am Gunn-Oszillator durchgeführt. Dabei wurde als Dämpfungsglied zwischen der Detektordiode und dem Gunn-Oszillator einmal das variable Dämpfungsglied und danach ein 10 dB Richtkoppler eingesetzt. Mit beiden Aufbauten wurde die Diodenspannung über einen längeren Zeitraum beobachtet. Bei Einsatz des variablen Dämpfungsgliedes sank die Diodenspannung mit der Zeit ab, während sie beim Richtkoppler stabil blieb. In weiteren Messungen mit dem provisorischen Aufbau wurde daher auf den Einsatz eines variablen Dämpfungsgliedes verzichtet.

Die nachfolgenden Messungen zeigten alle eine verbesserte Langzeitstabilität, wobei jedoch weiter Schwankungen der Diodenspannungen auftraten. Ein typisches Beispiel einer solchen Messung zeigt Bild 5.10. Die Einsattelung im unteren Leistungsbereich ist weniger ausgeprägt und zu niedrigeren Leistungen verschoben. Allerdings wird die Kurve bei hohen Leistungen ebenfalls flacher, was auf die stetig abfallende Diodenspannung zurück zu führen ist.

Eine weitere Ursache für die Langzeit-Instabilität des Diodensignals könnte eine, durch thermische Effekte (z.B. am Resonator des Gyrotrons) ausgelöste, stetige Änderung der Strahlform sein. Allerdings lässt sich die Feldverteilung nur statisch und bei niedrigen Leistungen durch das Belichten von Thermopapier messen. Es könnte jedoch sein, dass sich eine Änderung der Strahlform nicht in allen Bereichen des Gaußschen Hohlstrahls gleich stark auswirkt. Um dies festzustellen wurde die Position der Pickup-Antenne im Strahl von Messung zu Messung verändert.

Bei verschiedenen Antennenpositionen traten die Instabilitäten tatsächlich mit unterschiedlicher Intensität auf. Auch waren in manchen Positionen eher ein Anstieg der Diodenspannung, in anderen eher ein Abfall derselben festzustellen. Die beobachteten Effekte deuten darauf hin, dass sich die Strahlkonfiguration bei verschiedenen Leistungswerten ändert. Eine Systematik für diese Änderung konnte jedoch nicht erkannt werden. Die beste Messung die bei den Untersuchungen erreicht wurde ist in Bild 5.11 gezeigt. Dabei befand sich die Antenne ca. in der Mitte der Außenflanke des Strahls. Weder bei dieser noch bei der Wiederholungsmessung trat eine Drift der Diodenspannung auf. So ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Diodenspannung und der Ausgangsleistung des Gyrotrons.

### 5.3 Endgültiger Aufbau der Koppelinrichtung

Die Einflüsse bzw. Ursachen der Änderung der Strahlform wurde mit dem Aufbau mit 40 dB-Richtkoppler, dem Hohlleiterabschluss für hohe Leistungen, einem variablen Dämpfungsglied mit maximal 10 dB Dämpfung und einer neuen Detektordiode mit einer maximalen Eingangsleistung von 10 mW weiter untersucht. Mit dem endgültigen Messaufbau wurde auch versucht, die guten Ergebnisse der Messung aus Bild 5.11 zu reproduzieren.

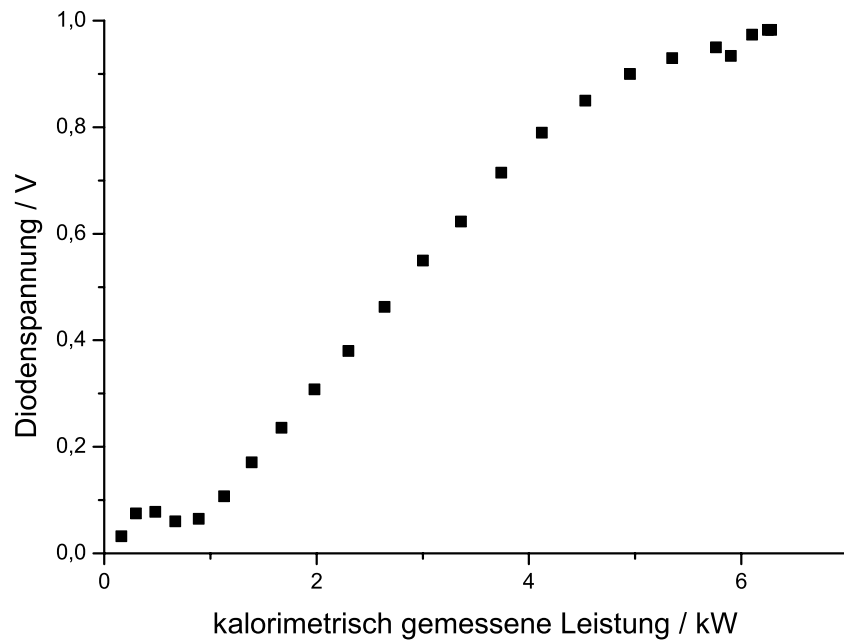


Bild 5.10: Kennlinie mit Richtkoppler zur Dämpfung der Leistung nach der Pickup-Antenne

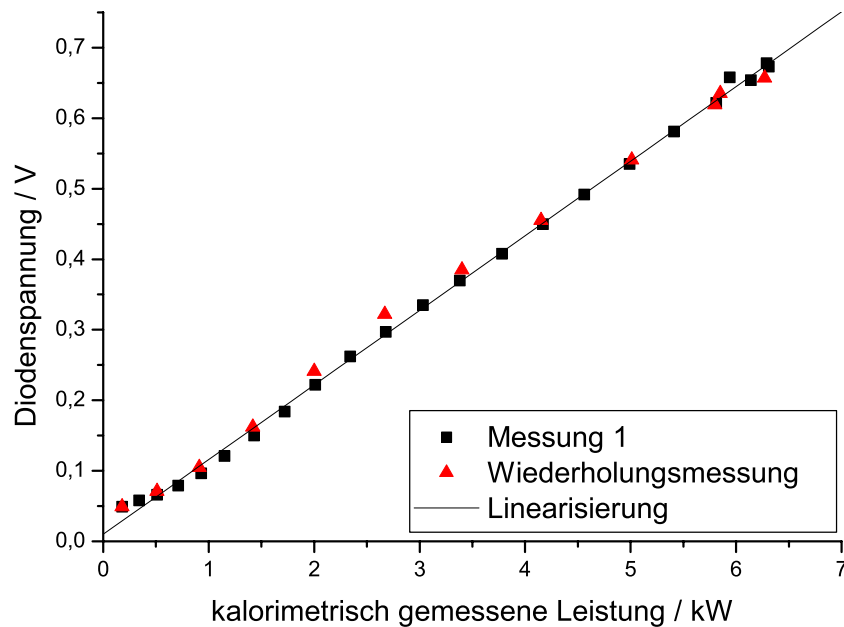


Bild 5.11: Beste gemessene Kennlinie

### 5.3.1 Niederleistungsmessung

Um negative Einflüsse des Messaufbaus auf die Messungen auszuschließen wurden sowohl die Einzelkomponenten, wie auch der gesamte Aufbau mit einem Vektor-Netzwerk-Analysator in einem Frequenzbereich von 28 GHz bis 33 GHz vermessen. Dabei bestand das Problem, dass kein Kalibrations-Kit für eine Hohlleiterkalibration zur Verfügung stand. Die Kalibration wurde daher vor den Koaxial-Hohlleiter-Übergängen mit dem Koaxial-Kalibrationskit durchgeführt. Mit diesem Vorgehen sind jedoch keine exakten Messungen möglich. In Bild 5.12 sind die  $S_{11}$ - und  $S_{21}$ -Parameter des gesamten Aufbaus

