

**WISPDMMX - eine direkte Suche nach
Dunkler Materie mit einer 208 MHz
HERA-Kavität**

**(WISPDMMX - a direct WISPy Dark Matter
eXperiment with a 208 MHz HERA cavity)**

von

Sebastian Baum

geboren am

05.07.1990

Bachelor-Arbeit im Studiengang Physik
Universität Hamburg

2013

1. Gutachter: Prof. Dr. Dieter Horns
2. Gutachter: Dr. Andrei Lobanov

Zusammenfassung

Die Natur Dunkler Materie (DM) ist eine der zentralen aktuellen Fragen der Physik. Experimentelle Suchen nach Dunkler Materie konzentrierten sich in den letzten Jahrzehnten auf schwach wechselwirkende massereiche Teilchen (WIMPs). Nachdem die Experimente keinen eindeutigen Nachweis hervorbrachten, zieht eine als schwach wechselwirkende leichte (oder sub-eV) Teilchen (WISPs) bezeichnete Klasse von DM-Kandidaten zunehmend Aufmerksamkeit auf sich. Zahlreiche theoretisch gut motivierte Erweiterungen des Standardmodells, insbesondere stringtheoretische und supersymmetrische Ansätze, enthalten zusätzliche U(1)-Symmetrien, deren Eichbosonen als Hidden Photons (HP) bezeichnet werden. Gebrochene zusätzliche Symmetrien erzeugen als axionähnliche Teilchen (ALPs) bezeichnete pseudo-Nambu-Goldstone-Bosonen. Sowohl HPs als auch ALPs sind auch mit Massen weit unterhalb der eV-Skala Kandidaten für Kalte Dunkle Materie (CDM).

Das WISPy Dark Matter eXperiment (WISPD MX) ist ein an der Universität Hamburg durchgeführtes Experiment zur direkten Suche nach HP- und ALP-CDM mit einer 208 MHz HERA Kavität. WISPD MX verwendet als erstes haloskopisches Experiment einen Breitband-Messansatz und Stempeltuner, die neben dem Stimmen der Resonanzfrequenzen auch die Beeinflussung der Feldgeometrien der Eigenmoden ermöglichen.

In dieser Arbeit wird der experimentelle Aufbau von WISPD MX präsentiert und erste Ergebnisse von Hidden Photon DM-Suchen beschrieben. Zur Bestimmung der Feldverteilung der Eigenmoden wurden CST MWS Simulationen der Eigenmoden der Kavität durchgeführt. Weiterhin wurde die Effektivität verschiedener Verfahren zum Verstimmen der Eigenmoden durch Simulationen abgeschätzt. Die Messapparatur des Experimentes wurde in Betrieb genommen und eine Reihe von Messungen zur Charakterisierung durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass WISPD MX sensitiv auf HPs bzw. ALPs ist, die tief in den für CDM bevorzugten Parameterbereich hineinragen. Auf dem Massenbereich $0.8 - 2.0 \mu\text{eV}$ wird WISPD MX die Sensitivität vorhergehender Experimente um mehrere Größenordnungen verbessern.

Es wurden erste HP-Suchen bei den nominellen Resonanzfrequenzen der Kavität durchgeführt. Die bestimmten Ausschlussgrenzen werden ebenfalls in dieser Arbeit präsentiert.

Abstract

The nature of dark matter (DM) is one of the major questions in modern physics. Last decades' experimental DM-searches focused on weakly interacting massive particles (WIMPs) but have not produced conclusive evidence of their existence. Thus attention is shifting towards lighter candidates. The so-called weakly interacting slim (or sub-eV) particles (WISPs) are found in a wide range of possible extensions of the Standard Model, including string theories and supersymmetry (SUSY), which contain additional hidden U(1)-symmetries. Their gauge bosons are called hidden photons (HP). Additional broken symmetries produce pseudo-Nambu-Goldstone bosons called axion-like particles (ALPs). Recently, it has been shown that HPs as well as ALPs could well account for cold DM (CDM) while still having masses far in the sub-eV range.

The WISPy Dark Matter eXperiment (WISPDMX) at the University of Hamburg/DESY is a Sikivie-type "haloscope" experiment searching for HP and ALPs dark matter with a 208 MHz cavity of the same type as was used for proton acceleration at HERA. The novel aspect of WISPDMX is the use of multiple resonant modes via a broadband measurement technique and the implementation of active tuning off both the resonant frequency and the field structure of the modes with the help of a plunger assembly.

This work presents the experimental design of WISPDMX and describes the first results from WISPDMX's searches for HP dark matter. CST MWS simulations of the cavity's eigenmodes were carried out to assess WISPDMX's sensitivity as well as the effectivity of various frequency tuning schemes under consideration. The detection apparatus was assembled and several test-measurements were performed to characterize the experiment. The results show that WISPDMX will reach well into the region of the WISP-parameter-space preferred for ALPs or HP constituting cold dark matter, thus signifying a pioneering effort searching the nature of Dark Matter in the $0.8 - 2.0 \mu\text{eV}$ range of particle mass. First searches at the nominal resonant frequencies of the cavity were carried out and derived limits are presented.

Erklärung zur Eigenständigkeit

Hiermit bestätige ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbständig verfasst wurde und ich keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel - insbesondere keine im Quellenverzeichnis nicht benannten Internet-Quellen - benutzt habe und die Arbeit von mir vorher nicht einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht wurde. Die eingereichte schriftliche Fassung entspricht der auf dem elektronischen Speichermedium. Ich bin damit einverstanden, dass die Bachelorarbeit veröffentlicht wird.

Sebastian Baum, Hamburg, den 4. Dezember 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Dunkle Materie	2
1.1.1	Hinweise auf Dunkle Materie	3
1.1.2	MOND, MOG, ... ?	6
1.1.3	DM-Kandidaten I	7
1.2	DM-Kandidaten II: Axionen und ALPs	10
1.2.1	Axionen und das starke CP-Problem	10
1.2.2	ALPs	12
1.2.3	ALPs als DM-Kandidat	12
1.2.4	Primakoff-Prozess	13
1.3	DM Kandidaten III: Hidden Photons	13
1.4	Kosmologische und astrophysikalische Hinweise auf WISPs	14
1.4.1	Energieverlust von Sternen	14
1.4.2	Transparenz des Universums	16
1.4.3	Photonen aus ALPs Zerfällen	16
1.4.4	Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)	16
1.4.5	Nukleosynthese während des Urknalls	17
1.5	Experimentelle WISP-Suchen	17
1.5.1	Beschleuniger	17
1.5.2	Abweichung vom Coulombschen Gesetz	17
1.5.3	Laser-Polarisations Experimente	18
1.5.4	Light Shining Through a Wall	19
1.5.5	Helioskope	19
1.5.6	Haloskope	20
2	WISPDMM	28
2.1	208 MHz Kavität	28
2.1.1	Verstimmung der Resonanzfrequenzen	29
2.2	CST Simulationen	32
2.2.1	Simulationen ohne Tuning	34
2.2.2	Simulationen mit Stempeltunern	35

2.2.3	Tuning durch Deformation	40
2.3	Messapparatur	41
2.3.1	Frequenzstabilität	43
2.3.2	Rauschleistung der Messapparatur	44
2.4	Magnete	48
2.5	Abschätzung der Sensitivität von WISPDMX	49
2.5.1	Derzeitige Sensitivität von WISPDMX	52
3	Erste Hidden Photon Messung	53
4	Zusammenfassung und Ausblick	55
	Literaturverzeichnis	57
	Anhang	61

Kapitel 1

Einleitung

Das Standardmodell (SM) der Teilchenphysik sowie die allgemeine Relativitätstheorie bilden nach wissenschaftlichem Konsens die Grundlage unserer Weltanschauung und sind mächtige Werkzeuge zur Beschreibung physikalischer Vorgänge. Zahlreiche theoretische Überlegungen und experimentelle Beobachtungen zeigen uns jedoch die Grenzen dieser Modelle auf und machen deutlich, dass wir keinesfalls über eine vollständige Beschreibung der physikalischen Welt verfügen. Beispielfhaft seien hier die fehlende quantenfeldtheoretische Beschreibung der Gravitation, die Feinabstimmung der Naturkonstanten („fine-tuning-Problem“) sowie Dunkle Materie (DM) und Dunkle Energie genannt.

Für Dunkle Materie existieren zahlreiche gut motivierte theoretische Modelle sowie (geplante) Experimente zu ihrem Nachweis. Die vorliegende Arbeit diskutiert das Weakly Interacting Slim Particle Dark Matter eXperiment (WISPD MX), ein haloskopisches Experiment zur Suche nach WISPy-DM mit einer 208 MHz HERA Kavität. Im ersten Kapitel wird zunächst die physikalische Motivation Dunkler Materie dargelegt, anschließend DM-Kandidaten vorgestellt und ihre experimentelle Evidenz diskutiert. Hierbei wird insbesondere auf WISPy-DM eingegangen und die physikalischen Grundlage von WISPD MX besprochen. Das zweite Kapitel beschreibt den physikalischen Aufbau des Experiments. Es werden Simulationsergebnisse zur Abschätzung der Sensitivität und eine Reihe von Messungen präsentiert, die zur Charakterisierung des Experiments durchgeführt wurden. Das dritte Kapitel enthält erste Messergebnisse und daraus kalkulierte Ausschlussgrenzen auf Hidden-Photon-DM.

1.1 Dunkle Materie

Astrophysikalische Beobachtungen des Universums zeigen, dass entweder eine neue Gravitationstheorie zur Beschreibung notwendig ist oder die sichtbare Materie lediglich einen kleinen Teil der gesamten Masse im Universum konstituieren kann. Die Gültigkeit der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie ist aber breiter Konsens in der Wissenschaft und durch zahlreiche experimentelle Beobachtungen belegt. Alternative Theorien wie Mo-

dified Newtonian Dynamics (MOND) oder Modified Gravity (MOG) wurden zwar bisher nicht ausgeschlossen, haben aber auch keine positive Evidenz. Die Existenz „Dunkler“, d.h. nur sehr schwach mit SM-Materie wechselwirkender Materie ist hingegen wissenschaftlicher Konsens.

1.1.1 Hinweise auf Dunkle Materie

Astrophysikalische Beobachtungen auf Längenskalen von einzelnen Galaxien bis zum gesamten Universums liefern starke Hinweise auf die Existenz Dunkler Materie. Einige besonders prägnante Beobachtungen werden im Folgenden dargestellt. Aktuelle Reviews können in [1–3] gefunden werden.

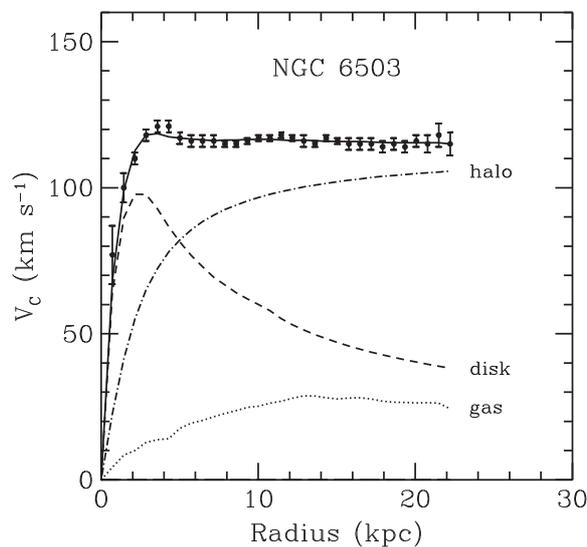


Abbildung 1.1: Rotationskurve der Galaxie NGC 6503. Die gepunkteten, gestrichelten und gepunkt-gestrichelten Linien stellen die Beiträge der Massenanteile des Gases (gas), der Scheibe (disk) sowie der DM-Halo (halo) dar. Aus [2].

Rotationskurven von Galaxien: Als Rotationskurve einer Spiralgalaxie wird die Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit vom Abstand zum Galaxiezentrum $v(r)$ bezeichnet. Typische Rotationskurven weisen für große Radii, d.h. bis an den Rand der sichtbaren Galaxiescheibe und weit darüber hinaus, einen flachen Verlauf der Rotationsgeschwindigkeit auf (s. Abb. 1.1).

Für die Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit vom Radius gilt in Newtonscher Dynamik

$$v(r) = \sqrt{\frac{G_N M(r)}{r}} \quad (1.1)$$

mit der innerhalb des Radius r eingeschlossenen Masse $M(r)$ und der Gravitationskonstante G_N . Für Radii größer als den der sichtbaren Galaxiescheibe gilt ohne Dunkle Ma-

terie offensichtlich $M(r) = \text{const.}$, also $v(r) \propto \sqrt{1/r}$. Um den flachen Verlauf der Rotationsgeschwindigkeit zu erklären, wird ein Halo aus Dunkler Materie mit $M_{DM}(r) \propto r$ benötigt (vgl. [2]).

Da sowohl Rotationskurven als auch sichtbare Massenkonzentration durch astrophysikalische Beobachtungen an zahlreichen Spiralgalaxien gut zugänglich sind und sich aus den Rotationskurven mittels Gleichung 1.1 direkt auf die Massenkonzentration schließen lässt, können aus diesen Daten lokale DM-Dichten und typische DM-Massendichten in Spiralgalaxien berechnet werden. Die lokale DM-Dichte in unserem Sonnensystem wurde hieraus zu $\rho_{DM}(r_0) = 0.39 \pm 0.03 \text{ GeV/cm}^{-3}$ [4] und die Geschwindigkeitsdispersion zu $\sigma_v = 286 \pm 7 \text{ km/s}$ [5] bestimmt¹.

Kinematik in Galaxiehaufen: Durch Beobachtung des Coma-Galaxiehaufens gelang es Zwicky 1933, die ersten Hinweise auf die Existenz Dunkler Materie zu finden. Gemäß des Virialsatzes gilt für die mittlere potentielle Energie $\overline{E_{pot}}$ und die kinetische Energie $\overline{E_{kin}}$ eines abgeschlossenen mechanischen Systems im stationären Zustand

$$2 \overline{E_{kin}} + \overline{E_{pot}} = 0 \quad (1.2)$$

Zwicky leitet für den Coma-Haufen ein Verhältnis $M_{DM}/M_{leucht.} = 400$ von Dunkler zu leuchtender Materie ab [6].

Weitere Untersuchungen von Galaxiehaufen durch Methoden wie die von Zwicky verwandte Geschwindigkeitsdispersion oder Ausnutzung des Gravitationslinseneffektes stützen Zwickys Ergebnisse, wobei der Coma-Haufen ein besonders krasses Massenverhältnis von Dunkler zu leuchtender Materie aufweist. Im Mittel findet man $\Omega_{DM} \simeq 0.2 - 0.3$ ² [2].

Bullet-Cluster 1E 0657-558: Einen spektakulären Hinweis auf die Existenz Dunkler Materie liefert der unter dem Namen „Bullet Cluster“ bekannte Galaxiehaufen 1E0657-558. Die beiden Unterhaufen des Bullet Clusters kollidierten vor der (auf astrophysikalische Skalen) kurzen Zeit von 100 Millionen Jahren. Bei einer solchen Kollision durchdringen sich die Galaxien praktisch reibungsfrei, während das interstellare Gas einen Kollisionsdruck verspürt. Nach der Kollision erwartet man also bis zum Wiedererreichen des Gleichgewichts eine Verschiebung der Massezentren der Galaxien von dem der ihnen zugehörigen Gaswolken. Der Verlauf des Gravitationspotentials lässt sich durch Ausnutzung des Gravitationslinseneffektes nachzeichnen (s. [7]). Ohne Dunkle Materie sollte mit dem für den Bullet Cluster gemessenen Massenverhältnis $2,5 \lesssim M_{Gas}/M_{Galaxien} \lesssim 15$ das Gra-

¹Catina & Ullio berechnen $\rho_{DM}(R_0) = 0.389 \pm 0.025 \text{ GeV/cm}^{-3}$ und $\sigma_v = 287.0 \pm 5.2 \text{ km/s}$ für einen NFW DM-Dichteverlauf und $\rho_{DM}(R_0) = 0.385 \pm 0.027 \text{ GeV/cm}^{-3}$ und $\sigma_v = 285.1 \pm 5.7 \text{ km/s}$ für das Einasto Modell. (s. [4] und [5] für Details). Für die Zwecke dieser Arbeit verwenden wir im Folgenden $\rho_{DM}(r_0) = 0.39 \pm 0.03 \text{ GeV/cm}^{-3}$ und $\sigma_v = 286 \pm 7 \text{ km/s}$.

²Der zur Beschreibung der Häufigkeit einer Substanz i im Universum verwandte Parameter Ω_i beschreibt das Verhältnis der Massendichte ρ_i zu der ein flaches Universum charakterisierenden kritischen Massendichte ρ_c : $\Omega_i = \rho_i/\rho_c$.

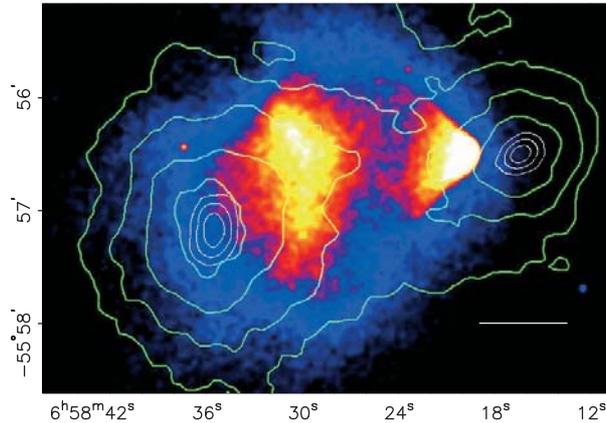


Abbildung 1.2: Aufnahme des Bullet Clusters durch das Röntgenteleskop des Chandra-Satelliten. Die grünen Konturen zeigen die κ -Rekonstruktionen aus dem schwachen Gravitationslinseneffekt mit der äußersten Kontur bei $\kappa = 0.16$ und $\Delta(\kappa) = 0.07$. Der Parameter κ ist proportional zur Oberflächenmassendichte. Die weißen Konturen repräsentieren den Fehler auf die Position der Maxima von κ (68.3%, 95.5% und 99.7% Konfidenzintervall). Der weiße Maßstab repräsentiert 200 kpc in der Entfernung des Galaxiehaufens. Aus [7].

gravitationspotential des Galaxiehaufens im Wesentlichen mit dem Potential der Gaswolke zusammenfallen. Untersuchungen des Bullet Cluster (s. Abb. 1.2) zeigen aber eine Abweichung der gravitativen Zentren auf 8σ -Niveau von den Massezentren der zugehörigen Gaswolken [7]. Dies lässt sich durch die Annahme Dunkler Materie erklären, da sich diese bei der Kollision der Galaxiehaufen wechselwirkungsfrei durchdringt. Das Zusammenfallen der galaktischen Materie mit dem gravitativen Potential stützt diese These; Dunkle Materie und Galaxien sollten beim Durchdringen der Galaxiehaufen gleiche Trajektorien zeigen.

Kosmischer Mikrowellenhintergrund: Der 1964 von Penzias und Wilson erstmals gemessene kosmische Mikrowellenhintergrund (CMB) ermöglicht einen Blick in die frühe Phase des Universums und liefert Daten zur Überprüfung kosmologischer Theorien. Insbesondere erlaubt die Untersuchung der CMB-Anisotropie (s. Abb. 1.3) direkte Rückschlüsse auf die Strukturbildung im Universum.

Die kürzlich veröffentlichte Auswertung der neunjährigen Wilkinson Microwave Anisotropy Probe-Mission (WMAP) [8, 9] bestätigt das Λ CDM-Modell³ der Kosmologie. Die Anisotropie des CMB lässt sich nicht alleine mit SM-Materie erklären, sondern erfordert Dunkle Materie.

Der Fit des Λ CDM-Modells an die experimentellen Daten der WMAP-Mission ergibt

³Das Λ CDM-Modell ist eine Parametrisierung der Urknall-Kosmologie. Zu seinen wesentlichen Voraussetzungen gehören die Gültigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie, die Annahme einer kosmologischen Konstante Λ , die mit Dunkler oder Vakuum-Energie verknüpft ist, sowie die Existenz Kalter Dunkler Materie (CDM). Details können in [9] und darin enthaltenen Referenzen gefunden werden.

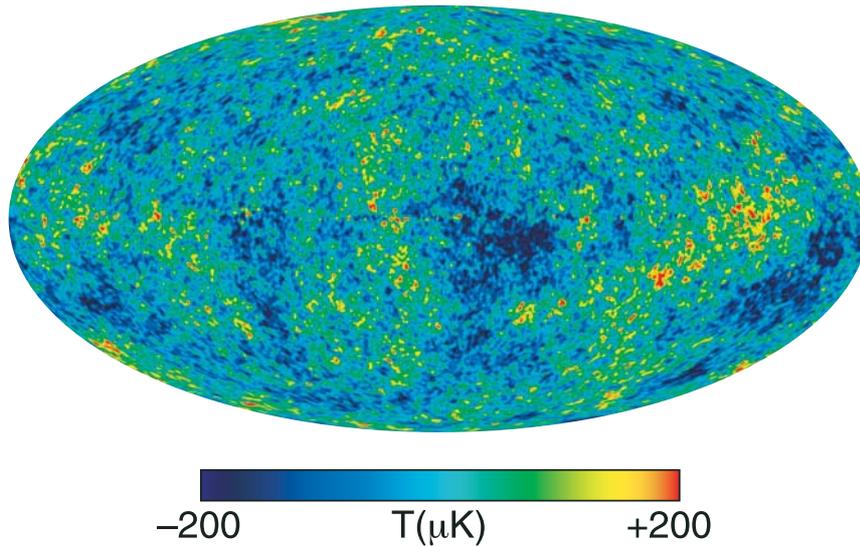


Abbildung 1.3: Anisotropie des CMB aus neunjähriger Datennahme des WMAP-Experiments. Aus [8].

hervorragende Übereinstimmung [8, 9] und ist konsistent mit den Ergebnissen anderer astrophysikalischer Experimente. Die Endergebnisse der WMAP-Kollaboration und die Daten nach Kombination mit weiteren CMB-Experimenten sind in Tab. 1.1 dargestellt. Im Gegensatz zu Beobachtungen an Galaxien und Galaxiehaufen, die eine Bestimmung des lokalen Masseanteils erlauben, können aus Beobachtungen des CMB direkte Schlüsse auf den Anteil Dunkler Materie an der Gesamtmasse des Universums gezogen werden. Nach den WMAP-Ergebnissen bestehen lediglich 4.6 % der Masse im Universum aus baryonischer Materie, 24.0 % aus Dunkler Materie und 71.4 % aus Dunkler Energie. Der Anteil Dunkler Materie ist in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den Beobachtungen von Galaxiehaufen $\Omega_{DM} \sim 0.2 - 0.3$ (s. oben).

Parameter	WMAP	Kombination
Alter des Universums: t_0 [Gyr]	13.74 ± 0.11	13.772 ± 0.059
Hubble-Konstante: H_0 [$\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$]	70.0 ± 2.2	69.32 ± 0.080
baryonischer Massenanteil: Ω_b	0.0463 ± 0.0024	0.04628 ± 0.00093
DM-Massenanteil: Ω_{DM}	0.233 ± 0.023	$0.2402^{+0.0088}_{-0.0087}$
Λ - Massenanteil: Ω_Λ	0.721 ± 0.024	$0.7135^{+0.0095}_{-0.0096}$

Tabelle 1.1: Ausgewählte Parameter des Fits eines sechsexparametrischen Λ CDM-Modells an Daten der WMAP-Mission und nach Kombination mit weiteren CMB-Experimenten (WMAP + eCMB + BAO + H_0) [9].

1.1.2 MOND, MOG, ... ?

Das Λ CDM-Standardmodell der Kosmologie setzt die Gültigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie voraus und benötigt zur Erklärung der astrophysikalischen Beobachtungen

Dunkle Materie und Dunkle Energie. Alternative Ansätze wie Modified Newtonian Dynamics (MOND) oder Modified Gravity (MOG) erklären diese Beobachtungen ohne die Annahme Dunkler Materie oder Dunkler Energie durch eine Abweichung der Dynamik bzw. des Gravitationsgesetzes auf galaktischen Skalen. Durch eine laufende Kopplungskonstante gelingt es z.B. MOG, die beobachteten Rotationskurven von Galaxien und die Dynamik in Galaxiehaufen zu erklären. Insbesondere die Beobachtung des Bullet-Clusters schließt jedoch einfache alternative Modelle aus [7]. Kürzlich gelang es, durch Implementierung komplizierterer Raum-Zeit-Geometrien auch in MOG und MOND die Phänomenologie des Bullet Clusters zu erklären [10, 11].

Eine Besprechung dieser Theorien geht über den Rahmen dieser Arbeit hinaus. Es sei erwähnt, dass modifizierte Gravitationstheorien nicht grundsätzlich die Existenz Dunkler Materie ausschließen, wenn dies auch die Intention ihrer Entwicklung ist.

1.1.3 DM-Kandidaten I

Während die Existenz Dunkler Materie aufgrund der zahlreichen Hinweise wissenschaftlicher Konsens ist, ist die Frage ihrer Natur bisweilen nicht geklärt. DM-Kandidaten müssen eine Reihe von Eigenschaften besitzen: Sie müssen auf kosmologischen Zeitskalen stabil sein, nur sehr schwach mit elektromagnetischer Strahlung wechselwirken, in der geforderten Massendichte produziert werden und existieren können und „kalt“, d.h. nichtrelativistisch, sein.

In der Literatur wird eine Vielzahl möglicher DM-Kandidaten diskutiert, die wichtigsten werden im Folgenden besprochen. Die für diese Arbeit besonders wichtigen Axionen, Axion ähnlichen Teilchen sowie Hidden Photons werden gesondert in 1.2 und 1.3 besprochen.

Neutrinos: SM-Neutrinos sind natürliche DM-Kandidaten: Sie nehmen lediglich an der gravitativen sowie der schwachen Wechselwirkung teil und sind die einzigen DM-Kandidaten, deren Existenz experimentell nachgewiesen ist. Neutrinos wurden im Standardmodell zunächst als masselos betrachtet. Die in Experimenten wie Super-Kamiokande oder OPERA nachgewiesene Neutrinooszillation erfordert aber massive Neutrinos. Die Neutrino-Massendichte im Universum ist durch

$$\Omega_\nu = \frac{1}{h^2} \frac{\sum_i m_{\nu_i}}{93 \text{ eV}} \quad (1.3)$$

mit der reduzierten Hubblekonstanten $h = \frac{H_0}{100} \cdot \frac{\text{s Mpc}}{\text{km}} = 0.6932$, gegeben [3].

Mit den Ergebnissen des Tritium β -Zerfallsexperiment KATRIN (Mainz/Troitsk) $m_\nu < 2.05 \text{ eV}$ (95 % CL⁴) folgt $\Omega_\nu < 0.14$. Von der nächsten Generation des KATRIN-Experiments werden um eine Größenordnung verbesserte Sensitivitäten erwartet.

Die Auswertung der WMAP-Mission ergibt aus der Analyse der CMB-Anisotropie ei-

⁴Confidence Limit - Konfidenzintervall

ne obere Grenze von $m_\nu < 1.3 \text{ eV}$ (95 % CL) und in Kombination mit weiteren CMB-Experimenten $m_\nu < 0.44 \text{ eV}$ (95 % CL) [9]. Damit ergibt sich $\Omega_\nu < 0.03$.

Neutrinos können folglich nur einen geringen Teil der DM-Dichte $\Omega_{DM} \simeq 0.23$ erklären. Ein weiteres Argument gegen Neutrinos als DM-Kandidat ist ihre relativistische Geschwindigkeit; sie wären der heißen DM zuzurechnen. Zur Erklärung der Strukturbildung im Universum benötigt das Λ CDM-Modell jedoch Kalte DM, da relativistische DM nicht auf galaktischen Größenskalen gebunden ist [2].

Sterile Neutrinos: Sterile Neutrinos sind hypothetische neutrinoähnliche Teilchen, die lediglich durch kinematisches Mischen mit SM-Teilchen wechselwirken. Um einen signifikanten Anteil der CDM erklären zu können, müssen sie Massen $> 10 \text{ keV}$ haben [2].

Sterile Neutrinos lassen sich beispielsweise durch Hinzufügen rechtshändiger Neutrinos zum Standardmodell implementieren. Im Rahmen der Theorie der elektroschwachen Vereinheitlichung würden diese Neutrinos lediglich gravitativ und durch kinematisches Mischen mit SM-Teilchen wechselwirken. Gegenüber anderen vorgeschlagenen Erweiterungen des Standardmodells haben sterile Neutrinos den Vorteil, keine Erweiterung der Eichgruppe des Standardmodells zu erfordern. Mittels eines solchen ν MSM (The neutrino Minimal Standard Modell) mit drei sterilen Neutrinos beanspruchen z.B. Canetti *et al.* nicht nur DM, sondern auch weitere zentrale ungelöste Probleme der Physik wie die Barionenasymmetrie erklären zu können [12].

Eine experimentell gut zugängliche Signatur steriler Neutrinos ist ein schmalbandiges Röntgensignal aus dem Zerfall steriler Neutrinos ν_s in SM-Neutrinos ν_{SM} : $\nu_s \rightarrow \nu_{SM} + \gamma$ mit $E(\gamma) = \frac{M(\nu_s)}{2}$ ⁵. Bisherige Suchen konnten keine eindeutigen Signaturen nachweisen.

MACHOs: Massive Astrophysical Compact Halo Objects (MACHOs) wird eine Klasse möglicher kompakter astronomischer Gebilde in den äußeren Halos von Galaxien genannt. Sie bestehen aus gewöhnlicher baryonischer Materie und emittieren (nahezu) keine elektromagnetische Strahlung, wodurch sie zu DM-Kandidaten werden. MACHOs können unter anderen Primordiale Schwarze Löcher, Neutronensterne oder Braune Zwerge sein. Experimentell Signatur von MACHOs wäre ihr Gravitationslinseneffekt bei ihrer Bewegung durch die Sichtlinie zu gewöhnlichen Sternen oder im Fall Primordialer Schwarzer Löcher Hawking-Strahlung.

Die MACHO, EROS und OGLE Kollaborationen untersuchten die Magellansche Wolken nach Hinweisen auf MACHOs unter Ausnutzung des Gravitationslinseneffektes. Die MACHO-Kollaboration zog eine Ausschlussgrenze von $M_{MACHOs}/M_{DM} < 0.4$, während das obere Limit der EROS-Kollaboration mit $M_{MACHOs}/M_{DM} < 0.08$ stärker ist [1]. MACHOs können folglich lediglich einen geringen Teil der benötigten DM erklären.

⁵Wenn nicht anders vermerkt, werden in dieser Arbeit natürliche Einheiten mit $\hbar = c = 1$ verwendet.

WIMPs: Weakly Interacting Massive Particles χ (WIMPs) standen im Zentrum der DM-Forschung der vergangenen Jahrzehnte. Sie werden durch Massen zwischen 10 GeV und einigen TeV sowie Wirkungsquerschnitten mit SM-Materie von der Größenordnung der schwachen Wechselwirkung charakterisiert. Unter diesen Annahmen ergibt sich in Λ CDM-Standardkosmologie eine WIMP-Dichte, die der geforderten DM-Dichte entspricht. Ein offensichtlicher WIMP-Kandidat sind schwere (sterile) Neutrinos (s. o.). Weitere Kandidaten lassen sich z.B. in supersymmetrischen (SUSY) Erweiterungen des Standardmodells finden. In R-Paritätserhaltenden SUSY-Modellen kann das leichteste supersymmetrische Teilchen nicht in SM-Teilchen zerfallen und ist somit ein generischer WIMP-Kandidat. Der meistuntersuchte Kandidat ist das leichteste Neutralino, eine Mischung der supersymmetrischen Partner der Eichbosonen des Standardmodells und der Higgs-Bosonen. Die bisherigen LHC-Ergebnisse mit Schwerpunktsenergien bis 8 TeV schließen aber die einfachsten SUSY-Modelle aus.

Indirekte Suchen nach Zerfallsprodukten aus WIMP-WIMP-Annihilation konzentrieren sich auf Röntgensignale oder Antimaterie. Die H.E.S.S.-Kollaboration und die FERMI/LAT-Mission konnten beispielsweise Hinweise im Röntgenspektrum finden. Die Erklärung der Daten durch WIMPs ist jedoch nur mit großen Anpassungen der Modelle möglich, weiterhin ist der Standardmodell-Untergrund nicht ausreichend verstanden, so dass bisherige Messungen keine eindeutigen Hinweise auf WIMPs liefern (s. [1]).

Zum direkten Nachweis wurden zahlreiche Experimente unternommen, die nach Signaturen elastischer Streuung von WIMPs an Atomkernen suchen. Die Ergebnisse der Experimente sind widersprüchlich:

Die DAMA/LIBRA-Kollaboration berichtet den Nachweis von WIMPs mit einer Masse von $M_\chi \simeq 50$ GeV und einem WIMP-Proton Wirkungsquerschnitt von $\sigma_{\chi p} \simeq 7 \cdot 10^{-6}$ pb bzw. eine zweite Lösung kleinerer Masse mit $M_\chi \simeq 6 \dots 10$ GeV und $\sigma_{\chi p} \simeq 10^{-3}$ pb [1]. Aufgrund der Relativbewegung der Erde zum lokalen DM-Halo wird für ein WIMP-Signal eine jährliche Modulation des Signals erwartet. Aus der beobachteten Modulation schließt DAMA/LIBRA auf den Nachweis eines DM-WIMP-Signals mit einer Signifikanz von 9.3σ [13].

Die Ergebnisse des DAMA/LIBRA Experiments werden u.a. von der XENON100-Kollaboration angegriffen, die die zurzeit stärksten Ausschlussgrenzen auf den WIMP-Proton Wirkungsquerschnitte veröffentlicht hat [14]. Die bisherigen Ergebnisse der direkten WIMP-Suchen sind in Abb. 1.4 dargestellt.

Die widersprüchlichen Ergebnisse der indirekten und direkten Suchen nach WIMPs zeigen, dass die theoretischen Modelle und die aus ihnen folgenden experimentellen Signaturen sowie die Experimente selber noch nicht ausreichend verstanden sind, um eindeutige Aussagen über die Existenz von WIMPs zu treffen.

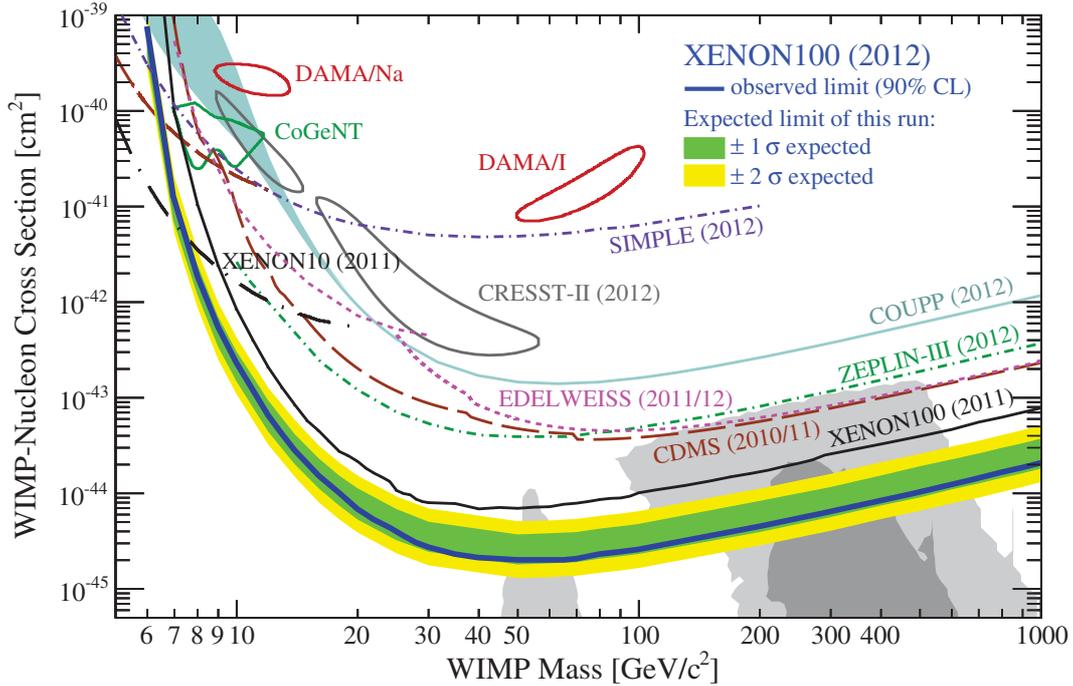


Abbildung 1.4: Obere Ausschlussgrenzen auf den spinunabhängigen WIMP-Nukleonen Wirkungsquerschnitt. Die durchgezogene blaue Linie repräsentiert die Ausschlussgrenzen der XENON100-Kollaboration, das grüne (gelbe) Band repräsentiert das 1σ (2σ) Fehlerband. Die übrigen Linien repräsentieren die Ausschlussgrenzen weiterer Experimente. Weiterhin sind die 2σ -Fehlerellipsen der WIMP-Nachweise der DAMA, CoGeNT und CRESST Experimente eingezeichnet. Die grauen Flächen zeigen die 1σ bzw. 2σ -Bereiche des von supersymmetrischen Theorien bevorzugten Parameterraumes. Aus [14]

1.2 DM-Kandidaten II: Axionen und ALPs

Neben WIMPs wird eine Klasse leichter Teilchen mit möglichen Massen zwischen 10^{-12} eV und 10^6 eV und sehr kleinen Kopplungskonstanten mit SM-Teilchen vorgeschlagen, die Weakly Interacting Slim (oder sub-eV) Particles (WISPs). Zu ihnen gehören u.a. Axionen, axionähnliche Teilchen (axion-like particles, ALPs), Hidden Photons (HP), Teilchen mit Miniladungen (mini-charged particles), Kaluza-Klein Moden und Chameleons (s. [15–19] für aktuelle Reviews). Im Folgenden werden die theoretisch am stärksten motivierten und experimentell meistuntersuchtesten Kandidaten Axionen/ALPs und HPs besprochen.

1.2.1 Axionen und das starke CP-Problem

Axionen wurde ursprünglich 1977 von Peccei und Quinn zur Lösung des starken CP-Problems vorgeschlagen [21]: Die quantenfeldtheoretische Beschreibung der starken Wechselwirkung, die Quantenchromodynamik (QCD), erlaubt einen CP-Symmetrie verletzenden Term [17]

$$\mathcal{L} \supset \frac{\alpha_s}{8\pi} \theta G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a,\mu\nu} \quad (1.4)$$

mit der starken Kopplungskonstante α_s , dem Gluon-Feldstärketensor G und einem die CP-Verletzung parametrisierenden Parameter θ .

θ bzw. der effektive Parameter $\bar{\theta} = \theta + \arg \det M \in (-\pi, \pi)$ mit der Quarkmassenmatrix M ist ein freier Parameter des Standardmodells und muss experimentell bestimmt werden. Ein auf die CP-Verletzung besonders sensibles Experiment ist die Messung des elektrischen Dipolmoments des Neutrons d_n , für das

$$|d_n| \sim \frac{e}{m_n} \frac{m_q}{m_n} |\bar{\theta}| \sim 10^{-16} |\bar{\theta}| e \text{ cm} \quad (1.5)$$

mit der Neutronenmasse m_n , der Masse eines leichten Quarks m_q und der elektrischen Einheitsladung e gilt [17]. Aus experimentellen Ausschlussgrenzen auf $|d_n| < 0.29 \cdot 10^{-25} e \text{ cm}$, (90 % CL) [1] ergibt sich:

$$|\bar{\theta}| \lesssim 10^{-10}. \quad (1.6)$$

Als starkes CP-Problem wird die fehlende theoretische Erklärung für den extrem kleinen Wert der CP-Verletzung der starken Wechselwirkung bei einem theoretisch erlaubten Wertebereich von $\bar{\theta} \in (-\pi, \pi)$ bezeichnet.

Peccei und Quinn fanden eine Lösung des starken CP-Problems durch Einführung einer spontan gebrochenen U(1)-Symmetrie („PQ-Symmetrie“): Sie führten anstelle des Parameters $\bar{\theta}$ ein dynamisches skalares Feld ϕ_A ein [17, 21]. Der CP-verletzende Gluon-Gluon Term der QCD-Lagrangedichte schreibt sich damit [1]

$$\mathcal{L} \supset \left(\bar{\theta} - \frac{\phi_A}{f_\phi} \right) \frac{\alpha_s}{8\pi} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a,\mu\nu}. \quad (1.7)$$

Durch die Kopplung des Feldes an die Gluonen bricht die PQ-Symmetrie. Nichtperturbative QCD-Effekte induzieren ein Potential ϕ_A mit Minimum an $\phi_A = \bar{\theta} f_\phi$, sodass effektiv der CP-verletzenden θ -Term in der QCD-Lagrangedichte (Gleichung 1.4) entfällt.

Weinberg und Wilczek zeigten unabhängig, dass aus der Brechung der PQ-Symmetrie ein pseudo-Nambu-Goldstone-Boson resultiert, welches Wilczek „Axion“ taufte [22]. Die Masse des Axions, welches wir wieder mit ϕ bezeichnen, lässt sich aus seinen Kopplungen an Quarks durch

$$m_\phi = \frac{m_\pi f_\pi}{f_\phi} \frac{\sqrt{m_u m_d}}{m_u + m_d} \simeq 0.6 \text{ meV} \left(\frac{10^{10} \text{ GeV}}{f_\phi} \right) \quad (1.8)$$

mit den Massen des π -Mesons bzw. der u- und d-Quarks m_π , m_u und m_d sowie der Pionen-Zerfallskonstanten f_π bestimmen [17]. Die Kopplung des Axions an Photonen wird üblicherweise durch

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4} g_{\phi\gamma} \phi F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} = g_{\phi\gamma} \phi \vec{E} \cdot \vec{B} \quad (1.9)$$

mit dem elektromagnetischen Feldstärketensor $F_{\mu\nu}$ und dem elektrischen (magnetischen) Feld \vec{E} (\vec{B}) parametrisiert. Für die Kopplungskonstante gilt [17]

$$g_{\phi\gamma} = \frac{\alpha}{2\pi f_\phi} \left(C_{\phi\gamma} - \frac{2}{3} \frac{m_u + 4m_d}{m_u + m_d} \right) \sim 10^{-13} \text{ GeV}^{-1} \left(\frac{10^{10} \text{ GeV}}{f_\phi} \right), \quad (1.10)$$

wobei $C_{\phi\gamma}$ ein modellabhängiger dimensionsloser Parameter der elektromagnetischen Anomalie des Noether-Stroms des Axionenfelds und α die Feinstrukturkonstante ist.

1.2.2 ALPs

Analog zu dem aus der Brechung der PQ-Symmetrie resultierenden Axion erhält man aus der Brechung weiterer Symmetrien als ALPs bezeichnete pseudo-Nambu-Goldstone Bosonen mit axionähnlichen Eigenschaften. Insbesondere in stringtheoretischen Erweiterungen des SM finden sich zahlreiche (gebrochene) Symmetrien [15].