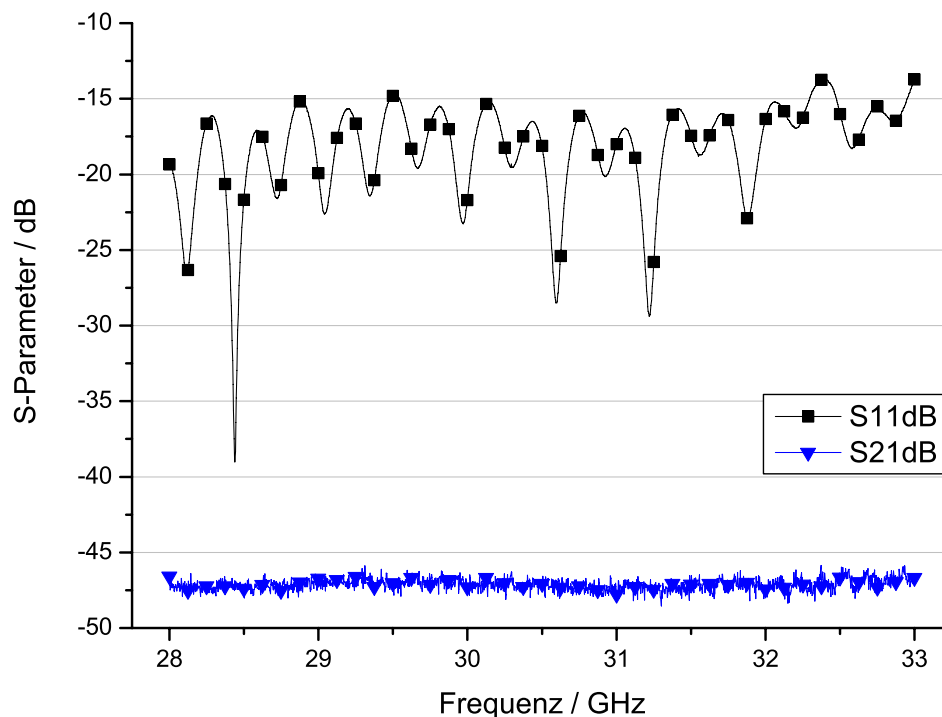


Bild 5.12: S-Parameter der Koppereinrichtung

gezeigt. Die Werte für den Eingangsreflexionsfaktor ( $S_{11}$ ) liegen fast über den kompletten Frequenzbereich unterhalb von  $-15$  dB. Die extremen Schwankungen der Kurve sind vor allem auf die schlechte Kalibration und den Einfluss der Koaxial-Hohlleiter-Übergänge zurück zu führen. Für den Pfad vom Eingang des 40 dB-Richtkopplers bis zum Ausgang des variablen Dämpfungsgliedes ( $S_{21}$ ) sind ebenfalls keine Auffälligkeiten zu erkennen. Bei der gezeigten Messung war die Dämpfung am variablen Dämpfungsglied auf 0 dB eingestellt. Damit ergab sich eine Gesamtdämpfung von ca. 47 dB, die für die vorgesehenen Messungen am Gyrotron ausreichen.

Die Vermessung der Einzelkomponenten ergab für den Koppelpfad des 40 dB-Richtkopplers eine Dämpfung von ca. 47 dB. Für das variable Dämpfungsglied, dessen Skala

von 0 dB bis 10 dB reicht, stimmen die gemessenen Werte sehr gut mit denen der Skala überein. Der maximale Dämpfungswert liegt bei ca. 17 dB. Mit diesem Aufbau sollte es, mit einer Gesamtdämpfung von bis zu 64 dB, also problemlos Möglich sein Messungen durchzuführen, bei denen sich die Pickup-Antenne im Maximum des gaußschen Hohlstrahls befindet.

### 5.3.2 Messungen bei verschiedenen Antennenpositionen

Zunächst wurde versucht die Messung aus Bild 5.11 bei einer Antennenposition an der Aussenflanke des Strahls zu reproduzieren. Bei ersten Messungen fiel ein sehr hoher Anteil der Streustrahlung in der Übertragungsleitung von bis zu 30% auf. Dabei befand sich die Pickup-Antenne nicht im Strahlengang und scheidet als Ursache für den schlechteren Wirkungsgrad der Übertragungsleitung aus. Daher wurde, vor weiteren Messungen, der erste Spiegel der Übertragungsleitung neu justiert. Danach betrug der Streuanteil ca. 20% der Gesamtleistung. Bei den Messungen in den Bildern 5.13 und 5.14 fällt auf, dass die Abweichungen vom exakt linearen Verlauf bei der Messung im Maximum des Strahls deutlich größer sind als an der Strahlflanke. Die Abweichungen betragen in der Messung in Bild 5.13 bis zu 5%, bei der Messung im Maximum (Bild 5.14) bis zu 10%. Dass die Abweichungen bei Messungen im Maximum tatsächlich schlechtere Ergebnisse liefert als Messungen an der Strahlflanke, kann jedoch nicht grundsätzlich angenommen werden.

Bei Messungen im Strahlmaximum erhitzt sich die Pickup-Antenne und teilweise auch der Richtkoppler sehr stark (längeres Anfassen war nicht mehr möglich). Im Gegensatz zur Montage in der Übertragungsleitung blieb hier jedoch das Diodengehäuse und das variable Dämpfungsglied immer kalt. Für weitere Messungen wird die Antenne an der Strahlflanke positioniert. Instabilitäten treten aber bei allen Antennenpositionen auf.



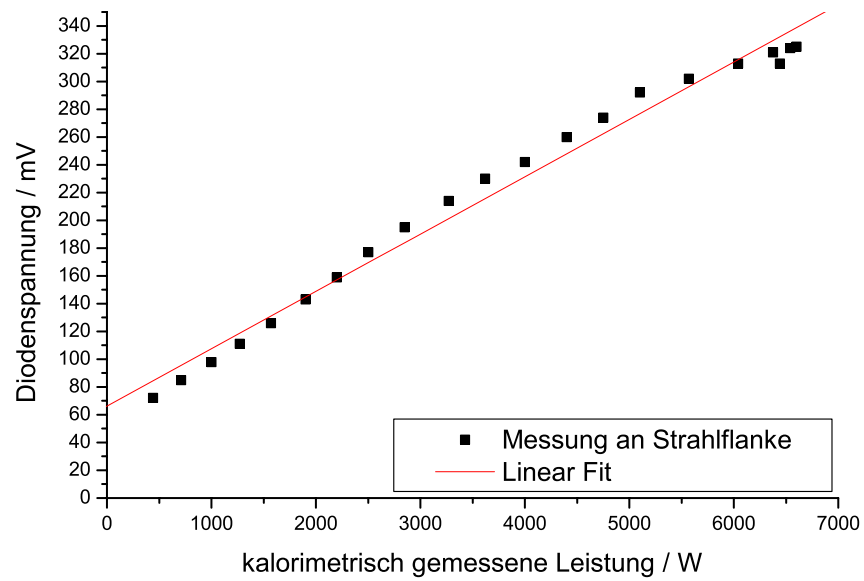


Bild 5.13: Messungen mit verschiedenen Antennenpositionen: Antenne an der Flanke des Strahls

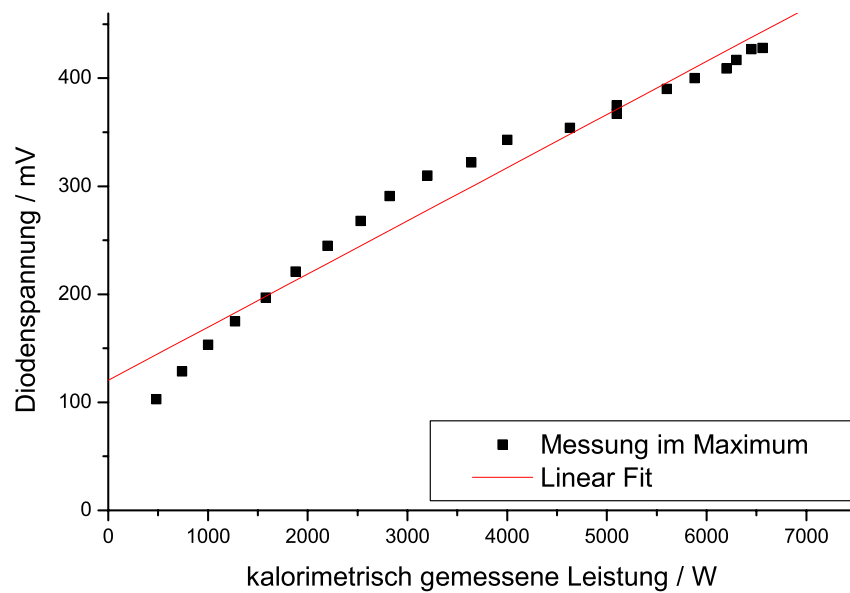


Bild 5.14: Messungen mit verschiedenen Antennenpositionen: Antenne im Maximum des Strahls

### 5.3.3 Drift der Diodenspannung

Um die Instabilität der Diodenspannung weiter zu untersuchen, wurden Messungen durchgeführt, bei denen sofort eine hohe Leistung (hohe Beschleunigungsspannung) eingestellt und der Verlauf der Diodenspannung längere Zeit beobachtet wurde. Da thermische Effekte als Grund für die Instabilitäten vermutet werden, wurde auch der Verlauf der Kühlwassertemperatur untersucht. Die Pickup-Antenne befand sich bei beiden gezeigten Messungen an derselben Position. Die Antenne (Mitte des Hohlleiters) befand sich ca. 28 mm vom inneren Rand des Horns entfernt und ca. 12 mm unterhalb der Unterkante des Horns.