Aufgrund der Vielzahl möglicher Theorien kann für die Masse resultierender ALPs sowie deren Kopplung an Photonen keine generelle Aussage wie für PQ-Axionen gemacht werden. Anstelle der Abhängigkeit der Masse und Kopplung von der Brechungsskala f_ϕ ist vielmehr die gesamte $m_\phi - g_{\phi\gamma}$ Ebene im Massenbereich $10^{-12} \dots 10^6$ eV und $g_{\phi\gamma} \lesssim 10^{-6} \text{ GeV}^{-1}$ zu untersuchen.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass neben Theorien mit pseudoskalaren ALPs auch Theorien entwickelt wurden, welche skalare ALPs vorhersagen. Für diese erhält man eine ähnliche Phänomenologie von $\phi \leftrightarrow \gamma + \gamma$ Kopplungen, allerdings mit der Lagrange-dichte [20]

$$\mathcal{L} \supset \frac{g_{\phi\gamma}}{4} \phi F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} = g_{\phi\gamma} \phi \left(\vec{B}^2 - \vec{E}^2 \right). \quad (1.11)$$

1.2.3 ALPs als DM-Kandidat

Für kleine Massen $m_\phi \lesssim \text{eV}$ und Kopplung an SM-Materie sind ALPs⁶ WISP-Kandidaten. Werden ALPs thermisch während des Urknalls produziert, haben sie aufgrund ihrer geringen Masse relativistische Geschwindigkeit und können folglich nicht zur Kalten Dunklen Materie beitragen. Durch den *vacuum misalignment mechanism* können ALPs aber auch mit kleinen Massen nichtrelativistisch produziert werden und sind damit CDM-Kandidat. Der *misalignment mechanism* wurde im Rahmen der PQ-Theorie entwickelt: Das Feld befindet sich nach der Inflation des Universums in einem Anfangszustand ϕ_i , der weit vom Minimum des Potentials ϕ_0 entfernt ist. In der frühen Phase des Universums entspricht die Entwicklung des Feldes $\phi(t)$ der eines überkritisch gedämpften Oszillators; das Feld ist eingefroren. Nach einer kritischen Zeit wird die Dämpfung jedoch unterkritisch und das Feld relaxiert sich durch Oszillation um sein Minimum ϕ_0 durch schwach gedämpfte Oszillationen (vgl. Higgs-Mechanismus). Aus der spontanen Symmetriebrechung folgen

⁶Im Folgenden sind mit ALPs auch QCD-Axionen gemeint

nichtrelativistische pseudo-Nambu-Goldstone Bosonen als CDM-Kandidaten.

In stringtheoretischen Erweiterungen des Standardmodells finden sich weitere Produktionsmechanismen, die ALPs zu CDM-Kandidaten machen (s. [18] und darin enthaltene Referenzen).

Der für CDM attraktive Parameterraum mit Ausschlussgrenzen aus bisherigen ALPs-Suchen (s. Abschnitt 1.5) und Hinweisen aus astrophysikalischen Beobachtungen (s. Abschnitt 1.4) ist in Abb. 1.5 (oben) dargestellt.

1.2.4 Primakoff-Prozess

An der in Gleichung 1.9 gegebenen Parametrisierung der $\phi \leftrightarrow \gamma + \gamma$ Kopplung wird deutlich, dass externe magnetische oder elektrische Feldern eines der beiden Photonen als virtuelles Photon zur Verfügung stellen können. In externen Feldern kann diese Kopplung somit effektiv als ALPs \leftrightarrow Photon Oszillation $\phi + \vec{B}(\vec{E}) \leftrightarrow \gamma + \vec{B}(\vec{E})$ betrachtet werden. Dies wird als Primakoff-Effekt bezeichnet und ist für experimentelle ALPs-Suchen von großer Bedeutung.

1.3 DM Kandidaten III: Hidden Photons

Eine Erweiterung des Standardmodells um zusätzliche $U(1)$ -Symmetrien mit massebehafteten Austauschbosonen wurde erstmals 1982 von Okun diskutiert [23]. Holdom zeigte 1983, dass die effektive Lagrangedichte eines Modells mit zwei $U(1)$ -Symmetrien Terme der Form

$$\mathcal{L} \supset -\frac{\alpha_1}{4} F_{1,\mu\nu} F_1^{\mu\nu} - \frac{\alpha_2}{4} F_{2,\mu\nu} F_2^{\mu\nu} - \frac{\chi}{2} F_{1,\mu\nu} F_2^{\mu\nu} \quad (1.12)$$

mit den Feldtensoren der $U_i(1)$ F_i , den jeweiligen Kopplungskonstanten α_i und der Parametrisierung der Mischung χ enthält. Den Austauschbosonen der $U_i(1)$ kann über den Higgs- oder den in String-Theorien auftretenden Stückelberg-Mechanismus eine Masse verliehen werden. Fügt man nun unter $U_1(1)$ oder unter $U_2(1)$ geladene Fermionen hinzu, ergibt sich aufgrund des Mischterms $\mathcal{L} \supset -\frac{\chi}{2} F_{1,\mu\nu} F_2^{\mu\nu}$ eine effektive Wechselwirkung auch zwischen der $U_2(1)$ und lediglich unter $U_1(1)$ geladenen Fermionen (und vice versa). Der Mischmechanismus entsteht den Neutrinooszillationen oder dem CKM-Mechanismus vergleichbar durch die Verdrehung der Masseneigenzustände gegenüber den Eigenzuständen der Wechselwirkung.

Zusätzliche bis zu sehr kleinen Massenskalen ungebrochene $U(1)$ -Symmetrien oder ganze zusätzliche „versteckte Sektoren“, deren einzige Wechselwirkung mit dem „sichtbaren Sektor“ der SM-Teilchen durch kinematisches Mischen ihrer Austauschbosonen mit den SM-Austauschbosonen entsteht, finden sich in zahlreichen gut motivierten Erweiterungen des Standardmodells, insbesondere generisch in String-Modellen [15–19].

Der theoretisch vorhergesagte Parameterraum für diese üblicherweise als Hidden Photons

(HP) bezeichneten, zu versteckten $U(1)$ gehörenden Austauscheteilchen, ist wie für ALPs sehr groß. Bisherige Einschränkungen bevorzugen jedoch HP-Massen $m_{\gamma'} \lesssim 1$ eV und Kopplungskonstanten für HP - Photon Oszillationen $\chi \lesssim 10^{-6}$ (vgl. Abschnitte 1.4 und 1.5 sowie Abb. 1.5).

Thermisch während des Urknalls produzierte HPs können aufgrund ihrer geringen Masse kein CDM-Kandidat sein. Kürzlich wurde jedoch gezeigt, dass auch HPs wie ALPs z.B. über den *vacuum misalignment mechanism* nichtthermisch erzeugt werden können (s. [18] und darin enthaltene Referenzen). Damit sind HPs für einen großen Parameterbereich (s. Abb. 1.5) gute CDM-Kandidaten.

1.4 Kosmologische und astrophysikalische Hinweise auf WISPs

Kosmologische Überlegungen und astrophysikalische Hinweise geben zahlreiche Hinweise auf den zulässigen Parameterraum für WISPs. Einige dieser Beobachtungen werden im Folgenden diskutiert. Die entsprechenden ausgeschlossenen Flächen in der $m - g$ Ebene für ALPs bzw. HPs können in Abb. 1.5 gefunden werden. Die in der Abbildung verwendeten Labels werden im Folgenden *kursiv* angeführt.

1.4.1 Energieverlust von Sternen

Falls WISPs existieren, werden sie in heißem Plasma, z.B. im Inneren von Sternen, durch ihre Kopplung an Photonen bzw. Elektronen oder Nukleonen produziert. Im Gegensatz zur Energieabstrahlung durch Standardmodellprozesse können WISPs aufgrund ihrer schwachen Wechselwirkung leicht das Innere des Sterns verlassen. Durch das große Volumen-Oberflächen-Verhältnis sphärischer Körper tragen sie deshalb trotz ihrer schwachen Kopplung erheblich zum Energieverlust von Sternen bei. Damit würden WISPs Einfluss auf die Lebenszeit von Sternen nehmen und ihre Entwicklung beeinflussen [15, 17].

ALPs: Für ALPs lassen sich aus der Nichtbeobachtung anomaler Energieverluste von Horizontalaststernen⁷ starke Ausschlussgrenzen $g_{\phi\gamma} \lesssim 10^{-10}$ GeV für Massen $m_\phi \lesssim 10^5$ eV ziehen [16, 17] (*HB*).

Weiter Ausschlussgrenzen für Massenbereiche $\text{MeV} \lesssim m_\phi \lesssim \text{GeV}$ lassen sich aus der Dauer des Neutrinoausbruchs der Supernova SN 1987A ziehen (*SN1987a*). Während des Neutrinoausbruchs produzierte ALPs würden in galaktischen \vec{B} -Feldern in Photonen konvertieren. Durch das Ausbleiben eines mit dem Neutrino-Ausstoß koinzidierenden Photonenstrahls lassen sich Ausschlussgrenzen für ALPs kleiner Massen $m_\phi \lesssim \text{neV}$ ziehen (*SN γ -burst*).

⁷Horizontalaststerne sind metallarme Sterne, die sich in der Phase stabiler Heliumverbrennung befinden

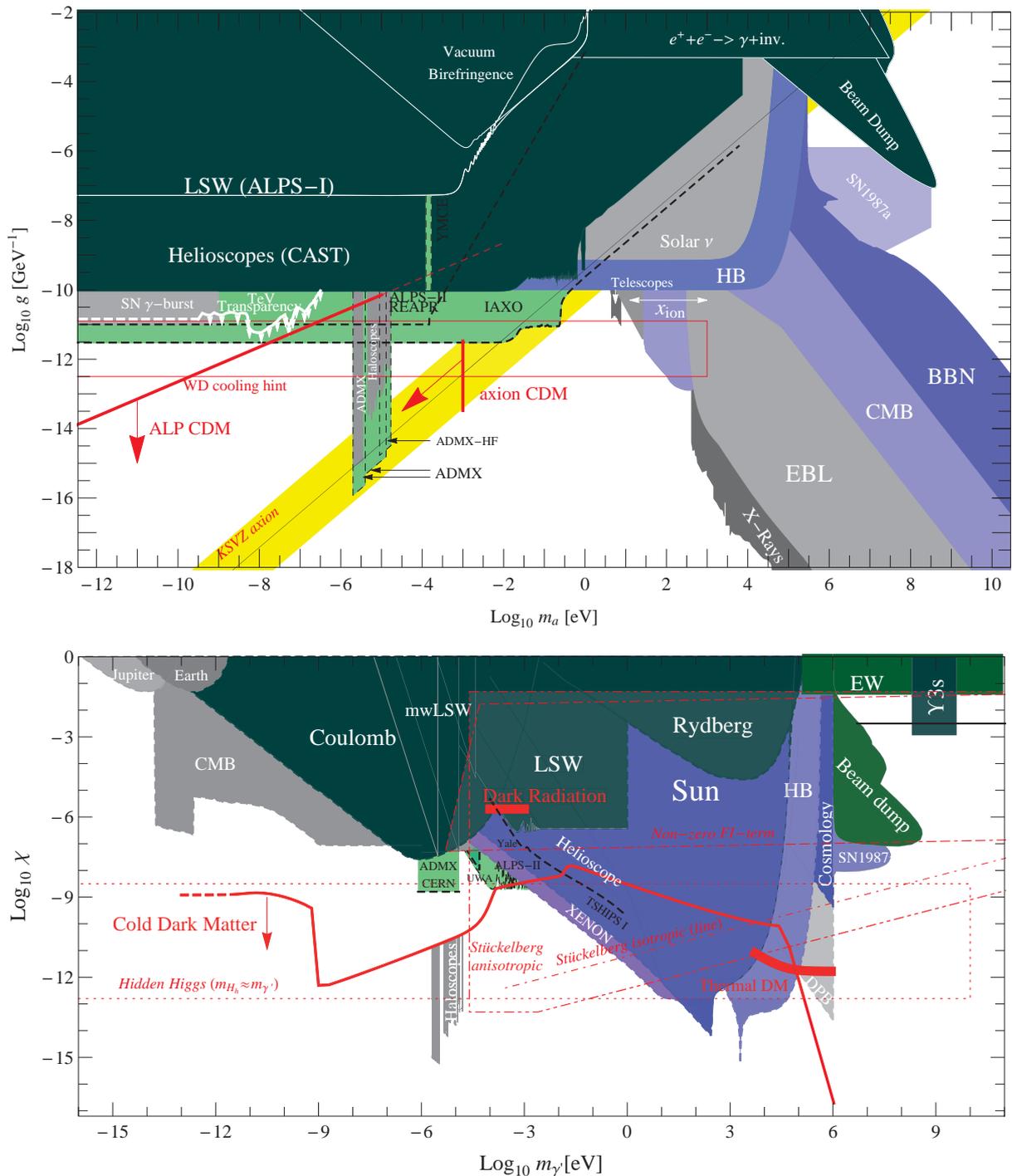


Abbildung 1.5: Axionen/ALP- (oben) und HP-Parameterraum (unten) aufgespannt durch die WISP-Photon Kopplungskonstante g bzw. χ und Masse m_a bzw. m_γ . Oben ist in gelb der Parameterraum des QCD-Axions um das KSVZ, ein bestimmtes QCD-Axion-Modell, eingezeichnet. Rote Linien und Label zeigen den für ALP bzw. Axionen-CDM erlaubten Parameterraum. Unten zeigen dicke und gekrümmte rote Linien den für kalte (CDM) bzw. heiße DM ($Thermal DM$) bzw. Dunkle Strahlung ($Dark Radiation$) erlaubten Parameter- raum. Gerade Linien und Vielecke zeigen ausgewählte Mechanismen für die Entstehung der HP-Masse.

In beiden Plots sind in blau mit weißen Labels Einschränkungen des Parameterraums aus kosmologischen Überlegungen und in grau Grenzen aus astronomischen Beobachtungen eingezeichnet, in dunkelgrün mit weißen Labels experimentell ausgeschlossene Parameter- bereiche und in hellgrün mit schwarzen Labels Sensitivitätsvorhersagen einiger geplanter Experimente. Für Details s. 1.4 und 1.5. Abbildung übernommen aus [16], angepasst und aktualisiert.

Aus dem Neutrinofluss unserer Sonne lässt sich direkt auf die Kernfusionsrate schließen [1]. Der Vergleich der gemessenen Luminosität der Sonne mit der zur Verfügung stehenden Fusionsleistung schränkt den ALPs-Parameterraum weiter ein (*Solar ν*).

Beobachtungen Weißer Zwerge zeigen hingegen schnelleres Abkühlen als erwartet, was sich durch die Produktion von Axionen mit $m_\phi \lesssim \text{keV}$ und Kopplungen $3 \cdot 10^{-13} \text{ GeV}^{-1} \lesssim g_{\phi\gamma} \lesssim 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$ im Inneren erklären lässt [1, 15, 17] (*WD cooling hint*).

Hidden Photons: Auch für HPs lassen sich Ausschlussgrenzen aus der Beobachtung der Lebenszeit von Horizontalaststernen ziehen. Stärkere Einschränkungen des erlaubten Parameterraums liefert jedoch die Lebenszeit unserer Sonne (*Sun*).

1.4.2 Transparenz des Universums

Beobachtungen von Quellen hochenergetischer γ -Strahlung zeigen einen Überschuss von TeV-Photonen. Dies lässt sich durch $\gamma \leftrightarrow \phi$ Oszillationen in galaktischen \vec{B} -Feldern erklären, wodurch das Universum durchsichtiger würde [25] (*TeV-Transparency*).

$\gamma \leftrightarrow \phi$ Oszillationen könnten weiterhin eine Erklärung für die Abwesenheit des GZK-Cutoffs in der kosmischen Strahlung sein [15].

1.4.3 Photonen aus ALPs Zerfällen

Aus $\phi \rightarrow \gamma + \gamma$ -Zerfällen erwartet man ein nahezu monochromatisches Photonensignal. ALPs in der galaktischen Halo würden eine monoenergetische Linie zum Spektrum des extragalaktischen Hintergrundlichts hinzufügen, die aber nicht beobachtet wird [18] (*EBL*). Weiter Hinweise finden sich in den Beobachtungen massereicher Regionen wie Galaxien und Galaxiehaufen. Abhängig von der Masse der ALPs erwartet man optische bis Röntgenphotonen mit $\omega_\gamma = m_\phi/2$. Die Nichtbeobachtung solcher Linien führt zum Ausschluss großer Parameterbereiche insbesondere für $m_\phi \gtrsim \text{keV}$ (*Telescopes, X-Rays*).

Nach Photonen aus dem ALPs Zerfall kann aufgrund der Undurchlässigkeit der Atmosphäre im Ultravioletten nicht gesucht werden. Einen Ausweg schafft jedoch ein kosmologisches Argument [18]: UV-Photonen aus ALPs-Zerfällen wären ionisierend und hätten die aus CMB-Beobachtungen bekannte Geschichte des Universums während der Reionisationsphase stark beeinflusst (x_{ion}).

1.4.4 Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)

Die Existenz von WISPs mit Kopplung an Photonen würde zum Fehlen von Photonen entsprechender Energie im CMB-Spektrum durch $\gamma \leftrightarrow \text{WISP}$ Oszillation führen [15, 17]. Aus dem Fehlen der Einflüsse auf das CMB-Spektrum resultieren starke Ausschlussgrenzen für ALPs mit $m_\phi \gtrsim \text{keV}$ und HPs mit $m_{\gamma'} \gtrsim 10^{-14} \text{ eV}$ (*CMB*).

1.4.5 Nukleosynthese während des Urknalls

Abschätzungen der Menge von ${}^4\text{He}$ -Kerne während der primordialen Nukleosynthese erlauben Rückschlüsse auf die damalige Energiedichte. Zusammen mit der SM-Energiedichte lässt sich damit der ALP-Parameterraum für $m_\phi \gtrsim \text{MeV}$ einschränken [15] (*BBN*).

1.5 Experimentelle WISP-Suchen

Zahlreiche Experimente zur Suche nach WISPs wurden bereits durchgeführt oder sind zurzeit in Vorbereitung. Die meisten dieser Experimente nutzen die WISP-Photon Kopplung aus und zielen auf einen direkten WISP-Nachweis durch Detektion der aus ihrer Konversion resultierenden Photonen. Einige dieser Experimente werden im folgenden diskutiert. Die Labels der in Abb. 1.5 korrespondierenden ausgeschlossenen WISP-Parameterbereiche werden wieder *kursiv* angegeben.

1.5.1 Beschleuniger

In Beam Dump Experimenten an Elektronenbeschleunigern, die in den 1980ern am SLAC, Fermilab, KEK und in Orsay durchgeführt wurden, wurde unter Ausnutzung der Kopplung von ALPs (HPs) an Elektronen nach dem der Bremsstrahlung ähnlichen Prozess $e + Ze \rightarrow e + Ze + \phi(\gamma')$ gesucht. Bei genügend hoher Strahlleistung treten dann ausreichend viele ALPs (HPs) aus dem Beam Dump aus, bevor sie wieder zu $e^+ + e^-$ zerfallen. Der $\phi(\gamma') \rightarrow e^+ + e^-$ Zerfall kann dann beispielsweise durch Positronenmessung nachgewiesen werden. Offensichtlich sind Beam Dump Experimente nur auf ALP/HP Massen $\geq 2m_e \simeq 1 \text{ MeV}$ sensitiv (*Beam Dump*).

Kürzlich wurden aus den Daten der Beam Dump Experimente neue Ausschlussgrenzen für HPs berechnet ([26] und darin enthaltene Referenzen).

Neue fixed target Experimente an Elektronen- und Protonenbeschleunigern sind in Planung. Des Weiteren kann an e^+e^- -Collidern wie z.B. dem zurzeit im Bau befindlichen SuperKEKB-Experiment oder Hadron-Collidern wie dem LHC nach WISP-Signaturen gesucht werden. Ein Überblick über bisherige Suchen und Vorschläge kann in [16] gefunden werden. Wie die Beam Dump Experimente sind Collider-Experimente auf WISP-Massen $\gtrsim \text{MeV}$ sensitiv.

1.5.2 Abweichung vom Coulombschen Gesetz

Aufgrund des kinetischen Mischterms von HPs mit SM-Photonen würde die Existenz von HPs die Quantenelektrodynamik (QED) modifizieren. Das Coulombsche Gesetz modifiziert sich zu [27]

$$V(r) = -\frac{Z\alpha}{r} (1 + \chi^2 e^{-m_{\gamma'}/r}). \quad (1.13)$$

Diese Modifikation kann direkt durch verbesserte Versionen des klassischen Versuchs Cavendishs, Abweichungen von dem für $V(r) \propto r^{-1}$ erwarteten Feld $\vec{E} = 0$ innerhalb einer geladenen Kugel zu messen, untersucht werden (*Coulomb*, vgl. [28]).

Weiter Möglichkeiten bieten Untersuchungen der magnetischen Felder von Planeten [28] (*Earth, Jupiter*), die hochauflösende Spektroskopie von Atomen [27] (*Rydberg*) sowie genaue QED-Tests durch elektroschwache Präzisionsexperimente (*EW*).

1.5.3 Laser-Polarisations Experimente

Laufen Photonen durch ein orthogonal zu ihrer Ausbreitungsrichtung ausgerichtetes \vec{B} -Feld, erwarten wir aufgrund der Wechselwirkung

$$\mathcal{L} \supset g_{\phi\gamma} \phi \vec{E} \cdot \vec{B} \quad (1.14)$$

und des Primakoff-Effektes (s. 1.2.4) eine von der Ausrichtung ihrer Polarisation zum \vec{B} -Feld abhängige Wahrscheinlichkeit für $\gamma \leftrightarrow \phi$ Prozesse. Unter Einfluss eines magnetischen Feldes wird das Vakuum somit doppelbrechend.

Eine experimentelle Möglichkeit, nach diesem Effekt zu suchen, sind sogenannte Laser-Polarisations-Experimente: Sendet man linear polarisiertes Laserlicht unter einem Winkel θ zwischen Polarisations Ebene und \vec{B} -Feld Richtung durch ein homogenes Magnetfeld, dreht sich nach einer Strecke D die Polarisation um

$$\alpha = \frac{a_{\parallel} - a_{\perp}}{2} D \sin(2\theta) \quad (1.15)$$

mit den Absorptionskoeffizienten a_{\parallel} (a_{\perp}) für parallel (orthogonal) zur magnetischen Feldrichtung polarisiertes Licht.

Laser-Polarisationsexperimente im Kontext von ALPs-Suchen wurden zunächst Anfang der 1990er in Brookhaven (BFRT, nach den beteiligten Instituten: Brookhaven National Laboratory, Fermilab, Rochester und Triest) unter Nutzung von Dipolmagneten des CBA-Beschleunigers gemacht. Später wurde das nun PVLAS (Polarization of the Vacuum with a Laser) genannte Experiment in Triest fortgesetzt. 2006 veröffentlichte die PVLAS-Kollaboration Berichte der Beobachtung einer Polarisationsdrehung, die mit ALPs mit

$$\begin{aligned} 1 \text{ meV} &\lesssim m_{\phi} \lesssim 1.5 \text{ meV}, \\ 2 \cdot 10^{-6} \text{ GeV}^{-1} &\lesssim g_{\phi\gamma} \lesssim 5 \cdot 10^{-6} \text{ GeV}^{-1} \end{aligned} \quad (1.16)$$

kompatibel war [29].

Spätere PVLAS-Runs und andere Experimente schlossen dieses Ergebnis wieder aus. Die „Entdeckung“ beschleunigte jedoch die Entwicklung von WISP-Experimenten, insbesondere von LSW-Suchen (s. 1.5.4), enorm. Der durch die Laser-Polarisationsexperimente ausgeschlossene Parameterraum ist in Abb. 1.5 mit *Vacuum Birefringence* gekennzeichnet.

net.

1.5.4 Light Shining Through a Wall

Light Shining Through a Wall (LSW) Experimente sind die zurzeit sensitivsten reinen Laborexperimente zur WISP-Suche. LSW-Experimente wurden erstmals 1982 [23] zur Suche nach Hidden Photons vorgeschlagen. Das Grundprinzip ist, einen brillanten Lichtstrahl auf eine lichtundurchlässige Wand zu richten und auf der gegenüberliegenden Seite nach transmittierten Photonen aus $\gamma \rightarrow \text{WISP} \rightarrow \gamma$ Oszillationen zu suchen; das HP würde als schwach wechselwirkendes Teilchen die Wand praktisch ungehindert durchdringen. Fügt man ein orthogonal zur Strahlrichtung ausgerichtetes \vec{B} -Feld hinzu, wird die Versuchsanordnung durch den Primakoff-Effekt sensitiv auf ALPs. Anders als bei den in 1.5.1 und 1.5.3 geschilderten Experimenten gibt es für LSW-Anordnungen praktisch keinen Standardmodelluntergrund.

Das bereits in 1.5.3 erwähnte BFRT-Experiment war nicht nur das erste Laser-Polarisations-Experiment, sondern wurde gleichzeitig als erster LSW-Aufbau betrieben. Nach den ALPs-Hinweisen der PVLAS-Kollaboration wurden weitere LSW-Experimente durchgeführt, die die PVLAS-Befunde widerlegten. Die LSW-Experimente zweiter Generation wurden in den vergangenen Jahren in Toulouse/Palaiseau (BMV/LULI), am CERN (OSQAR), Fermilab (GammeV), Jefferson Lab (LIPPS) und am DESY (ALPS-I) durchgeführt (*LSW(ALPS-I)*). Zurzeit befinden sich die LSW-Experimente dritter Generation, ALPS-II und REAPR am DESY bzw. Fermilab, in Vorbereitung. Sie werden erstmals auf den für ALPs-CDM erlaubten Parameterraum sensitiv sein (s. *ALPS-II* und *REAPR* in Abb. 1.5).

1.5.5 Helioskope

Sollten ALPs oder HPs existieren, werden sie im Inneren unserer Sonne über den Primakoff-Prozess bzw. $\gamma' \rightarrow \gamma$ Oszillationen produziert. Von Sikivie 1983 [31] erstmals vorgeschlagene Helioskope versuchen, den WISP-Fluss der Sonne nachzuweisen. Dafür werden dem Photonenregenerationsteil eines LSW-Experiments ähnliche Aufbauten verwendet, die auf die Sonne gerichtet werden. Aufgrund der hohen Photonendichte in der Sonne ist der erwartete WISP-Fluss um Größenordnungen höher als der in LSW-Aufbauten produzierte. Dafür sind Helioskope nur auf das Produkt aus WISP-Photon-Kopplung und WISP-Fluss aus der Sonne und nicht wie LSW-Experimente direkt auf den Kopplungsparameter sensitiv.

Die ALPs-Ausschlussgrenzen des ersten Helioskopes waren noch schwächer als die aus der Lebenszeit der Sonne [30]. Die Ergebnisse der Folgeexperimente, dem Tokyo Axion Helioscope (SUMICO) und dem zurzeit sensitivsten Experiment CAST (CERN Axion Helioscope), liefern starke Ausschlussgrenzen auf den erlaubten WISP-Parameterraum (*Helioscopes(CAST)*). An der Sternwarte Hamburg ist das dezidierte HP-Helioskop SHIPS

(Solar Hidden Photon Search) in Betrieb.

Die Sensitivität des geplanten CAST-Nachfolge Experiment IAXO (International Axion Observatory) wird die des CAST-Experimentes nochmal um mehr als eine Größenordnung verbessern, und damit in den ALP-CDM und QCD-Axion Parameterbereich vordringen.

1.5.6 Haloskope

ALPs und HPs sind CDM-Kandidaten (s. 1.2 und 1.3). Unter der Annahme, dass der gesamte DM-Halo aus WISPs besteht, erhalten wir aus der lokalen DM-Halo-Dichte $\rho_{DM}(r_0) = (0.39 \pm 0.03) \text{ GeV/cm}^3$ (s. 1.1.1) eine lokale WISP-Dichte von

$$\rho_{WISP} \simeq \frac{3.9 \cdot 10^{14}}{\text{cm}^3} \left(\frac{m_{WISP}}{1 \mu\text{eV}} \right)^{-1}. \quad (1.17)$$

Aufgrund der hohen Dichte ist trotz der schwachen Kopplungen von WISPs an Photonen eine direkte Suche möglich. Solche „Haloskop“ genannten Experimente schlug Sikivie 1983 [31] erstmals für Axion-Suchen vor: Vor dem Hintergrund eines statischen \vec{B} -Feldes konvertieren ALPs über den Primakoff-Prozess zu Photonen mit $m_\phi = \omega$. Findet diese Konversion innerhalb eines Resonators mit $\omega = \omega_{res}$ statt, werden die Photonen aus der $\phi \rightarrow \gamma$ Konversion resonant verstärkt. Für $m_\phi \sim 2\pi \cdot (100 \text{ MHz} \dots 100 \text{ GHz})$ ist dieser Ansatz von großem Interesse, da in diesem Frequenzbereich Mikrowellenresonatoren mit hohen Gütefaktoren sowie empfindliche Empfänger zur Verfügung stehen.

Krauss, Wilczek *et al.* und Sikivie untersuchten in den folgenden Jahren die theoretischen Grundlagen der resonant verstärkten Haloskopexperimente. Ihre für Axionen bestimmten Ergebnisse [32, 33] lassen sich durch Aufhebung des Zusammenhangs von Axionenmasse und Axion-Photon-Kopplungsparameter leicht auf ALPs verallgemeinern: Mit der Parametrisierung der ALPs-Photon Kopplung aus 1.2

$$\mathcal{L}_{\phi\gamma\gamma} \supset g_{\phi\gamma} \phi \vec{E} \cdot \vec{B} \quad (1.18)$$

finden wir den Ergebnissen der Berechnung von Sikivie folgend eine Kopplung der Resonanzmoden an Halo-ALPs

$$g_{\phi\gamma} \phi \int_V d^3x \vec{E} \cdot \vec{B}_0 \quad (1.19)$$

mit dem Volumen der Kavität V , dem elektrischen Feld der Mode $\vec{E} = \vec{E}(x, t)$ und dem statischen magnetischen Hintergrundfeld $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_B$.

Für die im Detektor induzierte Leistung erhalten wir

$$\begin{aligned}
P &= \kappa \frac{\rho_0}{m_\phi} \frac{\min\{Q, Q_\phi\}}{\int_V d^3x \vec{E}^2} \left(g_{\phi\gamma} \int_V d^3x \vec{E} \cdot \vec{B}_0 \right)^2 \\
&= \kappa g_{\phi\gamma}^2 V (B_0)^2 \rho_0 \mathcal{G}_\phi \frac{1}{m_\phi} \min\{Q, Q_\phi\}
\end{aligned} \tag{1.20}$$

mit dem die Kopplung der Kavität an den Detektor beschreibenden Parameter κ und dem effektiven Gütefaktor der an den Detektor gekoppelten Kavität Q . Der Gütefaktor der ALPs Q_ϕ berechnet sich aus dem kinetischen Beitrag zur Gesamtenergie der ALPs. Mit der Geschwindigkeitsdispersion der DM-Halo $\sigma_v = 268 \pm 7 \text{ km/s} \simeq 9.5 \cdot 10^{-4} c$ erhalten wir in nichtrelativistischer Mechanik

$$Q_\phi = \frac{m_\phi}{\frac{1}{2} m_\phi (\sigma_v)^2} \simeq 2.2 \cdot 10^6. \tag{1.21}$$

Der modenabhängige „Formfaktor“ \mathcal{G}_ϕ lässt sich mit der elektrischen Feldverteilung der Eigenmode \vec{E} wie folgt schreiben:

$$\mathcal{G}_\phi = \frac{\left(\int_V d^3x \vec{E} \cdot \vec{B}_0 \right)^2}{V (B_0)^2 \int_V d^3x \vec{E}^2}. \tag{1.22}$$

Nach der Diceschen Radiometergleichung

$$\frac{S}{N} = \frac{P}{k_B T_N} \sqrt{\frac{t}{b}} \tag{1.23}$$

mit dem Signal-Rausch-Verhältnis $\frac{S}{N}$, der Rauschtemperatur des Systems T_N , der Messdauer t und der Bandbreite des Signals b erhalten wir für die Sensitivität des Haloskopexperiments

$$g_{\phi\gamma} = \left[\frac{1}{\kappa} \frac{m_\phi}{\rho_0} \frac{1}{\min\{Q, Q_\phi\}} \frac{1}{V (B_0)^2 \mathcal{G}_\phi} \left(\frac{S}{N} \right) k_B T_N \left(\frac{\frac{1}{2\pi} \min\left\{ \frac{m_\phi}{Q_\phi}, \frac{\omega_{res}}{Q} \right\}}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}. \tag{1.24}$$

In Laboreinheiten ergibt sich mit $Q \sim 10^5 < Q_\phi \sim 10^6$

$$\begin{aligned}
g_{\phi\gamma} [\text{GeV}^{-1}] &= 4.81 \cdot 10^{-6} \kappa^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{S}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T_N}{\text{K}} \right)^{\frac{1}{2}} Q^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{V}{\text{l}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{B_0}{\text{T}} \right)^{-1} \mathcal{G}_\phi^{-\frac{1}{2}} \\
&\times \left(\frac{m_\phi}{\text{eV}} \right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{\rho_0}{\text{GeV/cm}^3} \right)^{-\frac{1}{2}} Q_\phi^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{t}{\text{s}} \right)^{-\frac{1}{4}}
\end{aligned} \tag{1.25}$$

und daraus mit realistischen experimentellen Parametern unter der Annahme, dass der gesamte DM-Halo aus ALPs besteht und der Gütefaktor Q_ϕ durch die Geschwindigkeitsdispersion der Halo bestimmt wird:

$$g_{\phi\gamma} [\text{GeV}^{-1}] = 9.8 \cdot 10^{-14} \kappa^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{S/N}{4}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T_N}{300 \text{ K}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Q}{10^5}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{V}{1001}\right)^{-\frac{1}{2}} \times \left(\frac{B_0}{1 \text{ T}}\right)^{-1} \left(\frac{\mathcal{G}_\phi}{0.5}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{m_\phi}{\mu\text{eV}}\right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{t}{1 \text{ s}}\right)^{-\frac{1}{4}}. \quad (1.26)$$

Diese Gleichung zeigt die Attraktivität haloskopischer ALPs-Suchen: Mit verfügbarer Technik sind Hohlräumresonatoren durch Ausnutzen der resonanten Verstärkung auf ALPs-Photon Kopplungsparameter $g_{\phi\gamma}$ sensitiv, die Größenordnungen kleiner als die anderer verfügbarer WISP-Suchen sind (vgl. Abb. 1.5). Aufgrund der Resonanzbedingung sind solche Versuche aber nur auf einen kleinen Massenbereich $m_\phi = \omega_{res} (1 \pm Q^{-1})$ sensitiv. Die Resonanzfrequenzen der verwendeten Resonatoren müssen also verstimmbar sein.

Hidden Photon Haloskop: Besteht ein großer Teil der DM-Halo aus Hidden Photons, können diese ebenfalls in Haloskopexperimenten unter Verwendung von Mikrowellenresonatoren nachgewiesen werden. Wie für ALPs werden Photonen aus $\gamma' \rightarrow \gamma$ Konversion für $m_{\gamma'} = \omega_{res}$ resonant verstärkt. Aus der Lagrangedichte

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{1}{4} X_{\mu\nu} X^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2} X_\mu X^\mu - \frac{\chi}{2} F_{\mu\nu} X^{\mu\nu} + J^\mu A_\mu \quad (1.27)$$

mit dem Feldtensor des Photonenfeldes $F_{\mu\nu}$, dem Photonenfeld A_μ , dem elektrischen Strom J^μ , dem Feldtensor des Hidden Photon-Feldes $X_{\mu\nu}$, dem HP-Feld X_μ , der HP-Masse $m_{\gamma'}$ und dem HP-Photon Kopplungsparameter χ (vgl. Gleichung 1.12) lässt sich durch Transformation des HP-Feldes $X \rightarrow X - \chi A$ der kinetische Mischterm zu einem Massenmischterm verschieben; in erster Ordnung ergibt sich dann die Bewegungsgleichung für das Photonenfeld [18]

$$\partial_\mu \partial^\mu A^\nu = \chi m_{\gamma'}^2 X^\nu. \quad (1.28)$$

Die im Detektor induzierte Leistung ergibt sich zu

$$P = \kappa \chi^2 m_{\gamma'} \rho_0 \min\{Q, Q_{\gamma'}\} V \mathcal{G}_{\gamma'}. \quad (1.29)$$

Der Formfaktor

$$\mathcal{G}_{\gamma'} = \frac{\left(\int_V d^3x \vec{E} \cdot \vec{n}\right)^2}{V \int_V d^3x \vec{E}^2} \quad (1.30)$$

beschreibt den Überlapp des Axionenfeldes mit dem Photonenfeld der Kavitäts-Eigenmode und hat dieselbe Form wie für ALPs, wobei die Richtung des statischen Magnetfeldes \vec{B}_0 durch die Richtung des HP-Feldes \vec{n} ersetzt wird. Der HP-Formfaktor lässt sich durch den ALPs-Formfaktor ausdrücken: $\mathcal{G}_{\gamma'} = \mathcal{G}_\phi \cdot \cos^2(\theta)$, wobei θ der Winkel zwischen \vec{n} und der für den ALPs-Fall angenommenen Richtung des statischen Magnetfeldes ist. Für die Richtungen des Photonenfeldes können zwei Szenarien angenommen werden [18]:

1. Die Richtung des HP-Feldes ist von der Strukturformation unbeeinflusst und alle HPs zeigen (zumindest auf ausreichenden Längenskalen) in die gleiche Richtung.
2. Die Richtung der HPs ist zufällig verteilt.

Im 1. Fall ist die Richtung des HP-Feldes unbekannt. Unter der Annahme, dass alle Raumrichtungen für die HP-Richtung gleich wahrscheinlich sind, kann der Winkel zu $\cos^2(\theta) \geq 0.0025$ (95 % CL) abgeschätzt werden [18]. Werden hingegen 3 rechtwinklig zueinander gedrehte Resonatoren verwendet, gilt für mindestens eine der Kavitäten $\cos^2(\theta) \geq 1/3$. Alternativ kann mehrmals nach Drehung der Kavität gemessen werden. Eine elegante Realisierung der Drehung ist das Ausrichten der Richtung \vec{n} , für die der Formfaktor maximal ist, im 45°-Winkel zur Rotationsachse der Erde. Von drei im Abstand von 8 Stunden durchgeführten Messungen gilt dann für mindestens eine $\cos^2(\theta) \geq 1/4$.

Im 2. Fall erhält man durch Mitteln über alle Richtungen $\langle \cos^2(\theta) \rangle = 1/3$.

Mit der Dickeschen Radiometergleichung erhalten wir für die Sensitivität des HP-Haloskopes in natürlichen Einheiten

$$\chi = \left[\frac{1}{\kappa} \frac{1}{m_{\gamma'} \rho_0} \frac{1}{\min\{Q, Q_{\gamma'}\}} \frac{1}{V \mathcal{G}_{\gamma'}} \left(\frac{S}{N} \right) k_B T_N \left(\frac{\frac{1}{2\pi} \min\left\{ \frac{m_{\gamma'}}{Q_{\gamma'}}, \frac{\omega_{res}}{Q} \right\}}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1.31)$$

In Laboreinheiten entspricht dies

$$\begin{aligned} \chi &= 9.32 \cdot 10^{-13} \kappa^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{S}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T_N}{\text{K}} \right)^{\frac{1}{2}} Q^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{V}{\text{I}} \right)^{-\frac{1}{2}} \mathcal{G}_{\gamma'}^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{m_{\gamma'}}{\text{eV}} \right)^{-\frac{1}{4}} \\ &\times \left(\frac{\rho_0}{\text{GeV/cm}^3} \right)^{-\frac{1}{2}} Q_{\gamma'}^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{t}{\text{s}} \right)^{-\frac{1}{4}} \end{aligned} \quad (1.32)$$

und mit realistischen experimentellen Parametern unter der Annahme, dass der gesamte DM-Halo aus Hidden Photons besteht und der Gütefaktor $Q_{\gamma'}$ durch die Geschwindigkeitsdispersion der Halo bestimmt wird:

$$\begin{aligned} \chi &= 3.3 \cdot 10^{-14} \kappa^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{S/N}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T_N}{300 \text{ K}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Q}{10^5} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{V}{1001} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ &\times \left(\frac{\mathcal{G}_{\gamma'}}{\frac{1}{3} 0.5} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{m_{\gamma'}}{\mu\text{eV}} \right)^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{t}{1 \text{ s}} \right)^{-\frac{1}{4}}. \end{aligned} \quad (1.33)$$

Als Haloskope verwendete Mikrowellenresonatoren erlauben den Nachweis sehr kleiner WISP-Photon Kopplungskonstanten für $m_{WISP} \simeq 0.1 \dots 2 \mu\text{eV}$. Anders als Helioskope oder LSW-Aufbauten sind sie aber nur auf einen durch den Gütefaktor der Resonanz bestimmten, schmalen Massebereich sensitiv. Weiterhin sind Haloskope nicht direkt auf den Kopplungsparameter, sondern im Fall von ALPS auf das Produkt $g_{\phi\gamma}^2 \rho_0 / m_\phi$ und für Hidden Photons auf $\chi^2 \rho_0 m_{\gamma'}$ sensitiv.

Im Folgenden werden die bisherigen Haloskope besprochen.