In der Messung in Bild 5.15 wurde, nach einer langen Pause, also im kalten Zustand des Gyrotrons ein Sprung der Beschleunigungsspannung auf 17,5 kV aufgeschaltet. Die Betriebsparameter wurden nach dem Einschalten nicht mehr verändert. Der Pegel der Diodenspannung fiel innerhalb von 15 min von 308 mV am Anfang um 33% auf 208 mV ab, bevor sie sich nach etwas mehr als 20 min auf einen Wert von 216 mV stabilisierte. Ein Zusammenhang der Spannungsdrift mit dem Temperaturverlauf des Kühlwassers, der in Bild 5.16 zu sehen ist, ist nicht zu erkennen.

Bei der Messung in Bild 5.17 wurde ein Sprung der Beschleunigungsspannung auf 17 kV aufgeschaltet. Die Spannung beginnt, nach einem Peak, der vom Einschaltvorgang herrührt, ausgehend von einem Spannungswert von 183 mV anzusteigen. Der Anstieg beträgt 5,5% innerhalb von knapp 9 min. Das Erreichen der Sättigung wurde bei dieser Messung nicht abgewartet. Der Temperaturverlauf in Bild 5.18 zeigt jedoch keine nennenswerten Unterschiede zu dem in Bild 5.16. Der leichte Temperaturabfall zu Beginn der Messung ist durch eine sehr kurze Pause zur vorausgehenden Messung verursacht.

Bei veränderter Antennenposition (22 mm vom inneren Rand des Horns entfernt) und einem Spannungssprung auf 16,5 kV ergab sich, ohne längere Pause zu den vorherigen Messungen, zwar eine flachere jedoch immer noch fallende Spannungskurve. Innerhalb von 5 min fiel der Anfangspegel um 13% ab.

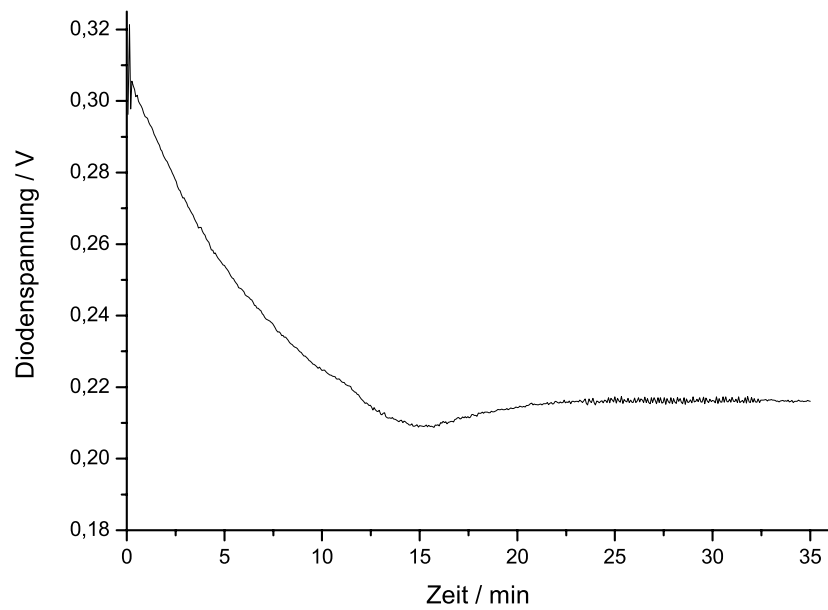


Bild 5.15: Abfall der Diodenspannung im kälteren Zustand der Anlage: Verlauf der Diodenspannung

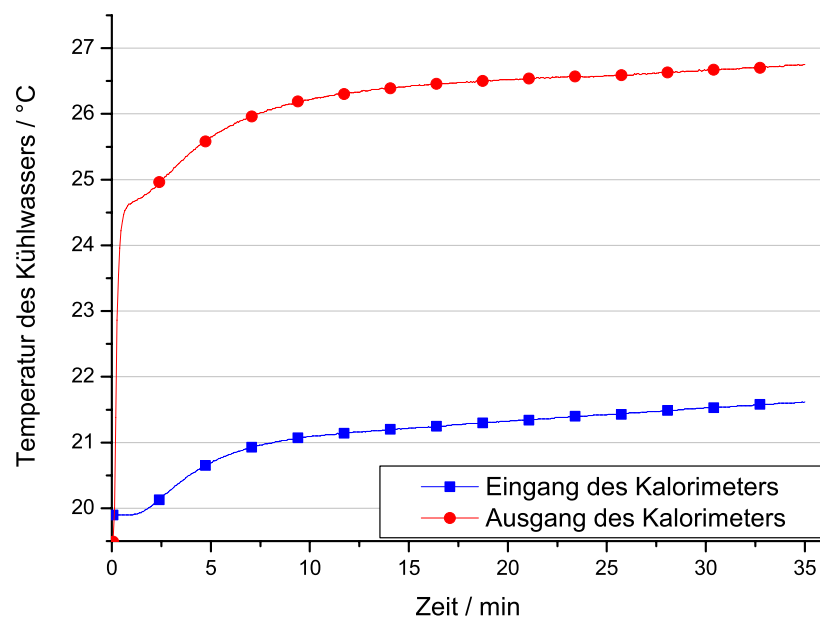


Bild 5.16: Abfall der Diodenspannung im kälteren Zustand der Anlage: Verlauf der Kühlwassertemperatur

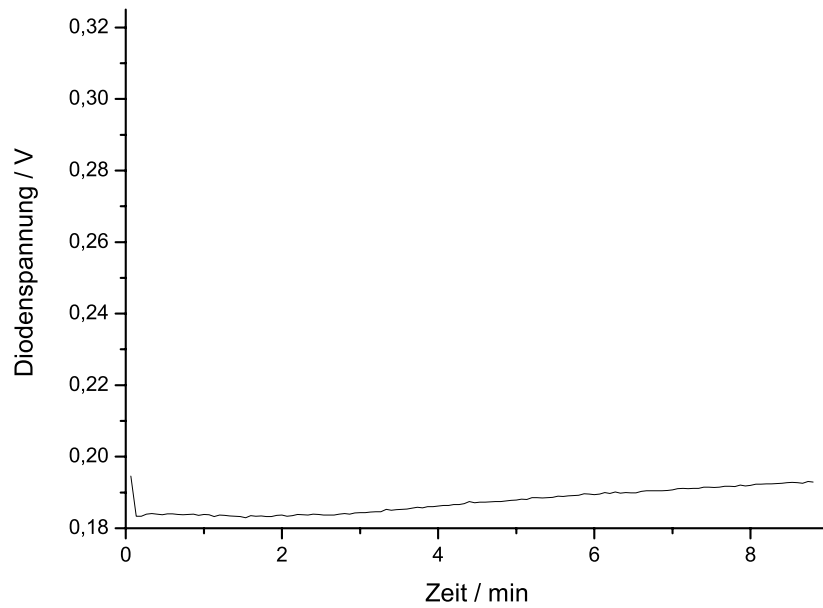


Bild 5.17: Anstieg der Diodenspannung im wärmeren Zustand der Anlage: Verlauf der Diodenspannung

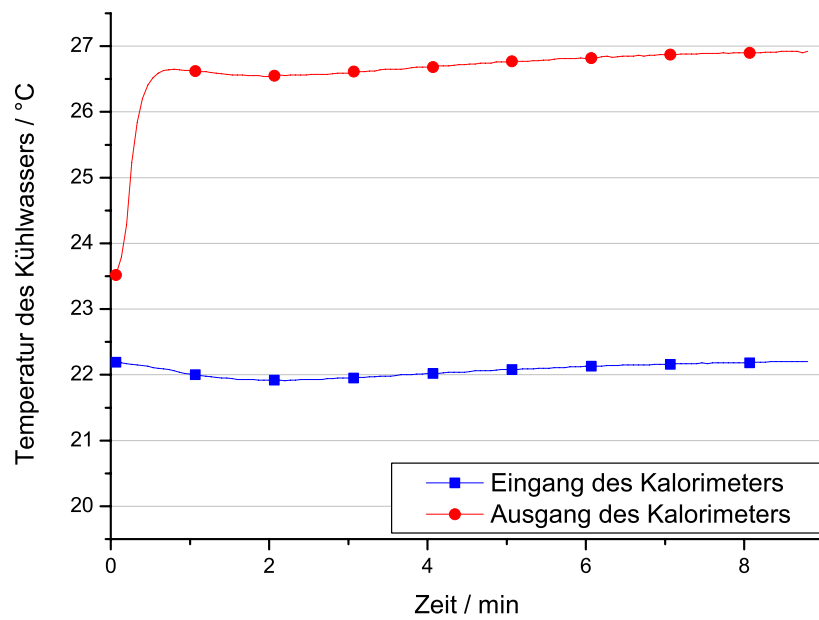


Bild 5.18: Anstieg der Diodenspannung im wärmeren Zustand der Anlage: Verlauf der Kühlwassertemperatur

### 5.3.4 Einfluss der Kühlung

Der Einfluss der Kühlung des Gyrotrons auf die Diodenspannung wurde überprüft, indem während der Messung der Durchfluss am Resonator erhöht wurde. Der sich daraus

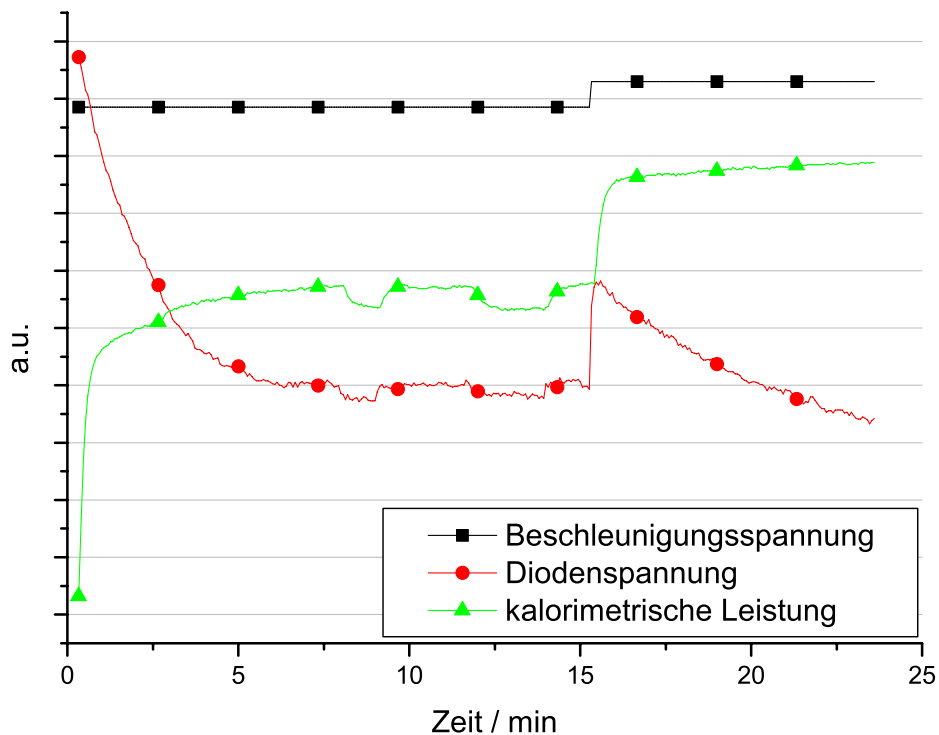


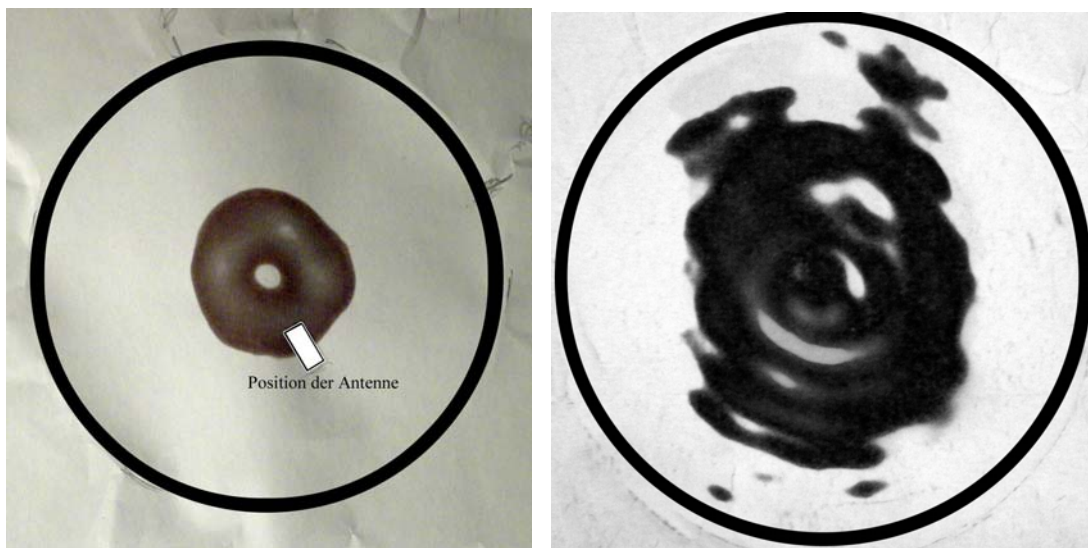
Bild 5.19: Einfluss der Kühlung auf die Diodenspannung

ergebende Verlauf der Diodenspannung und der kalorimetrisch gemessenen Leistung ist in Bild 5.19 dargestellt. Nach ca. 8 min wurde der Durchfluss stark erhöht und eine Minute später wieder auf den ursprünglichen Wert eingestellt. Nach 12 min wurde der Durchfluss des Kühlwassers wiederum für 2 min erhöht. Kurz darauf folgte ein Sprung der Beschleunigungsspannung um 500 V. Die Diodenspannung fällt während der gesamten Messung, auch nach dem Spannungssprung, stark ab. Bei erhöhtem Kühlwasserdurchfluss am Resonator sinken sowohl die Werte der kalorimetrischen Leistungsmessung, wie auch die Diodenspannung ab.

Das Kühlwasser für den Resonator und das durch das Kalorimeter werden dem selben Kühlwasserzweig entnommen. Durch die Änderung des Durchflusses am Resonator wird der Fluss durch das Kalorimeter also minimal abgesenkt. Durch eine Absenkung des Durchflusses im Kalorimeter müsste bei gleicher Gyrotronausgangsleistung die kalorimetrische Messung höhere Werten ergeben. Dies bedeutet, dass bei erhöhter Kühlung am Resonator eine geringere Ausgangsleistung erzielt wird.

### 5.3.5 Feldverteilungen am Horn des Gyrotrons und Fenster des Applikators

Da thermische Effekte an der zuletzt verwendeten Koppeleinrichtung selbst als Ursache der Langzeitinstabilitäten weitestgehend ausgeschlossen werden können, bleibt eine Änderung der Feldverteilung als möglicher Grund. Zur Prüfung der Feldverteilung am Ausgang des Gyrotron-Horns wurde ein Thermopapier, wie in Bild 2.4(b) gezeigt, über das Horn geklebt und, mit einem kurzen, leistungsschwachen Puls belichtet. Die Pickup-Antenne befand sich dabei in der zuletzt gewählten Position, ca. 22 cm von der Innenkante des Horns entfernt und ca. 12 mm unterhalb des Horns. In Bild 5.20(a) ist die



(a) Feldverteilung am Gyrotron-Horn

(b) Feldverteilung am Applikatorfenster

Bild 5.20: Durch Belichten von Thermopapier ermittelte Feldverteilungen

Feldverteilung am Horn zu sehen. Die Wand des Horns ist durch den schwarzen Kreisring angedeutet. Die Position der Antenne ist durch ein Viereck markiert. Ein Einfluss der Pickup-Antenne auf die Feldverteilung ist nicht zu erkennen. Auch sind keine Anzeichen von Interferenzen durch die in der Übertragungsleitung herrschenden Streustrahlung sichtbar. Die helleren Partien in der Mitte der kreisringförmigen Schwärzung sind durch Solarisationseffekte des Thermopapiers verursacht. Dabei nimmt die Schwärzung bei zu hoher Intensität der Belichtung wieder ab.

Zum Vergleich ist in Bild 5.20(b) die Feldverteilung am Fenster des Applikators zu sehen. Bei der Belichtung dieses Thermopapiers befand sich keine Pickup-Antenne in der Übertragungsleitung. Im Applikator befand sich das Hexagon zur Erzeugung einer homogenen Feldverteilung im Ofenraum, der Modenrührer war in Betrieb. Als Last dienten zwei wassergefüllte Kunststoffflaschen mit einem Gesamtvolumen von 4l. Der Rand des Fensters ist im Bild wiederum durch einen schwarzen Kreisring angedeutet. Ohne Feldstörungen wäre auch hier eine Schwärzung in Form eines Kreisrings zu erwarten, dessen Radius um einiges größer ist, als der am Horn des Gyrotrons. An der Feldverteilung am Fenster des Applikators sind deutlich die Einflüsse der Streustrah-

lung bzw. vor allem der aus dem Applikator zurückreflektierten Strahlung zu sehen, die starke Interferenzen zur Folge haben.