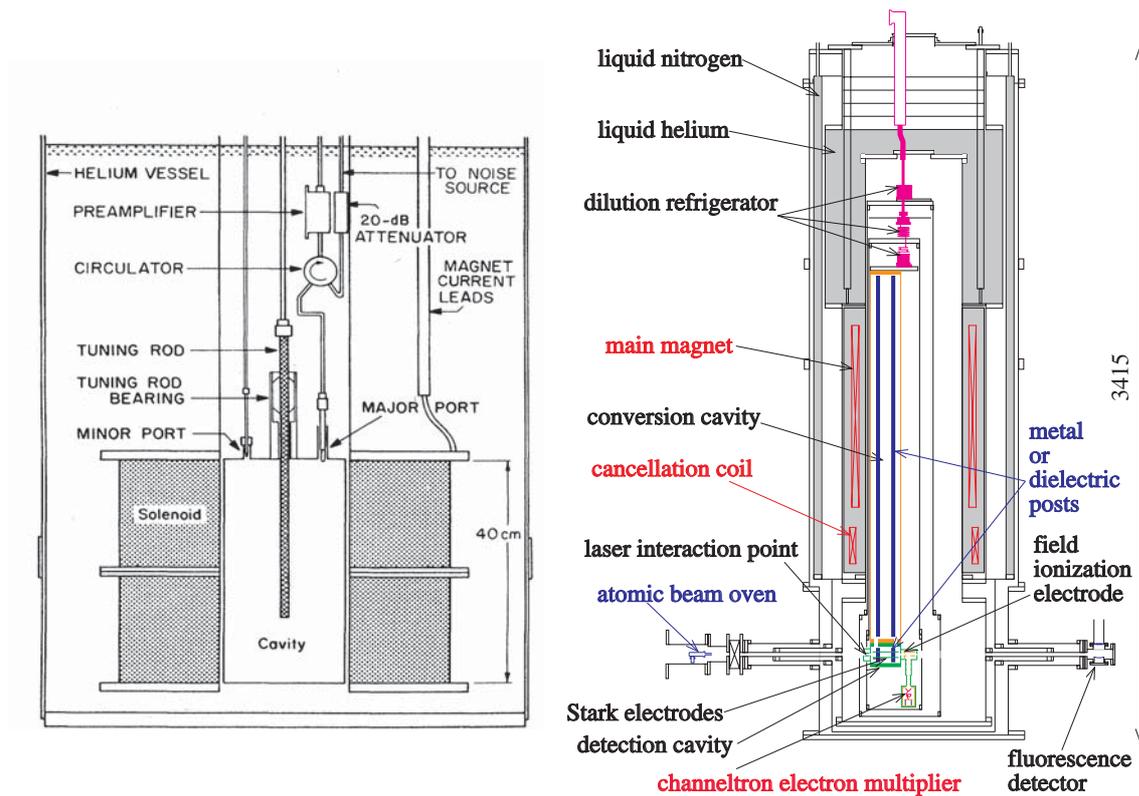


Abbildung 1.6: Schemata der Haloskopenexperimente RBF (links) und CARRACK (rechts). Aus [34, 38]

Rochester-BNL-FNAL: Kurze Zeit nachdem Sikivie und Mitstreiter die theoretischen Grundlagen der Haloskope gelegt hatten, wurde in einer Kollaboration der University of Rochester, des Brookhaven National Laboratory und des Fermi National Accelerator Laboratory das erste haloskopische Experiment realisiert. Unter Verwendung von 7 Kavitäten wurde der Frequenzbereich von 1.090 GHz bis 3.933 GHz bzw. der korrespondierende Massenbereich $4.51 \mu\text{eV}$ bis $16.3 \mu\text{eV}$ zu 91.7% abgesucht. Es wurden zylindrische Kavitäten aus OFHC-Kupfer mit Volumina $V \simeq 1 \dots 101$ und typischen Gütefaktoren $Q \sim 2 \cdot 10^5$ verwendet. Die Frequenz der für die Suche verwendeten TM_{010} und TM_{020} -Moden wurden mittels dielektrischer Stäbe mit $\sim 0.6 \dots 1.5$ cm Durchmesser, die entlang der Symmetrieachse in den Resonator eingefahren wurden, verstimmt. Die Kavitäten wur-

den innerhalb eines supraleitenden Solenoid-Magneten mit $\langle B_0 \rangle = 5.8 \text{ T}$ über das Volumen innerhalb des Solenoiden (bzw. $\langle B_0 \rangle = 8.5 \text{ T}$ mit einem zusätzlichen Solenoiden für die kleineren Kavitäten) betrieben. Die Detektor-Kette bestand aus einer induktionsgekoppelten Pickupantenne sowie mehreren Verstärker- und Downconverterstufen. Die Kavität, der Magnet und der erste Verstärker wurden mit flüssigem Helium auf $T = 4.4 \text{ K}$ gekühlt (s. Abb. 1.6).

Während der Messprozedur wurde der stimmbare Frequenzbereich jeder Kavität zweimal abgesucht. Koinzierten einem ALPs-Signal entsprechende auffällige schmale Peaks in beiden Läufen, wurde diese Frequenz anschließend ausführlich untersucht. Alle Signalkandidaten wurden ausgeschlossen. Die unter Annahme einer ALPs-Dichte von $\rho_0 = 0.30 \text{ GeV/cm}^3$ resultierenden Ausschlussgrenzen des BNL-Experiments $g_{\phi\gamma} \lesssim 5.1 \cdot 10^{-13} \text{ GeV}^{-1}$ für $m_\phi \simeq 16 \mu\text{eV} \dots g_{\phi\gamma} \lesssim 2.4 \cdot 10^{-14} \text{ GeV}^{-1}$ für $m_\phi \simeq 4.5 \mu\text{eV}$ sind in Abb. 1.5 mit *Haloscopes* gekennzeichnet. (Eine detaillierte Beschreibung des Experiments kann in [34] und darin enthaltenen Referenzen gefunden werden)

University of Florida: 1989 führte die University of Florida unter Beteiligung von Sikivie ebenfalls ein haloskopisches Experiment durch. Die verwendete zylindrische aus OFHC-Kupfer gefertigte Kavität mit einem Volumen von 7 l wurde durch einen radial beweglichen Keramikstab und einen weiteren entlang der Symmetrieachse der Kavität einführbaren Keramikstab gestimmt. Die Frequenz der TM_{010} -Mode mit einem Gütefaktor $Q \simeq 1.5 \cdot 10^5$ ließ sich so von 1.32 GHz bis 1.44 GHz verstimmen, dies entspricht Axionmassen $m_\phi = 5.4 \dots 5.9 \mu\text{eV}$. Die Kavität wurde in einem supraleitenden Solenoiden mit $\langle B_0 \rangle = 7.5 \text{ T}$ betrieben und mit flüssigem Helium auf $T = 2.2 \text{ K}$ beim ersten Messlauf und $T = 4.2 \text{ K}$ beim zweiten Lauf gekühlt. Die Detektor-Kette bestand aus einem heliumgekühlten HEMT-Verstärker, Downconvertern, Bandpässen und weiteren Verstärkern. Die Messprozedur ist der des BNL-Experiments ähnlich: Jede Frequenz wurde zunächst 90 s gemessen und Frequenzen mit Signalkandidaten weiter untersucht. Im betrachteten Massenbereich wurde kein ALPs-Signal gefunden. Die erreichten Ausschlussgrenzen auf den ALPs-Photon-Kopplungsparameter $g_{\phi\gamma}$ sind eine Größenordnung stärker als die des BNL-Experiments und in Abb. 1.5 in der mit *Haloscopes* gelabelten Fläche enthalten. Eine detaillierte Beschreibung des Experiments sowie der Ergebnisse kann in [35] und darin enthaltenen Referenzen gefunden werden.

US Axion Search Experiment: Das am Lawrence Livermore National Laboratory durchgeführte US Axion Search Experiment verwendete eine zylinderförmige verkupferte Edelstahlkavität mit $V \simeq 190 \text{ l}$. Mittels einem oder zwei radial beweglichen Stäben aus Kupfer (8 cm Durchmesser) oder Aluminium (6 cm Durchmesser) konnten die Resonanzfrequenzen der TM_{010} und TM_{020} -Moden jeweils um mehr als 100 MHz verstimmt werden. Der verwendete supraleitende Solenoid stellte ein mittleres Magnetfeld von $\langle B_0 \rangle = 7.6 \text{ T}$ bei einem freien Durchmesser von 53 cm und 1 m Höhe zur Verfügung. Die Empfänger-kette

bestand aus mehreren zum Teil heliumgekühlten Verstärkern, zwei Downmixern, Bandpassfiltern und Spektralanalysatoren. Die Messroutine war der der vorhergehenden Experimente analog.

Die ALPs-Suche auf einem Frequenzbereich von 480 MHz bis 810 MHz bzw. korrespondierendem Massenbereich $2.0 \mu\text{eV} \lesssim m_\phi \lesssim 3.3 \mu\text{eV}$ ergab keinen Hinweis auf ALPs. Die entsprechenden Ausschlussgrenzen sind in Abb. 1.5 mit *ADMX* gelabelt. Eine detaillierte Beschreibung des Experiments und der Ergebnisse kann in [36, 37] und darin enthaltenen Referenzen gefunden werden.

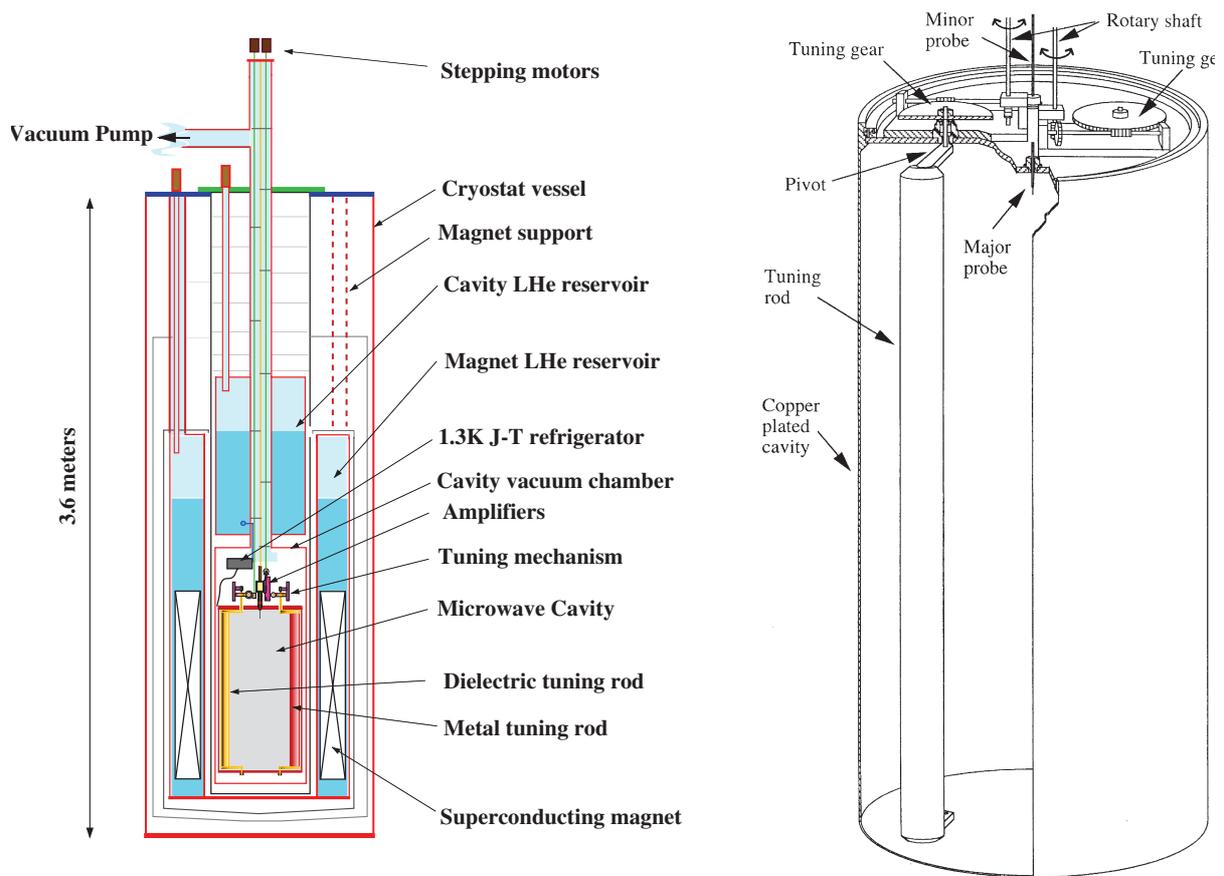


Abbildung 1.7: Schema des US Axion Search/ADMX-Experiments (links) und des zur Frequenzstimmung verwendeten Mechanismus (rechts). Aus [36, 39].

ADMX: Das US Axion Search Experiment wurde in Axion Dark Matter eXperiment (ADMX) umbenannt. Nach weiteren Suchen zog AMDX 2010 an die University of Washington um, wo es zurzeit umgebaut wird. Durch Verwendung von SQUID-Verstärkern, eines Mischkryostaten und weiteren Modifikationen, insbesondere der Frequenzstimmtechnik, sollen bis zu zwei Größenordnungen stärkere Ausschlussgrenzen erzielt werden. Die erwarteten Sensitivitäten sind in Abb. 1.5 mit *ADMX* und *ADMX-HF* gekennzeichnet.

CARRACK: Das Cosmic Axion Research with Rydberg Atoms in Resonant Cavities-Experiment (CARRACK) verwendet eine zylindrische OFHC-Kupferkavität mit $V = 51$ in einem 7 T Solenoiden. Die Resonanzfrequenz der für das Experiment verwendeten TM_{010} -Mode mit einem Gütefaktor $Q \sim 3 \cdot 10^4$ kann durch verschiedene Tuningstäbe um $\sim 25\%$ verstimmt werden. Das Experiment wird durch einen Mischkryostaten auf $T_c \simeq 10$ mK gekühlt.

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Haloskopen verwendet CARRACK zum Nachweis eines Axionensignals keine Pickup-Antenne. An die $WISP \rightarrow \gamma$ Konversionskavität ist eine zweite kleinere Kavität gekoppelt. In diese wird ein in Rydberg-Zustände präparierter Atomstrahl eingeschossen und nach Durchqueren der Detektionskavität nach Übergängen gesucht (s. Abb 1.6). CARRACK ist auf einen Massenbereich $2 \mu\text{eV} \lesssim m_\phi \lesssim 50 \mu\text{eV}$ sensitiv; erwartete Ausschlussgrenzen auf $g_{\phi\gamma}$ sind von gleicher Größenordnung wie die für ADMX erwarteten. Eine Beschreibung des Experiments kann in [38] gefunden werden.

Suche nach Hidden Photons: Bisher wurde keine dezidierte Hidden Photon Suche mit Mikrowellenresonatoren durchgeführt. Die Phänomenologie von Hidden Photons in einem Haloskop unterscheidet sich jedoch lediglich durch die Unabhängigkeit von externen Feldern von der ALPs-Physik. Aus den für ALPs-Suchen veröffentlichten Ergebnissen lassen sich also korrespondierende Ausschlussgrenzen für Hidden Photons bestimmen. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abb. 1.5 eingezeichnet.

Kapitel 2

WISPDMMX

Das WISPy Dark Matter eXperiment (WISPDMMX) ist ein Experiment zur direkte Suche nach WISPy DM im $0.8 - 2 \mu\text{eV}$ Massenbereich. WISPDMMX verwendet eine 208 MHz Reservekavität des HERA-Protonenrings und ist das erste resonant verstärkte Haloskop, welches auf WISP-Massen kleiner als $2 \mu\text{eV}$ sensitiv ist (s. 1.5.6, Abbildung 1.5).

WISPDMMX wird zurzeit in einer informellen Kollaboration zwischen DESY, der Universität Hamburg, dem Max-Planck Institut für Radioastronomie Bonn (MPIfR), der Universität Heidelberg und der Ludwig-Maximilian-Universität München durchgeführt. Das Experiment ist in zwei Phasen geplant: Während Phase I wird nach einem DM-Signal aus Hidden Photon Konversionen in normale Photonen gesucht. In Phase II wird die Kavität in einem Magneten betrieben und nach einem Axionen/ALPs-DM-Signal gesucht.

2.1 208 MHz Kavität

WISPDMMX verwendet die Reservekavität des 208 MHz Systems des HERA-Protonenrings. Die Kavitäten wurden 1988 an das DESY geliefert und sind in Konstruktion und Bauweise eng an das für den LEP-Betrieb verwendete 200 MHz-SPS-SW-System angelehnt. Die äußeren Abmessungen von 1 m Durchmesser und 66 cm Breite sind identisch. Die Kupferkavitäten wurden aus zwei kaltgeformten Hälften mit den Löchern für die *Nose Cones* zusammengeschweißt. Anschließend wurden die Durchführungen kalt geformt und Flansche und *Nose Cones* eingelötet. Zur Kühlung wurde ein System von Wasserleitungen auf die Außenhaut der Kavität gelötet. Um die im Vergleich zu den SPS-Kavitäten 8 MHz höhere Resonanzfrequenz der im Beschleunigerbetrieb verwendeten TM_{010} -Mode zu erreichen, wurden die *Nose Cones* der Kavität modifiziert um das *Gap* zu vergrößern [40–42]. Zum Stimmen der mit großen Toleranzen gefertigten Kavitäten auf die Fundamentalfrequenz von 208 MHz wurden sie anschließend plastisch entlang ihrer Symmetrieachse deformiert (s. Abb. 2.2).

Die genaue Geometrie der Kavität ist leider nicht mehr zu bestimmen, da es nur wenige Publikationen über das 208 MHz System und keine genauen Konstruktionszeichnungen

(s. Abb. 2.5) gibt. Weiterhin sind insbesondere Literaturangaben über den für die Resonanzfrequenz der TM-Moden wichtigen *Gap* widersprüchlich.



Abbildung 2.1: WISPDMX Aufbau mit der 208 MHz Kavität im Labor des Institut für Experimentalphysik. An der Kavität sind an den Flanschen rechts und links unten die HOM-Koppler montiert; am oberen rechten Flansch die Antenne, durch die das HF-Signal für den Beschleunigerbetrieb eingekoppelt wurde. Diese Komponenten sowie leicht entfernbare Teile der Wasserkühlung wurden inzwischen für den WISPDMX-Einsatz entfernt.

Für den Betrieb in HERA war die Kavität mit zwei HOM-Kopplern (High Order Mode), einem Koppler für die HF-Einspeisung und zwei magnetisch gekoppelten Pickupantennen ausgerüstet (s. Abb. 2.1). Für den WISPDMX Einsatz wurde die Antenne für die HF-Einspeisung und die HOM-Koppler ausgebaut; die Öffnungen wurden mit Blindflanschen verschlossen. Über die HOM-Koppler des HERA-System lässt sich keine Literatur finden, sie sind aber nahezu baugleich mit denen des SPS-Systems. Dort wurden mit den HOM-Kopplern um mehr als eine Größenordnung reduzierten Gütefaktoren gemessen [43]. Messungen der Resonanzfrequenzen mit einem *HP 8753C* Netzwerkanalysator mit *HP 85047A S PARAMETER TEST SET* vor und nach dem Ausbau der HOM-Koppler (s. Tab. 2.1) sind in guter Übereinstimmung mit diesen Werten.

Die beiden verbauten Pickupantennen (s. Abb. 2.3) sind magnetisch gekoppelt und auf die 208 MHz TM_{010} -Grundmode optimiert. Die Antennen sind so kurz, dass sie vollständig in ihrer Bohrung in der Wand der Kavität sitzen. Für den WISPDMX-Betrieb müssen neue Antennen entworfen und gebaut werden, die an Stellen mit besonders großen Feldstärken (s. 2.2) montiert werden.

2.1.1 Verstimmung der Resonanzfrequenzen

Damit das Experiment auf einen möglichst großen Massenbereich sensitiv ist, müssen die Resonanzfrequenzen der Kavität verstimmt werden. Hierfür wurden Stempeltuner (s. Abb.

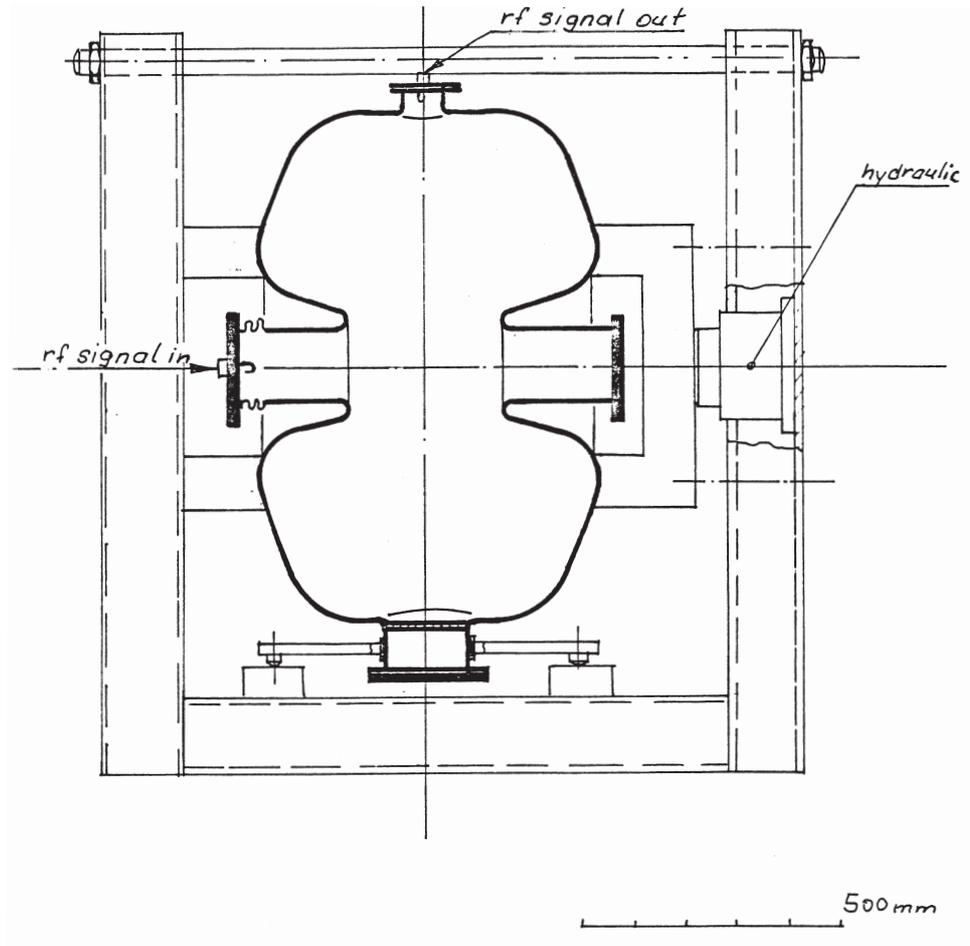


Abbildung 2.2: Schemazeichnung der zum plastischen Verformen der Kavitäten eingesetzten Apparatur. Mit einer ähnlichen Apparatur ließe sich elastisches Verformen der Kavität zum Verstimmen der Resonanzfrequenzen erzielen. Aus [41].



Abbildung 2.3: Magnetisch gekoppelte Pickupantenne.

Ohne HOM-Kopplern		Mit HOM-Koppler			
Pickup-Pickup		Pickup-HOM		Pickup-Pickup	
f/MHz	Q	f/MHz	Q	f/MHz	Q
207.88	55400	207.90	45800	207.90	44200
321.45	59800	-	-	320.59	36800
322.75	58900	-	-	-	-
390.50	72100	-	-	390.0	6150
392.09	75600	391.3	2100	391.44	56300
397.08	68600	-	-	-	-
399.34	73273	398.11	12300	398.07	34000
454.42	44300	-	-	465.85	12700
461.29	96900	462.0	1870	461.90	60600
489.81	71700	491.6	2290	491.67	4510
510.63	71600	512.1	2640	510.08	2440
513.55	60600	513.2	5650	512.37	18800
513.69	74400	513.92	10500	513.07	30900
515.97	67800	514.5	2740	515.37	42000
516.58	79200	515.34	31400	-	-
577.59	60400	558.8	2080	-	-
579.25	66500	579.85	11000	-	-
581.83	74300	-	-	-	-
590.37	72000	597.78	17500	-	-
597.81	79700	597.95	59050	597.94	42000
597.88	81300	598.65	13100	-	-

Tabelle 2.1: Messung der Resonanzfrequenzen f und Gütefaktoren Q der 208 MHz Kavität vor und nach dem Ausbau der HOM-Koppler mit einem *HP 8753C* Netzwerkanalysator mit *HP 85047A S PARAMETER TEST SET* durch Transmissionsmessung an den angegebenen Anschlüssen.



Abbildung 2.4: Geometrie des Stempeltuners zur Verstimmung der Resonanzfrequenzen der 208 MHz Kavität. Der Stempeltuner wird in einen der vorhandenen Flansche der Kavität eingebaut. Der Stempel mit einem Durchmesser von 146 mm kann bis zu 110 mm in die Kavität eingefahren werden.

2.4) konstruiert, die in die vorhandenen Flansche der Kavität eingebaut werden können. Der Tuner besteht im wesentlichen aus einem Stempel auf verkupferten Edelstahl mit 146 mm Durchmesser, der bis zu 110 mm in die Kavität eingefahren werden kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Frequenzverstimmung ist mechanisches Verformen der Kavität entlang ihrer Symmetrieachse, also Veränderung des *Gaps*. Diese Verformung kann entweder extern durch mechanischen Druck (vgl. Abb. 2.2) oder durch den Vakuumdruck beim Abpumpen der Kavität erzielt werden.

2.2 CST Simulationen

Um die Effektivität der verschiedenen Tuningmöglichkeiten abzuschätzen, wurden Simulationen der Kavität mit der kommerziellen Software *CST Microwave Studio* durchgeführt. Die CST-Simulationen liefern Resonanzfrequenzen und Gütefaktoren sowie Feldverteilung der Eigenmoden. Aus der Feldverteilung lässt sich der Formfaktor

$$\mathcal{G}_{\vec{n}} = \frac{\left(\int_V d^3x \vec{E} \cdot \vec{n} \right)^2}{V \int_V d^3x \vec{E}^2} \quad (2.1)$$

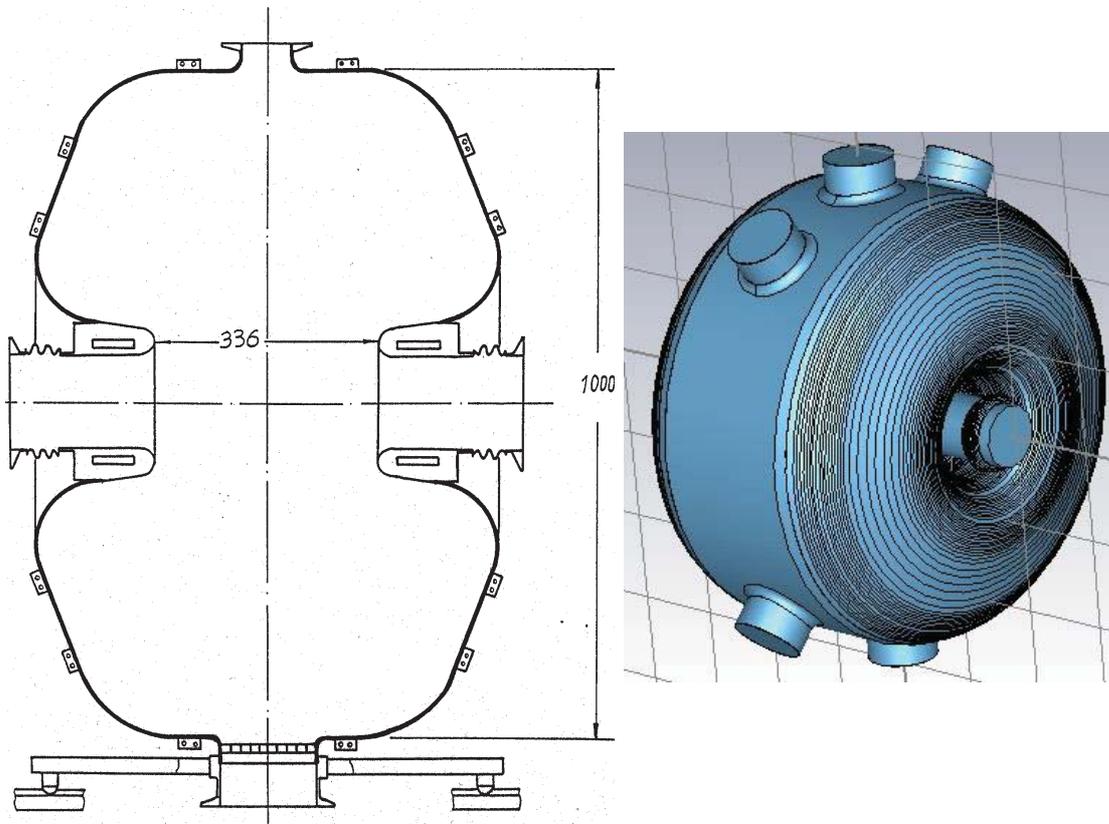


Abbildung 2.5: Zeichnung der 208 MHz HERA Kavitäten (links) aus einem Vortrag A. Gamps bei der CAS 2011 und daraus erstellte Geometrie für *CST MWS* Simulationen.

für eine beliebige Richtung in der Kavität \vec{n} bestimmen. Mit $\mathcal{G}_{\vec{n}}$ lässt sich leicht der Formfaktor für den ALPs bzw. HP Fall (vgl. 1.5.6) bestimmen. Für die numerische Eigenmodenlösung der Simulation mit N diskreten Stützstellen des Feldes erhalten wir für den Formfaktor:

$$\mathcal{G}_{\vec{n}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N \vec{E}_i \cdot \vec{n} \right)^2}{N \sum_{i=1}^N E_i^2}. \quad (2.2)$$

Bei der Berechnung wird durch einen Algorithmus die Richtung \vec{n} so gewählt, dass der Formfaktor maximal wird. Den Formfaktor für eine beliebige Richtung ist dann durch $\mathcal{G}_{\vec{n}} = \mathcal{G}_{\vec{n}_{max}} \cdot \cos^2 \theta$ mit dem von \vec{n} und \vec{n}_{max} eingeschlossenen Winkel θ gegeben.

2.2.1 Simulationen ohne Tuning

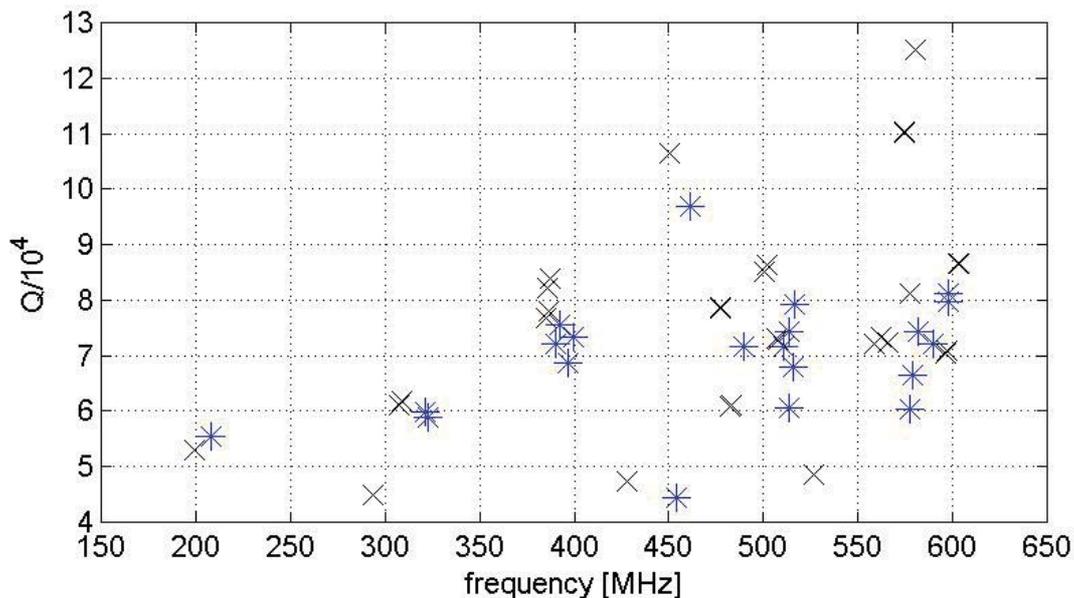


Abbildung 2.6: Vergleich von Simulationsergebnissen (schwarze Kreuze) mit gemessenen Resonanzen (blaue Sterne), Gütefaktor Q gegen Frequenz.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Messung der Resonanzmoden mit $f_{res} < 600$ MHz mit den Ergebnissen der *CST MWS* Simulation der 30 tiefsten Eigenmoden ist in Abb. 2.6 dargestellt. Angesichts der nicht genau bekannten Geometrie der Kavität ist die Übereinstimmung zufriedenstellend. Die Frequenz der Grundmode ist in der Simulation ca. 8 MHz kleiner als die tatsächlich gemessene. Systematisch sind die gemessenen Resonanzfrequenzen etwa 4% höher als die simulierten. In der Kombination aus Gütefaktor und Resonanzfrequenz lassen sich die Moden gut zuordnen und mit den simulierten Feldverteilungen identifizieren. Weiterhin hat diese Abweichung keinen signifikanten Einfluss auf die Feldgeometrie der Moden und das Verhalten der Resonanzfrequenz unter Fre-

quenzverstimmung.

In der Simulation wie in der Messung finden sich paarweise in Gütefaktor und Frequenz dicht beieinanderliegende Moden. Dies sind TE-Moden, d.h. Moden mit transversaler Orientierung des elektrischen Feldes bezüglich der Symmetrieachse der Kavität. Da die Eigenmoden der Kavität ein vollständiges Orthonormalsystem bilden, erwarten wir für TE-Moden jeweils zwei Lösungen. Die Zylindersymmetrie des Problems ist in der Simulation lediglich durch die Flansche gebrochen. In der Realität ist hingegen von einer Abweichung des Resonatorkörpers von perfekter Zylindersymmetrie auszugehen. Dies erklärt die in der Messung stärkere Aufspaltung der TE-Moden verglichen mit der Simulation. Für das Experiment sind insbesondere die Eigenmoden mit hohen Form- und Gütefaktoren von Interesse. Diese sind in Tab. 2.2 aufgeführt.

Mode	TM ₀₁₀	TE ₁₁₁	TM ₀₂₀	TE ₁₁₂	TE ₁₂₀	TM ₀₃₀
f/MHz	199	308	428	508	560	580
Q	53000	61000	47000	73000	72000	125000
\mathcal{G}	0.43	0.67	0.32	0.019	0.036	0.061

Tabelle 2.2: Resonanzfrequenz f , Gütefaktor Q und Formfaktor \mathcal{G} aus der Simulation der Kavität ohne Tuning. Für TM-Moden ist die Richtung \vec{n} , für die \mathcal{G} den angeführten maximalen Wert annimmt, parallel zur Symmetrieachse der Kavität. Für TE-Moden liegt \vec{n} orthogonal zur Symmetrieachse. Es sind nur die für die WISP-Suche interessanten Moden mit Formfaktoren $\mathcal{G} > 0.01$ angeführt.

2.2.2 Simulationen mit Stempeltunern

Zum Frequenzverstimmen der Resonanzmoden der Kavität wurde ein Tuningstempel konstruiert (Abb. 2.4). Der Stempel besteht aus verkupferten Edelstahl, hat einen Durchmesser von 146 mm und kann bis zu 110 mm in die Kavität eingefahren werden. Die Stempel können an vier Flanschen der Kavität montiert werden. Aufgrund der Position der Flansche lassen sich Winkel von 66° , 90° , 102° und 168° zwischen den Tunern realisieren. Zur Abschätzung des Tuningbereiches und des Verhaltens von Güte- und Formfaktoren wurden Simulationen der Kavität mit einem und zwei Stempeltunern durchgeführt.

Simulationen mit einem Plunger: Um die Wirkung des Stempeltuners auf die Resonanzmoden abzuschätzen, wurde die Kavität mit einem bis zur maximalen Tiefe von 110 mm ausgefahrenen Tuner in 10 mm Schritten simuliert. Aus den Feldverteilungen wurde anschließend der Formfaktor jeder Eigenmode berechnet. Die für das Experiment entscheidende Größe ist neben der Resonanzfrequenz das Produkt aus Gütefaktor Q und Formfaktor \mathcal{G} , da der kleinste WISP-Photon Kopplungsparameter, auf den das Experiment sensitiv ist, direkt proportional zu $1/\sqrt{Q \cdot \mathcal{G}}$ ist (vgl. 1.5.6). Die Ergebnisse sind in Abb. 2.7 dargestellt und im Anhang angegeben.

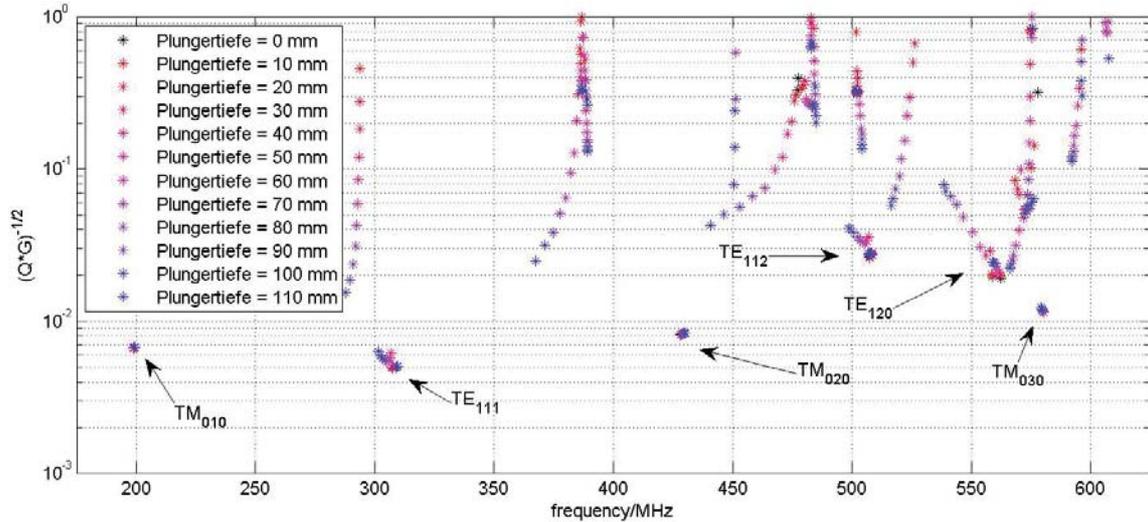


Abbildung 2.7: Ergebnisse der Simulation mit einem Plunger bis 110 mm Einfahrtiefe in Schritten von 10 mm. Die aus den Simulationsergebnissen bestimmte Größe $1/\sqrt{Q \cdot \mathcal{G}}$ ist proportional zur Sensitivität auf den WISP-Photon Kopplungsparameter.

Die Wirkung der Stempeltuner auf die Eigenmoden ist abhängig von der Ausrichtung des elektrischen Feldes zum Tuner. Für TM-Moden liegt das elektrische Feld und damit auch die Richtung des größten Formfaktors parallel zur Symmetrieachse der Kavität. Große Feldstärken finden sich für Moden niedriger Ordnung vornehmlich in der Nähe der Symmetrieachse. Deshalb ist die Wirkung des Stempeltuners auf solche Moden vergleichsweise klein, insbesondere bleibt die Feldverteilung und somit der Formfaktor praktische unbeeinflusst vom Plunger.

Die Fundamentalmode der Kavität (TM_{010}) lässt sich mit einem Stempeltuner um ca. 550 kHz verstimmen, wobei sich $1/\sqrt{Q \cdot \mathcal{G}}$ um weniger als 3% verändert. Weitere Moden mit großen Formfaktoren im betrachteten Frequenzbereich sind die TM_{020} und TM_{030} Mode. Die TM_{020} -Mode lässt sich durch einen Stempeltuner um ~ 800 kHz, die TM_{030} -Mode um ~ 1100 kHz verstimmen. Güte- und Formfaktor ändern sich kaum. Für die TM_{0n0} -Moden finden wir also Frequenzveränderungen von $\sim 0.2\%$ bei nahezu unveränderten Form- und Gütefaktoren.

Die Wirkung der Stempeltuner auf TE-Moden ist deutlich größer. Diese Moden haben große Feldstärken in der Nähe des Stempels. Ohne Plunger ist die Richtung des elektrischen Feldes aufgrund der Zylindersymmetrie der Kavität zunächst frei. Der Plunger bricht die Symmetrie und zwingt die Eigenmoden, sich relativ zum Stempel auszurichten. Von den aufgrund der beiden Polarisationsmöglichkeiten paarweise auftretenden TE-Moden richtet sich je eine parallel bzw. orthogonal zur Achse des Stempeltuners aus (vgl. Abb. 2.8). Die Resonanzfrequenz der Mode, deren elektrisches Feld sich parallel zur Stempelachse ausrichtet, nimmt mit der Stempel-einfahrtiefe ab, die der mit orthogonal ausgerichtetem Feld zu. Während die Formfaktoren der Moden mit orthogonal ausgerich-

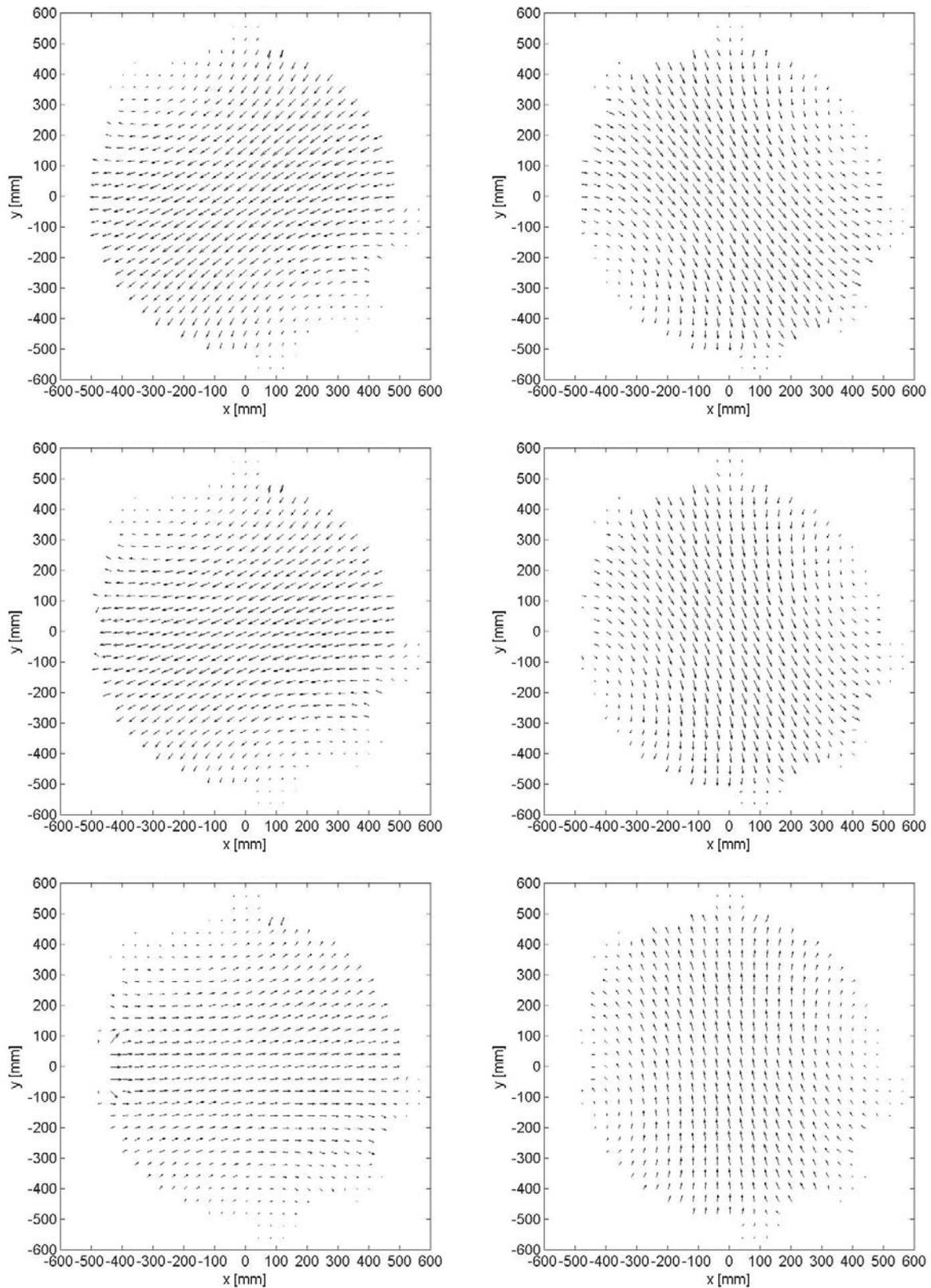


Abbildung 2.8: Projektion des elektrischen Feldes der TE_{111} Eigenmoden auf die zur Symmetrieachse orthogonale Ebene. Links ist jeweils die TE_{111} -Mode mit niedrigerer Eigenfrequenz dargestellt. Oben sind Feldverteilungen für 10 mm Plungertiefe, in der Mitte für 30 mm und unten für 60 mm dargestellt. Mit zunehmender Einfahrtiefe des Stempel-tuners richten sich die TE-Moden parallel bzw. orthogonal zum Plunger aus. Der Stempel wird von links entlang der x -Achse eingefahren.

tem Feld nur wenig vom Plunger beeinflusst wird, nimmt der Formfaktor der Moden mit parallel ausgerichtetem Feld mit größerer Einfahrtiefe des Stempels ab.