### 5.3.6 Frequenzverhalten des Gyrotrons

Eine Änderung der Feldverteilung im Mikrowellenstrahl des Gyrotrons könnte durch eine kontinuierliche Änderung der Frequenz verursacht werden. Eine langsame, kontinuierliche Änderung der Frequenz könnte wiederum durch die thermische Ausdehnung des Resonators im Gyrotron erfolgen. Dies würde auch erklären, weshalb die Drift der Diodenspannung vor allem bei hohen Leistungen auftritt. Außerdem könnte dies der Grund sein, dass die Diodenspannung bei einigen Messungen nach Leistungserniedrigung leicht ansteigt (Abkühlung des Resonators) und bei hohen Leistungen abfällt (Erwärmen des Resonators). Bei hohen Leistungen treten im Resonator höhere Verluste durch Wandströme auf. Wenn sich also bei hohen Leistungen eine Frequenzdrift zu niedrigeren Frequenzen nachweisen ließe, wäre dies ein Indiz für eine Änderung der Feldverteilung als Grund für die Drift der Diodenspannung.

Zur Untersuchung des Frequenzverhaltens des Gyrotrons wurde statt der Detektordiode ein externer Mischer des Tektronix Spektrum Analysators (Modell: 494 P) angeschlossen. Damit gleichzeitig auch die Diodenspannung weiter erfasst werden kann, wurde ein 10 dB-Richtkoppler hinter dem variablen Dämpfungsglied eingebaut. Die Detektordiode wurde am Durchgangspfad, der Mischer am Koppelpfad des 10 dB-Richtkopplers angeschlossen. Eine vergleichbare Messung wäre am Langlochkoppler des Spiegels oder am Aufbau in der Übertragungsleitung nicht möglich gewesen. Bild 5.21 zeigt

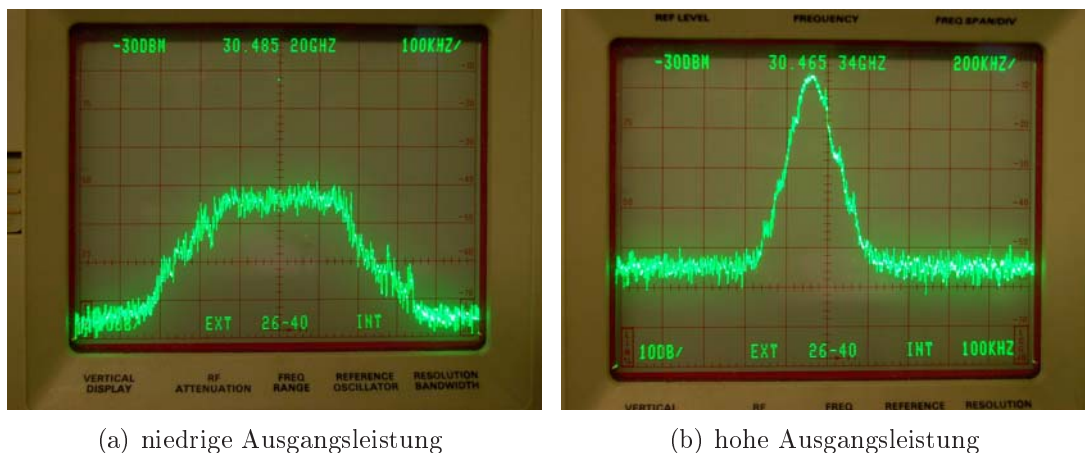


Bild 5.21: Spektrum des Gyrotrons

das Spektrum des Gyrotrons bei niedriger (5.21(a)) und hoher Leistung (5.21(b)). Bei niedriger Leistung und einer Beschleunigungsspannung von 13 kV beträgt die Mittenfrequenz 30,485 GHz. Bei einer Beschleunigungsspannung von 17 kV wurde eine Mittenfrequenz von 30,465 GHz gemessen. Die Abnahme der Frequenz bei höheren Beschleunigungsspannungen bestätigt den Einfluss der Beschleunigungsspannung auf die

Zyklotronresonanzfrequenz nach Gleichung 2.4. Man kann außerdem erkennen, dass die Bandbreite bei hohen Leistungen leicht abnimmt.

Die Spektrumanalysen haben gezeigt, dass sich die Frequenz mit Änderung der Beschleunigungsspannung sprunghaft ändert. Dies ist, im Rahmen der Bandbreite des Resonators, durch die Änderung der Zyklotronresonanzfrequenz nach Gleichung 2.4 zu erklären. Bei höheren Leistungen trat oft eine Frequenzdrift auf. Der Vergleich der gemessenen Frequenz und dem Diodensignal zeigte jedoch keinen Zusammenhang zwischen der Frequenz- und der Spannungsdrift. Die Diodenspannung war zu Zeiten, in denen die Frequenz driftete, häufig stabil. Wenn umgekehrt die Diodenspannung driftete, war keine zeitgleiche Drift der Frequenz festzustellen.

### 5.3.7 Stabilität der Kalibrierkennlinie

Wie bei den Untersuchungen zur Drift der Diodenspannung auffiel, ändert sich die Diodenspannung im warmen Betriebszustand der Gyrotron-Anlage, nach langem Betrieb bei hohen Leistungen, nicht mehr. Bei der Messung der Kennlinie zur Verknüpfung der kalorimetrisch gemessenen Leistungswerte mit der Diodenspannung überlagert sich bei der Messung von niedrigen zu hohen Leistungen der Fehler, der durch die Drift der Diodenspannung entsteht. Beim anschließenden Abwärtstasten fällt die Diodenspannung meist nicht mehr weiter ab. In seltenen Fällen war beim Abwärtstasten ein leichter Anstieg der Diodenspannung zu verzeichnen. Die durch die Drift der Diodenspannung hervorgerufenen Spannungsunterschiede beim Auf- und direkt anschließendem Abwärtstasten wurde im kalten und warmen Zustand der Gyrotron-Anlage, sowie bei verschiedenen Einstellungen des Resonator-Magnetfelds untersucht.

Bild 5.22 zeigt die Kurven bei kaltem und warmem Zustand der Anlage. Die Kurve der Messung im kalten Zustand zeigt für die Aufwärtstastung höhere Werte für die Diodenspannung als bei der Abwärtstastung. Der Unterschied beträgt, im unteren Bereich der Kurve bis zu 50 mV, dies entspricht an dieser Stelle 25% des Diodenpegels und einer Leistungsdifferenz von ca. 600 W (ca. 40% des Leistungspegels). Die direkt im Anschluss im warmen Zustand aufgenommene Kurve weicht nur gering von den Werten der Abwärtstastung der vorherigen Messung ab. Der Unterschied zwischen der Aufwärts- und Abwärtstastung beträgt maximal 2,3% des Diodenpegels und knapp 10% des Leistungspegels. Die im warmen Zustand auftretenden Abweichungen sind für eine Leistungsmessung noch recht gut geeignet. Probleme bestehen allerdings bei den großen Unterschieden zwischen kaltem und warmem Zustand der Anlage.

Die Kalibrierkennlinien bei verschiedenen Magnetfeldeinstellungen am Resonator, die im warmen Zustand der Anlage aufgenommen wurden, sind in Bild 5.23 dargestellt. Die Abweichungen, die zwischen den einzelnen Messungen auftreten, betragen maximal 7% des Gesamtpegels der Diode und 11% der Leistung. Die größten Abweichungen treten zwischen den Kurvenabschnitten bei Aufwärtstastung der Leistung auf. Bei der anschließenden Verringerung der Leistung betragen die Abweichungen der Leistungswerte weniger als 5%. Man kann also davon ausgehen, dass auch hier die Abweichungen durch thermische Effekte verursacht werden und die Magnetfeldeinstellungen keinen Einfluss auf die Messung haben.