Für das WISPDMM eXperiment ist die TE_{111} Mode von besonderem Interesse. Von allen Resonanzmoden im Frequenzbereich von 200 bis 600 MHz findet sich für TE_{111} mit $\mathcal{G} \simeq 0.67$ der größte Formfaktor. Zusammen mit einem Gütefaktor von $Q \simeq 61000$ ist dies die Mode mit höchster Sensitivität auf WISPs. Die Polarisation mit paralleler Ausrichtung des elektrischen Feldes zum Stempeltuner lässt sich mit einem Plunger um ~ 6 MHz nach unten verstimmen. Die komplementäre Polarisation lässt sich mit einem Plunger um ~ 800 kHz nach oben verstimmen. Ein Stempeltuner ermöglichen also einen großen Tuningbereich von ca. 5 % bei gleichzeitiger Kontrolle über die Ausrichtung des elektrischen Feldes.

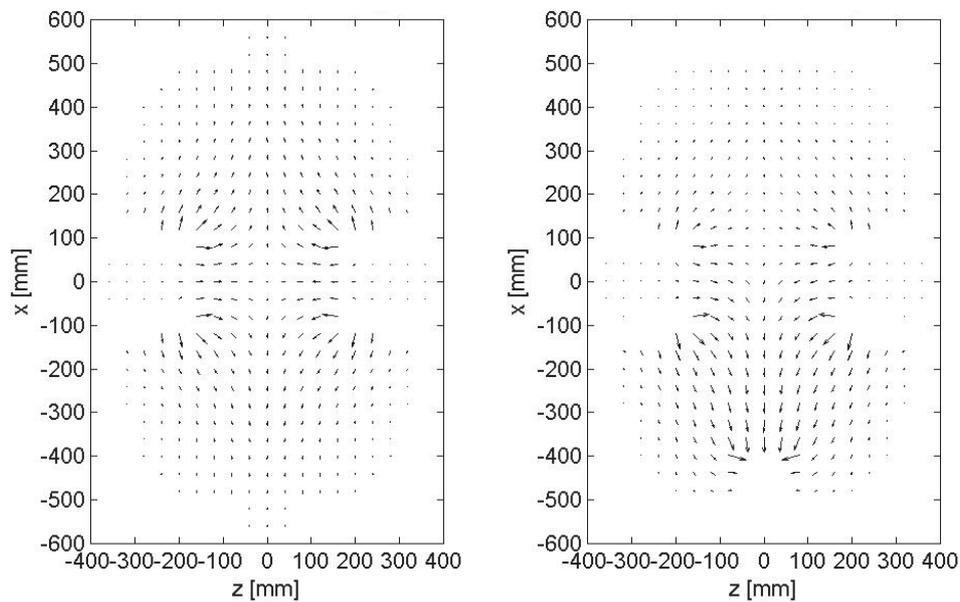


Abbildung 2.9: Feldverteilung der TM_{011} Mode ohne Stempeltuner (links) und mit maximal eingefahrenen Tuner (rechts) in der aus Symmetrieachse und Tuner aufgespannten Ebene. Während die Mode ohne Tuner aufgrund ihrer symmetrischen Verteilung einen verschwindenden Formfaktor zeigt, ergibt sich mit Tuner ein Formfaktor von einigen Prozent in Richtung des Stempels.

Moden die ohne Stempeltuner verschwindende Formfaktoren zeigen, entwickeln mit zunehmender Einfahrtiefe des Stempels ebenfalls einen Formfaktor von einigen Prozent. Da die Stempeloberfläche elektrisch gut leitet, richtet sich das elektrische Feld der Eigenmode lokal orthogonal zur Oberfläche aus (s. Abb. 2.9). Dies führt bei großen Einfahrtiefen des Stempels dazu, dass die Moden einen Formfaktor in Richtung der Stempelachse entwickeln. Durch diesen Effekt entwickeln alle Eigenmoden bei genügend tief eingefahrenem Stempel einen Formfaktor von einigen Prozent und werden somit sensitiv auf WISPs. Das Ausmaß der möglichen Frequenzverstimmung hängt wiederum von der Ausrichtung der elektrischen Felder zum Stempeltuner ab und ist im Allgemeinen für TE-Moden deutlich

größer als für TM-Moden.

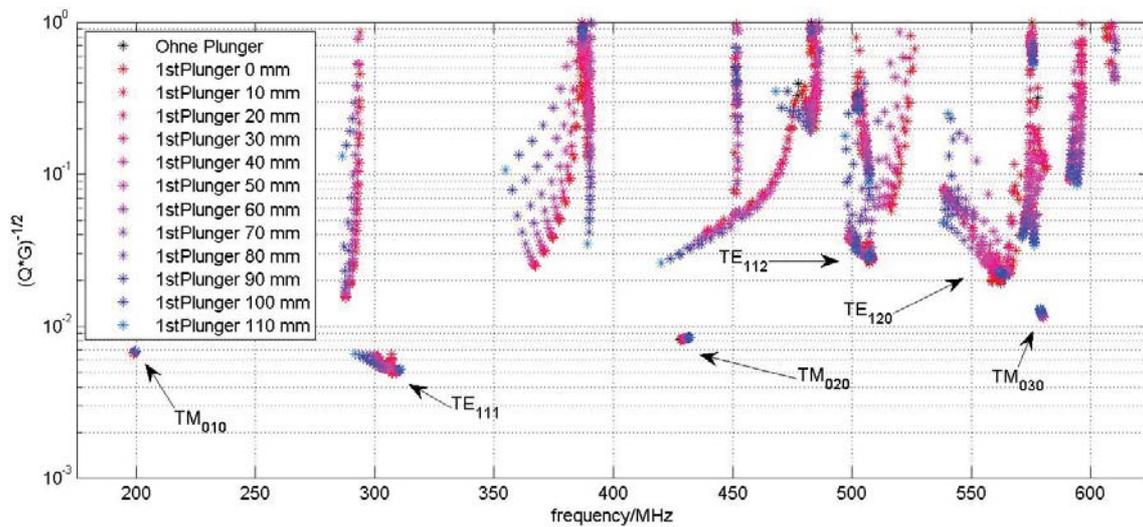


Abbildung 2.10: Ergebnisse der Simulation mit zwei Plunger bis 110 mm Einfahrtiefe in Schritten von 10 mm. Die Farbkodierung gibt jeweils die Einfahrtiefe des ersten Stempels an. Die Einfahrtiefe des zweiten Stempels ist größer oder gleich der Einfahrtiefe des ersten Stempels. Die aus den Simulationsergebnissen bestimmte Größe $1/\sqrt{Q \cdot \mathcal{G}}$ ist proportional zur Sensitivität auf den WISP-Photon Kopplungsparameter.

Simulation mit zwei Stempeltunern: Resonanzfrequenzen und Gütefaktoren verhalten sich mit zwei Plungern ähnlich wie im Falle eines einzelnen Plungers. Um die Kontrolle der Feldausrichtung der TE-Moden wie im Falle eines einzelnen Plungers auszunutzen, ist eine gegenüberliegende Anordnung der Stempeltuner die einfachste Wahl. Dann richten sich die Moden wiederum parallel bzw. orthogonal zu dieser Achse aus. Aufgrund der Lage der Flansche ist eine solche Anordnung in der 208 MHz-Kavität nicht möglich. Die Simulationen zeigen jedoch, dass die Ausrichtung der Moden für den größten realisierbaren Winkel zwischen den Tunern von 168° praktisch identisch ist. Es wurden wiederum Einfahrtiefen bis 110 mm in Schritten von 10 mm simuliert. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.10 dargestellt.

Die Resonanzfrequenz der TM_{010} -Mode lässt sich mit zwei Stempeltunern um ~ 1 MHz, die der TM_{020} -Mode um ~ 4 MHz und die TM_{030} -Mode um ~ 1.5 MHz verstimmen. Für TM_{010} und TM_{020} verdoppelt sich der Tuningbereich gegenüber einem Plunger nahezu. Die TE-Moden mit nichtverschwindenden Formfaktoren lassen sich mit zwei Tuner ebenfalls etwa doppelt so stark verstimmen wie mit einem Tuner. Für die TE_{111} -Mode findet sich ein Tuningbereich von ~ 15 MHz.

Moden, für die ohne Stempeltuner der Formfaktor verschwindet, entwickeln auch mit mehreren Plungern einen Formfaktor von einigen Prozent. Der Formfaktor ist allerdings aufgrund der Symmetrie nur für stark unterschiedliche Einstellungen der Stempel von null

verschieden; sind beide Stempel gleichweit eingefahren richtet sich das Feld zwar lokal an den Stempeloberflächen aus, da sie die Tuner aber gegenüberliegen, hebt sich der Effekt über das gesamte Volumen der Kavität auf.

Ableitung der Schrittweite: Beim Verstimmen der Resonanzfrequenzen mit Stempeltunern muss die Schrittweite der Tunertiefe für die Messung so gewählt werden, dass die Resonanzfrequenzen zwischen benachbarten Schritten höchstens um die Bandbreite der Resonanzfrequenz verstimmt werden. Wird die Schrittbreite größer gewählt, überlappen sich die Frequenzbereiche nicht mehr, auf denen das Experiment sensitiv auf WISP-Photon Konversationen ist.

Die größte Verstimmrate der Moden mit großen Formfaktoren aus den Simulationen beträgt 300 kHz/mm. Mit Gütefaktoren von ~ 30000 und Resonanzfrequenzen ~ 450 MHz haben diese Moden Bandbreiten von $b = f_{res}/Q \simeq 15$ kHz. Um den größtmöglichen Frequenzbereich abzusuchen, sind somit Schrittweiten < 0.05 mm der Stempeltuner erforderlich.

2.2.3 Tuning durch Deformation

Durch eine Veränderung des *Gaps* der Kavität lassen sich die Resonanzfrequenzen verstimmen. Da die Geometrie der Kavität sich hierbei nur wenig ändert, bleiben Form- und Gütefaktoren weitgehend unbeeinflusst. Aufgrund ihrer Feldverteilung sind TM-Moden auf ein solches Stimmverfahren besonders sensitiv.

Praktisch lässt sich die Änderung des *Gaps* durch Deformation der Kavität entlang ihrer Symmetrieachse erzielen. Dafür stehen zwei Methoden zur Verfügung: Durch ein Spindelhubgetriebe oder einen Hydraulikstempel kann die Kavität mechanisch entlang ihrer Symmetrieachse verformt werden. Aufgrund der massiven Bauweise erfordert dies jedoch erheblichen Kraftaufwand und somit einen aufwendigen Tuningapparat. Eine elegante Möglichkeit, die Deformation zu realisieren, ist das Abpumpen der Kavität. Durch den Vakuumdruck verformt sich die Kavität dann vornehmlich entlang ihrer Symmetrieachse. Erfahrungen aus dem Beschleunigerbetrieb zeigen eine relative Änderung der Resonanzfrequenzen der Fundamentalmode um $\sim 1.5\%$ durch den Vakuumdruck.

Zur Abschätzung der Effektivität des beschriebenen Tuningmechanismus sowie der Einflüsse auf Güte- und Formfaktoren wurden CST-Simulationen für einen Deformationsbereich von ± 1 cm durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Anhang aufgeführt. Wie erwartet verändern sich Güte- und Formfaktoren durch die Deformation nur wenig. Insbesondere bedeutet dies, dass im Frequenzbereich $f_{res} < 500$ MHz nur die TM_{010} , TE_{111} und TM_{020} Moden zur Suche nach ALPs bzw. Hidden Photons genutzt werden können. Die übrigen Resonanzmoden sind aufgrund ihres verschwindenden Gütefaktors nicht sensitiv auf $WISP \rightarrow \gamma$ Konversionen. Dies lässt sich umgehen, wenn zusätzlich zum Tuning durch Deformation Stempeltuner verwendet werden: Dann werden wie oben beschrieben

auch Moden, die ohne Stempeltuner verschwindende Formfaktoren haben, sensitiv auf den Nachweis von WISP $\rightarrow \gamma$ Konversion und können durch Modifikation des *Gaps* weiter verstimmt werden.

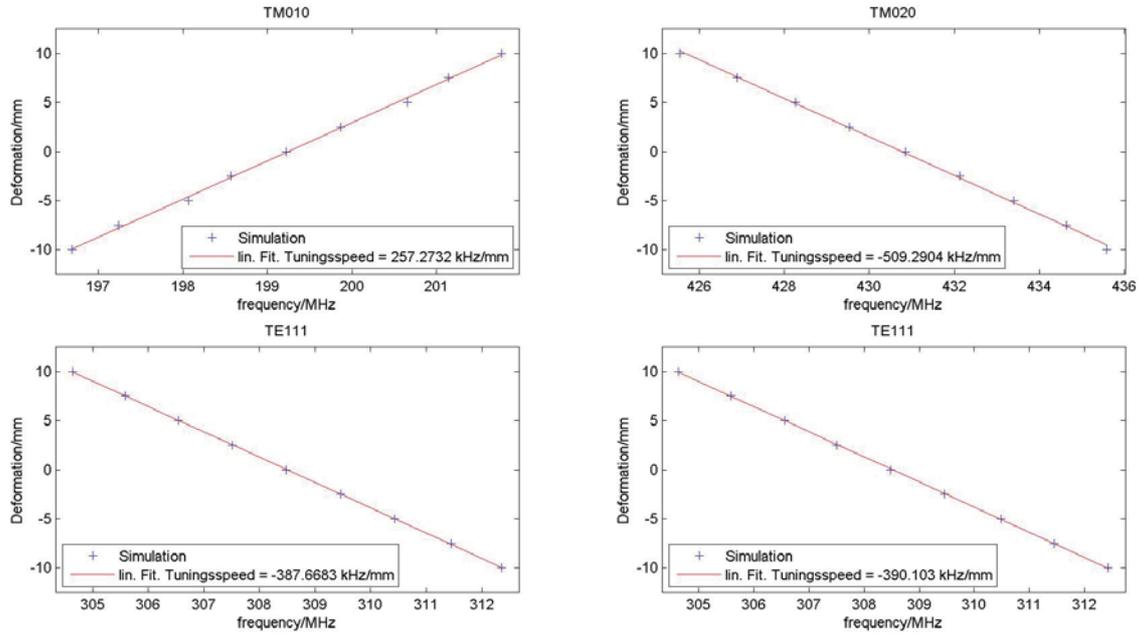


Abbildung 2.11: Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Deformation des *Gaps* für TM₀₁₀ - oben links, TM₀₂₀ - oben rechts und die beiden TE₁₁₁ Moden - unten. Blaue Kreuze zeigen die Ergebnisse der CST-Simulation, die rote Linie ist eine linearer Fit (χ^2) an die Simulationsergebnisse.

Für die Moden mit großen Formfaktoren wurde die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Änderung des *Gaps* näher untersucht (s. Abb. 2.11). Für die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Deformation des *Gaps* finden wir einen linearen Zusammenhang mit einer relativen Verstimmung der Mode in Abhängigkeit von der Deformation $\Delta f/f \sim \frac{1}{1000} \times \frac{\text{Deformation}}{\text{mm}}$. Zusammen mit typischen Gütefaktoren der betrachteten Moden $Q \sim 50000$ muss die Deformation also mit einer Genauigkeit $\lesssim 20 \mu\text{m}$ durchgeführt werden. Dies erschwert die Realisierung eines Tuningmechanismus durch mechanische Deformation. Das Verstimmen der Resonanzfrequenzen durch schrittweises Abpumpen der Kavität und Ausnutzen des Vakuumdrucks ist hingegen eine leicht realisierbare und gut kontrollierbare Tuningmöglichkeit, die sich auch in Kombination mit den Stempeltunern einsetzen lässt.

2.3 Messapparatur

Die Messapparatur des Experimentes besteht aus den oben beschriebenen Pickup-Antennen, einen Breitbandverstärker und einer PCI-Express Digitalisierungskarte.

Pickup-Antennen: Zurzeit werden die aus dem Beschleunigerbetrieb vorhandenen Pickup-Antennen verwendet. Wie bereits in 2.1 beschrieben handelt es sich um magnetisch gekoppelte Antennen, die auf die TM_{010} -Grundmode optimiert sind. Die Antennen sind so kurz, dass sie vollständig in ihrer Bohrung in der Kavitätswand sitzen. Da der zur Messung der Eigenmoden verwendete *HP 8753C*-Netzwerkanalysator einen stark nichtlinearen Bandpass im Frequenzbereich 150...750 MHz aufweist, steht bisher keine Möglichkeit zur Verfügung, die Kopplung der Antennen an die Eigenmoden zu untersuchen. Bis die Kopplung besser verstanden ist, wird der Kopplungsparameter κ für die Grundmode konservativ zu 0.1 und für alle Moden höherer Frequenz zu 0.01 abgeschätzt.

Anders als beim Beschleunigerbetrieb, wo vergleichsweise schwache Kopplung an die Moden ausreicht, da eine große HF-Leistung im Resonator gespeichert ist, werden für WISPD_{MX} Antennen mit möglichst starker Kopplung benötigt. Dafür werden elektrisch gekoppelte Pickup-Antennen an den Tunerstempel installiert werden; aus den CST-Simulationen ist bekannt, dass dort besonders große elektrische Felder auftreten. Weiterhin wird ein Blindflansch mit einer Durchführung zur Installation magnetischer wie elektrischer Pickup-Antennen ausgerüstet. Dieser Blindflansch kann dann wahlweise an nicht durch Stempeltuner belegten Flanschen angeschlossen werden.

Breitbandverstärker: Zur Verstärkung des Antennensignals können zwei vom MPIfR zur Verfügung gestellte Breitbandverstärker verwendet werden.

Der erste Breitbandverstärker (MITEQ AFS1-00300090-10-18P-4-GW) weist auf dem mit WISPD_{MX} untersuchten Frequenzbereich $f = 200 \dots 600$ MHz eine minimale Verstärkung von $g = 18.2$ dB bei einem maximalen Rauschfaktor von 1.05 dB auf.

Alternativ steht ein zweiter Verstärker (WanTcom WBA0110B) zur Verfügung. Dieser weist auf dem Frequenzbereich von 100 MHz bis 1.0 GHz eine Verstärkung von $g = 23.0 \pm 1.0$ dB mit einem Rauschfaktor ≤ 0.8 dB auf [45].

Um das Einkoppeln externer RF-Signale zu minimieren, wird der Verstärker mit einem möglichst kurzen Kabel mit der Pickup-Antenne verbunden. Um die bestmögliche Signalverstärkung zu erhalten, können beide Verstärker kombiniert werden. Aufgrund der geringeren Rauschzahl des WantCom-Verstärkers wird das Pickup-Signal zunächst mit diesem Verstärker und anschließend mit dem MITEQ-Verstärker verstärkt. Auf dem Frequenzbereich 200...600 MHz wird so eine minimale Verstärkung von 40.2 dB erreicht.

Digitalisierung: Das Ausgangssignal der Breitbandverstärker wird mit einer 2-Kanal PCI-Express Karte (Alazartech ATS9360) digitalisiert. Die Karte verwendet 12-bit ADCs (TI ADC12D1800) mit einem dynamischen Bereich von ± 400 mV. Die maximale Abtastrate pro Kanal beträgt 1.8 GHz [44]. Die Steuerung und Auswertung der Messung wird auf dem Mess-PC in *MATLAB* durchgeführt. Die Dauer der kontinuierlichen Datennahme ist durch die Datenübertragungsrate vom Kartenspeicher in den Arbeitsspeicher des PCs sowie die Speichergröße beschränkt; zurzeit lassen sich maximal $3 \cdot 10^6$ Abtastwerte

im Einkanalmodus ($3 \cdot 10^5$ Werte im Zweikanalmodus) aufnehmen. Bei einer Abtastrate von 1.2 GHz entspricht dies im Einkanalmodus einer Messdauer von 2.5 ms. Das Messsignal wird anschließend durch einen FFT-Algorithmus ausgewertet. Nach Durchführung der FFT wird die Karte erneut ausgelesen.

Die erforderliche spektrale Auflösung der Messung bestimmt sich aus der Bandbreite der Resonanzmoden $b_{res} \simeq 4$ kHz sowie der erwarteten Bandbreite der WISPs $b_{WISP} = 0.16 \left(\frac{m}{2\pi \cdot 200 \text{ MHz}} \right)$ kHz. Mit $3 \cdot 10^6$ Abtastwerten und einer Abtastrate von 1.2 GHz lässt sich eine spektrale Auflösung von 0.4 kHz erreichen. Da mit steigender spektraler Auflösung die Berechnungszeit der FFT exponentiell zunimmt, muss für das Experiment ein Kompromiss für die FFT-Auflösung gefunden werden. Mit einer Auflösung von 1.1 kHz bei einer Bandbreite von 600 MHz erreicht die Messroutine auf dem zurzeit verwendeten PC¹ ein durch die Berechnung der FFT dominiertes Mess- zu Totzeitverhältnis von 1:56.

Ein solches Spektrum nimmt einen Speicherplatz von ~ 8 MB ein. Die Speicherung jedes gemessenen Spektrums ist somit nicht praktikabel. Um die zu speichernde Datenmenge zu reduzieren und gleichzeitig das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern, werden die Spektren gemittelt. Die Zeit, über die gemittelt werden darf, wird durch die zu erwartenden zeitliche Abhängigkeit des WISP-Signals sowie die Stabilität der Resonanzmoden begrenzt. Für Hidden Photons hängt die Konversationswahrscheinlichkeit von der räumlichen Orientierung der Kavität ab, falls das HP-Feld eine Vorzugsrichtung aufweist (vgl. 1.5.6). Aufgrund der Erddrehung ändert sich der Winkel θ zwischen der Kavität und dem HP-Feld um maximal $0.25^\circ/\text{min}$. Wird die Messung über 15 min gemittelt, ergibt sich mit der Abhängigkeit der erwarteten Leistung von der Orientierung der Kavität $P \propto \cos^2 \theta$ eine Variation von $\Delta P/P \leq 4.3 \cdot 10^{-3}/(15 \text{ min})$. Für ALPs-Suchen wird keine Abhängigkeit der Leistung von der räumlichen Orientierung der Kavität erwartet.

2.3.1 Frequenzstabilität

Zur Abschätzung der Stabilität der Resonanzmoden wurde die Fundamentalmode über einen Zeitraum von 16 h mit einem *HP 8753C*-Netzwerkanalysator angeregt und alle 10 s das Anregungssignal und das Ausgangssignal der Pickupantenne der Kavität gemessen. Das Signal des Netzwerkanalysators wurde über einen RF-Splitter abgegriffen. Beide Signale wurden mit der oben beschriebenen Methode gemessen und die Spektren gespeichert. Anschließend wurde an die Messdaten um die Resonanzfrequenz jeweils ein Lorentzprofil gefittet (χ^2). Die Ergebnisse der Fits für die Resonanzfrequenz und die Peakleistung sind in Abb. 2.12 dargestellt.

Nach einem anfänglichen Drift der gemessenen Peakfrequenz für Netzwerkanalysator und Pickup in der ersten Stunde stabilisiert sich die Frequenz. Der Variationskoeffizient der Resonanzfrequenz beträgt $\frac{\sigma_f}{f} \sim 10^{-6}$ und ist zeitunabhängig. Der gemessene Drift der Resonanzfrequenz nach dem anfänglich stärkeren Drift ist kleiner als 5 Hz/h.

¹WIN 7 Enterprise 64 bit, Intel i7-2600, 16 GB RAM

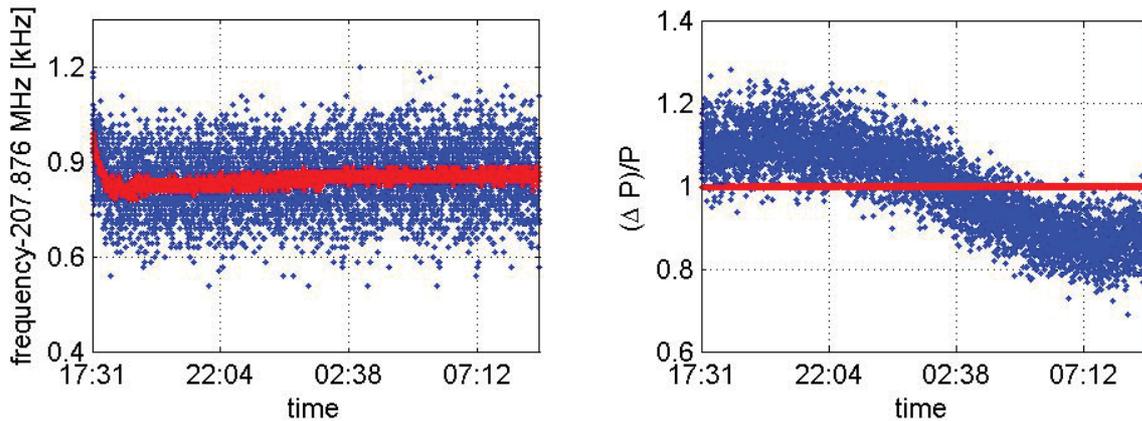


Abbildung 2.12: Frequenz- (links) und Leistungsstabilität (rechts) der Fundamentalmode gemessen über einen Zeitraum von 16 Stunden. In rot ist das Anregungssignal, in blau das Pickupsignal eingezeichnet. Die Standardabweichung der Resonanzfrequenz ist für das Anregungs- und das Pickupsignal kleiner als die Breite eines FFT-bins.

Die am Pickup gemessene Leistung ändert sich um $\sim 20\%$ über den gesamten Zeitraum der Messung bei unveränderter Anregungsleistung. Die Schwankung ist auf den Drift der Frequenz des Netzwerkanalysators gegenüber der exakten Resonanzfrequenz der Kavität zurückzuführen.

Aus der gemessenen Stabilität der Resonanzmoden ergeben sich keine Einschränkungen auf die Messdauer. Die zulässige Zeit, über die Spektren gemittelt werden dürfen, ist somit nur von der Änderung der räumlichen Orientierung der Kavität für Hidden Photons bzw. von der Stabilität des Magnetfeldes für ALPs Suchen abhängig.

2.3.2 Rauschleistung der Messapparatur

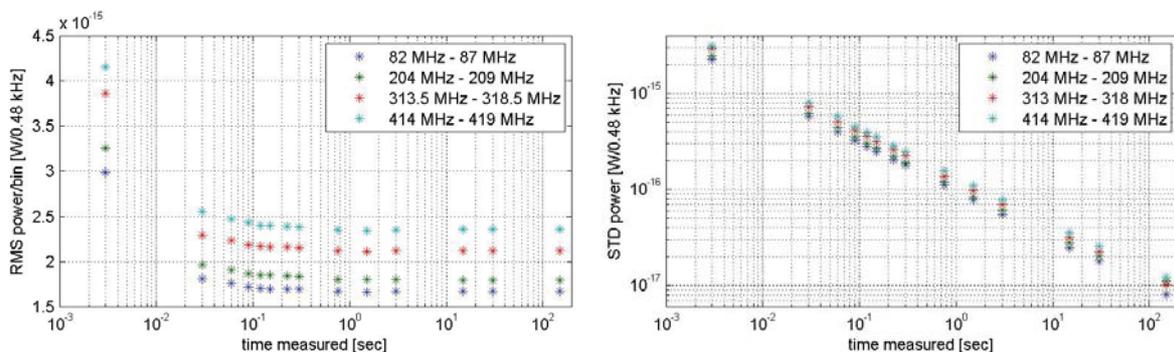


Abbildung 2.13: Auswertung der Messdaten des ATS9360-Untergrunds (s. Abb. 2.14). Das quadratische Mittel (RMS) und Standardabweichung (STD) wurde für vier Frequenzfenster von 5 MHz Breite, in denen keine schmalbandigen Untergrundmerkmale gefunden wurden, analysiert. Es gilt zu beachten, dass das quadratische Mittel semilogarithmisch aufgetragen ist, während die Standardabweichung doppel logarithmisch gezeigt ist.

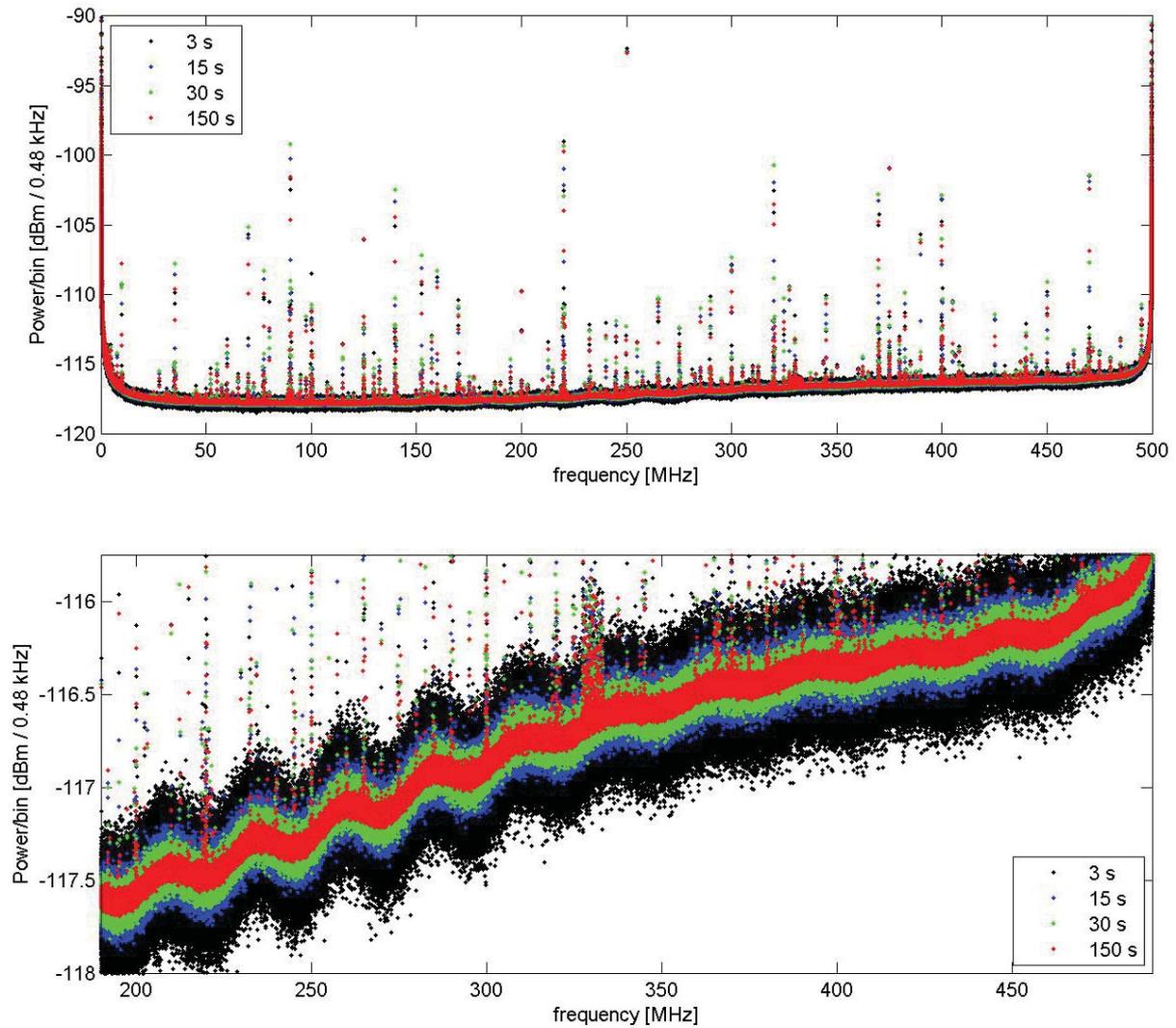


Abbildung 2.14: Messung des Untergrunds der Alazartech ATS9360 Digitalisierungskarte. Gemessene Leistung pro FFT-bin für eine akkumulierte Messdauer von 3 s (schwarz), 15 s (blau), 30 s (grün) und 150 s (rot). Die obere Abbildung zeigt den gesamten Messbereich, unten ist das Rauschen im Frequenzbereich von 200 MHz bis 500 MHz dargestellt, der für WISPDMMX von besonderem Interesse ist. Siehe Text für eine Beschreibung des Untergrundes.

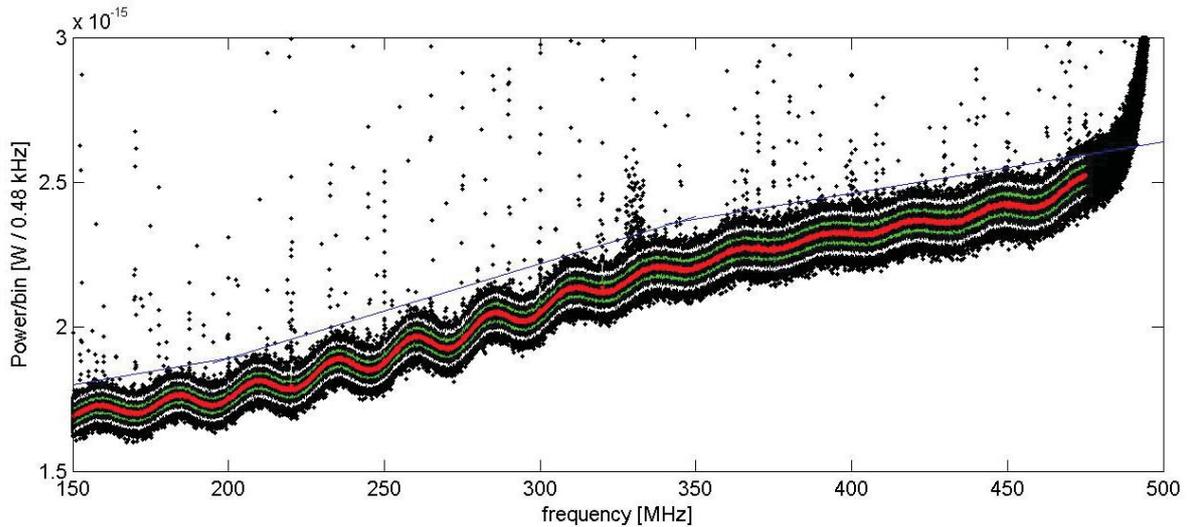


Abbildung 2.15: Gemessene Leistung des ATS9360-Untergrunds pro FFT-Bin aus 15 s akkumulierter Messzeit (schwarz) im Frequenzbereich von 150 MHz bis 500 MHz. In Rot ist das berechnete quadratische Mittel pro 100 kHz Bin eingezeichnet, in weiß (grün) das 1σ (2σ) Fehlerband. Dünne blaue Linien zeigen das obere Limit der Daten, die für die Berechnung des Mittelwertes und der Standardabweichung verwendet wurden.

Zur Einschätzung des Untergrunds der Messapparatur wurde zunächst die Rauschleistung der Alazartech ATS9360 Digitalisierungskarte vermessen. Dafür wurden alle Eingänge der Karte mit $50\ \Omega$ -Abschlusswiderständen versehen. Es wurde die gleiche Messprozedur wie für der WISP-Suche (s. 2.3) verwendet. Die Abtastrate betrug 1 GHz bei einer Länge der Einzelmessungen von $3 \cdot 10^6$ Abtastwerten. Die Spektren wurden mit einer spektralen Auflösung von 0.48 kHz berechnet und unabhängige Messungen über Nettogesamtmessdauern von 3 ms bis 150 s gemittelt. Die Messdaten der vier längsten Messreihen sind in Abb. 2.14 dargestellt.

Die Spektren zeigen unabhängig von der Messdauer eine Reihe von Merkmalen auf. Am unteren und oberen Ende des Frequenzbereiches steigt der Untergrund auf einer Breite von ca. 15 MHz von einem Basisniveau < -150 dBm auf mehr als -90 dBm an. Bei der halben Nyquist-Frequenz (sowie an $1/4$ und $3/4$ der Nyquist-Frequenz) finden sich große Maxima von ~ -92 dBm (~ -106 dBm) mit einer Breite von ca. 1 kHz. Ähnliche, aber schwächere Merkmale finden sich auch bei $1/8$, $3/8$, $5/8$ und $7/8$ der Nyquistfrequenz usw. in abnehmender Stärke.

Des Weiteren finden sich an allen Vielfachen von 10 MHz scharfe Maxima mit einer Breite von einige 10 kHz, die von einer Reihe schnell an Stärke abnehmender Maxima mit einem Abstand von ± 400 kHz begleitet werden. Über den gesamten Frequenzbereich unregelmäßig verteilt finden sich eine weitere Reihe scharfer Maxima, die ebenfalls Breiten von einige 10 kHz aufweisen.

Für alle bisher beschriebenen Untergrundmerkmale findet sich keine Abhängigkeit der spektralen Leistung oder Frequenz von der Messdauer. Als Ursache der Artefakte kann

folglich unkorreliertes Rauschen ausgeschlossen werden. Die Merkmale treten weiterhin unabhängig von der Anzahl der Abtastwerte einer Einzelmessung auf und qualitativ gleich auch bei Skalierung der Abtastfrequenz um mehr als eine Größenordnung. Bei Probemessungen mit einer Alazartech ATS9625-Digitalisierungskarte konnten diese Artefakte reproduziert werden. Als Ursache der Untergrundmerkmale wird ungenügende Abschirmung des karteninternen Taktgebers, der auf beiden Karten mit einer Frequenz von 10 MHz läuft, oder ein durch die ADC-Ausleserate induzierte Signal vermutet.

Neben den scharfen Maxima des Untergrundspektren sowie dem Anstieg an den Enden des Frequenzbereiches findet sich auch eine periodische Modulation des Untergrundes mit einer Periode von ca. 27 MHz. Diese ist mit einer Amplitude von ca. 0.5 dBm besonders deutlich im Frequenzbereich von 100 MHz bis 350 MHz ausgeprägt. Als Ursache dieser Modulation kommen interne Verbindungen mit einer Längen von $c/27 \text{ MHz} \simeq 11 \text{ m}$ infrage.

Zur Untersuchung des weiteren Untergrundes wurde auf vier über den Messbereich verteilten Frequenzbereichen mit einer Breite von 5 MHz, in denen keine der oben beschriebenen scharfen Untergrundmerkmale auftreten, das quadratische Mittel sowie die Standardabweichung berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.13 dargestellt. Wie für unkorreliertes Rauschen zu erwarten, nimmt das quadratische Mittel zunächst mit steigender Gesamtmesszeit schnell ab und nähert sich asymptotisch an einen Grenzwert an. Wie schon in den Spektren zu sehen, nimmt das Mittel des Untergrundes mit steigender Frequenz schwach zu. Die Abhängigkeit der Standardabweichung σ_P von der Messzeit t entspricht für alle betrachteten Frequenzintervalle in guter Näherung dem für unkorreliertes Rauschen erwarteten Verhalten $\sigma_P \propto t^{-1/2}$.

Um eine Eichkurve der Untergrundleistung zu gewinnen, wurde das Spektrum mit einer Gesamtmessdauer von 15 s im Frequenzbereich von 150 MHz bis 475 MHz näher untersucht. Zur Untersuchung des unkorrelierten Untergrundes wurden zunächst die scharfen korrelierten Untergrundmerkmale durch oberhalb des thermischen Rauschens gesetzte Limits auf die Leistung ausgeschlossen. Anschließend wurden mit einer Binbreite von 100 kHz das quadratische Mittel sowie die Standardabweichung des gemessenen Spektrums bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.15 dargestellt.

Weitere Untergrundbeiträge entstehen durch das Rauschen des Verstärkers sowie des von der Pickup-Antenne eingesammelten thermischen Rauschens der Kavität. Zur Abschätzung des Beitrages des Verstärkers wurde das Rauschen über eine akkumulierte Messzeit von 16 s mit und ohne Verstärker gemessen (s. Abb. 2.16). Mit dem MITEQ Verstärker mit $g = 18 \text{ dB}$ liegt das Niveau des thermischen Rauschens ca. 0.5 dB über dem Niveau ohne Verstärker. Die angegebene Rauschzahl des Verstärkers beträgt 1 dB. Weiterhin fügt der Verstärker dem Rauschspektrum eine Reihe scharfer Maxima mit Breiten von ca. 100 kHz und Peakleistungen $\leq -98 \text{ dBm}$ im Frequenzbereich 87...107 MHz hinzu. Diese liegen jedoch außerhalb des für WISPDMMX interessanten Messbereichs und sind somit nicht von weiterem Interesse.

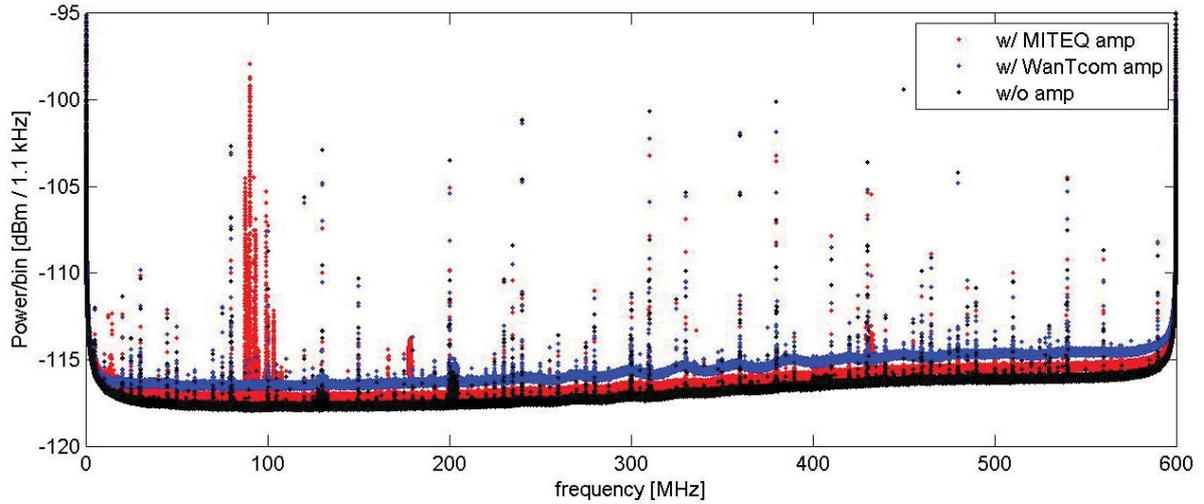


Abbildung 2.16: Über eine Gesamtnettomessdauer von 16 s mit der ATS9360 Karte gemessene Rauschleistung mit dem vom MITEQ 18 dB Verstärker (rot), dem WanTcom 23 dB Verstärker (blau) sowie ohne Verstärker (schwarz). Abtastrate = 1.2 GHz. Die Eingänge der Karte bzw. des Verstärkers waren jeweils mit 50 Ω -Abschlusswiderständen versehen.

Die Messung mit dem WanTcom Verstärker mit $g = 23$ dB zeigt keine gegenüber dem Untergrundspektrum ohne Verstärker veränderten Merkmale auf. Das gesamte Spektrum ist um ca. 1 dB nach oben verschoben. Die angegebene Rauschzahl des Verstärkers beträgt 0.8 dB.