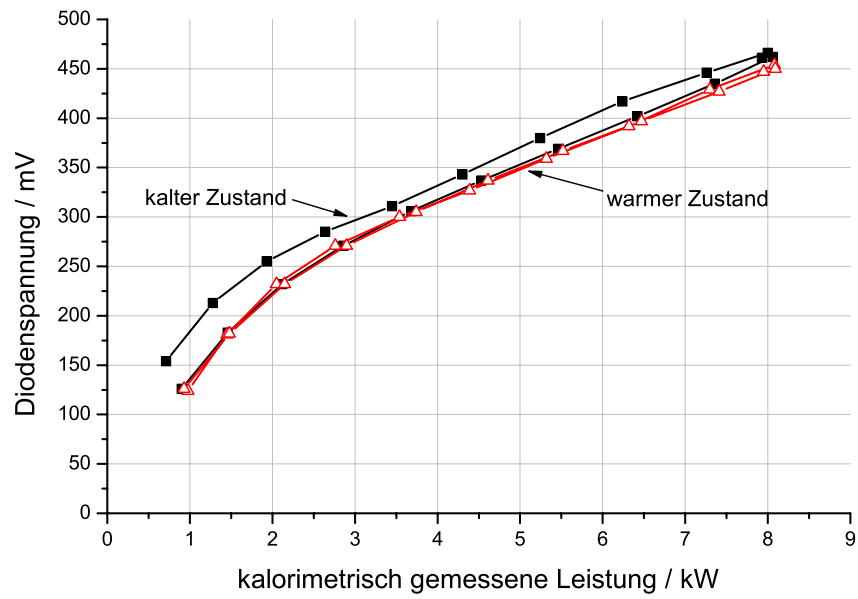


Bild 5.22: Kalibrierkennlinie im kalten und warmen Zustand

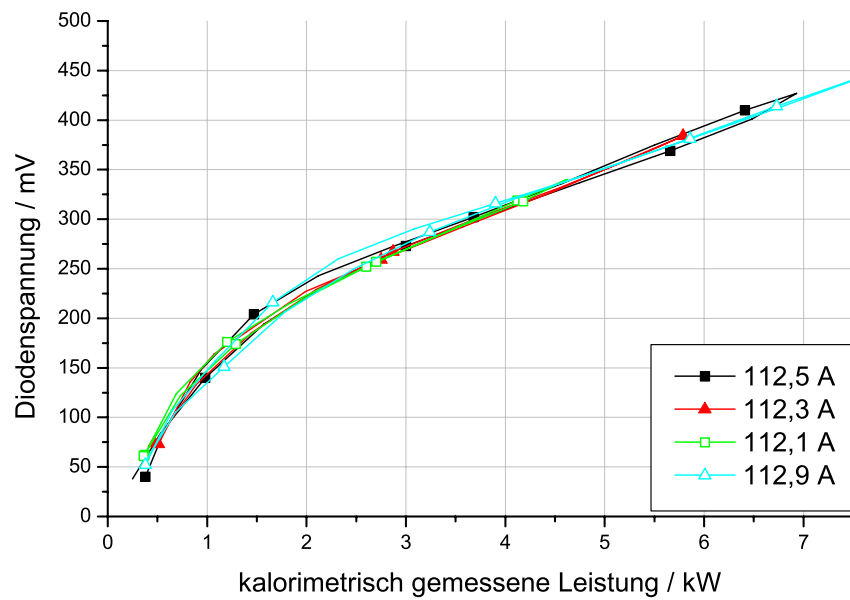


Bild 5.23: Kalibrierkennlinie bei verschiedenen Einstellungen des Resonator-Magnetfeldes

### 5.3.8 Vergleich der Diodenspannung mit großer und kleiner Last im Applikator

Zum Abschluss der Messungen an der Anlage wurde das Kalorimeter aus dem Applikator ausgebaut. Danach wurden bei identischen Einstellungen der Pickup-Antenne und gleichen Betriebsparametern wie bei den letzten Messungen mit Kalorimeter, Messungen mit einer Last von 4l Wasser im Applikator und eingeschaltetem Modenrührer durchgeführt. Die Beschleunigungsspannung wurde jeweils beginnend bei 13,0 kV in 500 V-Schritten bis 17,5 kV durchgestimmt.

Die Ergebnisse zweier Vergleichsmessungen, mit Kalorimeter (große Last) und 4l Wasser (kleine Last) im Applikator, ist in Bild 5.24 abgebildet. Die Diodenspannung liegt

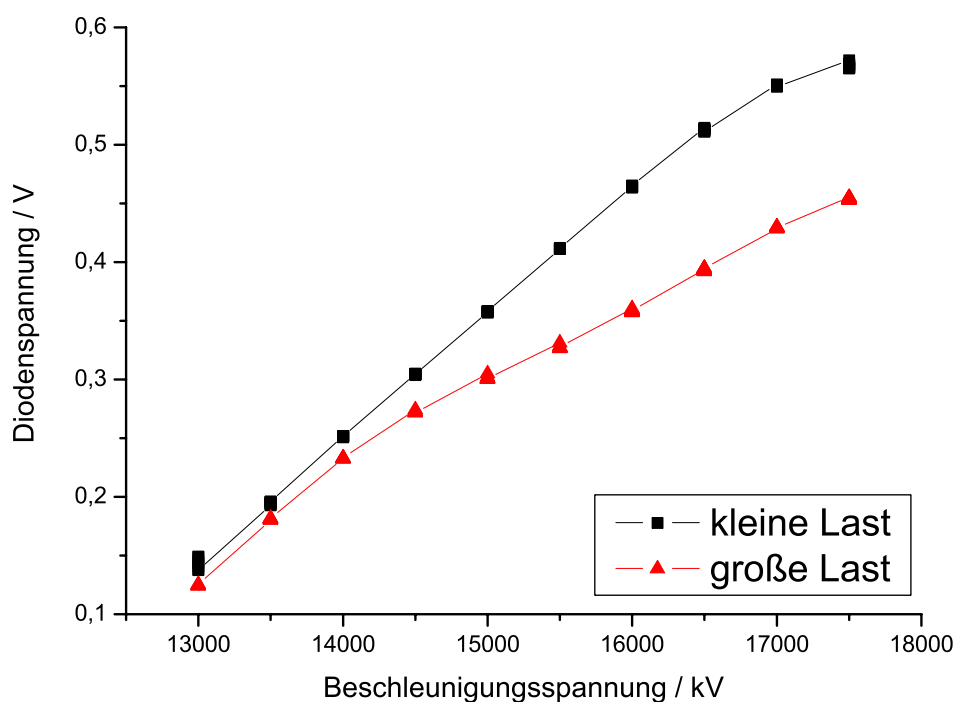


Bild 5.24: Vergleichsmessung mit großer und kleiner Last

bei höchster Beschleunigungsspannung bei der Messung mit kleiner Last bis zu 24,5% höher als mit großer Last. Die Frage warum die Diodenspannung ohne Kalorimeter ansteigt konnte nicht sicher geklärt werden. Es kommen jedoch mehrere Möglichkeiten als Ursache in Frage:

- Die Ausgangsleistung steigt tatsächlich, z.B. aufgrund von geringeren Reflexionen aus dem Applikator und dadurch geringeren Feldstörungen im Resonator, an.
- Der Streustrahlungsanteil in der Übertragungsstrecke steigt wegen stärkeren Reflexionen aus dem Applikator und damit erhöhter Streustrahlung in der Übertragungsleitung an und führt so zu einem höheren Diodenpegel.

- Die Feldverteilung an der Pickup-Antenne ändert sich durch Interferenzen, die sich von denen im Betrieb mit Kalorimeter unterscheiden.

Erfahrungen aus der Gyrotron-Forschung lassen vor allem die beiden letztgenannten Gründe vermuten. Bei der Beurteilung der möglichen Ursachen besteht jedoch das Problem, dass die Gesamtleistung des Gyrotrons ohne Kalorimeter nicht zuverlässig bestimmbar ist. Bei anderen Vergleichsmessungen fiel auf, dass das Gyrotron bei kleiner Last bei bis zu 1 kV höherer Beschleunigungsspannung, verglichen mit dem Betrieb bei großer Last, noch zuverlässig Mikrowellenleistung generierte.

## 5.4 Fazit

Die Experimente zur Untersuchung der schnellen, halbleiterbasierten Leistungsmessung haben deutlich die Vorteile gegenüber der kalorimetrischen Leistungsmessung gezeigt. So ist die halbleiterbasierte Leistungsmessung nicht nur erheblich schneller, sondern zeigt auch eine wesentlich höhere Empfindlichkeit. Die hohe Empfindlichkeit der Messung ist vor allem im untersten Leistungsbereich des Gyrotrons beim Einsetzen der HF-Schwingung von großem Vorteil. Die kalorimetrische Leistungsmessung ist bei Ausgangsleistungen unter 0,5 kW sehr unsicher bzw. nicht einsetzbar.

Die Kalibrierkennlinien zur halbleiterbasierten Leistungsmessung aus den Bildern 5.22 und 5.23 dienen zur Umsetzung der gemessenen Spannungswerte der Detektordiode in die zugehörigen Werte der Ausgangsleistung. Für eine zuverlässige Leistungsbestimmung setzt dies jedoch voraus, dass die Kalibrierkennlinien über längere Zeit stabil bleiben. Die Untersuchungen zur Kalibration haben gezeigt, dass in der Praxis häufig Driften der Diodenspannung bis über 30% des Anfangspegels auftreten. Diese Instabilitäten treten scheinbar zufällig, auch ohne Änderung der Betriebsparameter auf. Dies bedeutet, dass eine gemessene Kalibrierkennlinie keine eindeutige Aussage für zukünftige Messungen zulässt. Aufgrund der Instabilitäten der Kalibrierkennlinie, die auch innerhalb kurzer Zeit auftreten, ist eine Leistungsmessung, wie sie im vorigen Abschnitt beschrieben ist, über längere Sicht nur mit größeren Fehlern möglich. Ein Zusammenhang der Driften mit dem Betriebszustand des Gyrotrons ist nicht erkennbar. Eine weitere Ursache für die Spannungsdriften könnte eine Änderung der Feldverteilung aufgrund von thermischer Ausdehnung des Gyrotron-Horns, der Spiegel sowie der metallischen Abschirmung um die Übertragungsleitung sein.

Durch den Einsatz der Pickup-Antenne zur Auskopplung der zu messenden Leistung aus dem Primärstrahl, die Verwendung einer Kapazität parallel zur Diode sowie die Durchführung einer Mittelwertbildung wurde die relative Genauigkeit über die Genauigkeit der kalorimetrischen Messung verbessert. Vergleichsmessungen mit unterschiedlicher Last im Applikator (mit und ohne Kalorimeter) haben jedoch Pegelunterschiede von bis zu 25% aufgezeigt. Das heißt, dass die Messungen von der Last und damit vom jeweiligen Prozess abhängig sind. Da eine exakte Leistungsmessung ohne Kalorimeter nicht möglich ist, kann nicht sicher geklärt werden, ob es sich bei den Unterschieden der Messwerte um reale Leistungsunterschiede oder um Messfehler handelt. Eine Ursache sind die veränderten Reflexionen und eine dadurch veränderte Feldverteilung in der Übertragungsleitung. Damit ist auch bei stabilem Langzeitverhalten des Diodensignals noch keine zuverlässige Leistungsmessung möglich.

Bei allen Messungen hat sich gezeigt, dass bei Aufschalten eines Leistungssprungs immer auch ein Sprung der Diodenspannung auftritt. Diese Eigenschaft kann trotz der sonst bestehenden Probleme genutzt werden um zu prüfen, ob z.B. nach einem Sprung der Beschleunigungsspannung auch ein Leistungssprung erfolgt. Damit kann das Einsetzen bzw. Abreißen der HF-Schwingung zuverlässig erkannt werden. Die halbleiterbasierte Messung bietet dabei eine sehr hohe Empfindlichkeit und äußerst kurze Reaktionszeiten im Vergleich zur kalorimetrischen Messung.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Am Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM) des Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) ist seit 1994 ein kompaktes, industrienahes 30 GHz / 15 kW-Gyrotron-System für den Einsatz in der Materialprozesstechnik aufgebaut. In der vorliegenden Arbeit wurden die Möglichkeiten zur schnellen, halbleiterbasierten Leistungsmessung an diesem System untersucht.

Bisher wird eine Leistungsmessung an dieser Anlage nur mit Kalorimetern durchgeführt, bei denen die Mikrowellenleistung über den Umweg der Erwärmung von Wasser gemessen wird. Dieser Vorgang ist relativ träge und kann im normalen Betrieb nicht eingesetzt werden, da zur Leistungsbestimmung immer die komplette Mikrowellenstrahlung zur Erwärmung des Wassers in ein Kalorimeter eingestrahlt wird. Bei der kalorimetrischen Leistungsmessung wird eine relative Genauigkeit von ca. 5% erreicht, der Varianzkoeffizient beträgt ca. 1 – 1,5%.

Zur halbleiterbasierten Leistungsmessung während dem Normalbetrieb, die möglichst schnell stattfinden soll, wird ein Teil der Leistung aus dem vom Gyrotron erzeugten Mikrowellenstrahl ausgekoppelt und einer Detektordiode zugeführt. Als Koppelinrichtung stand zu Beginn der Arbeit ein Spiegel der quasi-optischen Übertragungsstrecke mit integriertem  $\lambda/4$ -Langlochkoppler zur Verfügung.

Um bei der Analyse des Diodensignals und den Untersuchungen zu dessen Kalibrierung reproduzierbare Messungen durchführen zu können, wurden Computerprogramme erstellt, die genau auf die jeweilige Messaufgabe zugeschnitten sind. Mit Hilfe dieser Programme lässt sich die komplette Gyrotron-Anlage vom Laborrechner aus steuern. Die benötigten Messwerte werden von den Programmen, in vom Benutzer vorher festgelegter Weise, ausgelesen und können zur späteren Auswertung abgespeichert werden. Durch den modularen Aufbau können weitere Programme schnell aufgebaut werden, da Funktionen wie z.B. die Geräteansteuerung oder Verarbeitung der Messwerte nicht komplett neu programmiert werden müssen.

Die Untersuchungen am  $\lambda/4$ -Langlochkoppler des Spiegels haben gezeigt, dass kaum Strahlung über die Koppelstruktur eingekoppelt wird. Dadurch werden die Messungen von der Streustrahlung in der Übertragungsleitung und den Reflexionen aus dem Applikator dominiert. Eine Messung der Ausgangsleistung des Gyrotrons war damit nicht möglich. Darüberhinaus führt dies zu einer schlechten Kurzzeitstabilität des Gleichspannungssignals der Detektordiode. Der Varianzkoeffizient nahm Werte bis zu 14% an, was darauf hindeutet, dass regelmäßig größere Abweichungen auftreten. Durch das Parallelschalten eines Kondensators und durch die Mittelwertbildung über mehrere Messwerte konnte die Kurzzeitstabilität des Signals auf Werte des Varianzkoeffizienten unter 1,5% verbessert werden. Durch den Einfluss der Streustrahlung und der Rückwirkungen aus dem Applikator ist der Mittelwert der Diodenspannung und damit die Leistungsmessung nicht unabhängig von den Betriebsparametern des jeweiligen Prozesses.

Um den Einfluss der störenden Strahlungsanteile in der Übertragungsstrecke zu vermindern wurde eine neue Koppereinrichtung aufgebaut. Zur Auskopplung der Mikrowellenstrahlung, die der Diode zugeführt wird, wird dabei ein offener WR-28 Rechteckhohlleiter als Pickup-Antenne im Primärstrahl des Gyrotrons positioniert. Die Kurzzeitstabilität ist bei diesem neuen Aufbau schon ohne Parallelkapazität und Mittelwertbildung stark verbessert. Der Varianzkoeffizient ohne Mittelwertbildung beträgt weniger als 3%. Durch die Mittelwertbildung ließ sich der Varianzkoeffizient ohne Parallelkapazität auf Werte unter 1% vermindern. Damit wird eine für die Leistungsmessung ausreichende Signalstabilität erreicht.

Bei den Messungen zur Kalibrierung des Signals der Detektordiode auf die kalorimetrisch ermittelten Leistungswerte fielen Langzeitinstabilitäten des Diodensignals auf, während die kalorimetrisch gemessene Leistung konstant blieb. Als Ursache hierfür wird eine durch thermische Effekte hervorgerufene langsame Änderung der Feldverteilung im Mikrowellenstrahl des Gyrotrons vermutet. Anzeichen, die diese Vermutung eindeutig bestätigen könnten, wie z.B. eine gleichzeitig mit der Drift der Diodenspannung auftretende Frequenzdrift der HF-Welle konnten allerdings nicht nachgewiesen werden. Die Abhängigkeit der Drift der Diodenspannung von thermischen Eigenschaften der Anlage wird aber bei Veränderungen des Kühlwasserdurchflusses deutlich. Außerdem stabilisiert sich die Diodenspannung nach langem Betrieb bei hohen Leistungen. Durch die Spannungsdrift wird ein relativer Fehler von bis zu 30%, in Bezug auf den Startwert des Spannungspegels der Detektordiode verursacht. Ein Grund für die Spannungsdriften könnte die thermische Ausdehnung von Komponenten der Übertragungsleitung und eine dadurch geänderte Feldverteilung sein.

Beim Vergleich der Diodenspannung im Betrieb mit und ohne Kalorimeter im Applikator traten ebenfalls Unterschiede von bis zu 25% des Pegels auf. Diese Spannungsdifferenz wird vor allem durch erhöhte Reflexionen aus dem Applikator bei kleiner Last hervorgerufen. Ob durch die Reflexionen auch die Ausgangsleistung des Gyrotrons beeinflusst wird, lässt sich hier nicht abschließend klären.