Weitere Merkmale finden sich aber zwischen 420 MHz und 433.5 MHz. Dort findet sich insbesondere ein breites Störsignal, welches sich mit einer maximalen Leistung von -105 dBm über einen Frequenzbereich von etwa 2 MHz Breite erstreckt.

2.4 Magnete

	B [T]	D [mm]	L [mm]	Art
H1, DESY	1.15	1600	3600	Solenoid
ZEUS, DESY	1.8	1720	2800	Solenoid
M1, CERN	3	1400	820	Helmholtz

Tabelle 2.3: Magnetfeldstärke B , Durchmesser D und Länge L einiger für WISPDMMX in Betracht kommender Magnete. [46, 47]

WISPDMMX ist in seiner derzeitigen Konfiguration lediglich sensitiv auf Hidden-Photons. Damit das Experiment auch als ALPs-Haloskop fungiert, muss die Kavität in einem Magnetfeld betrieben werden. Aufgrund der äußeren Abmessungen der 208 MHz-HERA Kavität mit einem Durchmesser inklusive Flansche von ca. 116 cm und einer Breite von 77 cm existieren nur wenige geeignete Magnete. Bei Verwendung der Stempeltuner für die

ALPS-Suche erhöht sich der Durchmesser pro Tuner um 56 cm.

Aufgrund der Ausrichtungen der Formfaktoren ist das Experiment für TM-Moden mit entlang der Symmetrieachse der Kavität ausgerichtetem Magnetfeld und für die TE-Moden mit parallel bzw. orthogonal zur Tunerachse ausgerichtetem Magnetfeld zu betreiben. Um das Potential von WISPDMX vollständig auszunutzen, ist also ein Magnet Durchmesser und Länge > 1720 mm beim Betrieb mit einem Stempeltuner bzw. 2280 mm für zwei Stempeltuner erforderlich.

Aufgrund ihrer Abmessungen und ihres Standortes sind die H1 und ZEUS-Solenoiden am geeignetsten. Die Stempeltunern müssten für die Nutzung in diesen Magneten allerdings kompakter konstruiert werden. Alternativ kann auch der M1-Magnet am CERN verwendet werden. Dieser Magnet stellt ein stärkeres Magnetfeld als die DESY-Magneten zur Verfügung, der Innenraum ist aber kleiner. Die Abmessungen und Magnetfeldstärken dieser Magnete sind in Tab. 2.3 dargestellt.

Eine weitere Möglichkeit ist der Spektromettermagnet des HERA-B Experimentes mit einer Länge von $L = 4$ m und einem Durchmesser $1.9 \text{ m} \leq D \leq 2.6$ m. Die Magnetfeldstärke im Inneren beträgt > 1.4 T [48].

2.5 Abschätzung der Sensitivität von WISPDMX

Die Sensitivität eines WISP-Haloskopes auf den ALPs-Photon Kopplungsparameter $g_{\phi\gamma}$ bzw. Hidden Photon-Kopplungsparameter bei resonanter Verstärkung $m_{\phi/\gamma'} = \omega_{res}$ lässt sich mit der Diceschen Radiometergleichung für ALPs zu

$$g_{\phi\gamma} [\text{GeV}^{-1}] = 4.81 \cdot 10^{-6} \kappa^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{S}{N}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T_N}{K}\right)^{\frac{1}{2}} Q^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{V}{I}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{B_0}{T}\right)^{-1} \mathcal{G}_{\phi}^{-\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

$$\times \left(\frac{m_{\phi}}{\text{eV}}\right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{\rho_0}{\text{GeV}/\text{cm}^3}\right)^{-\frac{1}{2}} Q_{\phi}^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{t}{s}\right)^{-\frac{1}{4}}$$

und für Hidden Photons zu

$$\chi = 9.32 \cdot 10^{-13} \kappa^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{S}{N}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T_N}{K}\right)^{\frac{1}{2}} Q^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{V}{I}\right)^{-\frac{1}{2}} \mathcal{G}_{\gamma'}^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{m_{\gamma'}}{\text{eV}}\right)^{-\frac{1}{4}} \quad (2.4)$$

$$\times \left(\frac{\rho_0}{\text{GeV}/\text{cm}^3}\right)^{-\frac{1}{2}} Q_{\gamma'}^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{t}{s}\right)^{-\frac{1}{4}}$$

abschätzen (s. Abschnitt 1.5.6). Für die Bedeutung der Symbole s. 1.5.6 und Tab. 2.4.

Im Falle von WISPDMX kann aus dem Niveau der Rauschleistung des Empfängers P_N und dem Gain des Verstärkers g direkt aus Gleichungen 1.5.6 bzw. 1.5.6 die Sensitivität

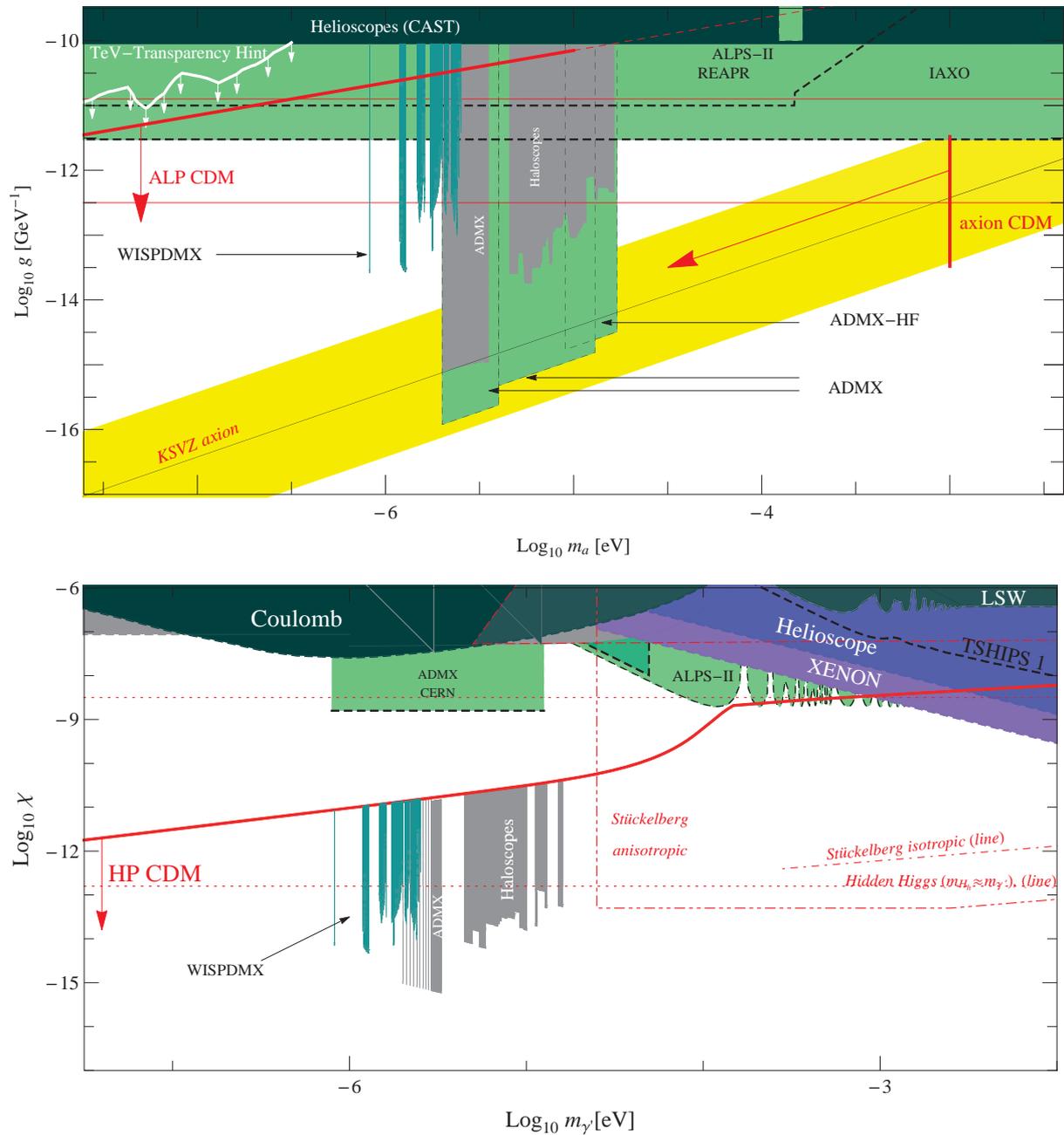


Abbildung 2.17: Abschätzung der Sensitivität WISPDMMXs auf ALPs (oben) und HP-DM. In Türkis sind die erwarteten Sensitivitäten unter Verwendung zweier Stempeltuner eingetragen, die Annahmen sind im Text beschrieben. Für die Bedeutung weiterer Flächen und Markierungen siehe Abb. 1.5 sowie Abschnitte 1.4 und 1.5.

abgeschätzt werden. In Laboreinheiten erhalten wir für die ALPs-Suche

$$g_{\phi\gamma} [\text{GeV}^{-1}] = 328.1 \times 10^{-\frac{g/\text{dB}}{20}} \left(\frac{P_N}{\text{W}}\right)^{\frac{1}{2}} \kappa^{-\frac{1}{2}} Q^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{V}{\text{l}}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{B_0}{\text{T}}\right)^{-1} \mathcal{G}_\phi^{-\frac{1}{2}} \times \left(\frac{m_\phi}{\text{eV}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_0}{\text{GeV}/\text{cm}^3}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

und für das HP-Haloskop

$$\chi = 6.410 \cdot 10^{-5} \times 10^{-\frac{g/\text{dB}}{20}} \left(\frac{P_N}{\text{W}}\right)^{\frac{1}{2}} \kappa^{-\frac{1}{2}} Q^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{V}{\text{l}}\right)^{-\frac{1}{2}} \mathcal{G}_{\gamma'}^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{m_{\gamma'}}{\text{eV}}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_0}{\text{GeV}/\text{cm}^3}\right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (2.6)$$

Aus den Ergebnissen der CST-Simulationen und den in Tab. 2.4 angegebenen experi-

Parameter		
Antennenkopplung	κ	0.5
Kavitätsvolumen	V	4471
lokale DM-Dichte	ρ_0	0.39 GeV/cm ³
WISP-Gütefaktor	$Q_{\phi/\gamma'}$	$2.2 \cdot 10^6$
Signal-Rausch-Verhältnis	S/N	4
Rauschtemperatur	T_N	300 K
Magnetfeldstärke	B_0	1.15 T
Messdauer	t	1 min

Tabelle 2.4: Zur Abschätzung der WISPDMX-Sensitivität verwendete experimentelle Parameter.

mentellen Parametern wurde mit Gleichung 2.3 (2.4) die Sensitivität von WISPDMX auf ALPs und HPs abgeschätzt. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.17 dargestellt. Für die ALPs Suche wurde die Verfügbarkeit des H1-Magnetens angenommen. Die HP-Sensitivität wurden ohne Berücksichtigung des Winkels θ zwischen der Vorzugsrichtung des HP-Feldes und der Richtung, für die der jeweilige Formfaktor maximal wird, berechnet. Die Auswirkungen von $\theta \neq 0$ wurden in 1.5.6 diskutiert. Wird die HP-Messung dreimal mit je 8 h Abstand durchgeführt, reduziert der Effekt der Fehlausrichtung der Moden zur HP-Richtung die Sensitivität maximal zu $\chi' = 2 \cdot \chi$.

Mit zwei Stempeltunern wird WISPDMX mehr als 50 % des Massenbereiches 0.85 . . . 2.6 μeV und WISP-Photon Kopplungsparameter, die weit in den für WISP-CDM bevorzugten Bereich hineinreichen, nach ALPs und HPs absuchen können. Die kleinsten nachweisbaren Kopplungsparameter $g_{\phi\gamma}$ bzw. χ sind etwa eineinhalb Größenordnung größer als die des derzeit sensitivsten WISP-Haloskopes ADMX auf dem Massenbereich 2.3 . . . 3.3 μeV und vergleichbar mit denen der vorhergehenden haloskopischen Suchen für $m \sim 6 \dots 20 \mu\text{eV}$. Die maximale Schrittweite der Stempeltuner wurde aus den Simulationen zu 0.05 mm bestimmt. Mit der für die Kalkulation der Sensitivität angenommenen Messdauer von 1 min benötigt WISPDMX damit 3.8 Jahre Messzeit um den Tuningbereich von zwei Stempeltu-

nen auszunutzen. Da die HP-Photon Konversationswahrscheinlichkeit unbeeinflusst vom externen Magnetfeld ist, kann die Suche nach Hidden Photons und nach ALPs gleichzeitig durchgeföhrt werden.

Wird die Kavität zusätzlich schrittweise durch eine Vakuumpumpe evakuiert, verstimmen sich die Resonanzfrequenzen um ca. 1.5% (s. 2.2.3). Damit erhöht sich der von WISPDMMX sondierbare Bereich auf $\sim 70\%$ des Massenbereiches $0.85 \dots 2.8 \mu\text{eV}$. Diese Option ist insbesondere für WISP-Massen $\sim 0.86 \mu\text{eV}$ von Interesse, da sich die TM_{010} -Fundamentalmode mit $f_{res} \simeq 207.9 \text{ MHz}$ mit Stempeltunern nur vergleichsweise wenig verstimmen lässt und keine weiteren Eigenmoden mit $f_{res} \lesssim 290 \text{ MHz}$ existieren.

2.5.1 Derzeitige Sensitivität von WISPDMMX

Zurzeit erreicht WISPDMMX aufgrund folgender Gründe nicht die oben berechnete Sensitivität:

- es stehen weder Stempeltuner noch eine Vakuumpumpe zur Frequenzverstimmung zur Verfügung. Die Fertigstellung der Stempeltuner ist für Anfang 2014 vorgesehen. Frequenztoning durch schrittweises Evakuieren der Kavität ließe sich kurzfristig realisieren, da die Kavität selber und die Stempeltuner vakuumdicht sind und ein Flansch zum Anschluss einer Vakuumpumpe an die Kavität vorhanden ist.
- es steht bisher kein Magnet zur Verfügung. Ohne externes Magnetfeld ist das Experiment lediglich sensitiv auf Hidden Photons. Das Erdmagnetfeld $B_0 \sim 40 \mu\text{T}$ ist so schwach, dass WISPDMMX damit nicht sensitiv auf ALP-CDM ist.
- die gemessene Rauschleistung der Alazartech ATS9360 mit den verwendeten Verstärkern beträgt $\sim 10^{-14} \text{ W}$. Mit der derzeitigen Verstärkung von 40 dB bei Verwendung beider Verstärker kann also eine Leistung von $\sim 10^{-18} \text{ W}$ detektiert werden. Um die berechnete Sensitivität zu erreichen, muss eine minimale Leistung von $\sim 2 \cdot 10^{-20}$ gemessen werden. Dies kann durch Reduktion des Rauschens der Karte und bessere Verstärker erreicht werden.
- Für WISPDMMX optimierte Antennen (s. 2.3) erhöhen den Kopplungsparameter κ um mehr als eine Größenordnung gegenüber der derzeitigen konservativen Abschätzung von $\kappa = 0.01$ für alle Moden außer TM_{010} .

Kapitel 3

Erste Hidden Photon Messung

	κ	f/MHz	Q	\mathcal{G}	$P/W(95\% \text{ CL})$	$m_{\gamma'}/\mu\text{eV}$	$\chi(95\% \text{ CL})$
TM ₀₁₀	0.1	207.87961	55405	0.429	$1.08 \cdot 10^{-14}$	0.85972093	$5.4 \cdot 10^{-13}$
TE ₁₁₁	0.01	321.45113	59770	0.674	$1.08 \cdot 10^{-14}$	1.3294150	$8.4 \cdot 10^{-13}$
TE ₁₁₁	0.01	322.74845	58900	0.671	$1.08 \cdot 10^{-14}$	1.3347803	$8.5 \cdot 10^{-13}$
TM ₀₂₀	0.01	454.42411	44340	0.317	$1.08 \cdot 10^{-14}$	1.8793470	$10.1 \cdot 10^{-13}$
TE ₁₁₂	0.01	510.62681	71597	0.020	$1.09 \cdot 10^{-14}$	2.1117827	$28.2 \cdot 10^{-13}$
TE ₁₁₂	0.01	515.97110	67840	0.019	$1.09 \cdot 10^{-14}$	2.1338849	$29.5 \cdot 10^{-13}$
TE ₁₂₀	0.01	577.59175	60350	0.036	$1.10 \cdot 10^{-14}$	2.3887274	$20.4 \cdot 10^{-13}$
TE ₁₂₀	0.01	579.25126	66520	0.037	$1.10 \cdot 10^{-14}$	2.3955906	$19.1 \cdot 10^{-13}$

Tabelle 3.1: Erste Messergebnisse und abgeleitete Ausschlussgrenzen für Hidden Photon Suchen mit WISPDMMX

Zurzeit stehen für WISPDMMX noch keine Möglichkeiten zur Frequenzverstimmung der Kavität zur Verfügung. Ohne externes Magnetfeld lassen sich somit lediglich Suchen nach Hidden Photons bei den nominellen Resonanzfrequenzen der Kavität durchführen. Dafür wurden Messungen über einen Gesamtzeitraum von 3 Tagen durchgeführt. Zur Verstärkung des Pickup-Signals wurden der oben beschriebene WantCom-Verstärker mit $g > 22$ dB und der MITEQ-Verstärker mit $g > 18.2$ dB auf dem betrachteten Frequenzband verwendet. Die Daten wurden mit $3 \cdot 10^6$ Punkten bei einer Abtastfrequenz von 1.2 GHz aufgenommen. Daraus wurden Spektren mit einer Auflösung von 0.572 kHz berechnet. Die Spektren wurden jeweils über einen Messzeitraum von 15 min gemittelt. Mit dem durchschnittlichen Verhältnis von Mess- zu Totzeit ergab sich eine Nettomesszeit von 12 s pro gemitteltem Spektrum.

Die experimentelle Signatur von HP-CDM mit $m_{\gamma'} = \omega_{res}$ ist ein schmaler Peak an f_{res} . Da die Bandbreite des HP-Signals $b_{\gamma'} = m_{\gamma'}/Q_{\gamma'} \lesssim 300$ Hz kleiner als die spektrale Auflösung der Messung ist, sollte das HP-Signal nur in einem Kanal auftreten. Aufgrund der Drehung der Kavität durch die Erdrotation erwarten wir weiterhin unter der Annahme einer Vorzugsrichtung des HP-Feldes eine Modulation des HP-Signals mit einer Periode von 24 h (vgl. 1.5.6). Zur Verbesserung der Messstatistik können deshalb Spektren mit $\Delta t = 24$ h

gemittelt werden.

Zur Auswertung wurde für jede Resonanzfrequenz die spektrale Leistung im entsprechenden FFT-Kanal sowie den jeweils zehn oberhalb bzw. unterhalb gelegenen Kanälen mit dem quadratischen Mittel der Rauschleistung in einem ± 500 kHz-Fenster um die Resonanzfrequenz betrachtet. Es wurde keine regelmäßige Modulation des Signals beobachtet. Die spektrale Leistung streut in allen betrachteten Frequenzkanälen wie für unkorreliertes Rauschen erwartet um das quadratische Mittel der Rauschleistung: jeweils $\sim 68\%$ der Datenpunkte befindet sich innerhalb einer Standardabweichung um das Mittel, $\sim 95\%$ innerhalb zweier Standardabweichungen und $\sim 99.7\%$ innerhalb von drei Standardabweichungen.

Mit der gemessenen Untergrundleistung des Detektors um die Resonanzfrequenz und Gleichung 2.5 lassen sich obere Ausschlussgrenzen auf den HP-Photon Kopplungsparameter χ bestimmen. Dafür wurde der die Kopplung der Antenne an die Resonanzmoden beschreibende Parameter κ konservativ abgeschätzt (vgl. 2.3). Resonanzfrequenzen f und Gütefaktoren Q wurden mit einem *HP 8753C*-Netzwerkanalysator vermessen. Da die spektrale Auflösung der Messung Δf_{spec} kleiner als die erwartete Bandbreite eines HP-Signals ist, ist die erwartete spektrale Leistung um einen Faktor $d_{spec} = f_{res}/(Q_{HP} \cdot \Delta f_{spec}) \simeq 0.079 \times f_{res}/100$ MHz reduziert. Der Winkel zwischen Vorzugsrichtung des HP-Feldes und Richtung des maximalen Gütefaktors wurde mit der konservativen Annahme $\cos^2 \theta \geq 1/4$ berücksichtigt (vgl. 1.5.6).

Haloskopische Experimente sind nicht direkt auf χ sondern nur auf das Produkt $\chi \cdot \sqrt{\rho_0}$ sensitiv. Die unter der Annahme, dass die gesamte lokale DM-Dichte aus Hidden Photons besteht, bestimmten oberen Ausschlussgrenzen auf χ sind in Tab. 3.1 dargestellt. Aufgrund der in 2.5.1 diskutierten Faktoren ist die derzeitige Sensitivität von WISPD MX geringer als die Zielsensitivität des Experimentes.

Kapitel 4

Zusammenfassung und Ausblick

Axionen, ALPs und Hidden Photons sind gut motivierte Erweiterungen des Standardmodells der Teilchenphysik. Während auf dem Massenbereich $\gtrsim 10^{-2}$ eV vergleichsweise starke Ausschlussgrenzen für solche Teilchen existieren, ist die Sensitivität bisheriger Experimente auf geringere Massen deutlich kleiner.

Sowohl für Axionen und ALPs als auch für Hidden Photons wurde gezeigt, dass sie auch mit kleinen Massen bis hin zu 10^{-12} eV die gesamte Kalte Dunkle Materie ausmachen könnten. Nach solchen CDM-ALPs/HPs kann mit sogenannten Haloskopen gesucht werden. Dabei wird versucht, Photonen aus WISP-Photon Oszillationen nachzuweisen. Während HPs direkt in gewöhnliche Photonen konvertieren können, weisen Axionen und ALPs nur eine Kopplung an zwei Photonen auf. Findet die Oszillation aber vor einem magnetischen oder elektrischen Hintergrundfeld statt, stellt dieses ein virtuelles Photon zur Verfügung und die Konversation lässt sich als effektive Axionen/ALPs - Photon Oszillation betrachten.

Unter Ausnutzung der im Mikrowellenbereich verfügbaren empfindlichen Messtechnik und Resonatoren mit hohen Gütefaktoren $Q = \mathcal{O}(10^4)$ und großen Volumina $V = \mathcal{O}(100\text{l})$ lassen sich unter Ausnutzung der resonanten Verstärkung sehr empfindliche Haloskope konstruieren. Aufgrund der Resonanzbedingung sind solche Haloskope aber nur auf einen schmalen Frequenzbereich $b = f_{res}/Q$ um die Resonanzfrequenzen sensitiv. Abhilfe lässt sich durch Verstimmen der Resonanzfrequenzen schaffen. Werden solche Resonatorexperimente in Magnetfelder betrieben, können nicht nur HPs, sondern auch Axionen und ALPs nachgewiesen werden.

Das WISPy Dark Matter eXperiment WISPD MX verwendet eine 208 MHz HERA-Kavität zur Suche nach WISPy-DM. WISPD MX ist zurzeit das einzige Haloskop-Experiment, welches auf WISPs mit Massen $0.8 \dots 2.0 \mu\text{eV}$ sensitiv ist. Unter Verwendung von zwei Stempeltunern können mehr als 50 % des Massenbereiches $0.8 \dots 2.6 \mu\text{eV}$ abgesucht werden. Wird zusätzlich eine Vakuumpumpe zum schrittweisen Evakuieren der Kavität verwendet, können ~ 70 % des genannten Massenbereichs abgesucht werden. Die projizierte Sensitivität von WISPD MX auf den WISP-Photon Kopplungsparameter reicht weit in

den für Kalte Dunkle Materie bevorzugten Parameterbereich.

In dieser Arbeit wurde die Sensitivität von WISPDMX durch Simulationen der Eigenmoden der Kavität und Untersuchungen des Detektors abgeschätzt. Im Unterschied zu vorhergehenden Haloskopen werden bei WISPDMX nicht nur TM_{0n0} Moden zur WISP-Suche verwandt. Es wurde gezeigt, dass auch TE-Moden genutzt werden können. Unter Verwendung der zurzeit in Konstruktion befindlichen Stempeltuner kann die Ausrichtung dieser Moden kontrolliert werden. Auch weitere Moden wie z.B. TM_{011} können mit Stempeltunern zur Suche verwandt werden.

Weiterhin suchten bisherige Haloskope jeweils nur Signale in einem schmalen Frequenzband um eine Resonanzmode nach WISP-Signalen ab. WISPDMX verfolgt einen Breitband-Messansatz, der es erlaubt, alle sensitiven Resonanzmoden gleichzeitig zu untersuchen.

Neben Messungen zur Charakterisierung des Detektors wurden erste Hidden-Photon Suchen bei den nominellen Resonanzfrequenzen durchgeführt. Es wurden keine Hidden-Photon Signale beobachtet. Die abgeleiteten Ausschlussgrenzen wurden präsentiert. Mit der für Januar 2014 geplanten Fertigstellung der Stempeltuner kann im ersten Halbjahr 2014 das Hidden-Photon Messprogramm aufgenommen werden.

Zur Suche nach Axionen bzw. ALPs muss die Kavität in einem Magneten betrieben werden. Einige infragekommene existierende Magnete wurden präsentiert. Da die Hidden-Photon Suche unbeeinflusst von externen Magnetfeldern ist, können beide Suchen gleichzeitig durchgeführt werden.

Für Massen $< 2.0 \mu\text{eV}$ wird das endgültige WISPDM-eXperiment somit einen entscheidenden Beitrag zur Suche nach ALPs- und HP-DM liefern.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Beringer *et al.* (PDG): „The Review of Particle Physics“, Phys. Rev. D**86**, 010001 (2012)
- [2] G. Bertone, D. Hooper and J.Silk: „Particle dark matter: evidence, candidates and constraints“, Phys. Rep. 405, 279-309 (2005)
- [3] L. Bergström: „Non-baryonic dark matter: observational evidence and detection methods“, Rep. Prog. Phys. 64 (2000), 793-841
- [4] R. Catena and P. Ullio: „A novel determination of the local dark matter density“, JCAP08 (2010) 004
- [5] R. Catena and P. Ullio: „The local dark matter phase-space density and impact on WIMP direct detection“, JCAP05 (2012) 005
- [6] F. Zwicky: „Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln“, Helv. Phys. Acta 6 (1933), 110
- [7] D. Clowe *et al.*: „A direct empirical proof of the existence of dark matter“, Astrophys. J. 648:L109-L113 (2006)
- [8] C.L. Bennett *et al.*: „Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), Observations: Final Maps and Results“, ApJS 208 (2013), 20
- [9] G. Hinshaw *et al.*: „Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results“, ApJS 208 (2013), 19
- [10] J. R. Brownstein and J. W. Moffat: „The Bullet Cluster 1E0657-558 evidence shows modified gravity in the absence of dark matter“, Mon. Not. R. Astron. Soc. 382, 29-47 (2007)
- [11] X. Li *et al.*: „Finslerian MOND versus observations of Bullet Cluster 1E 0657-558“, Mon. Not. R. Astron. Soc. 428, 2939-2948 (2013)
- [12] L. Canetti, M. Drewes und M. Shapshnikov: „Sterile Neutrinos as the Origin of Dark Matter and Baryonic Matter“, PRL 110 (2013), 061801

- [13] R. Bernabei *et al.*: „Final model independent result of DAMA/LIBRA-phase1“, arXiv:1308.5109v1 [astro-ph.GA] (2013)
- [14] E. Aprile *et al.*: „Dark Matter Results from 225 Live Days of XENON100 Data“, PRL 109, 181301 (2012)
- [15] J. Jaeckel und A. Ringwald: „The Low-Energy Frontier of Particle Physics“, Ann. Rev. Nuc. Part. Sci. 60:405-437 (2010)
- [16] J. L. Hewett *et al.*: „Fundamental Physics at the Intensity Frontier“, arXiv:1205:2671v1 [hep-ex]
- [17] A. Ringwald: „Exploring the Role of Axions and Other WISPs in the Dark Universe“, arXiv:1210.5081v2 [hep-ph] (2012)
- [18] P. Arias *et al.*: „WISPy Cold Dark Matter“, arXiv:12015902v2 [hep-ph] (2012)
- [19] K. Baker *et al.*: „The quest for axions and other new light particles“, arXiv:1306:2841v1 [hep-ph] (2013)
- [20] J. Redondo und A. Ringwald: „Light shining through walls“, arXiv:1011.3741v1 [hep-ph] (2010)
- [21] R. D. Peccei und H. R. Quinn: „CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles“, PRL 38, 1440-1443 (1977)
- [22] S. Weinberg: „A New Light Boson ?“, PRL 40, 040223 (1978)
F. Wilczek: „Problem of Strong P and T Invariance in the Presence of Instantons“, PRL 40, 279-282 (1978)
- [23] L. B. Okun: „Limits on electrodynamics: paraphotons?“, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 83, 892-898 (1982)
- [24] B. Holdom: „Two $U(1)$'s and ϵ Charge Shifts“, Phys. Lett. 166B, 2, 196-198
- [25] D. Horns und M. Meyer: „Indications for pair-production anomaly from the propagation of VHE gamma-rays“, JCAP02(2012)033
- [26] S. Andreas, C. Niebuhr und A. Ringwald: „New limits on hidden photons from past electron beam dumps“, Phys. Rev. D 86, 095019 (2012)
- [27] J. Jaeckel und S. Roy: „Spectroscopy as a test of Coulomb's law: A probe of the hidden sector“, Phys. Rev. D 82, 125020 (2010)
- [28] A. S. Goldhaber und M. M. Nieto: „Terrestrial and Extraterrestrial Limits on the Photon Mass“, Rev. Mod. Phys. 43, 3, 277- 296 (1971)

- [29] E. Zavattini *et al.*: „Experimental Observation of Optical Rotation Generated in Vacuum by a Magnetic Field“, PRL 96, 110406 (2006)
- [30] D. M. Lazarus *et al.*: „Search for Solar Axions“, PRL 69, 2333 (1992)
- [31] P. Sikivie: „Experimental Test of the “Invisible” Axion“, PRL 51, 1415 (1983)
- [32] L. Krauss *et al.*: „Calculations for Cosmic Axion Detection“, PRL 55, 1797 (1985)
- [33] P. Sikivie: „Detection rates for “invisible”-axion searches“, Phys. Rev. D 32, 2988 (1985)
- [34] W. U. Wuensch *et al.*: „Results of a laboratory search for cosmic axions and other weakly coupled light particles“, Phys. Rev. D 40, 3153 (1989)
- [35] C. Hagmann, P. Sikivie, N. S. Sullivan und D. B. Tanner: „Results from a search for cosmic axions“ Phys. Rev. D 42, 1297 (1990)
- [36] H. Peng: *et al.*: „Cryogenic cavity detector for a large-scale cold dark-matter axion search“, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 444, 569-583 (2000)
- [37] S. J. Azatalos: *et al.*: „Experimental Constraints on the axion dark matter halo density“, ApJ 571:L27-L30 (2002)
- [38] K. Yanamoto: *et al.*: „The Rydberg-Atom-Cavity Axion Search“, arXiv:0101:200v1 [hep-ph] (2001)
- [39] L. D. Duffy: *et al.*: „High Resolution search for dark-matter axions“, Phys. Rev. D 74, 012006 (2006)
- [40] A. Gamp *et al.*: „The Radio Frequency System for Protons in HERA“, Proceedings of EPAC88, 1105-1107
- [41] C. Rogner: „Study of the Mechanical Design of 200 MHz Single-Cell Cavities for Application in the SPS“, CERN/SPS/80-14
- [42] A. Gamp: „The Radio Frequency Systems and Control of the HERA Proton beam“, Particle Accelerators, 29, 65-70 (1990)
- [43] V. Rödel: „High-order modes and tuning of the SPS 200 MHz single-cell cavity“, SL/RFS/Note91-08
- [44] Alazartech ATS9360 Datenblatt, http://alazartech.com/products/ATS9360_v_1_2a.pdf
- [45] WanTcom WBA0110B Datenblatt, <http://www.wantcominc.com/DataSheets/WBA/WBA0110B.pdf>

- [46] H1 Kollaboration: „The H1 detector at HERA“, *Nuc. Instr. Meth. A* 386, 310-347 (1997)
- [47] ZEUS Kollaboration: „The ZEUS Detektor, Status Report 1993“, <http://www-zeus-desy-de/bluebook.html>
- [48] S. L. Wipf *et al.*: „A Spectrometer Magnet for the HERA-B Experiment“, *Proceedings of EPAC94*, 2307-2309

Anhang

Simulationsergebnisse mit Stempeltunern

Im Folgenden sind die Ergebnisse der CST-MWS Simulationen mit einem bzw. zwei Plungern in einem relative Winkel von 180° dargestellt. Neben der Frequenz f und dem Gütefaktor Q ist der Formfaktor \mathcal{G} für die Richtung \vec{n} angegeben, für die er maximal wird. z , x und y geben diese maximale Richtung an, wobei z entlang der Symmetrieachse der Kavität zeigt und x entlang der Plungerachse. Für die Simulationen mit 2 Plungern zeigt x so, dass die Plungerachsen jeweils einen Winkel von 6° zu x einnehmen. Moden mit Gütefaktoren $\mathcal{G} > 0.01$ sind hellgrau unterlegt.