In dieser Arbeit wurden jedoch die großen Vorteile der halbleiterbasierten Leistungsmessung deutlich. Durch den starken Einfluss der Streustrahlung in der Übertragungsleitung und der Reflexionen aus dem Applikator sowie der thermisch verursachten Drift des Diodensignals ist eine Messung der absoluten Leistung mit großen Fehlern behaftet. Bei einer kalorimetrischen Messung in der Übertragungsleitung ist der Einfluss der Streustrahlung und die auftretenden Fehler jedoch wesentlich größer. Außerdem ist der Aufbau sehr gut geeignet um die Leistungsänderung z.B. nach einem Sprung der Beschleunigungsspannung zu beurteilen. Dies ist zur Analyse des Leistungsverlaufs im Bereich des Einsetzens der HF-Schwingung bei niedrigen Leistungen bzw. des Abreißen der HF-Schwingung bei hohen Leistungen interessant, um die Grenzen der Betriebsparameter im laufenden Betrieb schnell zu erkennen. Die Messung mit der Detektordiode ist dabei wesentlich schneller als kalorimetrische Messungen und wegen der hohen Empfindlichkeit auch bei sehr niedrigen Leistungspegeln zuverlässig einsetzbar.

## **Ausblick**

Bevor die Vorteile der schnellen, halbleiterbasierten Leistungsmessung auch bei der Leistungsbestimmung zuverlässig genutzt werden können, müssen die Ursachen der bestehenden Probleme der Langzeitstabilität weiter untersucht werden. So müssen vor allem die thermischen Einflüsse auf die Feldverteilung in der Übertragungsleitung, die als Hauptursache für die starke Drift der Diodenspannung zu sehen sind, genau analysiert werden. Außerdem sollten die Auswirkungen der Reflexionen aus dem Applikator auf das Betriebsverhalten des Gyrotrons, sowie auf die Feldverteilung in der Übertragungsleitung geklärt werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] A. Heil und O. Heil. Eine neue Methode zur Erzeugung kurzer, ungedämpfter elektromagnetischer Wellen hoher Intensität. *Zeitschrift für Physik* 95, Seiten 752 – 756, 1935.
- [2] R.H. Varian und S.F. Varian. A high frequency oscillator and amplifier. *J. Appl. Phys.*, Seiten 321 – 327, 1939.
- [3] M. Thumm. Progress in gyrotron development. *Fusion Engineering and Design*, 66 - 68:69 – 90, 2003. [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- [4] M. Thumm. Moderne Mikro- und Millimeterwellenröhren für die Materialprozeßtechnik. *Unterlagen zur Vorlesung: Ausgewählte Kapitel der HF-Technik Teil II, Universität Karlsruhe*, 2001. Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik, Karlsruhe.
- [5] Joseph Eichmeier. *Moderne Vakuumelektronik - Grundlagen, Bauelemente, Technologie*, Kapitel 6. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 1981.
- [6] GYCOM, Nizhny Novgorod. *Gyrotron GCGT - Technical Certificate*, 1999.
- [7] A. Möbius, M. Thumm, et al. A hollow cone gaussian beam quasi-optical transmission line for a gyrotron technological system. In *21. Int Conf. on Infrared and Millimeter Waves*. Berlin 1996, AT 11.
- [8] G. Link, L. Feher und M. Thumm. Optimized design of an industrial millimeter wave applicator for homogeneous processing of ceramic charges. In *Conf. Proc. Microwave and High Frequency Heating*, Seiten 443 – 446, Fermo, 9.-13. Sept. 1997.
- [9] A. Möbius. Unveröffentlichte Unterlagen.
- [10] W. Wiesbeck. *Hochfrequenztechnik - Mikrowellen, Felder, Wellen, Komponenten. Skript zur Vorlesung Hochfrequenztechnik an der Universität Karlsruhe(TH)*, 2001.
- [11] Bronstein, Semendjajew, Musol und Mühlig. *Taschenbuch der Mathematik*, Kapitel 16.4.1.3. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1999.
- [12] H. Czichos. *Hütte - Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*, Kapitel A, Seite A135. Springer, 2000.
- [13] G. Link, L. Feher, M. Thumm, et al. Sintering of advanced ceramics using a 30-GHz, 10-kW, CW industrial gyrotron. In *IEEE Transactions on Plasma Science*, Band 27, Seiten 547 – 554, 1999.



- 
- [14] Yu. V. Bykov, K. I. Rybakov und V. E. Semenov. High-temperature microwave processing of materials. In *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Band 34, Seiten R55 – R75. Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, Russia, 2001.
- [15] M. Thumm, W. Wiesbeck und S. Kern. *Hochfrequenzmeßtechnik - Verfahren und Meßsysteme*. B.G.Teubner, Stuttgart - Leipzig, 1997.
- [16] S.W. Ferguson, R. Stever, A. Throop, B. Felker und R. Franklin. MTX/ELF II microwave power measurements and calibration for the 2-GW, 140 GHz, ELF II free electron laser. In *Proceedings IEEE Thirteenth Symposium on Fusion Engineering*, Band 1, Seiten 145 – 148, 1989.
- [17] Günter Nimtz. *Mikrowellen - Einführung in Theorie und Anwendung*. Wissenschaftsverlag Mannheim / Wien / Zürich. Anhang - Tabelle 2.

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Kompaktes Gyrotron-System . . . . .	3
2.2	Gyrotron . . . . .	4
2.3	Querschnitt eines Gyrotrons mit Axialer Strahlauskopplung . . . . .	5
2.4	Modenwandler und Feldverteilung . . . . .	9
2.5	Spiegel der Übertragungsleitung . . . . .	9
2.6	Applikator . . . . .	10
2.7	HF-Fenster . . . . .	10
2.8	Kalorimeter . . . . .	13
3.1	Struktur der Programme . . . . .	17
3.2	Startfenster . . . . .	23
3.3	Hauptfenster von „Measurement“ . . . . .	25
3.4	Optionen von „Measurement“ . . . . .	28
3.5	Hauptfenster von „Calibration“ . . . . .	31
3.6	Optionen von „Calibration“ . . . . .	34
3.7	Temperaturoffsets . . . . .	36
3.8	AC-Calibration . . . . .	37
3.9	Hauptfenster von „Characteristics“ . . . . .	39
3.10	Optionen von „Characteristics“ . . . . .	41
3.11	Randwertbestimmung . . . . .	42
4.1	Spiegel mit integriertem Lochkoppler . . . . .	49
4.2	Prinzip der Lochkopplung . . . . .	51
4.3	Pickup-Antenne . . . . .	52
4.4	Koppeleinrichtungen . . . . .	55
4.5	Endgültiger Aufbau der Koppeleinrichtung im eingebauten Zustand . . . . .	55
5.1	Diodensignal am Spiegel mit und ohne Modenrührer . . . . .	58
5.2	Vergleichsmessung mit 4 bzw. 2 Liter Wasser als Last . . . . .	59
5.3	Vergleichsmessung mit und ohne Kondensator parallel zur Diode . . . . .	60
5.4	Vergleich der Signale mit und ohne Kondensator bzw. Mittelwertbildung . . . . .	61
5.5	Feldverteilung auf dem Spiegel . . . . .	62
5.6	Messung mit abgeklebten Koppellöchern . . . . .	64
5.7	Erste Messungen mit Pickup-Antenne . . . . .	66
5.8	Typischer Verlauf der Messwerte bei der Kalibrierung . . . . .	68
5.9	Kalibrationsversuche . . . . .	70
5.10	Kennlinie mit Richtkoppler zur Dämpfung der Leistung nach der Pickup-Antenne . . . . .	72

---

5.11 Beste gemessene Kennlinie . . . . .	72
5.12 S-Parameter der Koppeleinrichtung . . . . .	73
5.13 Messungen mit verschiedenen Antennenpositionen: Antenne an der Flanke des Strahls . . . . .	75
5.14 Messungen mit verschiedenen Antennenpositionen: Antenne im Maximum des Strahls . . . . .	75
5.15 Abfall der Diodenspannung im kälteren Zustand der Anlage: Verlauf der Diodenspannung . . . . .	77
5.16 Abfall der Diodenspannung im kälteren Zustand der Anlage: Verlauf der Kühlwassertemperatur . . . . .	77
5.17 Anstieg der Diodenspannung im wärmeren Zustand der Anlage: Verlauf der Diodenspannung . . . . .	78
5.18 Anstieg der Diodenspannung im wärmeren Zustand der Anlage: Verlauf der Kühlwassertemperatur . . . . .	78
5.19 Einfluss der Kühlung auf die Diodenspannung . . . . .	79
5.20 Durch Belichten von Thermopapier ermittelte Feldverteilungen . . . . .	80
5.21 Spektrum des Gyrotrons . . . . .	81
5.22 Kalibrierkennlinie im kalten und warmen Zustand . . . . .	83
5.23 Kalibrierkennlinie bei verschiedenen Einstellungen des Resonator-Magnetfeldes . . . . .	83
5.24 Vergleichsmessung mit großer und kleiner Last . . . . .	84