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	-						10					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	198.76	53082	0.429	1.00	0.00	0.00	198.84	52783	0.427	1.00	0.00	0.00
TM011	293.83	44792	0.000	0.00	1.00	0.00	293.73	44727	0.000	0.00	0.99	0.12
TE111	307.44	61085	0.674	0.00	0.00	1.00	307.40	60710	0.674	0.00	0.84	-0.54
TE111	308.68	61827	0.671	0.00	1.00	0.00	308.77	61208	0.671	0.00	0.54	0.84
	385.37	76677	0.000	0.00	1.00	0.00	386.23	74725	0.000	0.00	0.95	0.31
	386.00	82178	0.000	1.00	0.00	0.00	386.25	81750	0.000	1.00	0.00	0.00
	386.86	78061	0.000	0.00	0.00	1.00	386.30	76692	0.000	0.00	0.53	0.85
	387.59	84009	0.000	0.00	-0.42	0.91	387.94	82813	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	428.21	47249	0.317	1.00	0.00	0.00	428.68	46867	0.316	1.00	0.00	0.00
	450.50	106400	0.000	0.00	0.00	1.00	450.92	104537	0.000	0.00	0.15	0.99
	477.25	78488	0.000	0.00	0.00	1.00	476.42	75580	0.000	0.00	0.56	0.83
	477.47	78755	0.000	0.00	1.00	0.00	479.09	75874	0.000	0.00	0.99	0.16
	482.50	60857	0.000	1.00	0.00	0.00	482.66	60756	0.000	1.00	0.00	0.00
	483.56	61182	0.000	0.94	0.34	0.00	483.82	60868	0.000	1.00	0.00	0.00
	500.53	85159	0.000	0.99	0.00	0.12	501.67	82709	0.000	1.00	0.00	0.00
	501.94	86281	0.000	1.00	0.00	0.00	501.95	86213	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	507.44	72991	0.020	0.00	0.00	1.00	507.33	71798	0.020	0.00	0.85	-0.52
TE112	508.26	72763	0.019	0.00	1.00	0.00	508.25	72120	0.018	0.00	0.52	0.86
	526.83	48547	0.000	0.28	0.96	0.00	526.44	47947	0.000	0.00	0.94	0.35
TE120	559.00	72227	0.036	0.00	0.00	1.00	558.94	70585	0.035	0.00	0.84	-0.55
TE120	562.22	73448	0.037	0.00	1.00	0.00	562.17	71651	0.035	0.00	0.56	0.83
	565.84	72353	0.000	0.00	0.00	1.00	568.50	69018	0.002	0.00	0.15	0.99
	574.80	110202	0.000	1.00	0.00	0.00	574.83	110230	0.000	1.00	0.00	0.00
	574.83	110336	0.000	0.73	0.69	0.00	574.84	110099	0.000	1.00	0.00	0.00
	577.86	81266	0.000	0.00	1.00	0.00	576.28	73386	0.001	0.00	0.90	0.43
TM030	580.41	125162	0.061	1.00	0.00	0.00	580.40	124828	0.061	1.00	0.00	0.00
	596.55	70434	0.000	0.00	1.00	0.00	596.36	68193	0.000	0.00	0.89	0.46
	596.99	70775	0.000	0.00	0.00	1.00	596.59	70524	0.000	0.00	0.92	0.39
	603.45	86677	0.000	1.00	0.00	0.00	603.57	86477	0.000	1.00	0.00	0.00
	603.57	86657	0.000	-0.59	0.81	0.00	605.00	84384	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	20						30					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	198.88	52601	0.427	1.00	0.00	0.00	198.92	52473	0.427	1.00	0.00	0.00
TM011	293.66	44616	0.000	0.00	1.00	0.00	293.56	44579	0.001	0.00	1.00	0.00
TE111	307.29	60445	0.673	0.00	0.88	-0.47	307.10	60201	0.672	0.00	0.92	-0.39
TE111	308.81	60865	0.671	0.00	0.47	0.88	308.85	60528	0.671	0.00	0.39	0.92
	385.90	75551	0.000	0.00	0.83	0.56	385.32	73903	0.000	0.00	0.96	0.28
	386.31	81763	0.000	1.00	0.00	0.00	386.37	81634	0.000	1.00	0.00	0.00
	386.50	74006	0.000	0.00	0.72	-0.69	386.79	73351	0.000	0.00	-0.53	0.85
	388.09	82183	0.000	1.00	0.00	0.00	388.25	81384	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	428.85	46642	0.316	1.00	0.00	0.00	429.03	46505	0.316	1.00	0.00	0.00
	451.03	103864	0.000	0.00	0.31	0.95	451.13	103127	0.000	0.00	0.64	0.77
	475.72	72948	0.000	0.00	0.69	0.72	474.66	68942	0.000	0.00	0.87	0.50
	479.61	74936	0.000	0.00	0.97	0.26	480.16	74085	0.000	0.00	0.94	0.33
	482.71	60712	0.000	1.00	0.00	0.00	482.75	60721	0.000	1.00	0.00	0.00
	483.92	60648	0.000	1.00	0.00	0.00	484.03	60554	0.000	1.00	0.00	0.00
	501.97	86034	0.000	1.00	0.00	0.00	501.98	86079	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.05	81712	0.000	1.00	0.00	0.00	502.46	80428	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	507.17	70800	0.020	0.00	0.90	-0.44	506.88	69102	0.011	0.00	0.93	0.36
TE112	508.24	71907	0.018	0.00	0.43	0.90	508.22	71562	0.018	0.00	0.34	0.94
	526.15	47369	0.000	0.00	0.98	0.21	525.69	46610	0.000	0.00	0.99	0.17
TE120	558.61	68399	0.035	0.00	0.89	-0.46	557.87	63765	0.019	0.00	0.94	0.35
TE120	561.98	70456	0.034	0.00	0.46	0.89	561.69	69252	0.033	0.00	0.32	0.95
	569.31	67858	0.003	0.00	0.12	0.99	570.17	66768	0.003	0.00	0.00	1.00
	574.80	110099	0.000	1.00	0.00	0.00	573.68	61926	0.004	0.00	0.93	0.36
	574.87	109932	0.000	1.00	0.00	0.00	574.75	109973	0.000	1.00	0.00	0.00
	575.17	67898	0.001	0.00	0.92	0.39	574.91	109868	0.000	1.00	0.00	0.00
TM030	580.37	124591	0.061	1.00	0.00	0.00	580.33	124359	0.062	1.00	0.00	0.00
	595.95	66465	0.000	0.00	0.96	0.28	595.43	64574	0.000	0.00	0.99	0.15
	596.60	70538	0.000	0.00	0.99	0.14	596.60	70610	0.000	0.00	0.98	0.19
	603.60	86333	0.000	1.00	0.00	0.00	603.65	86195	0.000	1.00	0.00	0.00
	605.43	83527	0.000	1.00	0.00	0.00	605.88	82610	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	40						50					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.08	52371	0.427	1.00	0.00	0.00	199.11	52464	0.426	1.00	0.00	0.00
TM011	293.34	44490	0.002	0.00	1.00	0.00	293.04	44644	0.003	0.00	1.00	0.00
TE111	306.67	59942	0.435	0.00	0.95	0.31	306.22	59583	0.510	0.00	0.97	0.25
TE111	308.76	60373	0.670	0.00	0.31	0.95	308.80	60248	0.671	0.00	0.25	0.97
	384.48	71682	0.000	0.00	0.98	0.18	383.40	68524	0.001	0.00	0.99	0.11
	386.47	82219	0.000	1.00	0.00	0.00	386.59	81630	0.000	1.00	0.00	0.00
	387.06	72830	0.000	0.00	-0.43	0.90	387.37	72275	0.000	0.00	0.32	0.95
	388.48	81108	0.000	1.00	0.00	0.00	388.74	80190	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	428.58	46293	0.316	1.00	0.00	0.00	428.48	46478	0.317	1.00	0.00	0.00
	451.02	104263	0.000	0.00	0.85	0.52	451.05	103707	0.000	0.00	0.98	0.18
	473.08	63206	0.001	0.00	0.93	0.36	470.85	55728	0.001	0.00	0.98	0.21
	480.73	73299	0.000	0.00	0.92	-0.39	481.35	72469	0.000	0.00	0.90	-0.43
	482.66	61053	0.000	1.00	0.00	0.00	482.71	61415	0.000	1.00	0.00	0.00
	484.03	60744	0.000	1.00	0.00	0.00	484.14	61097	0.000	1.00	0.00	0.00
	501.82	86188	0.000	1.00	0.00	0.00	501.82	86286	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.73	79362	0.000	1.00	0.00	0.00	503.11	78208	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	506.27	66954	0.013	0.00	0.96	0.29	505.64	63038	0.015	0.00	0.97	0.23
TE112	508.10	72046	0.018	0.00	0.27	0.96	508.13	71398	0.018	0.00	0.20	0.98
	524.17	45571	0.000	0.00	0.99	0.11	522.99	44534	0.000	0.00	1.00	0.00
TE120	556.12	56224	0.024	0.00	0.98	0.22	553.66	46874	0.022	0.00	0.99	0.11
TE120	561.05	68887	0.033	0.00	0.15	0.99	560.68	69045	0.033	0.00	0.00	1.00
	570.96	65106	0.002	0.00	0.36	0.93	570.01	55726	0.011	0.00	0.98	0.19
	571.92	57466	0.008	0.00	0.87	0.49	572.05	63874	0.005	0.00	0.33	0.94
	574.76	110291	0.000	1.00	0.00	0.00	574.75	110242	0.000	1.00	0.00	0.00
	575.07	110316	0.000	1.00	0.00	0.00	575.23	110445	0.000	1.00	0.00	0.00
TM030	580.32	124049	0.061	1.00	0.00	0.00	580.37	123666	0.061	1.00	0.00	0.00
	594.54	63165	0.000	0.00	0.99	0.11	593.91	62178	0.000	0.00	1.00	0.00
	596.23	70810	0.000	0.00	0.91	-0.42	596.22	71001	0.000	0.00	-0.67	0.74
	603.64	86213	0.000	1.00	0.00	0.00	603.69	86189	0.000	1.00	0.00	0.00
	606.28	81862	0.000	1.00	0.00	0.00	606.71	80932	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	60						70					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.18	52082	0.426	1.00	0.00	0.00	199.19	52146	0.426	1.00	0.00	0.00
TM011	292.85	44170	0.006	0.00	1.00	0.00	292.30	44114	0.012	0.00	1.00	0.00
TE111	305.73	58455	0.560	0.00	0.98	0.20	305.01	57524	0.582	0.00	0.99	0.16
TE111	308.93	59693	0.670	0.00	0.19	0.98	308.97	59686	0.671	0.00	0.15	0.99
	381.94	64278	0.002	0.00	1.00	0.00	380.08	59241	0.004	0.00	1.00	0.00
	386.56	81816	0.000	1.00	0.00	0.00	386.65	82201	0.000	1.00	0.00	0.00
	387.66	71560	0.000	0.00	0.26	0.97	387.97	71064	0.000	0.00	0.22	0.98
	388.83	79230	0.000	1.00	0.00	0.00	389.06	78685	0.001	1.00	0.00	0.00
TM020	428.98	45998	0.316	1.00	0.00	0.00	428.83	46140	0.318	1.00	0.00	0.00
	451.10	102206	0.000	0.00	1.00	0.00	451.03	101521	0.000	0.00	1.00	0.00
	467.66	47457	0.002	0.00	0.99	0.14	463.48	39625	0.004	0.00	1.00	0.00
	481.88	71621	0.000	0.00	0.89	-0.46	482.48	70808	0.000	0.00	0.88	-0.47
	482.74	61004	0.000	1.00	0.00	0.00	482.74	61489	0.000	1.00	0.00	0.00
	484.31	60590	0.000	1.00	0.00	0.00	484.39	60997	0.000	1.00	0.00	0.00
	501.89	85991	0.000	1.00	0.00	0.00	501.88	86080	0.000	1.00	0.00	0.00
	503.54	76610	0.000	1.00	0.00	0.00	503.47	53779	0.016	0.00	0.98	0.18
TE112	504.66	58491	0.016	0.00	0.98	0.21	503.82	75296	0.000	0.94	0.33	0.00
TE112	508.01	71109	0.018	0.00	0.17	0.99	507.98	71372	0.018	0.00	0.13	0.99
	522.12	42897	0.001	0.00	1.00	0.00	520.50	42648	0.002	0.00	1.00	0.00
	550.42	39531	0.017	0.00	1.00	0.00	546.77	36443	0.012	0.00	1.00	0.00
TE120	560.48	68828	0.030	0.00	0.13	0.99	560.11	69323	0.028	0.00	0.20	0.98
TE120	568.63	56880	0.018	0.00	0.97	0.26	567.62	59051	0.023	0.00	0.96	0.28
	572.85	62930	0.005	0.00	0.23	0.97	573.68	61859	0.005	0.00	0.20	0.98
	574.49	109462	0.000	1.00	0.00	0.00	574.36	109144	0.001	1.00	0.00	0.00
	575.20	109994	0.000	1.00	0.00	0.00	575.37	110172	0.000	1.00	0.00	0.00
TM030	580.11	123231	0.061	1.00	0.00	0.00	580.11	122735	0.060	1.00	0.00	0.00
	593.40	61582	0.001	0.00	1.00	0.00	592.90	61828	0.001	0.00	1.00	0.00
	596.23	70934	0.000	0.00	-0.49	0.87	596.20	71173	0.000	0.00	0.37	0.93
	603.74	85914	0.000	1.00	0.00	0.00	603.80	85818	0.000	1.00	0.00	0.00
	607.09	79750	0.000	1.00	0.00	0.00	607.39	78732	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	80						90					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.14	51650	0.426	1.00	0.00	0.00	199.30	51528	0.426	1.00	0.00	0.00
TM011	291.85	43248	0.024	0.00	1.00	0.00	290.90	42477	0.042	0.00	1.00	0.00
TE111	304.38	55628	0.583	0.00	0.99	0.13	303.33	54020	0.570	0.00	0.99	0.11
TE111	309.26	58947	0.670	0.00	0.12	0.99	309.21	58831	0.664	0.00	0.00	1.00
	377.71	53492	0.007	0.00	1.00	0.00	374.74	47756	0.014	0.00	1.00	0.00
	386.56	81693	0.000	1.00	0.00	0.00	386.62	81983	0.000	1.00	0.00	0.00
	388.28	70244	0.000	0.00	0.18	0.98	388.52	69718	0.000	0.00	0.16	0.99
	389.03	77346	0.001	1.00	0.00	0.00	389.17	77031	0.001	1.00	0.00	0.00
TM020	429.93	45625	0.317	1.00	0.00	0.00	429.47	45413	0.317	1.00	0.00	0.00
	451.15	96245	0.000	0.00	1.00	0.00	450.51	66971	0.002	0.00	1.00	0.00
	458.36	33877	0.007	0.00	1.00	0.00	452.79	34544	0.009	0.00	1.00	0.00
	482.89	60661	0.000	1.00	0.00	0.00	482.73	60918	0.000	1.00	0.00	0.00
	482.96	69917	0.000	0.00	0.88	-0.48	483.47	69055	0.000	0.00	0.89	-0.45
	484.67	60096	0.000	1.00	0.00	0.00	484.63	60340	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.13	85598	0.000	1.00	0.00	0.00	500.63	48240	0.014	0.00	0.98	0.18
TE112	502.26	50110	0.016	0.00	0.98	0.18	502.01	85623	0.000	1.00	0.00	0.00
	504.27	73517	0.000	1.00	0.00	0.00	504.28	72213	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.90	70386	0.019	0.00	0.11	0.99	507.62	70689	0.018	0.00	0.10	0.99
	519.89	41936	0.003	0.00	1.00	0.00	518.15	44299	0.004	0.00	1.00	0.00
	543.88	36208	0.008	0.00	1.00	0.00	541.22	37382	0.006	0.00	1.00	0.00
TE120	560.24	68591	0.025	0.00	0.24	0.97	559.57	68533	0.024	0.00	0.26	0.97
TE120	567.27	61742	0.025	0.00	0.96	0.29	566.57	63138	0.028	0.00	0.96	0.29
	573.87	107401	0.001	1.00	0.00	0.00	573.56	106767	0.002	1.00	0.00	0.00
	574.42	60448	0.005	0.00	0.19	0.98	575.02	59296	0.005	0.00	0.17	0.99
	575.25	109053	0.000	1.00	0.00	0.00	575.43	109418	0.000	1.00	0.00	0.00
TM030	579.76	122087	0.059	1.00	0.00	0.00	579.62	121660	0.058	1.00	0.00	0.00
	592.83	61727	0.001	0.00	1.00	0.00	592.33	62628	0.001	0.00	1.00	0.00
	596.54	70956	0.000	0.00	0.26	0.97	596.19	71191	0.000	0.00	0.19	0.98
	603.92	85386	0.000	1.00	0.00	0.00	603.91	85359	0.000	1.00	0.00	0.00
	607.66	77322	0.000	1.00	0.00	0.00	607.75	76322	0.000	0.99	0.12	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	100						110					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.35	51441	0.426	1.00	0.00	0.00	199.34	51166	0.426	1.00	0.00	0.00
TM011	289.61	41317	0.070	0.00	1.00	0.00	287.83	39361	0.107	0.00	1.00	0.00
TE111	302.32	52308	0.546	0.00	1.00	0.00	301.43	50573	0.491	0.00	1.00	0.00
TE111	309.27	58716	0.666	0.00	0.00	1.00	309.47	58249	0.668	0.00	0.00	1.00
	371.25	42500	0.024	0.00	1.00	0.00	367.35	38213	0.042	0.00	1.00	0.00
	386.65	81889	0.000	1.00	0.00	0.00	386.65	81383	0.000	0.99	0.00	0.12
	388.78	69165	0.000	0.00	0.15	0.99	389.03	68452	0.000	0.00	0.13	0.99
	389.20	76337	0.001	1.00	0.00	0.00	389.15	75502	0.001	1.00	0.00	0.00
TM020	429.47	45357	0.317	1.00	0.00	0.00	430.03	45104	0.317	1.00	0.00	0.00
	446.15	28311	0.014	0.00	1.00	0.00	440.75	27185	0.020	0.00	1.00	0.00
	450.95	90228	0.001	0.00	0.99	0.14	450.71	95434	0.000	0.00	0.96	0.28
	482.77	61155	0.000	1.00	0.00	0.00	482.97	60782	0.000	0.98	0.00	0.18
	483.95	68162	0.000	0.00	0.91	-0.41	484.38	67174	0.000	0.00	0.94	0.33
	484.77	60449	0.000	1.00	0.00	0.00	485.00	60192	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	499.33	47870	0.013	0.00	0.98	0.18	498.45	48241	0.013	0.00	0.98	0.18
	502.03	85504	0.000	1.00	0.00	0.00	502.18	85214	0.000	1.00	0.00	0.00
	504.28	70824	0.001	1.00	0.00	0.00	504.31	69239	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.35	70553	0.018	0.00	0.00	1.00	507.13	70117	0.019	0.00	0.00	1.00
	517.08	46752	0.005	0.00	1.00	0.00	516.57	48615	0.006	0.00	1.00	0.00
	539.40	39122	0.005	0.00	1.00	0.00	538.49	40962	0.004	0.00	1.00	0.00
TE120	559.11	68343	0.025	0.00	0.26	0.97	558.87	67475	0.024	0.00	0.26	0.97
TE120	566.19	64501	0.030	0.00	0.96	0.28	566.20	65534	0.031	0.00	0.96	0.27
	573.13	105566	0.003	1.00	0.00	0.00	572.56	103611	0.004	1.00	0.00	0.00
	575.54	58138	0.005	0.00	0.16	0.99	575.67	108739	0.000	1.00	0.00	0.00
	575.60	109297	0.000	0.93	0.00	0.37	575.96	56933	0.004	0.00	0.17	0.99
TM030	579.51	121206	0.056	1.00	0.00	0.00	579.29	120548	0.055	1.00	0.00	0.00
	592.06	63337	0.001	0.00	1.00	0.00	592.08	63594	0.001	0.00	1.00	0.00
	596.13	71321	0.000	0.00	0.15	0.99	596.32	71317	0.000	0.00	0.13	0.99
	603.96	85213	0.000	1.00	0.00	0.00	604.05	84859	0.000	1.00	0.00	0.00
	607.75	75255	0.000	1.00	0.00	0.00	607.68	74094	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	10						10					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.04	52521	0.427	1.00	0.00	0.00	198.96	52317	0.426	1.00	0.00	0.00
TM011	293.52	44650	0.000	0.00	-0.38	0.92	293.57	44575	0.000	0.00	0.95	0.31
TE111	307.19	60579	0.674	0.00	0.89	-0.45	307.25	60214	0.673	0.00	0.92	-0.39
TE111	308.69	60623	0.672	0.00	0.45	0.89	308.89	60091	0.671	0.00	0.38	0.92
	385.70	75159	0.000	0.00	0.95	0.32	385.33	73953	0.000	0.00	1.00	0.00
	386.58	81867	0.000	0.91	0.41	0.00	386.60	81565	0.000	1.00	0.00	0.00
	387.07	73269	0.000	0.00	0.53	0.85	387.38	72436	0.000	0.00	0.20	0.98
	388.35	81629	0.000	1.00	0.00	0.00	388.44	80492	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	428.41	46436	0.317	1.00	0.00	0.00	429.31	46297	0.316	1.00	0.00	0.00
	451.14	104047	0.000	0.13	0.00	0.99	451.44	101801	0.000	0.00	0.34	0.94
	475.84	72498	0.000	0.00	0.73	0.68	475.16	69884	0.000	0.00	0.81	0.58
	480.31	73555	0.000	0.00	0.88	-0.48	480.71	72674	0.000	0.00	0.85	-0.52
	482.66	60922	0.000	0.00	0.23	0.97	482.91	60578	0.000	1.00	0.00	0.00
	483.88	60719	0.000	0.98	0.00	0.17	484.18	60192	0.000	1.00	0.00	0.00
	501.73	85415	0.000	1.00	0.00	0.00	501.94	85262	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.69	81466	0.000	1.00	0.00	0.00	503.23	80254	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	507.09	71128	0.019	0.00	0.90	-0.43	507.07	69858	0.011	0.00	0.94	0.35
TE112	508.13	71940	0.017	0.00	0.43	0.90	508.23	71186	0.018	0.00	0.34	0.94
	525.04	47239	0.000	0.97	0.00	0.24	525.71	46648	0.000	0.00	0.90	0.43
TE120	558.57	69311	0.036	0.00	0.89	-0.45	558.72	67020	0.018	0.00	0.93	0.38
TE120	562.34	69991	0.037	0.00	0.44	0.90	562.72	67944	0.036	0.00	0.34	0.94
	568.12	65414	0.001	0.00	0.60	0.80	567.48	62548	0.003	0.00	0.74	0.67
	574.92	110714	0.000	0.99	0.11	0.00	574.81	109930	0.000	1.00	0.00	0.00
	574.99	110550	0.000	1.00	0.00	0.00	574.90	109787	0.000	1.00	0.00	0.00
	577.18	68186	0.000	0.00	0.98	0.20	577.42	66177	0.000	0.00	0.78	-0.62
TM030	580.45	124610	0.061	1.00	0.00	0.00	580.36	124216	0.062	1.00	0.00	0.00
	595.49	66539	0.000	0.17	0.99	0.00	595.41	64975	0.000	0.00	1.00	0.00
	596.18	70396	0.000	0.00	0.00	1.00	596.58	70217	0.000	0.00	0.35	0.94
	603.83	86034	0.000	1.00	0.00	0.00	603.96	85644	0.000	1.00	0.00	0.00
	606.14	82797	0.000	1.00	0.00	0.00	606.59	81864	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	10 30						10 40					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.04	52221	0.426	1.00	0.00	0.00	199.05	52032	0.426	1.00	0.00	0.00
TM011	293.37	44542	0.000	0.00	1.00	0.00	293.32	44426	0.001	0.00	0.99	0.11
TE111	306.96	60074	0.442	0.00	0.95	0.31	306.76	59558	0.533	0.00	0.97	0.23
TE111	308.83	59836	0.671	0.00	0.30	0.95	308.98	59378	0.671	0.00	0.23	0.97
	384.73	72460	0.000	0.00	1.00	0.00	383.94	70152	0.000	0.00	1.00	0.00
	386.69	81755	0.000	0.84	0.00	0.54	386.73	81639	0.000	1.00	0.00	0.00
	387.66	71872	0.000	0.00	0.14	0.99	387.98	71162	0.000	0.00	0.00	1.00
	388.64	79742	0.000	0.95	0.32	0.00	388.79	78792	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	429.06	46160	0.317	1.00	0.00	0.00	429.67	45990	0.316	1.00	0.00	0.00
	451.45	101827	0.000	0.00	0.72	-0.69	451.63	100252	0.000	0.00	-0.59	0.81
	474.07	65996	0.000	0.00	0.87	0.48	472.44	60429	0.001	0.00	0.93	0.38
	481.17	71879	0.000	0.00	0.83	-0.55	481.66	71098	0.000	0.00	0.80	-0.59
	482.81	60796	0.000	0.96	0.00	0.30	483.00	60594	0.000	1.00	0.00	0.00
	484.15	60180	0.000	0.88	-0.47	0.00	484.42	59835	0.000	1.00	0.00	0.00
	501.86	85378	0.000	1.00	0.00	0.00	501.99	85240	0.000	1.00	0.00	0.00
	503.54	79203	0.000	1.00	0.00	0.00	504.06	77900	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	506.74	68530	0.014	0.00	0.96	0.26	506.36	66137	0.017	0.00	0.98	0.19
TE112	508.14	71099	0.018	0.00	0.25	0.97	508.18	70541	0.018	0.00	0.17	0.99
	524.67	45833	0.000	-0.43	0.90	0.00	524.52	44572	0.000	0.00	0.98	0.18
TE120	557.78	62976	0.023	0.00	0.96	0.28	556.47	53938	0.024	0.00	0.99	0.16
TE120	562.30	65778	0.035	0.00	0.19	0.98	562.17	62934	0.031	0.00	0.00	1.00
	566.55	59915	0.006	0.00	0.79	0.61	565.73	60248	0.014	0.00	0.77	0.64
	574.81	110129	0.000	1.00	0.00	0.00	574.68	109523	0.000	1.00	0.00	0.00
	574.99	110053	0.000	1.00	0.00	0.00	574.99	109547	0.000	1.00	0.00	0.00
	577.73	64321	0.000	0.00	0.38	0.92	578.12	62813	0.000	0.00	0.00	1.00
TM030	580.36	124054	0.062	1.00	0.00	0.00	580.25	123612	0.062	1.00	0.00	0.00
	594.72	63429	0.000	0.00	1.00	0.00	594.29	61714	0.000	0.00	1.00	0.00
	596.37	70278	0.000	0.00	0.33	0.94	596.57	70203	0.000	0.00	-0.43	0.90
	604.00	85572	0.000	1.00	0.00	0.00	604.11	85276	0.000	1.00	0.00	0.00
	606.97	81169	0.000	1.00	0.00	0.00	607.42	80170	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	10 50						10 60					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.09	51910	0.426	1.00	0.00	0.00	199.14	51729	0.426	1.00	0.00	0.00
TM011	293.11	44334	0.002	0.00	1.00	0.00	292.81	44087	0.005	0.00	1.00	0.00
TE111	306.34	58969	0.593	0.00	0.99	0.17	305.79	58069	0.624	0.00	0.99	0.11
TE111	309.05	59065	0.671	0.00	0.16	0.99	309.13	58748	0.671	0.00	0.11	0.99
	382.85	67104	0.001	0.00	1.00	0.00	381.41	63141	0.002	0.00	1.00	0.00
	386.78	81619	0.000	1.00	0.00	0.00	386.82	81820	0.000	1.00	0.00	0.00
	388.29	70563	0.000	0.00	0.00	1.00	388.60	69957	0.000	0.00	0.00	1.00
	388.97	77825	0.000	1.00	0.00	0.00	389.14	77167	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	429.87	45880	0.316	1.00	0.00	0.00	430.05	45682	0.317	1.00	0.00	0.00
	451.69	99389	0.000	0.00	0.73	-0.69	451.71	98707	0.000	0.00	-0.67	0.74
	470.07	53336	0.001	0.00	0.95	0.30	466.78	45539	0.003	0.00	0.97	0.23
	482.16	70381	0.000	0.00	0.79	-0.62	482.67	69611	0.000	0.00	0.76	-0.65
	483.04	60653	0.000	1.00	0.00	0.00	483.08	60640	0.000	1.00	0.00	0.00
	484.55	59731	0.000	1.00	0.00	0.00	484.69	59578	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.01	85188	0.000	1.00	0.00	0.00	502.05	85096	0.000	1.00	0.00	0.00
	504.47	76651	0.000	1.00	0.00	0.00	504.84	58863	0.020	0.00	1.00	0.00
TE112	505.72	62830	0.018	0.00	0.99	0.13	504.85	75301	0.000	0.93	0.36	0.00
TE112	508.14	70180	0.018	0.00	0.10	0.99	508.08	70035	0.018	0.00	0.00	1.00
	523.55	43107	0.000	0.00	0.99	0.15	522.30	41618	0.001	0.00	0.99	0.14
	553.83	44679	0.019	0.00	1.00	0.00	550.38	38848	0.013	0.00	1.00	0.00
TE120	561.76	62202	0.020	0.00	0.31	0.95	561.42	62704	0.031	0.00	-0.46	0.89
TE120	565.15	62251	0.021	0.00	0.74	0.68	564.82	63903	0.026	0.00	0.72	0.70
	574.57	109297	0.000	1.00	0.00	0.00	574.41	108811	0.000	1.00	0.00	0.00
	575.05	109490	0.000	1.00	0.00	0.00	575.11	109294	0.000	1.00	0.00	0.00
	578.60	61566	0.001	0.00	0.00	1.00	579.13	60507	0.001	0.00	0.18	0.98
TM030	580.16	123334	0.061	1.00	0.00	0.00	580.04	122840	0.061	1.00	0.00	0.00
	593.66	60526	0.001	0.00	1.00	0.00	593.07	59907	0.001	0.00	1.00	0.00
	596.56	70238	0.000	0.00	0.36	0.93	596.55	70262	0.000	0.00	-0.40	0.92
	604.18	85083	0.000	1.00	0.00	0.00	604.25	84865	0.000	1.00	0.00	0.00
	607.82	79268	0.000	1.00	0.00	0.00	608.18	78251	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	10 70						10 80					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.28	51674	0.426	1.00	0.00	0.00	199.23	51406	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	292.25	43836	0.011	0.00	1.00	0.00	291.80	43261	0.020	0.00	1.00	0.00
TE111	304.92	57126	0.643	0.00	1.00	0.00	304.25	55377	0.627	0.00	1.00	0.00
TE111	309.04	58684	0.669	0.00	0.00	1.00	309.31	58208	0.670	0.00	0.00	1.00
	379.50	58394	0.004	0.00	0.99	0.10	377.16	52897	0.008	0.00	0.99	0.10
	386.92	81982	0.000	1.00	0.00	0.00	386.88	81736	0.000	1.00	0.00	0.00
	388.86	69519	0.000	0.00	0.00	1.00	389.19	68788	0.000	0.00	0.00	1.00
	389.34	76682	0.000	1.00	0.00	0.00	389.41	75473	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	429.43	45564	0.318	1.00	0.00	0.00	430.39	45365	0.317	1.00	0.00	0.00
	451.48	99567	0.000	0.00	0.81	-0.59	451.61	96920	0.000	0.00	0.92	-0.40
	462.40	38194	0.005	0.00	0.98	0.19	457.14	32715	0.008	0.00	0.99	0.17
	482.96	61043	0.000	1.00	0.00	0.00	483.14	60677	0.000	1.00	0.00	0.00
	483.17	68926	0.000	0.00	0.75	-0.66	483.66	68128	0.000	0.00	0.74	-0.67
	484.52	59874	0.000	1.00	0.00	0.00	484.97	59338	0.000	1.00	0.00	0.00
	501.87	85192	0.000	0.99	0.13	0.00	502.12	84907	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	503.51	54625	0.018	0.00	1.00	0.00	502.41	51121	0.018	0.00	1.00	0.00
	504.98	74157	0.000	1.00	0.00	0.00	505.41	72585	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	507.87	70168	0.018	0.00	0.00	1.00	507.85	69476	0.018	0.00	0.00	1.00
	520.00	41376	0.001	0.00	0.99	0.12	519.41	41178	0.002	0.00	0.99	0.12
	546.60	36666	0.009	0.00	1.00	0.00	543.84	36778	0.006	0.00	1.00	0.00
TE120	560.72	63429	0.033	0.00	-0.52	0.86	560.84	63640	0.033	0.00	-0.55	0.84
TE120	564.26	64714	0.028	0.00	0.72	0.70	564.41	65322	0.029	0.00	0.73	0.69
	574.27	108837	0.001	1.00	0.00	0.00	573.91	107364	0.001	1.00	0.00	0.00
	575.31	109831	0.000	0.99	0.12	0.00	575.29	108980	0.000	1.00	0.00	0.00
	579.67	59525	0.001	0.00	0.24	0.97	579.75	121807	0.060	1.00	0.00	0.00
TM030	580.00	122428	0.060	1.00	0.00	0.00	580.23	58621	0.001	0.00	0.28	0.96
	592.27	60228	0.001	0.00	1.00	0.00	592.16	60201	0.001	0.00	1.00	0.00
	596.13	70443	0.000	0.00	0.31	0.95	596.51	70356	0.000	0.00	0.35	0.94
	604.25	84841	0.000	0.98	0.00	0.19	604.38	84464	0.000	1.00	0.00	0.00
	608.39	77391	0.000	1.00	0.00	0.00	608.68	76118	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	10						10					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.28	51231	0.425	1.00	0.00	0.00	199.40	51073	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	290.93	42436	0.038	0.00	1.00	0.00	289.62	41168	0.067	0.00	1.00	0.00
TE111	303.29	53665	0.597	0.00	1.00	0.00	302.19	51913	0.554	0.00	1.00	0.00
TE111	309.40	57941	0.671	0.00	0.00	1.00	309.42	57728	0.671	0.00	0.00	1.00
	374.24	47347	0.014	0.00	0.99	0.11	370.77	42255	0.025	0.00	0.99	0.11
	386.91	81589	0.000	1.00	0.00	0.00	386.95	81725	0.000	0.98	0.00	0.19
	389.47	68190	0.000	0.00	0.00	1.00	389.56	74299	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.49	74828	0.000	1.00	0.00	0.00	389.71	67630	0.000	0.00	0.00	1.00
TM020	430.53	45189	0.317	1.00	0.00	0.00	430.35	44981	0.318	1.00	0.00	0.00
	451.07	35695	0.009	0.00	0.99	0.13	445.19	27354	0.016	0.00	0.99	0.14
	451.64	59745	0.003	0.00	0.98	0.20	451.21	95251	0.000	0.00	0.71	0.70
	483.16	60655	0.000	1.00	0.00	0.00	483.15	60742	0.000	0.98	0.00	0.20
	484.12	67327	0.000	0.00	0.74	-0.67	484.56	66467	0.000	0.00	0.76	-0.65
	485.11	59269	0.000	1.00	0.00	0.00	485.12	59345	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	501.10	49182	0.017	0.00	1.00	0.00	499.81	48690	0.016	0.00	1.00	0.00
	502.17	84756	0.000	1.00	0.00	0.00	502.12	84680	0.000	1.00	0.00	0.00
	505.55	71177	0.001	1.00	0.00	0.00	505.49	69898	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.66	69215	0.019	0.00	0.00	1.00	507.36	69362	0.019	0.00	0.00	1.00
	518.13	42674	0.004	0.00	0.99	0.12	516.93	45063	0.005	0.00	0.99	0.11
	541.56	38156	0.005	0.00	1.00	0.00	539.79	39781	0.004	0.00	1.00	0.00
TE120	560.52	63693	0.034	0.00	-0.54	0.84	559.96	63576	0.034	0.00	-0.52	0.85
TE120	564.23	65493	0.030	0.00	0.75	0.66	563.91	65576	0.030	0.00	0.79	0.62
	573.56	106301	0.002	1.00	0.00	0.00	573.15	105268	0.003	1.00	0.00	0.00
	575.39	108805	0.000	1.00	0.00	0.00	575.55	108887	0.000	1.00	0.00	0.00
TM030	579.58	121269	0.058	1.00	0.00	0.00	579.44	120837	0.057	1.00	0.00	0.00
	580.75	57722	0.001	0.00	0.31	0.95	581.19	56848	0.002	0.00	0.35	0.94
	591.86	60740	0.002	0.00	1.00	0.00	591.53	61460	0.002	0.00	1.00	0.00
	596.49	70393	0.000	0.00	0.30	0.95	596.31	70463	0.000	0.00	0.31	0.95
	604.45	84257	0.000	1.00	0.00	0.00	604.48	84110	0.000	1.00	0.00	0.00
	608.79	74974	0.000	1.00	0.00	0.00	608.76	73990	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	10		G	z	x	y
	f/MHz	Q				
TM010	199.47	51140	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	287.68	39483	0.103	0.00	1.00	0.00
TE111	301.07	50526	0.495	0.00	1.00	0.00
TE111	309.38	57791	0.671	0.00	0.00	1.00
	366.86	38083	0.041	0.00	0.99	0.11
	387.07	81586	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.65	73498	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.94	67144	0.000	0.00	0.00	1.00
TM020	429.83	45093	0.319	1.00	0.00	0.00
	439.60	26870	0.020	0.00	0.99	0.13
	450.81	95679	0.000	0.00	0.37	0.93
	483.08	61305	0.000	1.00	0.00	0.00
	485.00	65623	0.000	0.00	0.81	-0.59
TE112	485.19	59786	0.000	1.00	0.00	0.00
	498.73	49052	0.014	0.00	1.00	0.00
	502.06	84730	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	505.26	68745	0.001	1.00	0.00	0.00
	507.07	69575	0.018	0.00	0.00	1.00
	515.95	47798	0.005	0.00	0.99	0.12
TE120	538.34	41283	0.004	0.00	1.00	0.00
	559.19	63625	0.035	0.00	-0.48	0.88
TE120	563.51	65942	0.030	0.00	0.83	0.56
	572.76	104212	0.004	1.00	0.00	0.00
	575.84	109141	0.000	1.00	0.00	0.00
TM030	579.43	120476	0.055	1.00	0.00	0.00
	581.57	56095	0.001	0.00	0.39	0.92
	591.23	62295	0.002	0.00	1.00	0.00
	596.11	70603	0.000	0.00	0.30	0.95
	604.49	84051	0.000	1.00	0.00	0.00
	608.63	73111	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	20						20					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.00	52181	0.426	1.00	0.00	0.00	199.04	52054	0.426	1.00	0.00	0.00
TM011	293.38	44503	0.000	0.72	-0.69	0.00	293.40	44482	0.000	0.00	0.94	0.35
TE111	307.01	60076	0.388	0.00	0.94	0.35	306.88	59773	0.475	0.00	0.96	0.28
TE111	308.88	59847	0.671	0.00	0.34	0.94	309.03	59450	0.671	0.00	0.28	0.96
	385.02	73172	0.000	0.00	0.84	0.54	384.45	71588	0.000	0.00	0.98	0.21
	386.64	81809	0.000	-0.44	0.00	0.90	386.69	81702	0.000	1.00	0.00	0.00
	387.55	71689	0.000	0.00	-0.60	0.80	387.85	71016	0.000	0.00	-0.54	0.84
	388.63	79700	0.000	0.81	0.59	0.00	388.80	78903	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	429.07	46116	0.317	1.00	0.00	0.00	429.64	46024	0.316	1.00	0.00	0.00
	451.52	101435	0.000	0.00	0.16	0.99	451.68	100190	0.000	0.00	-0.63	0.78
	474.60	67865	0.000	0.00	0.89	0.45	473.56	64273	0.001	0.00	0.92	0.39
	481.06	71696	0.000	0.00	0.80	-0.60	481.45	70816	0.000	0.00	0.78	-0.62
	482.77	60679	0.000	0.77	0.00	0.64	482.98	60620	0.000	1.00	0.00	0.00
	484.13	60041	0.000	0.99	0.00	0.12	484.44	59812	0.000	1.00	0.00	0.00
	501.93	85414	0.000	1.00	0.00	0.00	502.04	85285	0.000	1.00	0.00	0.00
	503.46	79280	0.000	1.00	0.00	0.00	503.94	78205	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	506.85	69121	0.012	0.00	0.95	0.32	506.65	67900	0.015	0.00	0.97	0.25
TE112	508.23	71152	0.018	0.00	0.31	0.95	508.25	70632	0.018	0.00	0.24	0.97
	524.88	46009	0.000	0.92	0.00	0.40	524.87	45086	0.000	0.00	0.91	0.42
TE120	558.10	65708	0.020	0.00	0.94	0.34	557.73	62281	0.024	0.00	0.97	0.26
TE120	562.57	67606	0.036	0.00	0.31	0.95	562.57	64404	0.032	0.00	0.17	0.99
	567.93	60377	0.003	0.00	0.53	0.85	566.89	57421	0.007	0.00	0.61	0.79
	574.80	110087	0.000	1.00	0.00	0.00	574.74	109773	0.000	1.00	0.00	0.00
	574.96	109935	0.000	0.99	0.11	0.00	574.96	109588	0.000	1.00	0.00	0.00
	576.34	61608	0.000	0.00	0.97	0.22	576.72	60448	0.000	0.00	0.86	-0.51
TM030	580.37	124051	0.062	1.00	0.00	0.00	580.29	123776	0.062	1.00	0.00	0.00
	595.00	64297	0.000	0.00	0.99	0.13	594.68	62966	0.000	0.00	1.00	0.00
	596.35	70065	0.000	0.00	0.87	-0.49	596.51	69903	0.000	0.00	0.88	-0.48
	604.02	85534	0.000	0.95	0.00	0.30	604.13	85227	0.000	1.00	0.00	0.00
	606.95	81261	0.000	1.00	0.00	0.00	607.37	80421	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	20						20					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.08	51931	0.426	1.00	0.00	0.00	199.12	51774	0.426	1.00	0.00	0.00
TM011	293.26	44426	0.000	0.00	0.98	0.17	293.05	44282	0.002	0.00	0.99	0.12
TE111	306.58	59392	0.548	0.00	0.98	0.22	306.15	58753	0.598	0.00	0.99	0.16
TE111	309.09	59132	0.671	0.00	0.21	0.98	309.16	58796	0.671	0.00	0.16	0.99
	383.65	69416	0.000	0.00	0.99	0.16	382.57	66450	0.001	0.00	0.99	0.14
	386.74	81712	0.000	1.00	0.00	0.00	386.79	81737	0.000	1.00	0.00	0.00
	388.15	70439	0.000	0.00	-0.49	0.87	388.46	69849	0.000	0.00	-0.44	0.90
	388.99	78013	0.000	1.00	0.00	0.00	389.17	77115	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	429.83	45908	0.316	1.00	0.00	0.00	430.01	45746	0.317	1.00	0.00	0.00
	451.77	99411	0.000	0.00	-0.63	0.77	451.83	98746	0.000	0.00	0.80	-0.60
	471.97	59118	0.001	0.00	0.95	0.32	469.64	52427	0.002	0.00	0.96	0.26
	481.89	69971	0.000	0.00	0.75	-0.66	482.34	69181	0.000	0.00	0.73	-0.68
	483.02	60656	0.000	1.00	0.00	0.00	483.06	60664	0.000	1.00	0.00	0.00
	484.57	59664	0.000	1.00	0.00	0.00	484.71	59481	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.06	85230	0.000	1.00	0.00	0.00	502.09	85129	0.000	1.00	0.00	0.00
	504.36	77082	0.000	1.00	0.00	0.00	504.76	75918	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	506.25	65925	0.017	0.00	0.98	0.19	505.65	62970	0.018	0.00	0.99	0.14
TE112	508.23	70253	0.018	0.00	0.17	0.99	508.19	69920	0.018	0.00	0.11	0.99
	524.12	43801	0.000	0.00	0.97	0.26	523.10	42163	0.000	0.00	0.98	0.19
TE120	556.39	54719	0.025	0.00	0.99	0.15	553.89	45166	0.020	0.00	1.00	0.00
TE120	562.04	60361	0.027	0.00	0.10	0.99	561.40	58979	0.027	0.00	-0.40	0.92
	565.92	57505	0.016	0.00	0.62	0.78	565.32	59882	0.024	0.00	0.60	0.80
	574.66	109557	0.000	1.00	0.00	0.00	574.54	109244	0.000	1.00	0.00	0.00
	575.01	109557	0.000	1.00	0.00	0.00	575.06	109403	0.000	1.00	0.00	0.00
	577.19	59502	0.000	0.00	-0.65	0.76	577.74	58714	0.001	0.00	-0.43	0.90
TM030	580.23	123506	0.062	1.00	0.00	0.00	580.14	123103	0.061	1.00	0.00	0.00
	594.14	61715	0.000	0.00	1.00	0.00	593.57	60748	0.000	0.00	1.00	0.00
	596.49	69837	0.000	0.00	0.88	-0.48	596.47	69774	0.000	0.00	0.83	-0.55
	604.21	85030	0.000	1.00	0.00	0.00	604.29	84827	0.000	1.00	0.00	0.00
	607.78	79571	0.000	1.00	0.00	0.00	608.17	78688	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	20 60						20 70					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.17	51590	0.425	1.00	0.00	0.00	199.34	51443	0.426	1.00	0.00	0.00
TM011	292.76	44038	0.004	0.00	1.00	0.00	292.30	43681	0.009	0.00	1.00	0.00
TE111	305.59	57834	0.625	0.00	0.99	0.11	304.77	56792	0.643	0.00	1.00	0.00
TE111	309.24	58477	0.670	0.00	0.11	0.99	309.19	58291	0.668	0.00	0.00	1.00
	381.13	62594	0.002	0.00	0.99	0.13	379.24	57949	0.003	0.00	0.99	0.13
	386.83	81787	0.000	1.00	0.00	0.00	386.92	82116	0.000	1.00	0.00	0.00
	388.76	69273	0.000	0.00	-0.41	0.91	389.03	68792	0.000	0.00	0.37	0.93
	389.35	76268	0.000	1.00	0.00	0.00	389.57	75838	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	430.19	45549	0.317	1.00	0.00	0.00	429.78	45307	0.318	1.00	0.00	0.00
	451.85	97968	0.000	0.00	0.79	-0.61	451.65	98345	0.000	0.00	0.89	-0.46
	466.39	44955	0.003	0.00	0.98	0.21	462.05	37894	0.005	0.00	0.98	0.18
	482.81	68407	0.000	0.00	-0.70	0.71	483.01	60849	0.000	1.00	0.00	0.00
	483.08	60625	0.000	1.00	0.00	0.00	483.28	67659	0.000	0.00	-0.69	0.72
	484.85	59284	0.000	1.00	0.00	0.00	484.82	59382	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.12	85019	0.000	1.00	0.00	0.00	501.99	85014	0.000	1.00	0.00	0.00
	504.81	59067	0.019	0.00	0.99	0.10	503.55	54878	0.019	0.00	1.00	0.00
TE112	505.13	74645	0.000	1.00	0.00	0.00	505.29	73493	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	508.14	69623	0.018	0.00	0.00	1.00	507.94	69785	0.018	0.00	0.00	1.00
	521.78	40560	0.001	0.00	0.99	0.17	519.66	40091	0.001	0.00	0.99	0.13
	550.50	38949	0.013	0.00	1.00	0.00	546.80	36601	0.009	0.00	1.00	0.00
TE120	560.93	59759	0.028	0.00	-0.57	0.82	560.29	60766	0.030	0.00	-0.63	0.78
TE120	564.99	61713	0.028	0.00	0.58	0.81	564.52	62495	0.030	0.00	0.59	0.81
	574.39	108732	0.000	1.00	0.00	0.00	574.24	108638	0.001	1.00	0.00	0.00
	575.13	109194	0.000	1.00	0.00	0.00	575.29	109571	0.000	1.00	0.00	0.00
	578.33	57983	0.001	0.00	0.28	0.96	578.92	57234	0.001	0.00	0.17	0.99
TM030	580.03	122613	0.061	1.00	0.00	0.00	579.92	122256	0.060	1.00	0.00	0.00
	593.03	60227	0.001	0.00	1.00	0.00	592.31	60488	0.001	0.00	1.00	0.00
	596.45	69750	0.000	0.00	0.80	-0.59	596.10	69797	0.000	0.00	0.72	-0.70
	604.36	84614	0.000	1.00	0.00	0.00	604.39	84545	0.000	0.00	-0.47	0.88
	608.52	77705	0.000	1.00	0.00	0.00	608.75	76847	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	20						20					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.26	51287	0.425	1.00	0.00	0.00	199.31	51095	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	291.76	43246	0.019	0.00	1.00	0.00	290.90	42417	0.036	0.00	1.00	0.00
TE111	304.05	55219	0.628	0.00	1.00	0.00	303.08	53463	0.599	0.00	1.00	0.00
TE111	309.41	57952	0.670	0.00	0.00	1.00	309.50	57660	0.670	0.00	0.00	1.00
	376.91	52579	0.007	0.00	0.99	0.12	374.00	47127	0.013	0.00	0.99	0.12
	386.89	81875	0.000	1.00	0.00	0.00	386.92	81650	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.35	68129	0.000	0.00	0.36	0.93	389.63	67540	0.000	0.00	0.35	0.94
	389.62	74850	0.000	1.00	0.00	0.00	389.70	73975	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	430.53	45264	0.317	1.00	0.00	0.00	430.68	45062	0.318	1.00	0.00	0.00
	451.75	95684	0.000	0.00	0.98	0.22	450.76	32363	0.011	0.00	0.99	0.13
	456.82	32543	0.008	0.00	0.99	0.16	451.80	70730	0.002	0.00	0.98	0.22
	483.14	60688	0.000	1.00	0.00	0.00	483.17	60614	0.000	1.00	0.00	0.00
	483.74	66842	0.000	0.00	-0.67	0.74	484.18	66019	0.000	0.00	-0.66	0.75
	485.15	59101	0.000	1.00	0.00	0.00	485.29	58941	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.19	84783	0.000	1.00	0.00	0.00	501.15	49150	0.017	0.00	1.00	0.00
TE112	502.46	51352	0.018	0.00	1.00	0.00	502.24	84622	0.000	1.00	0.00	0.00
	505.68	72013	0.000	1.00	0.00	0.00	505.82	70640	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.91	69084	0.018	0.00	0.00	1.00	507.73	68787	0.019	0.00	0.00	1.00
	518.77	40052	0.002	0.00	0.99	0.14	517.48	41501	0.004	0.00	0.99	0.13
	543.96	36708	0.007	0.00	1.00	0.00	541.66	38046	0.005	0.00	1.00	0.00
TE120	560.31	61342	0.030	0.00	-0.66	0.75	560.02	61664	0.031	0.00	-0.65	0.76
TE120	564.55	62982	0.031	0.00	0.60	0.80	564.33	62962	0.031	0.00	0.63	0.78
	573.89	107364	0.001	1.00	0.00	0.00	573.54	106253	0.002	1.00	0.00	0.00
	575.30	108934	0.000	1.00	0.00	0.00	575.41	108650	0.000	1.00	0.00	0.00
	579.52	56482	0.001	0.00	0.00	1.00	579.57	121084	0.058	1.00	0.00	0.00
TM030	579.73	121657	0.060	1.00	0.00	0.00	580.07	55700	0.001	0.00	0.00	1.00
	592.18	60461	0.001	0.00	1.00	0.00	591.89	60904	0.002	0.00	1.00	0.00
	596.39	69735	0.000	0.00	-0.70	0.71	596.36	69712	0.000	0.00	-0.63	0.78
	604.51	84169	0.000	1.00	0.00	0.00	604.57	83918	0.000	1.00	0.00	0.00
	609.02	75573	0.000	1.00	0.00	0.00	609.13	74458	0.000	0.99	0.00	0.17

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	20 100						20 110					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.44	50954	0.425	1.00	0.00	0.00	199.40	50749	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	289.49	41149	0.065	0.00	1.00	0.00	287.79	39281	0.102	0.00	1.00	0.00
TE111	301.92	51818	0.555	0.00	1.00	0.00	301.02	50059	0.496	0.00	1.00	0.00
TE111	309.42	57536	0.671	0.00	0.00	1.00	309.67	57156	0.670	0.00	0.00	1.00
	370.52	42112	0.024	0.00	0.99	0.12	366.69	38036	0.040	0.00	0.99	0.12
	386.98	81986	0.000	1.00	0.00	0.00	386.96	81314	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.79	72960	0.000	0.97	0.00	0.24	389.72	72659	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.85	67563	0.000	0.36	0.00	0.93	390.13	66375	0.000	0.00	0.33	0.94
TM020	430.08	44838	0.319	1.00	0.00	0.00	430.89	44737	0.318	1.00	0.00	0.00
	444.82	27241	0.017	0.00	0.99	0.13	439.40	26801	0.021	0.00	0.99	0.13
	451.30	94370	0.000	0.00	0.81	0.58	451.20	93036	0.000	0.00	0.54	0.84
	482.99	60878	0.000	0.99	0.00	0.11	483.22	60610	0.000	1.00	0.00	0.00
	484.60	65203	0.000	0.00	-0.66	0.75	484.99	64320	0.000	0.00	-0.68	0.73
	485.17	59076	0.000	1.00	0.00	0.00	485.58	58759	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	499.76	48523	0.015	0.00	1.00	0.00	498.97	48682	0.015	0.00	1.00	0.00
	502.11	84607	0.000	1.00	0.00	0.00	502.34	84312	0.000	1.00	0.00	0.00
	505.66	69505	0.001	1.00	0.00	0.00	505.70	68021	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.37	69130	0.018	0.00	0.00	1.00	507.18	68426	0.019	0.00	0.00	1.00
	515.99	44263	0.005	0.00	0.99	0.13	515.73	45768	0.006	0.00	0.99	0.13
	539.70	39542	0.004	0.00	0.99	0.10	538.89	41348	0.004	0.00	1.00	0.00
TE120	559.27	61897	0.032	0.00	-0.63	0.78	559.27	61698	0.032	0.00	-0.60	0.80
TE120	563.75	62874	0.032	0.00	0.68	0.74	563.83	62662	0.031	0.00	0.71	0.70
	573.16	105439	0.003	1.00	0.00	0.00	572.61	103497	0.004	1.00	0.00	0.00
	575.61	108969	0.000	1.00	0.00	0.00	575.66	108293	0.000	1.00	0.00	0.00
TM030	579.47	120704	0.057	1.00	0.00	0.00	579.25	120148	0.055	1.00	0.00	0.00
	580.53	54955	0.001	0.00	0.00	1.00	580.97	54231	0.001	0.00	0.00	1.00
	591.45	61731	0.002	0.00	1.00	0.00	591.52	61853	0.002	0.00	1.00	0.00
	595.99	69767	0.000	0.00	-0.59	0.80	596.31	69645	0.000	0.00	-0.55	0.84
	604.57	83883	0.000	1.00	0.00	0.00	604.68	83455	0.000	1.00	0.00	0.00
	609.07	73564	0.000	1.00	0.00	0.00	609.03	72388	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	30						30					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.08	51941	0.426	1.00	0.00	0.00	199.22	51841	0.426	1.00	0.00	0.00
TM011	293.30	44454	0.000	0.00	0.22	0.98	293.05	44374	0.000	0.00	0.99	0.13
TE111	306.63	59495	0.506	0.00	0.97	0.26	306.14	59262	0.562	0.00	0.98	0.20
TE111	309.13	59165	0.671	0.00	0.25	0.97	309.04	58986	0.671	0.00	0.20	0.98
	383.97	70285	0.000	0.00	0.57	0.82	383.15	68365	0.000	0.00	0.94	0.35
	386.71	81661	0.000	1.00	0.00	0.00	386.81	82004	0.000	1.00	0.00	0.00
	388.06	70291	0.000	0.00	0.91	-0.42	388.30	69793	0.000	0.00	0.84	-0.54
	389.01	77958	0.000	1.00	0.00	0.00	389.28	77445	0.000	0.99	0.13	0.00
TM020	429.81	45917	0.316	1.00	0.00	0.00	429.24	45727	0.318	1.00	0.00	0.00
	451.81	99355	0.000	0.00	0.88	-0.48	451.69	100033	0.000	0.00	0.86	-0.51
	472.67	61518	0.001	0.00	0.96	0.29	471.15	56975	0.001	0.00	0.97	0.26
	481.76	69702	0.000	0.00	0.73	-0.68	482.13	68690	0.000	0.00	-0.69	0.72
	482.99	60608	0.000	0.97	0.00	0.23	482.88	60908	0.000	0.98	0.00	0.18
	484.60	59614	0.000	1.00	0.00	0.00	484.50	59792	0.000	0.87	0.00	-0.48
	502.11	85258	0.000	1.00	0.00	0.00	501.93	85275	0.000	1.00	0.00	0.00
	504.28	77210	0.000	1.00	0.00	0.00	504.51	76323	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	506.43	66953	0.016	0.00	0.97	0.24	505.93	65714	0.017	0.00	0.98	0.19
TE112	508.29	70279	0.018	0.00	0.23	0.97	508.14	70344	0.017	0.00	0.18	0.98
	524.30	44022	0.000	0.00	0.12	0.99	522.52	42639	0.000	0.00	0.85	0.53
TE120	557.13	60699	0.025	0.00	0.97	0.24	555.73	56288	0.027	0.00	0.99	0.16
TE120	562.53	62894	0.030	0.00	0.19	0.98	561.38	56309	0.024	0.00	0.00	1.00
	566.94	53375	0.008	0.00	0.36	0.93	565.71	53480	0.017	0.00	0.44	0.90
	574.69	109560	0.000	1.00	0.00	0.00	574.71	110009	0.000	1.00	0.00	0.00
	574.99	109476	0.000	1.00	0.00	0.00	575.14	109994	0.000	0.99	0.00	0.16
	575.50	57058	0.001	0.00	0.99	0.12	576.04	56485	0.001	0.00	0.95	0.33
TM030	580.25	123490	0.062	1.00	0.00	0.00	580.26	123287	0.062	1.00	0.00	0.00
	594.40	62610	0.000	0.00	1.00	0.00	593.62	62032	0.000	0.00	1.00	0.00
	596.45	69609	0.000	0.00	0.97	0.24	596.02	69484	0.000	0.00	0.96	0.27
	604.22	85006	0.000	1.00	0.00	0.00	604.24	84938	0.000	1.00	0.00	0.00
	607.77	79673	0.000	1.00	0.00	0.00	608.10	79026	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	30 50						30 60					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.16	51641	0.425	1.00	0.00	0.00	199.21	51498	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	292.96	44233	0.001	0.00	0.98	0.19	292.68	44052	0.003	0.00	0.99	0.13
TE111	305.88	58430	0.602	0.00	0.99	0.15	305.32	57571	0.626	0.00	0.99	0.11
TE111	309.27	58551	0.670	0.00	0.15	0.99	309.36	58266	0.670	0.00	0.11	0.99
	382.12	65438	0.000	0.00	0.97	0.23	380.70	61772	0.001	0.00	0.98	0.18
	386.80	81863	0.000	1.00	0.00	0.00	386.84	81836	0.000	1.00	0.00	0.00
	388.64	69091	0.000	0.00	0.79	-0.61	388.93	68527	0.000	0.00	0.75	-0.67
	389.40	76341	0.000	1.00	0.00	0.00	389.57	75525	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	430.18	45621	0.317	1.00	0.00	0.00	430.36	45490	0.317	1.00	0.00	0.00
	451.96	97791	0.000	0.00	0.91	-0.41	451.99	96945	0.000	0.00	0.91	-0.41
	468.89	50959	0.002	0.00	0.97	0.23	465.71	44065	0.003	0.00	0.98	0.19
	482.51	67678	0.000	0.00	-0.67	0.74	482.91	66720	0.000	0.00	-0.63	0.77
	483.07	60669	0.000	1.00	0.00	0.00	483.10	60690	0.000	1.00	0.00	0.00
	484.89	59230	0.000	1.00	0.00	0.00	485.04	59101	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.16	85023	0.000	1.00	0.00	0.00	502.19	84925	0.000	1.00	0.00	0.00
	505.09	75069	0.000	1.00	0.00	0.00	504.75	59460	0.019	0.00	0.99	0.11
TE112	505.52	62990	0.018	0.00	0.99	0.15	505.46	73873	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	508.24	69613	0.018	0.00	0.12	0.99	508.19	69206	0.018	0.00	0.00	1.00
	522.40	40741	0.000	0.00	0.95	0.30	520.99	39011	0.000	0.00	0.97	0.23
	553.89	46036	0.021	0.00	1.00	0.00	550.61	39186	0.014	0.00	1.00	0.00
TE120	560.60	53024	0.021	0.00	-0.48	0.88	559.91	54384	0.024	0.00	-0.68	0.74
TE120	565.34	57436	0.027	0.00	0.43	0.90	565.07	59509	0.031	0.00	0.43	0.90
	574.50	109068	0.000	1.00	0.00	0.00	574.34	108686	0.001	1.00	0.00	0.00
	575.09	109243	0.000	1.00	0.00	0.00	575.16	109156	0.000	1.00	0.00	0.00
	576.68	56053	0.001	0.00	0.86	-0.51	577.33	55494	0.001	0.00	0.75	-0.66
TM030	580.11	122822	0.061	1.00	0.00	0.00	580.00	122468	0.061	1.00	0.00	0.00
	593.44	61047	0.000	0.00	1.00	0.00	592.96	60656	0.001	0.00	1.00	0.00
	596.36	69203	0.000	0.00	0.96	0.29	596.32	69081	0.000	0.00	0.94	0.34
	604.40	84538	0.000	1.00	0.00	0.00	604.48	84313	0.000	1.00	0.00	0.00
	608.55	78011	0.000	1.00	0.00	0.00	608.90	77071	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	30 70						30 80					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.26	51285	0.425	1.00	0.00	0.00	199.30	51143	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	292.28	43669	0.008	0.00	1.00	0.00	291.71	43203	0.017	0.00	1.00	0.00
TE111	304.61	56376	0.643	0.00	1.00	0.00	303.76	54913	0.629	0.00	1.00	0.00
TE111	309.44	57913	0.667	0.00	0.00	1.00	309.53	57673	0.669	0.00	0.00	1.00
	378.86	57242	0.003	0.00	0.99	0.16	376.52	52124	0.006	0.00	0.99	0.14
	386.87	81803	0.000	1.00	0.00	0.00	386.90	81779	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.23	67950	0.000	0.00	-0.70	0.71	389.51	67395	0.000	0.00	-0.67	0.74
	389.73	74705	0.000	1.00	0.00	0.00	389.85	73972	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	430.54	45258	0.317	1.00	0.00	0.00	430.70	45133	0.317	1.00	0.00	0.00
	451.97	96038	0.000	0.00	0.96	0.28	451.87	93879	0.000	0.00	1.00	0.00
	461.47	37444	0.006	0.00	0.99	0.17	456.28	32340	0.009	0.00	0.99	0.15
	483.13	60593	0.000	1.00	0.00	0.00	483.15	60659	0.000	1.00	0.00	0.00
	483.32	65810	0.000	0.00	-0.61	0.79	483.72	64925	0.000	0.00	-0.58	0.82
	485.19	58886	0.000	1.00	0.00	0.00	485.35	58767	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.23	84770	0.000	1.00	0.00	0.00	502.27	84660	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	503.73	55278	0.019	0.00	1.00	0.00	502.50	51540	0.018	0.00	1.00	0.00
	505.76	72621	0.000	1.00	0.00	0.00	505.99	71353	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	508.10	68828	0.018	0.00	0.00	1.00	507.96	68516	0.018	0.00	0.00	1.00
	519.38	37987	0.001	0.00	0.98	0.19	517.80	38316	0.002	0.00	0.99	0.17
	547.11	36572	0.009	0.00	1.00	0.00	544.08	36637	0.007	0.00	1.00	0.00
TE120	559.50	55812	0.026	0.00	0.74	-0.67	559.22	56804	0.027	0.00	0.76	-0.65
TE120	564.87	60376	0.033	0.00	0.44	0.90	564.65	60639	0.033	0.00	0.46	0.89
	574.13	108006	0.001	1.00	0.00	0.00	573.85	107241	0.002	1.00	0.00	0.00
	575.24	108943	0.000	1.00	0.00	0.00	575.33	108809	0.000	1.00	0.00	0.00
	577.98	54839	0.001	0.00	-0.66	0.75	578.60	54149	0.001	0.00	-0.58	0.81
TM030	579.86	121947	0.060	1.00	0.00	0.00	579.71	121458	0.059	1.00	0.00	0.00
	592.54	60584	0.001	0.00	1.00	0.00	592.19	60797	0.001	0.00	1.00	0.00
	596.28	68971	0.000	0.00	0.91	-0.41	596.23	68894	0.000	0.00	0.88	-0.47
	604.56	84080	0.000	1.00	0.00	0.00	604.63	83876	0.000	1.00	0.00	0.00
	609.18	76057	0.000	1.00	0.00	0.00	609.39	74989	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	30						30					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.35	50954	0.425	1.00	0.00	0.00	199.49	50827	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	290.86	42383	0.034	0.00	1.00	0.00	289.50	41138	0.062	0.00	1.00	0.00
TE111	302.78	53198	0.601	0.00	1.00	0.00	301.60	51611	0.558	0.00	1.00	0.00
TE111	309.62	57398	0.670	0.00	0.00	1.00	309.55	57256	0.671	0.00	0.00	1.00
	373.63	46808	0.012	0.00	0.99	0.13	370.18	41924	0.023	0.00	0.99	0.13
	386.92	81751	0.000	1.00	0.00	0.00	386.99	81862	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.78	66804	0.000	0.00	-0.64	0.77	389.99	66547	0.000	0.00	-0.61	0.79
	389.94	73226	0.000	1.00	0.00	0.00	390.03	72631	0.000	0.99	0.00	0.16
TM020	430.83	44939	0.318	1.00	0.00	0.00	430.27	44738	0.319	1.00	0.00	0.00
	450.23	30765	0.012	0.00	0.99	0.13	444.33	27100	0.018	0.00	0.99	0.12
	451.94	77588	0.001	0.00	0.97	0.23	451.46	93141	0.000	0.00	0.86	0.51
	483.18	60622	0.000	1.00	0.00	0.00	483.01	60831	0.000	1.00	0.00	0.00
	484.12	63999	0.000	0.00	-0.56	0.83	484.50	63139	0.000	0.00	-0.53	0.85
	485.49	58610	0.000	1.00	0.00	0.00	485.37	58812	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	501.21	49111	0.017	0.00	1.00	0.00	499.84	48284	0.015	0.00	1.00	0.00
	502.31	84467	0.000	1.00	0.00	0.00	502.18	84491	0.000	1.00	0.00	0.00
	506.12	70040	0.001	1.00	0.00	0.00	505.97	68911	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.78	68284	0.018	0.00	0.00	1.00	507.43	68434	0.018	0.00	0.00	1.00
	516.45	39815	0.003	0.00	0.99	0.15	514.96	42488	0.005	0.00	0.99	0.15
	541.77	37963	0.005	0.00	1.00	0.00	539.78	39500	0.005	0.00	0.99	0.12
TE120	558.97	57445	0.028	0.00	0.76	-0.65	558.35	58164	0.029	0.00	0.74	-0.67
TE120	564.38	60455	0.033	0.00	0.49	0.87	563.73	60078	0.033	0.00	0.53	0.85
	573.50	106088	0.002	1.00	0.00	0.00	573.11	105365	0.003	1.00	0.00	0.00
	575.43	108491	0.000	1.00	0.00	0.00	575.63	108961	0.000	0.99	0.00	0.16
	579.18	53420	0.001	0.00	-0.53	0.85	579.44	120534	0.056	1.00	0.00	0.00
TM030	579.55	120811	0.058	1.00	0.00	0.00	579.66	52719	0.001	0.00	-0.50	0.87
	591.93	61114	0.001	0.00	1.00	0.00	591.50	61816	0.002	0.00	1.00	0.00
	596.19	68814	0.000	0.00	0.84	-0.55	595.80	68823	0.000	0.00	0.79	-0.62
	604.69	83606	0.000	1.00	0.00	0.00	604.69	83547	0.000	1.00	0.00	0.00
	609.50	73832	0.000	1.00	0.00	0.00	609.43	72959	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	30		G	z	x	y	
	f/MHz	Q					
TM010	199.52	50684	0.425	1.00	0.00	0.00	
TM011	287.65	39326	0.100	0.00	1.00	0.00	
TE111	300.58	50002	0.498	0.00	1.00	0.00	
TE111	309.61	57059	0.670	0.00	0.00	1.00	
	366.32	37867	0.038	0.00	0.99	0.13	
	387.01	81825	0.000	1.00	0.00	0.00	
	390.02	72292	0.000	1.00	0.00	0.00	
	390.23	65758	0.000	0.00	-0.59	0.81	
	TM020	430.31	44616	0.319	1.00	0.00	0.00
		438.81	26584	0.022	0.00	0.99	0.12
451.18		93238	0.000	0.00	0.66	0.75	
482.99		60911	0.000	0.99	0.00	0.12	
484.86		62224	0.000	0.00	-0.52	0.86	
485.52		58789	0.000	1.00	0.00	0.00	
TE112	498.81	48406	0.014	0.00	1.00	0.00	
	502.23	84306	0.000	1.00	0.00	0.00	
	505.82	67688	0.001	1.00	0.00	0.00	
TE112	507.13	68406	0.018	0.00	0.00	1.00	
	514.28	44683	0.006	0.00	0.99	0.14	
	538.59	41062	0.004	0.00	0.99	0.12	
TE120	558.01	58593	0.030	0.00	0.71	-0.70	
TE120	563.33	59556	0.033	0.00	0.58	0.82	
	572.61	103925	0.004	1.00	0.00	0.00	
	575.78	108788	0.000	1.00	0.00	0.00	
	TM030	579.29	120129	0.055	1.00	0.00	0.00
580.10		52003	0.001	0.00	-0.49	0.87	
591.34		62191	0.002	0.00	1.00	0.00	
595.75		68673	0.000	0.00	0.74	-0.67	
604.74		83276	0.000	1.00	0.00	0.00	
609.31		71934	0.000	1.00	0.00	0.00	

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	40						40					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.16	51610	0.425	1.00	0.00	0.00	199.20	51450	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	293.02	44232	0.000	0.00	0.13	0.99	292.84	44095	0.000	0.00	0.92	0.38
TE111	305.96	58592	0.574	0.00	0.98	0.19	305.52	57923	0.606	0.00	0.99	0.15
TE111	309.31	58525	0.670	0.00	0.19	0.98	309.40	58271	0.670	0.00	0.14	0.99
	382.48	66491	0.000	0.00	0.37	0.93	381.45	63938	0.000	0.00	0.90	0.45
	386.77	81831	0.000	1.00	0.00	0.00	386.81	81971	0.000	1.00	0.00	0.00
	388.55	68938	0.000	0.00	0.97	0.23	388.83	68322	0.000	0.00	0.95	0.33
	389.43	76370	0.000	1.00	0.00	0.00	389.62	75508	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	430.16	45578	0.317	1.00	0.00	0.00	430.35	45426	0.317	1.00	0.00	0.00
	452.01	97808	0.000	0.00	0.98	0.20	452.08	97004	0.000	0.00	0.97	0.23
	469.83	53682	0.002	0.00	0.98	0.18	467.68	48664	0.003	0.00	0.99	0.17
	482.37	67232	0.000	0.00	-0.66	0.75	482.65	65860	0.000	0.00	-0.65	0.76
	483.04	60565	0.000	1.00	0.00	0.00	483.08	60649	0.000	1.00	0.00	0.00
	484.91	59187	0.000	1.00	0.00	0.00	485.07	58920	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.19	85046	0.000	1.00	0.00	0.00	502.22	84905	0.000	1.00	0.00	0.00
	505.05	75194	0.000	1.00	0.00	0.00	505.33	62810	0.018	0.00	0.99	0.15
TE112	505.79	64613	0.017	0.00	0.98	0.19	505.44	74131	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	508.30	69644	0.018	0.00	0.17	0.98	508.27	69311	0.018	0.00	0.13	0.99
	522.58	40750	0.000	0.00	0.00	1.00	521.36	38699	0.000	0.00	0.84	0.54
TE120	555.32	54515	0.026	0.00	0.99	0.17	553.71	47564	0.024	0.00	1.00	0.00
	560.96	48908	0.015	0.00	0.00	1.00	559.12	44397	0.013	0.00	-0.49	0.87
TE120	565.56	51837	0.024	0.00	0.20	0.98	565.20	55855	0.031	0.00	0.25	0.97
	574.54	109146	0.000	1.00	0.00	0.00	574.43	108854	0.000	1.00	0.00	0.00
	575.03	55364	0.003	0.00	1.00	0.00	575.13	109132	0.000	1.00	0.00	0.00
	575.07	109219	0.000	1.00	0.00	0.00	575.67	54684	0.002	0.00	0.99	0.14
TM030	580.13	122850	0.061	1.00	0.00	0.00	580.05	122538	0.061	1.00	0.00	0.00
	593.70	61884	0.000	0.00	1.00	0.00	593.29	61442	0.000	0.00	1.00	0.00
	596.31	68914	0.000	0.00	0.99	0.11	596.24	68576	0.000	0.00	0.99	0.14
	604.41	84532	0.000	1.00	0.00	0.00	604.50	84281	0.000	1.00	0.00	0.00
	608.57	78120	0.000	1.00	0.00	0.00	608.94	77273	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	40						40					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.34	51424	0.425	1.00	0.00	0.00	199.30	51188	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	292.43	44013	0.002	0.00	1.00	0.00	292.18	43664	0.006	0.00	0.99	0.13
TE111	304.80	57310	0.629	0.00	0.99	0.11	304.23	55979	0.644	0.00	1.00	0.00
TE111	309.30	58194	0.671	0.00	0.10	0.99	309.57	57716	0.667	0.00	0.00	1.00
	380.03	60620	0.001	0.00	0.96	0.28	378.25	56322	0.002	0.00	0.98	0.21
	386.91	82139	0.000	1.00	0.00	0.00	386.88	81834	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.07	67846	0.000	0.00	0.92	-0.39	389.38	67141	0.000	0.00	0.89	-0.45
	389.86	75106	0.000	1.00	0.00	0.00	389.97	73906	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	429.76	45352	0.318	1.00	0.00	0.00	430.71	45201	0.317	1.00	0.00	0.00
	451.91	97763	0.000	0.00	0.97	0.24	452.08	95013	0.000	0.00	0.99	0.15
	464.59	42568	0.004	0.00	0.99	0.15	460.49	36669	0.006	0.00	0.99	0.14
	482.93	61306	0.000	0.00	-0.67	0.74	483.14	60687	0.000	1.00	0.00	0.00
	482.95	64242	0.000	0.00	-0.60	0.80	483.26	63247	0.000	0.00	-0.58	0.81
	484.99	59177	0.000	1.00	0.00	0.00	485.39	58659	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.06	84947	0.000	1.00	0.00	0.00	502.30	84627	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	504.47	60097	0.018	0.00	0.99	0.13	503.72	55893	0.019	0.00	0.99	0.10
	505.62	73213	0.000	1.00	0.00	0.00	506.10	71859	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	508.11	69203	0.017	0.00	0.00	1.00	508.13	68295	0.018	0.00	0.00	1.00
	518.92	37114	0.000	0.00	0.96	0.29	518.05	35677	0.001	0.00	0.97	0.24
	550.48	40041	0.016	0.00	1.00	0.00	547.23	36645	0.010	0.00	1.00	0.00
TE120	557.76	46472	0.018	0.00	0.75	-0.67	557.59	48744	0.021	0.00	0.83	-0.56
TE120	564.68	57681	0.034	0.00	0.29	0.96	564.89	58631	0.035	0.00	0.30	0.95
	574.35	109060	0.001	1.00	0.00	0.00	574.06	107879	0.001	1.00	0.00	0.00
	575.31	109659	0.000	1.00	0.00	0.00	575.27	108820	0.000	1.00	0.00	0.00
	576.29	53806	0.002	0.00	0.96	0.27	576.98	53177	0.001	0.00	0.93	0.38
TM030	580.02	122194	0.061	1.00	0.00	0.00	579.82	121690	0.060	1.00	0.00	0.00
	592.61	61497	0.000	0.00	1.00	0.00	592.52	61084	0.001	0.00	1.00	0.00
	595.78	68435	0.000	0.00	0.98	0.18	596.11	68088	0.000	0.00	0.97	0.23
	604.52	84230	0.000	1.00	0.00	0.00	604.67	83799	0.000	1.00	0.00	0.00
	609.22	76517	0.000	1.00	0.00	0.00	609.56	75360	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	40						40					
	80	Q	G	z	x	y	90	Q	G	z	x	y
	f/MHz						f/MHz					
TM010	199.48	51051	0.426	1.00	0.00	0.00	199.39	50794	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	291.58	43157	0.014	0.00	1.00	0.00	290.80	42320	0.030	0.00	1.00	0.00
TE111	303.26	54690	0.631	0.00	1.00	0.00	302.38	52834	0.604	0.00	1.00	0.00
TE111	309.52	57552	0.669	0.00	0.00	1.00	309.74	57148	0.670	0.00	0.00	1.00
	375.93	51502	0.005	0.00	0.98	0.18	373.10	46375	0.011	0.00	0.99	0.16
	386.95	82020	0.000	1.00	0.00	0.00	386.93	81740	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.62	66666	0.000	0.00	0.87	-0.50	389.91	65980	0.000	0.00	0.85	-0.53
	390.16	73450	0.000	1.00	0.00	0.00	390.18	72536	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	430.23	44966	0.319	1.00	0.00	0.00	431.00	44802	0.318	1.00	0.00	0.00
	451.77	92038	0.000	0.00	1.00	0.00	449.43	29686	0.014	0.00	0.99	0.12
	455.39	32074	0.010	0.00	0.99	0.13	452.07	81920	0.001	0.00	0.97	0.23
	483.08	60912	0.000	0.99	0.00	0.11	483.19	60641	0.000	1.00	0.00	0.00
	483.58	62021	0.000	0.00	-0.54	0.84	483.89	60893	0.000	0.00	-0.51	0.86
	485.40	58782	0.000	1.00	0.00	0.00	485.71	58284	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.14	84267	0.000	0.75	0.66	0.00	501.27	48995	0.017	0.00	1.00	0.00
TE112	502.35	52002	0.018	0.00	1.00	0.00	502.38	84279	0.000	1.00	0.00	0.00
	506.15	70798	0.001	1.00	0.00	0.00	506.43	69365	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.85	68171	0.018	0.00	0.00	1.00	507.82	67538	0.018	0.00	0.00	1.00
	515.75	36484	0.002	0.00	0.98	0.21	514.95	37562	0.003	0.00	0.98	0.18
	543.99	36520	0.007	0.00	0.99	0.11	541.88	37901	0.006	0.00	0.99	0.11
TE120	557.04	50296	0.023	0.00	0.84	-0.54	557.14	50840	0.024	0.00	0.85	-0.53
TE120	564.38	58726	0.035	0.00	0.33	0.94	564.39	58416	0.035	0.00	0.34	0.94
	573.89	107583	0.002	1.00	0.00	0.00	573.44	106026	0.002	1.00	0.00	0.00
	575.49	109197	0.000	1.00	0.00	0.00	575.46	108426	0.000	1.00	0.00	0.00
	577.57	52300	0.002	0.00	0.89	-0.45	578.19	51579	0.002	0.00	0.87	-0.50
TM030	579.75	121283	0.059	1.00	0.00	0.00	579.52	120677	0.058	1.00	0.00	0.00
	591.97	61506	0.001	0.00	1.00	0.00	591.96	61400	0.001	0.00	1.00	0.00
	595.68	67996	0.000	0.00	0.96	0.30	595.98	67735	0.000	0.00	0.94	0.34
	604.69	83728	0.000	1.00	0.00	0.00	604.81	83287	0.000	1.00	0.00	0.00
	609.70	74456	0.000	0.79	0.62	0.00	609.86	73168	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	40 100						40 110					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.46	50663	0.425	1.00	0.00	0.00	199.48	50457	0.424	1.00	0.00	0.00
TM011	289.47	41115	0.058	0.00	1.00	0.00	287.76	39244	0.097	0.00	1.00	0.00
TE111	301.27	51204	0.561	0.00	1.00	0.00	300.29	49549	0.501	0.00	1.00	0.00
TE111	309.73	56974	0.670	0.00	0.00	1.00	309.90	56639	0.669	0.00	0.00	1.00
	369.70	41641	0.021	0.00	0.99	0.15	365.91	37725	0.036	0.00	0.99	0.14
	386.98	81901	0.000	0.97	0.00	0.23	386.97	81657	0.000	1.00	0.00	0.00
	390.14	65479	0.000	0.00	0.83	-0.56	390.19	71233	0.000	1.00	0.00	0.00
	390.23	72026	0.000	0.99	0.16	0.00	390.38	64824	0.000	0.00	0.81	-0.58
TM020	430.72	44650	0.319	1.00	0.00	0.00	431.21	44495	0.319	1.00	0.00	0.00
	443.60	26859	0.019	0.00	0.99	0.11	438.18	26353	0.024	0.00	0.99	0.11
	451.70	91363	0.000	0.00	0.90	0.44	451.49	90826	0.000	0.00	0.74	0.67
	483.08	60782	0.000	0.98	0.00	0.18	483.23	60639	0.000	1.00	0.00	0.00
	484.20	59810	0.000	0.00	-0.47	0.88	484.49	58818	0.000	0.00	-0.44	0.90
	485.70	58363	0.000	0.99	0.11	0.00	486.02	58073	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	499.98	47766	0.015	0.00	1.00	0.00	499.03	47620	0.014	0.00	1.00	0.10
	502.33	84223	0.000	1.00	0.00	0.00	502.48	83954	0.000	1.00	0.00	0.00
	506.34	68218	0.001	1.00	0.00	0.00	506.29	66969	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.54	67534	0.018	0.00	0.00	1.00	507.28	67049	0.019	0.00	0.00	1.00
	513.64	40107	0.005	0.00	0.98	0.18	513.22	41992	0.006	0.00	0.98	0.17
	540.03	39482	0.005	0.00	0.99	0.12	539.06	41153	0.004	0.00	0.99	0.12
TE120	556.76	51689	0.025	0.00	0.84	-0.55	556.76	52164	0.025	0.00	0.82	-0.57
TE120	563.78	57816	0.035	0.00	0.38	0.93	563.55	56996	0.034	0.00	0.41	0.91
	573.04	105062	0.003	1.00	0.00	0.00	572.52	103395	0.004	1.00	0.00	0.00
	575.63	108576	0.000	1.00	0.00	0.00	575.71	108036	0.000	1.00	0.00	0.00
	578.69	50772	0.002	0.00	0.86	-0.52	579.15	50077	0.002	0.00	0.86	-0.51
TM030	579.41	120307	0.056	1.00	0.00	0.00	579.22	119814	0.054	1.00	0.00	0.00
	591.64	61833	0.002	0.00	1.00	0.00	591.62	61969	0.002	0.00	1.00	0.00
	595.73	67643	0.000	0.00	0.92	-0.40	595.85	67385	0.001	0.00	0.88	-0.47
	604.84	83130	0.000	0.99	0.13	0.00	604.91	82786	0.000	1.00	0.00	0.00
	609.82	72179	0.000	1.00	0.00	0.00	609.74	71097	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	50						50					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.25	51348	0.425	1.00	0.00	0.00	199.29	51154	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	292.66	44035	0.000	0.00	0.10	1.00	292.40	43796	0.001	0.00	0.92	0.39
TE111	305.05	57342	0.609	0.00	0.99	0.14	304.46	56481	0.626	0.00	0.99	0.11
TE111	309.52	58040	0.670	0.00	0.14	0.99	309.60	57695	0.670	0.00	0.10	0.99
	380.50	61800	0.000	0.00	0.27	0.96	379.16	58777	0.000	0.00	0.88	0.48
	386.82	81858	0.000	1.00	0.00	0.00	386.86	81858	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.03	67567	0.000	0.00	0.99	0.14	389.28	66907	0.000	0.00	0.98	0.21
	389.84	74680	0.000	1.00	0.00	0.00	390.03	73851	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	430.53	45354	0.317	1.00	0.00	0.00	430.71	45154	0.317	1.00	0.00	0.00
	452.17	96134	0.000	0.00	1.00	0.00	452.20	95236	0.000	0.00	1.00	0.00
	465.82	45234	0.004	0.00	0.99	0.12	462.92	40468	0.005	0.00	0.99	0.12
	482.78	63791	0.000	0.00	-0.61	0.79	482.92	61759	0.000	0.00	-0.56	0.83
	483.09	60668	0.000	1.00	0.00	0.00	483.12	60593	0.000	1.00	0.00	0.00
	485.26	58792	0.000	1.00	0.00	0.00	485.42	58547	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.28	84776	0.000	1.00	0.00	0.00	502.32	84595	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	505.02	62124	0.018	0.00	0.99	0.16	504.48	60179	0.019	0.00	0.99	0.13
	505.78	73184	0.000	1.00	0.00	0.00	506.13	72118	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	508.29	68866	0.018	0.00	0.14	0.99	508.23	68269	0.018	0.00	0.11	0.99
	519.91	36236	0.000	0.00	0.00	1.00	518.14	34017	0.000	0.00	0.78	0.62
TE120	552.92	48265	0.024	0.00	0.99	0.12	550.67	40920	0.017	0.00	1.00	0.00
	557.14	37120	0.005	0.00	0.00	1.00	555.30	38546	0.011	0.00	0.79	-0.61
TE120	564.94	55681	0.033	0.00	0.00	1.00	564.91	57030	0.036	0.00	0.15	0.99
	574.32	108592	0.001	1.00	0.00	0.00	574.17	108142	0.001	1.00	0.00	0.00
	574.98	54784	0.004	0.00	1.00	0.00	575.24	108790	0.000	1.00	0.00	0.00
	575.17	108980	0.000	1.00	0.00	0.00	575.57	53718	0.004	0.00	1.00	0.00
TM030	579.98	122194	0.061	1.00	0.00	0.00	579.88	121776	0.061	1.00	0.00	0.00
	593.14	61939	0.000	0.00	0.99	0.12	592.80	61713	0.000	0.00	1.00	0.00
	596.12	67983	0.000	0.00	1.00	0.00	596.03	67515	0.000	0.00	1.00	0.00
	604.60	84024	0.000	1.00	0.00	0.00	604.69	83764	0.000	1.00	0.00	0.00
	609.32	76470	0.000	1.00	0.00	0.00	609.64	75566	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	50 70						50 80					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.35	50988	0.425	1.00	0.00	0.00	199.39	50823	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	292.04	43491	0.003	0.00	0.98	0.19	291.51	43031	0.010	0.00	0.99	0.13
TE111	303.74	55338	0.644	0.00	1.00	0.00	302.86	53941	0.632	0.00	1.00	0.00
TE111	309.69	57406	0.666	0.00	0.00	1.00	309.78	57151	0.668	0.00	0.00	1.00
	377.39	54940	0.001	0.00	0.95	0.31	375.14	50472	0.004	0.00	0.97	0.23
	386.89	81842	0.000	1.00	0.00	0.00	386.91	81858	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.53	66241	0.000	0.00	0.96	0.26	389.78	65616	0.000	0.00	0.95	0.30
	390.19	73117	0.000	1.00	0.00	0.00	390.32	72454	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	430.88	44992	0.318	1.00	0.00	0.00	431.04	44842	0.318	1.00	0.00	0.00
	452.16	93830	0.000	0.00	1.00	0.00	451.95	80790	0.001	0.00	1.00	0.00
	459.00	35446	0.008	0.00	0.99	0.12	454.20	32684	0.011	0.00	0.99	0.12
	483.07	59760	0.000	0.00	-0.53	0.85	483.17	60596	0.000	1.00	0.00	0.00
	483.15	60578	0.000	1.00	0.00	0.00	483.23	57894	0.000	0.00	-0.48	0.88
	485.60	58336	0.000	1.00	0.00	0.00	485.76	58182	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.36	84439	0.000	1.00	0.00	0.00	502.40	84234	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	503.67	56712	0.019	0.00	0.99	0.11	502.59	52336	0.018	0.00	0.99	0.10
	506.42	71027	0.001	1.00	0.00	0.00	506.63	69847	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	508.14	67604	0.018	0.00	0.00	1.00	508.01	66981	0.018	0.00	0.00	1.00
	516.17	32778	0.001	0.00	0.93	0.37	514.32	33171	0.002	0.00	0.96	0.29
	547.34	36809	0.010	0.00	1.00	0.00	544.31	36600	0.007	0.00	0.99	0.12
TE120	554.74	41518	0.016	0.00	0.89	-0.46	554.53	42961	0.018	0.00	0.90	-0.43
TE120	564.82	57456	0.036	0.00	0.17	0.98	564.63	57384	0.037	0.00	0.20	0.98
	573.96	107560	0.001	1.00	0.00	0.00	573.68	106784	0.002	1.00	0.00	0.00
	575.31	108589	0.000	1.00	0.00	0.00	575.40	108398	0.000	1.00	0.00	0.00
	576.16	52668	0.004	0.00	0.99	0.11	576.74	51672	0.004	0.00	0.98	0.18
TM030	579.76	121356	0.060	1.00	0.00	0.00	579.62	120877	0.059	1.00	0.00	0.00
	592.49	61592	0.001	0.00	1.00	0.00	592.21	61584	0.001	0.00	1.00	0.00
	595.94	67153	0.000	0.00	0.99	0.12	595.85	66873	0.000	0.00	0.99	0.16
	604.78	83526	0.000	1.00	0.00	0.00	604.85	83223	0.000	1.00	0.00	0.00
	609.91	74602	0.000	1.00	0.00	0.00	610.11	73514	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	50						50					
	90	Q	G	z	x	y	100	Q	G	z	x	y
	f/MHz						f/MHz					
TM010	199.44	50667	0.424	1.00	0.00	0.00	199.58	50562	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	290.71	42289	0.025	0.00	1.00	0.00	289.41	41121	0.053	0.00	1.00	0.00
TE111	301.85	52309	0.606	0.00	1.00	0.00	300.65	50802	0.565	0.00	1.00	0.00
TE111	309.86	56895	0.669	0.00	0.00	1.00	309.77	56777	0.670	0.00	0.00	1.00
	372.35	45719	0.009	0.00	0.98	0.19	368.99	41231	0.018	0.00	0.99	0.17
	386.94	81816	0.000	1.00	0.00	0.00	387.01	82051	0.000	1.00	0.00	0.00
	390.02	64990	0.000	0.00	0.94	0.34	390.20	64523	0.000	0.00	0.93	0.37
	390.41	71757	0.000	1.00	0.00	0.00	390.51	71486	0.000	0.99	0.14	0.00
TM020	431.17	44703	0.318	1.00	0.00	0.00	430.58	44541	0.319	1.00	0.00	0.00
	448.24	28720	0.016	0.00	0.99	0.11	442.45	26463	0.021	0.00	0.99	0.10
	452.16	84789	0.000	0.00	0.97	0.23	451.71	90649	0.000	0.00	0.92	0.39
	483.19	60615	0.000	1.00	0.00	0.00	483.03	60913	0.000	1.00	0.00	0.00
	483.40	56209	0.000	0.00	-0.45	0.89	483.55	54658	0.000	0.00	-0.39	0.92
	485.93	58032	0.000	1.00	0.00	0.00	485.83	58273	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	501.33	48732	0.016	0.00	0.99	0.10	499.91	47042	0.014	0.00	0.99	0.11
	502.45	84100	0.000	1.00	0.00	0.00	502.31	84075	0.000	1.00	0.00	0.00
	506.74	68673	0.001	1.00	0.00	0.00	506.56	67652	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.82	66355	0.018	0.00	0.00	1.00	507.44	65947	0.018	0.00	0.00	1.00
	512.88	35034	0.004	0.00	0.97	0.26	511.40	38175	0.005	0.00	0.96	0.27
	541.98	37845	0.006	0.00	0.99	0.12	539.97	39355	0.005	0.00	0.99	0.14
TE120	554.41	43792	0.019	0.00	0.91	-0.42	553.98	44757	0.021	0.00	0.90	-0.44
TE120	564.33	56987	0.036	0.00	0.22	0.98	563.54	56342	0.036	0.00	0.25	0.97
	573.34	105835	0.003	1.00	0.00	0.00	572.97	105144	0.004	1.00	0.00	0.00
	575.50	108217	0.000	1.00	0.00	0.00	575.71	108715	0.000	0.98	0.00	0.19
	577.28	50695	0.003	0.00	0.97	0.23	577.72	49659	0.003	0.00	0.97	0.25
TM030	579.48	120403	0.058	1.00	0.00	0.00	579.41	120229	0.056	1.00	0.00	0.00
	591.99	61686	0.001	0.00	1.00	0.00	591.57	62122	0.001	0.00	1.00	0.00
	595.76	66654	0.000	0.00	0.98	0.22	595.30	66532	0.000	0.00	0.96	0.28
	604.92	83005	0.000	1.00	0.00	0.00	604.92	82909	0.000	1.00	0.00	0.00
	610.20	72400	0.000	1.00	0.00	0.00	610.12	71501	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	50		G	z	x	y
	f/MHz	Q				
TM010	199.53	50368	0.424	1.00	0.00	0.00
TM011	287.74	39293	0.093	0.00	1.00	0.00
TE111	299.73	49134	0.505	0.00	1.00	0.00
TE111	310.02	56409	0.669	0.00	0.00	1.00
	365.27	37467	0.032	0.00	0.99	0.16
	386.98	81434	0.000	1.00	0.00	0.00
	390.42	70405	0.000	1.00	0.00	0.00
	390.45	63802	0.001	0.00	0.92	-0.39
TM020	431.39	44448	0.319	1.00	0.00	0.00
	437.12	25965	0.026	0.00	0.99	0.10
	451.61	89600	0.000	0.00	0.79	0.61
	483.24	60616	0.000	1.00	0.00	0.00
	483.75	53472	0.000	0.00	0.35	0.94
	486.25	57810	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	499.03	46614	0.013	0.00	0.99	0.11
	502.55	83744	0.000	1.00	0.00	0.00
	506.57	66383	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.27	65249	0.018	0.00	0.00	1.00
	511.23	39950	0.007	0.00	0.97	0.25
	539.13	41070	0.004	0.00	0.99	0.12
TE120	554.20	44985	0.021	0.00	0.89	-0.45
TE120	563.39	55485	0.035	0.00	0.27	0.96
	572.44	103276	0.004	1.00	0.00	0.00
	575.74	107831	0.000	1.00	0.00	0.00
	578.21	48998	0.003	0.00	0.97	0.25
TM030	579.20	119651	0.054	1.00	0.00	0.00
	591.67	62043	0.002	0.00	1.00	0.00
	595.58	66189	0.000	0.00	0.94	0.33
	605.02	82463	0.000	1.00	0.00	0.00
	610.06	70299	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	60						60					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.34	50993	0.425	1.00	0.00	0.00	199.39	50827	0.425	1.00	0.00	0.00
TM011	292.17	43617	0.000	0.00	0.00	1.00	291.83	43343	0.001	0.00	0.93	0.37
TE111	303.85	55651	0.624	0.00	0.99	0.11	303.10	54552	0.643	0.00	1.00	0.00
TE111	309.73	57429	0.670	0.00	0.10	0.99	309.81	57157	0.666	0.00	0.00	1.00
	377.92	56301	0.000	0.00	0.21	0.98	376.22	53019	0.001	0.00	0.84	0.54
	386.87	81878	0.000	1.00	0.00	0.00	386.90	81872	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.45	66058	0.000	0.00	1.00	0.00	389.67	65308	0.000	0.00	0.99	0.14
	390.24	73200	0.000	1.00	0.00	0.00	390.40	72409	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	430.88	45005	0.318	1.00	0.00	0.00	431.05	44854	0.318	1.00	0.00	0.00
	452.24	94337	0.000	0.00	1.00	0.00	452.19	91726	0.000	0.00	1.00	0.00
	460.44	37390	0.007	0.00	1.00	0.00	456.81	33742	0.010	0.00	1.00	0.00
	482.83	58524	0.000	0.00	-0.56	0.83	482.74	55385	0.000	0.00	-0.54	0.84
	483.13	60549	0.000	1.00	0.00	0.00	483.16	60573	0.000	1.00	0.00	0.00
	485.62	58341	0.000	1.00	0.00	0.00	485.80	58129	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.38	84413	0.000	1.00	0.00	0.00	502.42	84205	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	504.19	60112	0.019	0.00	0.99	0.14	503.58	57818	0.019	0.00	0.99	0.13
	506.44	71156	0.001	1.00	0.00	0.00	506.72	70116	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	508.21	67736	0.018	0.00	0.12	0.99	508.11	66572	0.018	0.00	0.00	1.00
	515.97	31271	0.000	0.00	0.00	1.00	513.71	29933	0.000	0.00	0.76	0.65
TE120	550.06	43183	0.022	0.00	1.00	0.00	547.41	37385	0.012	0.00	1.00	0.00
	552.40	32847	0.002	0.00	0.00	1.00	551.23	36301	0.011	0.00	0.91	-0.42
TE120	564.69	56854	0.037	0.00	0.00	1.00	564.66	56892	0.037	0.00	0.00	1.00
	574.01	107713	0.001	1.00	0.00	0.00	573.81	107269	0.002	1.00	0.00	0.00
	575.16	54139	0.007	0.00	0.99	0.14	575.36	108470	0.000	1.00	0.00	0.00
	575.29	108586	0.000	1.00	0.00	0.00	575.65	52964	0.007	0.00	1.00	0.00
TM030	579.79	121383	0.060	1.00	0.00	0.00	579.68	121062	0.059	1.00	0.00	0.00
	592.72	62274	0.000	0.00	0.99	0.15	592.46	62099	0.000	0.00	0.99	0.12
	595.88	66825	0.000	0.00	1.00	0.00	595.76	66323	0.001	0.00	1.00	0.00
	604.79	83496	0.000	1.00	0.00	0.00	604.87	83235	0.000	1.00	0.00	0.00
	609.97	74665	0.000	1.00	0.00	0.00	610.23	73688	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	60 80						60 90					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.52	50738	0.425	1.00	0.00	0.00	199.48	50520	0.424	1.00	0.00	0.00
TM011	291.20	42954	0.007	0.00	0.99	0.13	290.59	42222	0.020	0.00	0.99	0.12
TE111	302.06	53333	0.634	0.00	1.00	0.00	301.16	51581	0.610	0.00	1.00	0.00
TE111	309.72	57069	0.668	0.00	0.00	1.00	309.98	56623	0.669	0.00	0.00	1.00
	374.01	49126	0.003	0.00	0.94	0.34	371.33	44776	0.007	0.00	0.97	0.25
	386.98	82117	0.000	1.00	0.00	0.00	386.95	81781	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.83	64680	0.001	0.00	0.98	0.17	390.09	63857	0.001	0.00	0.98	0.20
	390.60	71851	0.000	0.98	0.20	0.00	390.61	70987	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	430.46	44716	0.319	1.00	0.00	0.00	431.35	44586	0.319	1.00	0.00	0.00
	451.30	45657	0.007	0.00	1.00	0.00	446.52	27692	0.018	0.00	1.00	0.00
	452.71	44899	0.007	0.00	1.00	0.00	452.20	86467	0.000	0.00	0.98	0.21
	482.61	52284	0.000	0.00	-0.49	0.87	482.54	49845	0.000	0.00	-0.46	0.89
	482.99	60935	0.000	0.98	0.00	0.20	483.21	60594	0.000	1.00	0.00	0.00
	485.68	58226	0.000	0.99	0.00	0.12	486.14	57785	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.28	83256	0.000	0.55	0.83	0.00	501.38	48218	0.016	0.00	0.99	0.11
TE112	502.44	53324	0.017	0.00	0.99	0.12	502.51	83898	0.000	1.00	0.00	0.00
	506.74	69180	0.001	1.00	0.00	0.00	507.02	67905	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.83	64477	0.017	0.00	0.00	1.00	507.74	62142	0.017	0.00	0.00	1.00
	511.11	31290	0.002	0.00	0.86	0.50	510.24	33541	0.004	0.00	0.88	0.47
TE120	544.18	36558	0.008	0.00	0.99	0.15	542.08	37820	0.006	0.00	0.99	0.13
	550.75	38162	0.008	0.00	0.93	0.36	551.01	38673	0.009	0.00	0.94	0.35
TE120	564.14	56690	0.038	0.00	0.11	0.99	564.21	56133	0.037	0.00	0.12	0.99
	573.58	107043	0.003	1.00	0.00	0.00	573.20	105543	0.003	1.00	0.00	0.00
	575.52	108844	0.000	0.99	0.00	0.14	575.54	108056	0.000	1.00	0.00	0.00
	576.06	51596	0.007	0.00	1.00	0.00	576.62	50768	0.007	0.00	1.00	0.00
TM030	579.62	120783	0.058	1.00	0.00	0.00	579.42	120226	0.057	1.00	0.00	0.00
	591.98	62307	0.001	0.00	1.00	0.00	592.02	61964	0.001	0.00	1.00	0.00
	595.28	66043	0.001	0.00	1.00	0.00	595.53	65682	0.001	0.00	0.99	0.13
	604.89	83150	0.000	1.00	0.00	0.00	605.02	82721	0.000	1.00	0.00	0.00
	610.33	72812	0.000	0.99	0.00	0.11	610.49	71543	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	60 100						60 110					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.53	50365	0.424	1.00	0.00	0.00	199.66	50270	0.424	1.00	0.00	0.00
TM011	289.44	41079	0.046	0.00	1.00	0.00	287.58	39311	0.087	0.00	1.00	0.00
TE111	300.06	49935	0.571	0.00	1.00	0.00	298.85	48639	0.510	0.00	1.00	0.00
TE111	310.06	56354	0.669	0.00	0.00	1.00	309.96	56312	0.669	0.00	0.00	1.00
	368.09	40614	0.015	0.00	0.98	0.21	364.37	37037	0.028	0.00	0.98	0.19
	386.97	81543	0.000	1.00	0.00	0.00	387.05	81915	0.000	1.00	0.00	0.00
	390.29	63165	0.001	0.00	0.97	0.23	390.43	62582	0.001	0.00	0.97	0.25
	390.65	70252	0.000	1.00	0.00	0.00	390.70	69933	0.000	0.94	0.34	0.00
TM020	431.47	44451	0.319	1.00	0.00	0.00	430.80	44305	0.320	1.00	0.00	0.00
	440.94	25882	0.024	0.00	1.00	0.00	435.54	25366	0.029	0.00	1.00	0.00
	451.96	88643	0.000	0.00	0.94	0.35	451.49	89804	0.000	0.00	0.86	0.51
	482.48	47762	0.000	0.00	-0.42	0.91	482.39	45886	0.000	0.00	-0.41	0.91
	483.23	60565	0.000	1.00	0.00	0.00	483.10	60985	0.000	0.99	0.00	0.17
	486.32	57674	0.000	1.00	0.00	0.00	486.16	57846	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	500.09	45582	0.014	0.00	0.99	0.12	498.79	45155	0.011	0.00	0.99	0.13
	502.56	83653	0.000	1.00	0.00	0.00	502.42	83599	0.000	1.00	0.00	0.00
	506.99	66796	0.001	1.00	0.00	0.00	506.66	65843	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.46	59668	0.016	0.00	0.14	0.99	506.94	56285	0.012	0.00	0.27	0.96
	509.37	37459	0.007	0.00	0.87	0.50	508.51	42977	0.009	0.00	0.80	0.60
TE120	540.39	39420	0.005	0.00	0.99	0.13	538.79	40902	0.005	0.00	0.99	0.14
	550.98	39131	0.009	0.00	0.94	0.35	550.63	39731	0.009	0.00	0.93	0.36
TE120	563.78	55438	0.037	0.00	0.14	0.99	562.84	54713	0.036	0.00	0.16	0.99
	572.79	104473	0.004	1.00	0.00	0.00	572.35	103622	0.005	1.00	0.00	0.00
	575.66	107875	0.000	1.00	0.00	0.00	575.89	108261	0.000	0.99	0.00	0.16
	577.06	49771	0.007	0.00	1.00	0.00	577.36	48598	0.007	0.00	1.00	0.00
TM030	579.29	119826	0.055	1.00	0.00	0.00	579.24	119595	0.054	1.00	0.00	0.00
	591.85	62012	0.001	0.00	1.00	0.00	591.48	62346	0.002	0.00	1.00	0.00
	595.42	65417	0.001	0.00	0.98	0.18	594.95	65259	0.001	0.00	0.97	0.25
	605.08	82415	0.000	1.00	0.00	0.00	605.07	82283	0.000	1.00	0.00	0.00
	610.46	70428	0.000	1.00	0.00	0.00	610.24	69497	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	70						70					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.44	50684	0.424	1.00	0.00	0.00	199.48	50540	0.424	1.00	0.00	0.00
TM011	291.53	43120	0.000	0.00	0.00	1.00	291.09	42753	0.002	0.00	0.93	0.35
TE111	302.32	53490	0.638	0.00	1.00	0.00	301.38	52173	0.632	0.00	1.00	0.00
TE111	309.94	56943	0.665	0.00	0.00	1.00	310.02	56659	0.667	0.00	0.00	1.00
	374.65	50407	0.000	0.00	0.16	0.99	372.57	47121	0.001	0.00	0.83	0.55
	386.91	81989	0.000	1.00	0.00	0.00	386.94	81805	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.80	64345	0.001	0.00	1.00	0.00	389.97	63410	0.001	0.00	1.00	0.00
	390.58	71718	0.000	1.00	0.00	0.00	390.71	70934	0.000	0.00	0.83	0.55
TM020	431.22	44739	0.318	1.00	0.00	0.00	431.37	44616	0.319	1.00	0.00	0.00
	452.05	75960	0.002	0.00	1.00	0.00	449.10	29639	0.017	0.00	1.00	0.00
	453.83	33508	0.011	0.00	1.00	0.00	452.39	80280	0.001	0.00	1.00	0.00
	482.26	50478	0.001	0.00	-0.51	0.86	481.75	46099	0.000	0.00	-0.46	0.89
	483.17	60620	0.000	1.00	0.00	0.00	483.20	60577	0.000	1.00	0.00	0.00
	486.00	57908	0.000	1.00	0.00	0.00	486.18	57744	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.48	84024	0.000	1.00	0.00	0.00	502.53	83818	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	503.36	58596	0.019	0.00	0.99	0.14	502.64	54459	0.018	0.00	0.99	0.12
	506.96	69169	0.001	1.00	0.00	0.00	507.16	68130	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	508.03	63808	0.017	0.00	0.11	0.99	507.67	46018	0.013	0.00	0.00	1.00
	510.89	28204	0.001	0.00	0.00	1.00	508.82	34491	0.006	0.00	0.39	0.92
TE120	547.01	39857	0.018	0.00	1.00	0.00	544.50	36951	0.009	0.00	0.99	0.11
TE120	548.12	32595	0.001	0.00	0.11	0.99	547.54	35534	0.006	0.00	0.95	0.32
	564.43	56703	0.038	0.00	0.00	1.00	564.29	56220	0.038	0.00	0.00	1.00
	573.60	106720	0.002	1.00	0.00	0.00	573.34	106035	0.003	1.00	0.00	0.00
	575.43	108254	0.000	1.00	0.00	0.00	575.50	108028	0.000	1.00	0.00	0.00
	575.45	53330	0.009	0.00	0.99	0.16	575.84	52246	0.009	0.00	0.99	0.10
TM030	579.58	120677	0.059	1.00	0.00	0.00	579.47	120297	0.058	1.00	0.00	0.00
	592.43	62574	0.000	0.00	0.99	0.15	592.22	62348	0.001	0.00	0.99	0.13
	595.60	65654	0.001	0.00	1.00	0.00	595.45	65223	0.001	0.00	1.00	0.00
	604.96	82969	0.000	1.00	0.00	0.00	605.05	82668	0.000	1.00	0.00	0.00
	610.49	72727	0.000	1.00	0.00	0.00	610.65	71644	0.000	0.98	0.00	0.20

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	70						70					
	90	Q	G	z	x	y	100	Q	G	z	x	y
	f/MHz						f/MHz					
TM010	199.53	50320	0.424	1.00	0.00	0.00	199.65	50275	0.424	1.00	0.00	0.00
TM011	290.39	42039	0.012	0.00	0.99	0.17	289.19	41030	0.036	0.00	1.00	0.00
TE111	300.30	50575	0.613	0.00	1.00	0.00	299.01	49178	0.577	0.00	1.00	0.00
TE111	310.10	56329	0.668	0.00	0.00	1.00	310.02	56244	0.669	0.00	0.00	1.00
	369.96	43415	0.004	0.00	0.93	0.36	366.80	39704	0.011	0.00	0.96	0.27
	386.96	81793	0.000	1.00	0.00	0.00	387.04	82039	0.000	1.00	0.00	0.00
	390.13	62512	0.001	0.00	0.99	0.12	390.23	61712	0.002	0.00	0.99	0.14
	390.79	70243	0.000	1.00	0.00	0.00	390.89	69802	0.000	0.99	0.14	0.00
TM020	431.50	44390	0.319	1.00	0.00	0.00	430.89	44315	0.320	1.00	0.00	0.00
	444.09	26472	0.022	0.00	1.00	0.00	438.66	25006	0.028	0.00	1.00	0.00
	452.19	87354	0.000	0.00	0.98	0.18	451.80	89247	0.000	0.00	0.96	0.28
	481.23	42494	0.000	0.00	-0.45	0.90	480.68	39569	0.000	0.00	-0.43	0.90
	483.21	60500	0.000	1.00	0.00	0.00	483.07	60902	0.000	0.99	0.00	0.13
	486.35	57480	0.000	1.00	0.00	0.00	486.18	57716	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	501.42	46990	0.015	0.00	0.99	0.12	499.84	43090	0.011	0.00	0.99	0.13
	502.57	83614	0.000	1.00	0.00	0.00	502.44	83586	0.000	1.00	0.00	0.00
	506.77	33861	0.006	0.00	-0.66	0.75	505.72	36821	0.008	0.00	0.87	-0.49
	507.24	67068	0.001	1.00	0.00	0.00	507.04	66161	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	508.09	57113	0.016	0.00	0.27	0.96	507.68	64401	0.017	0.00	0.24	0.97
TE120	542.16	37830	0.007	0.00	0.99	0.13	540.13	39323	0.006	0.00	0.99	0.14
TE120	547.51	36217	0.007	0.00	0.96	0.30	547.22	36679	0.008	0.00	0.96	0.30
	564.01	55579	0.038	0.00	0.00	1.00	563.22	54992	0.037	0.00	0.00	1.00
	573.01	105141	0.004	1.00	0.00	0.00	572.62	104644	0.005	1.00	0.00	0.00
	575.60	107806	0.000	1.00	0.00	0.00	575.79	108269	0.000	0.99	0.00	0.11
	576.24	51197	0.009	0.00	1.00	0.00	576.50	49893	0.010	0.00	1.00	0.00
TM030	579.35	119928	0.056	1.00	0.00	0.00	579.29	119747	0.055	1.00	0.00	0.00
	592.04	62187	0.001	0.00	0.99	0.11	591.65	62354	0.001	0.00	1.00	0.00
	595.32	64893	0.001	0.00	1.00	0.00	594.84	64784	0.001	0.00	0.99	0.12
	605.12	82420	0.000	1.00	0.00	0.00	605.12	82300	0.000	0.97	0.00	0.25
	610.71	70516	0.000	1.00	0.00	0.00	610.59	69520	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	70		G	z	x	y	
	f/MHz	Q					
TM010	199.62	50018	0.424	1.00	0.00	0.00	
TM011	287.64	39223	0.078	0.00	1.00	0.00	
TE111	298.04	47563	0.516	0.00	1.00	0.00	
TE111	310.25	55840	0.668	0.00	0.00	1.00	
	363.26	36470	0.023	0.00	0.97	0.22	
	387.00	81488	0.000	1.00	0.00	0.00	
	390.42	60796	0.002	0.00	0.99	0.15	
	390.81	68905	0.000	1.00	0.00	0.00	
	TM020	431.72	44142	0.320	1.00	0.00	0.00
	433.59	24636	0.034	0.00	1.00	0.00	
TM020	451.70	87579	0.000	0.00	0.89	0.46	
	480.36	37956	0.000	0.00	-0.44	0.90	
	483.26	60546	0.000	1.00	0.00	0.00	
	486.70	57159	0.000	1.00	0.00	0.00	
	TE112	498.83	42875	0.010	0.00	0.99	0.15
	502.68	83225	0.000	1.00	0.00	0.00	
TE112	505.79	39235	0.010	0.00	0.87	-0.50	
	507.04	64999	0.002	1.00	0.00	0.00	
	507.52	63606	0.018	0.00	0.28	0.96	
TE112	539.23	40829	0.005	0.00	0.99	0.12	
	547.54	36753	0.008	0.00	0.95	0.30	
	TE120	563.00	54146	0.036	0.00	0.00	1.00
TE120	572.16	102828	0.005	1.00	0.00	0.00	
	575.83	107382	0.000	1.00	0.00	0.00	
	576.96	49314	0.010	0.00	1.00	0.00	
TM030	579.11	119316	0.053	1.00	0.00	0.00	
TM030	591.76	62152	0.002	0.00	1.00	0.00	
	595.06	64392	0.001	0.00	0.99	0.17	
	605.22	81876	0.000	1.00	0.00	0.00	
	610.49	68294	0.000	1.00	0.00	0.00	

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	80						80					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.53	50384	0.424	1.00	0.00	0.00	199.58	50209	0.424	1.00	0.00	0.00
TM011	290.71	42446	0.000	0.00	0.00	1.00	290.11	41874	0.005	0.00	0.95	0.31
TE111	300.39	50875	0.629	0.00	1.00	0.00	299.25	49331	0.616	0.00	1.00	0.00
TE111	310.14	56434	0.666	0.00	0.00	1.00	310.22	56133	0.667	0.00	0.00	1.00
	370.65	44602	0.001	0.00	0.14	0.99	368.18	41595	0.002	0.00	0.80	0.60
	386.95	81847	0.000	1.00	0.00	0.00	386.97	81803	0.000	1.00	0.00	0.00
	390.03	62179	0.002	0.00	1.00	0.00	390.13	60987	0.002	0.00	1.00	0.00
	390.85	70254	0.000	1.00	0.00	0.00	390.94	69593	0.000	1.00	0.00	0.00
TM020	431.52	44491	0.319	1.00	0.00	0.00	431.66	44327	0.319	1.00	0.00	0.00
	445.52	26901	0.022	0.00	1.00	0.00	440.86	25110	0.028	0.00	1.00	0.00
	452.25	86895	0.000	0.00	1.00	0.00	452.13	87455	0.000	0.00	0.99	0.11
	480.61	40096	0.001	0.00	-0.46	0.89	479.46	35747	0.001	0.00	-0.46	0.89
	483.20	60623	0.000	1.00	0.00	0.00	483.23	60579	0.000	1.00	0.00	0.00
	486.39	57518	0.000	0.99	0.11	0.00	486.57	57317	0.000	1.00	0.00	0.00
	502.58	83567	0.000	0.98	0.18	0.00	501.41	43303	0.013	0.00	0.99	0.13
TE112	502.59	57223	0.019	0.00	0.99	0.14	502.63	83361	0.000	1.00	0.00	0.00
	505.35	27149	0.000	0.00	0.32	0.95	504.02	33346	0.005	0.00	0.97	0.24
	507.32	67217	0.001	1.00	0.00	0.00	507.40	66203	0.001	1.00	0.00	0.00
TE112	507.98	65807	0.018	0.00	0.11	0.99	507.79	66745	0.018	0.00	0.13	0.99
	544.10	38307	0.015	0.00	1.00	0.00	542.18	38016	0.009	0.00	1.00	0.00
	544.93	34340	0.001	0.00	0.48	0.88	544.50	35802	0.004	0.00	0.95	0.31
TE120	563.99	55984	0.038	0.00	0.00	1.00	563.73	55278	0.038	0.00	0.00	1.00
	573.08	105427	0.004	1.00	0.00	0.00	572.76	104625	0.004	1.00	0.00	0.00
	575.58	107803	0.000	1.00	0.00	0.00	575.67	107603	0.000	1.00	0.00	0.00
TE120	575.76	52450	0.011	0.00	0.99	0.17	576.08	51518	0.012	0.00	0.99	0.12
TM030	579.37	119979	0.057	1.00	0.00	0.00	579.27	119675	0.055	1.00	0.00	0.00
	592.23	62665	0.001	0.00	0.99	0.14	592.06	62377	0.001	0.00	0.99	0.12
	595.28	64664	0.001	0.00	1.00	0.00	595.12	64350	0.001	0.00	1.00	0.00
	605.13	82418	0.000	1.00	0.00	0.00	605.21	82124	0.000	1.00	0.00	0.00
	610.80	70561	0.000	1.00	0.00	0.00	610.84	69381	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	80 100						80 110					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.63	50055	0.424	1.00	0.00	0.00	199.74	49934	0.424	1.00	0.00	0.00
TM011	289.14	40892	0.024	0.00	0.99	0.15	287.42	39256	0.066	0.00	1.00	0.00
TE111	298.02	47729	0.585	0.00	1.00	0.00	296.73	46507	0.525	0.00	1.00	0.00
TE111	310.29	55866	0.668	0.00	0.00	1.00	310.19	55723	0.668	0.00	0.00	1.00
	365.19	38471	0.007	0.00	0.93	0.38	361.72	35598	0.016	0.00	0.96	0.29
	387.00	81622	0.000	1.00	0.00	0.00	387.07	81905	0.000	1.00	0.00	0.00
	390.21	59826	0.003	0.00	1.00	0.00	390.23	58700	0.004	0.00	1.00	0.00
	390.97	68852	0.000	1.00	0.00	0.00	391.01	68469	0.000	0.92	0.39	0.00
TM020	431.78	44199	0.320	1.00	0.00	0.00	430.81	23714	0.039	0.12	0.99	0.00
	435.82	24030	0.035	0.00	1.00	0.00	431.11	43953	0.320	1.00	0.00	0.00
	451.93	87175	0.000	0.00	0.98	0.20	451.49	87692	0.000	0.00	0.94	0.33
	478.38	32889	0.000	0.00	-0.47	0.88	477.34	30972	0.000	0.00	-0.53	0.85
	483.26	60576	0.000	1.00	0.00	0.00	483.08	60870	0.000	0.98	0.00	0.20
	486.76	57118	0.000	1.00	0.00	0.00	486.59	57291	0.000	0.99	0.13	0.00
TE112	499.80	39171	0.009	0.00	0.99	0.16	498.35	40429	0.006	0.00	0.98	0.18
	502.68	83165	0.000	1.00	0.00	0.00	502.55	83062	0.000	1.00	0.00	0.00
	503.73	39626	0.009	0.00	0.98	0.21	503.37	43189	0.010	0.00	0.97	0.23
	507.35	65223	0.002	1.00	0.00	0.00	507.01	64391	0.002	0.99	0.00	0.14
TE112	507.57	66642	0.019	0.00	0.14	0.99	507.20	67084	0.018	0.00	0.16	0.99
	540.47	39284	0.007	0.00	0.99	0.10	538.93	40747	0.006	0.00	0.99	0.13
	544.51	36171	0.006	0.00	0.96	0.28	544.16	36380	0.007	0.00	0.96	0.27
TE120	563.30	54561	0.037	0.00	0.00	1.00	562.33	53837	0.037	0.00	0.00	1.00
	572.38	103659	0.005	1.00	0.00	0.00	571.97	102968	0.006	1.00	0.00	0.00
	575.77	107363	0.000	1.00	0.00	0.00	575.99	107746	0.000	1.00	0.00	0.00
TE120	576.40	50645	0.012	0.00	1.00	0.00	576.55	49421	0.012	0.00	1.00	0.00
TM030	579.16	119370	0.054	1.00	0.00	0.00	579.13	119323	0.052	1.00	0.00	0.00
	591.92	62241	0.001	0.00	1.00	0.10	591.57	62362	0.002	0.00	1.00	0.00
	594.97	64139	0.002	0.00	1.00	0.00	594.47	64081	0.002	0.00	0.99	0.11
	605.27	81882	0.000	1.00	0.00	0.00	605.25	81745	0.000	1.00	0.00	0.00
	610.76	68222	0.000	1.00	0.00	0.00	610.48	67228	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	90						90 100					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.67	50071	0.424	1.00	0.00	0.00	199.79	49946	0.424	1.00	0.00	0.00
TM011	289.59	41475	0.001	0.00	0.13	0.99	288.77	40695	0.010	0.00	0.97	0.23
TE111	297.94	47879	0.611	0.00	1.00	0.00	296.55	46295	0.591	0.00	1.00	0.00
TE111	310.24	55945	0.667	0.00	0.00	1.00	310.24	55741	0.668	0.00	0.00	1.00
	365.89	39350	0.001	0.00	0.11	0.99	363.07	36876	0.003	0.00	0.78	0.63
	387.02	82012	0.000	0.94	0.00	0.35	387.07	81961	0.000	1.00	0.00	0.00
	390.07	59367	0.004	0.00	1.00	0.00	390.03	57734	0.005	0.00	1.00	0.00
	391.06	69017	0.000	0.86	0.52	0.00	391.14	68372	0.000	-0.53	0.85	0.00
TM020	431.41	44173	0.320	1.00	0.00	0.00	431.27	44010	0.320	1.00	0.00	0.00
	436.83	23836	0.034	0.00	1.00	0.00	432.14	23034	0.042	0.00	1.00	0.00
	451.90	87787	0.000	0.00	1.00	0.00	451.62	87472	0.000	0.00	1.00	0.00
	477.37	30838	0.001	0.00	-0.40	0.92	475.48	28146	0.001	0.00	-0.42	0.91
	483.14	60715	0.000	0.97	0.00	0.24	483.15	60891	0.000	0.99	0.00	0.13
	486.66	57278	0.000	0.64	0.77	0.00	486.75	57187	0.000	0.96	0.26	0.00
	500.79	31514	0.002	0.00	0.99	0.16	499.04	35529	0.003	0.00	0.98	0.20
TE112	501.99	52742	0.015	0.00	0.99	0.15	501.95	50603	0.014	0.00	0.99	0.16
	502.59	83090	0.000	0.93	0.36	0.00	502.56	82959	0.000	0.95	0.32	0.00
	507.37	65417	0.002	1.00	0.00	0.00	507.24	64679	0.003	0.74	0.00	-0.67
TE112	507.55	67018	0.018	0.00	0.11	0.99	507.28	66733	0.017	0.00	0.12	0.99
	541.55	38472	0.013	0.00	1.00	0.00	540.23	39392	0.009	0.00	1.00	0.00
	542.50	36336	0.001	0.00	0.71	0.70	541.85	36994	0.003	0.00	0.94	0.33
TE120	563.11	55049	0.038	0.00	0.00	1.00	562.58	54332	0.038	0.00	0.00	1.00
	572.49	104180	0.005	1.00	0.00	0.00	572.14	103466	0.006	1.00	0.00	0.00
	575.81	107575	0.000	0.75	-0.66	0.00	575.94	107596	0.000	0.84	0.55	0.00
TE120	576.00	51445	0.013	0.00	0.99	0.16	576.20	50568	0.014	0.00	0.99	0.13
TM030	579.22	119519	0.054	1.00	0.00	0.00	579.15	119327	0.053	1.00	0.00	0.00
	591.95	62641	0.001	0.00	0.99	0.12	591.72	62494	0.001	0.00	1.00	0.00
	594.76	64123	0.002	0.00	1.00	0.00	594.45	64013	0.002	0.00	1.00	0.00
	605.25	81994	0.000	0.72	0.70	0.00	605.29	81782	0.000	1.00	0.00	0.00
	610.82	68282	0.000	0.98	0.20	0.00	610.66	67112	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	90		G	z	x	y
	f/MHz	Q				
TM010	199.79	49786	0.424	1.00	0.00	0.00
TM011	287.27	39219	0.048	0.00	0.99	0.11
TE111	295.22	44922	0.537	0.00	1.00	0.00
TE111	310.28	55436	0.667	0.00	0.00	1.00
	359.81	34497	0.010	0.00	0.91	0.42
	387.08	81568	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.99	56084	0.007	0.00	1.00	0.00
	391.14	67749	0.000	0.22	0.98	0.00
	427.50	22822	0.048	0.00	1.00	0.00
	431.24	43903	0.321	1.00	0.00	0.00
TM020	451.37	86708	0.000	0.00	0.97	0.24
	473.91	26763	0.001	0.00	-0.51	0.86
	483.03	60785	0.000	0.99	0.00	0.12
	486.85	57075	0.000	0.99	0.00	0.13
	497.91	39105	0.003	0.00	0.97	0.22
	502.00	49985	0.013	0.00	0.99	0.17
TE112	502.60	82676	0.000	0.91	-0.40	0.00
	506.98	66495	0.018	0.00	0.13	0.99
TE112	507.04	63750	0.002	0.85	0.00	0.53
	538.92	40688	0.007	0.00	1.00	0.00
	541.84	37231	0.004	0.00	0.96	0.28
TE120	561.93	53596	0.037	0.00	0.00	1.00
	571.71	102409	0.006	1.00	0.00	0.00
TE120	576.04	107410	0.000	1.00	0.00	0.00
	576.42	49764	0.015	0.00	0.99	0.11
TM030	579.05	119169	0.051	1.00	0.00	0.00
	591.59	62355	0.002	0.00	1.00	0.00
	594.27	63886	0.002	0.00	1.00	0.00
	605.33	81493	0.000	1.00	0.00	0.00
	610.39	65957	0.000	1.00	0.00	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	100						100					
	f/MHz	Q	G	z	x	y	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.72	49747	0.424	1.00	0.00	0.00	199.78	49564	0.423	1.00	0.00	0.00
TM011	288.25	40192	0.001	0.00	0.00	1.00	287.03	39007	0.023	0.00	0.98	0.20
TE111	295.10	44412	0.591	0.00	1.00	0.00	293.50	42909	0.555	0.00	1.00	0.00
TE111	310.50	55367	0.666	0.00	0.00	1.00	310.47	55091	0.666	0.00	0.00	1.00
	360.52	35002	0.002	0.00	0.00	1.00	357.46	33137	0.005	0.00	0.74	0.67
	387.03	81534	0.000	1.00	0.00	0.00	387.07	81611	0.000	0.95	0.00	0.30
	389.89	55334	0.008	0.00	1.00	0.00	389.68	53002	0.011	0.00	1.00	0.00
	391.10	67504	0.000	1.00	0.00	0.00	391.12	67095	0.000	0.78	0.63	0.00
	428.14	22346	0.050	0.00	1.00	0.00	423.81	22216	0.058	0.00	1.00	0.00
TM020	432.02	43947	0.320	1.00	0.00	0.00	431.70	43736	0.321	1.00	0.00	0.00
	451.62	85628	0.000	0.00	1.00	0.00	451.28	85387	0.000	0.00	1.00	0.00
	472.90	25788	0.000	0.00	0.34	0.94	470.66	24665	0.001	0.00	-0.46	0.89
	483.28	60564	0.000	1.00	0.00	0.00	483.14	60614	0.000	0.99	0.00	0.12
	487.17	56697	0.000	1.00	0.00	0.00	487.17	56628	0.000	-0.58	0.82	0.00
	498.47	35530	0.000	0.00	0.93	0.37	497.56	39472	0.001	0.00	0.95	0.31
TE112	501.49	56819	0.017	0.00	0.99	0.15	501.35	55176	0.016	0.00	0.99	0.16
	502.79	82550	0.000	1.00	0.00	0.00	502.75	82366	0.000	0.95	0.30	0.00
TE112	507.14	65908	0.019	0.00	0.11	0.99	506.81	66042	0.019	0.00	0.12	0.99
	507.33	63578	0.002	1.00	0.00	0.00	507.04	62793	0.002	1.00	0.00	0.00
	539.57	39087	0.012	0.00	1.00	0.00	538.71	40288	0.011	0.00	1.00	0.00
	541.31	38483	0.000	0.00	0.42	0.91	540.55	38784	0.001	0.00	0.85	-0.53
TE120	562.43	53970	0.037	0.00	0.00	1.00	561.62	53275	0.037	0.00	0.00	1.00
	571.75	102277	0.006	1.00	0.00	0.00	571.39	101521	0.006	1.00	0.00	0.00
	575.94	106813	0.000	1.00	0.00	0.00	576.08	106771	0.000	0.86	-0.51	0.00
TE120	576.34	50722	0.015	0.00	0.99	0.15	576.46	49957	0.016	0.00	0.99	0.13
TM030	579.02	118963	0.052	1.00	0.00	0.00	578.97	118913	0.050	1.00	0.00	0.00
	591.95	62290	0.001	0.00	1.00	0.00	591.72	62242	0.002	0.00	1.00	0.00
	594.60	63710	0.002	0.00	1.00	0.00	594.26	63716	0.002	0.00	1.00	0.00
	605.41	81335	0.000	1.00	0.00	0.00	605.44	81178	0.000	1.00	0.00	0.00
	610.56	65661	0.000	1.00	0.00	0.00	610.20	64514	0.000	0.99	0.11	0.00

1st Plunger/mm 2nd Plunger /mm	110 110					
	f/MHz	Q	G	z	x	y
TM010	199.81	49410	0.423	1.00	0.00	0.00
TM011	286.46	38490	0.001	0.00	0.00	1.00
TE111	291.62	40852	0.563	0.00	1.00	0.00
TE111	310.65	54808	0.665	0.00	0.00	1.00
	354.70	31723	0.003	0.00	0.00	1.00
	387.07	81279	0.000	1.00	0.00	0.00
	389.28	49730	0.017	0.00	1.00	0.00
	391.06	66244	0.000	1.00	0.00	0.00
	420.04	22112	0.065	0.00	1.00	0.00
TM020	432.21	43656	0.321	1.00	0.00	0.00
	451.09	83821	0.000	0.00	0.99	0.16
	467.93	23812	0.000	0.00	0.30	0.95
	483.32	60516	0.000	1.00	0.00	0.00
	487.56	56257	0.000	1.00	0.00	0.00
	497.29	40981	0.001	0.00	0.89	-0.46
TE112	501.06	57355	0.017	0.00	0.99	0.16
	502.89	81961	0.000	1.00	0.00	0.00
TE112	506.55	65164	0.019	0.00	0.12	0.99
	506.92	62003	0.002	1.00	0.00	0.00
	538.02	40304	0.011	0.00	1.00	0.00
	540.34	40115	0.000	0.00	0.35	0.94
TE120	561.29	52990	0.036	0.00	0.00	1.00
	571.02	100491	0.007	1.00	0.00	0.00
	576.14	106212	0.000	1.00	0.00	0.00
TE120	576.57	49945	0.017	0.00	0.99	0.14
TM030	578.89	118649	0.049	1.00	0.00	0.00
	591.83	62056	0.002	0.00	1.00	0.00
	594.26	63635	0.002	0.00	1.00	0.00
	605.53	80841	0.000	1.00	0.00	0.00
	609.85	63129	0.000	1.00	0.00	0.00

Simulationsergebnisse mit Tuning durch Deformation

Im Folgenden sind die CST-Simulationsergebnisse für Tuning durch Deformation, Resonanzfrequenz f , Gütefaktor Q und Formfaktor \mathcal{G} angegeben. Für Moden mit $\mathcal{G} > 0.01$ ist der Modenname angegeben. Für TM-Moden liegt die Richtung \vec{n} , für die der angegebene Formfaktor gilt, in der Symmetrieachse der Kavität. Für TE-Moden steht \vec{n} orthogonal auf der Symmetrieachse.

	Deformation -10.0 mm			Deformation -7.5 mm			Deformation -5.0 mm			Deformation -2.5 mm			
	f/MHz	Q	G	f/MHz	Q	G	f/MHz	Q	G	f/MHz	Q	G	
TM010	196.69	53022	0.426	197.23	53002	0.429	198.07	53298	0.432	198.57	53321	0.429	
	295.45	44957	0.000	294.89	44786	0.000	294.61	44914	0.000	293.95	44801	0.000	
TE111	312.35	61614	0.456	311.44	61592	0.677	310.43	61905	0.678	309.46	61971	0.635	
TE111	312.42	61645	0.676	311.44	61562	0.612	310.48	61938	0.678	309.46	61939	0.678	
	388.29	84151	0.000	388.27	83994	0.000	388.40	84963	0.000	388.18	79478	0.000	
	388.36	84233	0.000	388.27	84156	0.000	388.48	85169	0.000	388.18	79451	0.000	
	389.98	79000	0.000	389.39	79093	0.000	388.78	79329	0.000	388.40	84933	0.000	
	389.99	79036	0.000	389.39	79104	0.000	388.78	79362	0.000	388.40	84920	0.000	
	TM020	435.59	48213	0.341	434.64	47999	0.337	433.40	48069	0.332	432.14	47944	0.324
		455.98	106861	0.000	455.32	106563	0.000	454.31	108187	0.000	453.66	108059	0.000
481.86		82195	0.000	481.49	82274	0.000	481.13	82393	0.000	480.77	82501	0.000	
481.86		82199	0.000	481.49	82292	0.000	481.13	82421	0.000	480.77	82493	0.000	
492.14		61090	0.000	490.14	60889	0.000	488.29	61268	0.000	486.14	61232	0.000	
492.49		61207	0.000	490.14	60850	0.000	488.55	61457	0.000	486.15	61212	0.000	
505.80		90043	0.000	505.56	89533	0.000	505.14	89341	0.000	504.82	88866	0.000	
505.82		90093	0.000	505.56	89537	0.000	505.14	89361	0.000	504.82	88886	0.000	
TE112	509.95	71873	0.024	509.49	71455	0.023	508.84	72097	0.022	508.37	71787	0.021	
TE112	510.04	71849	0.023	509.49	71570	0.012	508.96	72178	0.021	508.37	71778	0.021	
	527.61	48032	0.000	527.49	48017	0.000	526.83	48226	0.000	526.33	48284	0.000	
TE120	564.91	73732	0.021	564.49	73492	0.038	563.82	73989	0.028	563.19	73852	0.037	
TE120	565.16	74032	0.039	564.50	73437	0.029	564.00	74333	0.038	563.19	73824	0.037	
	577.40	81169	0.000	577.17	81228	0.000	576.95	81297	0.000	576.36	109230	0.000	
	577.40	81148	0.000	577.17	81192	0.000	576.95	81277	0.000	576.37	109113	0.000	
	580.90	106040	0.000	579.30	106889	0.000	577.90	108183	0.000	576.73	81357	0.000	
	580.93	106114	0.000	579.30	106770	0.000	577.93	108258	0.000	576.73	81320	0.000	
	TM020	582.26	118175	0.054	581.76	119795	0.057	581.26	121364	0.059	580.84	123011	0.061
		597.27	70670	0.000	597.09	70507	0.000	596.58	70608	0.000	596.28	70470	0.000
597.31		70717	0.000	597.09	70521	0.000	596.59	70629	0.000	596.28	70516	0.000	
610.54		91797	0.000	609.90	91196	0.000	609.19	90829	0.000	608.51	90378	0.000	
610.54		91776	0.000	609.90	91222	0.000	609.19	90840	0.000	608.52	90384	0.000	

Deformation 0 mm			Deformation +2.5 mm			Deformation +5.0 mm			Deformation +7.5 mm			Deformation +10.0 mm		
f/MHz	Q	G	f/MHz	Q	G	f/MHz	Q	G	f/MHz	Q	G	f/MHz	Q	G
199.22	53460	0.434	199.86	53611	0.437	200.65	53905	0.440	201.14	53909	0.437	201.77	54039	0.443
293.50	44788	0.000	293.06	44792	0.000	292.84	44934	0.000	292.23	44797	0.000	291.84	44783	0.000
308.48	62158	0.680	307.51	62309	0.681	306.55	62719	0.684	305.59	62684	0.682	304.64	62874	0.685
308.48	62115	0.399	307.51	62336	0.682	306.56	62637	0.635	305.59	62727	0.682	304.64	62882	0.685
387.59	79669	0.000	387.01	79773	0.000	386.43	80016	0.000	385.86	80119	0.000	385.30	80260	0.000
387.59	79633	0.000	387.01	79822	0.000	386.43	80054	0.000	385.86	80147	0.000	385.30	80303	0.000
388.45	85365	0.000	388.51	85814	0.000	388.62	86494	0.000	388.61	86493	0.000	388.66	86741	0.000
388.46	85358	0.000	388.51	85809	0.000	388.69	86589	0.000	388.62	86509	0.000	388.66	86855	0.000
430.85	47898	0.322	429.54	47866	0.317	428.27	47967	0.313	426.89	47829	0.305	425.54	47790	0.303
452.86	108801	0.000	452.08	109665	0.000	451.17	111155	0.000	450.56	111026	0.000	449.82	111722	0.000
480.42	82612	0.000	480.07	82672	0.000	479.73	82778	0.000	478.36	61896	0.000	476.46	62100	0.000
480.42	82628	0.000	480.07	82676	0.000	479.73	82793	0.000	478.36	61971	0.000	476.46	62107	0.000
484.17	61387	0.000	482.21	61539	0.000	480.47	61979	0.000	479.40	82876	0.000	479.07	82936	0.000
484.17	61398	0.000	482.22	61601	0.000	480.63	62140	0.000	479.40	82853	0.000	479.07	82941	0.000
504.42	88550	0.000	504.01	88109	0.000	503.54	87857	0.000	503.14	87377	0.000	502.69	86953	0.000
504.42	88499	0.000	504.01	88150	0.000	503.55	87906	0.000	503.14	87393	0.000	502.69	86987	0.000
507.81	71933	0.020	507.26	72145	0.019	506.68	72680	0.017	506.19	72384	0.017	505.67	72470	0.016
507.81	71944	0.020	507.27	72171	0.019	506.79	72702	0.017	506.20	72404	0.017	505.67	72562	0.016
525.71	48399	0.000	525.06	48522	0.000	524.34	48749	0.000	523.69	48784	0.000	522.96	48902	0.000
562.51	73968	0.036	561.83	74015	0.036	561.18	74457	0.035	560.44	74112	0.034	559.72	74105	0.033
562.51	73967	0.036	561.83	74090	0.036	561.28	74818	0.035	560.44	74190	0.034	559.73	74119	0.033
574.95	110381	0.000	573.57	111578	0.000	572.33	113018	0.000	570.92	114030	0.000	569.65	115400	0.000
574.95	110423	0.000	573.57	111601	0.000	572.33	113108	0.000	570.92	114145	0.000	569.65	115393	0.000
576.52	81434	0.000	576.31	81432	0.000	576.10	81497	0.000	575.90	81560	0.000	575.70	81593	0.000
576.52	81428	0.000	576.31	81420	0.000	576.10	81475	0.000	575.90	81534	0.000	575.70	81569	0.000
580.41	124601	0.063	579.99	126070	0.066	579.56	127528	0.068	579.21	129064	0.069	578.84	130555	0.072
595.86	70456	0.000	595.43	70406	0.000	594.90	70489	0.000	594.53	70329	0.000	594.08	70279	0.000
595.86	70483	0.000	595.43	70457	0.000	594.91	70536	0.000	594.54	70363	0.000	594.08	70308	0.000
607.81	89987	0.000	607.10	89554	0.000	606.36	89241	0.000	605.66	88825	0.000	604.93	88461	0.000
607.81	89993	0.000	607.10	89552	0.000	606.36	89221	0.000	605.66	88849	0.000	604.93	88469	0.000