

KAHVE-Lab 800 MHz RFQ'nun Üretimi ve Testleri

KAHVELab
adına
Atacan KILIÇGEDİK

02.12.2023

İstinye Üniversitesi, Vadi Kampüsü, İstanbul

Kandilli Dedektör, Hızlandırıcı ve Enstrümantasyon Laboratuvarı (KAHVE-Lab)



İSTANBUL
ÜNİVERSİTESİ
CERRAHPAŞA

İSÜ

İSTİNYE
ÜNİVERSİTESİ
İSTANBUL



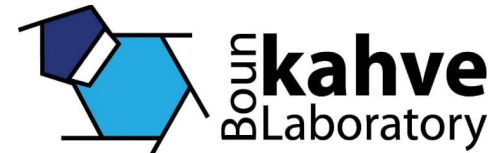
TOBB ETÜ
Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Feza Gürsey Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Kampüsü'nde yer almaktadır.

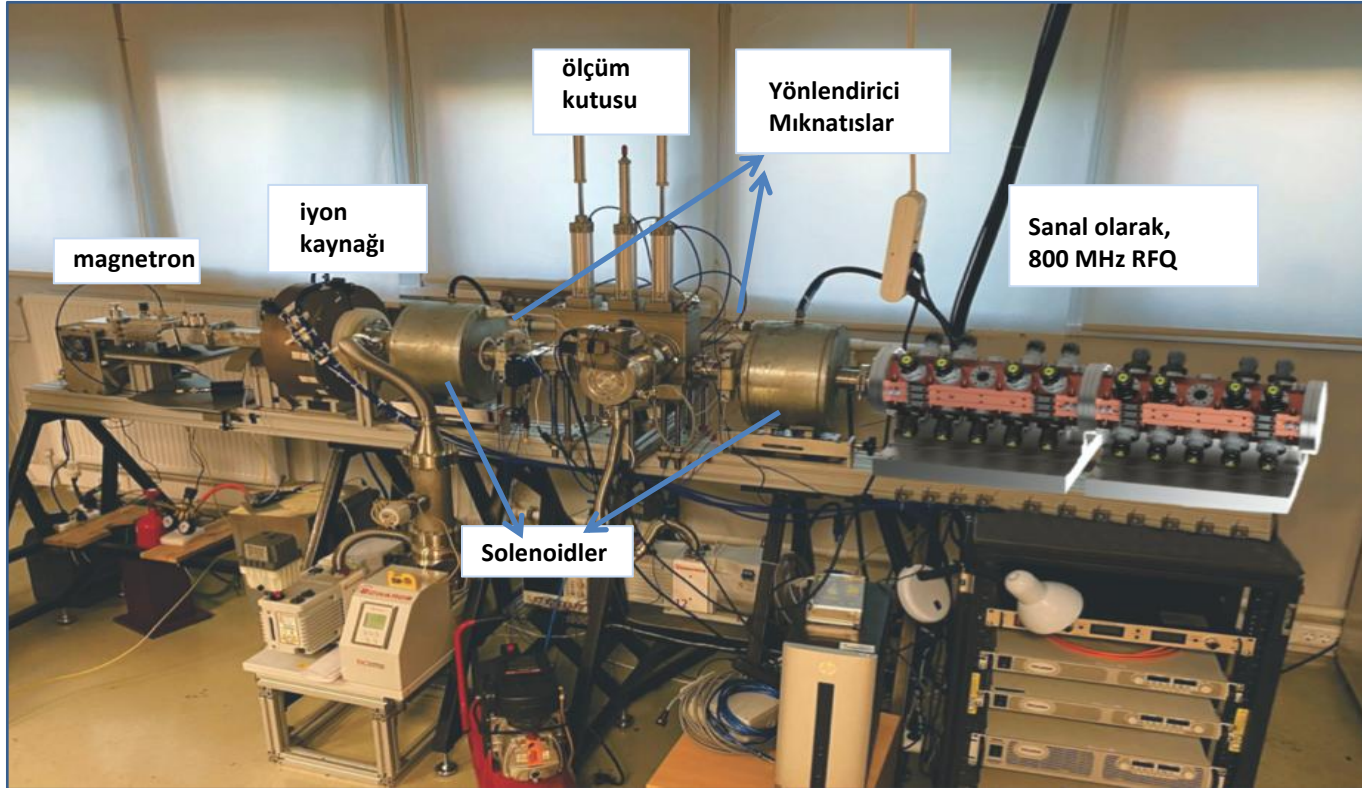
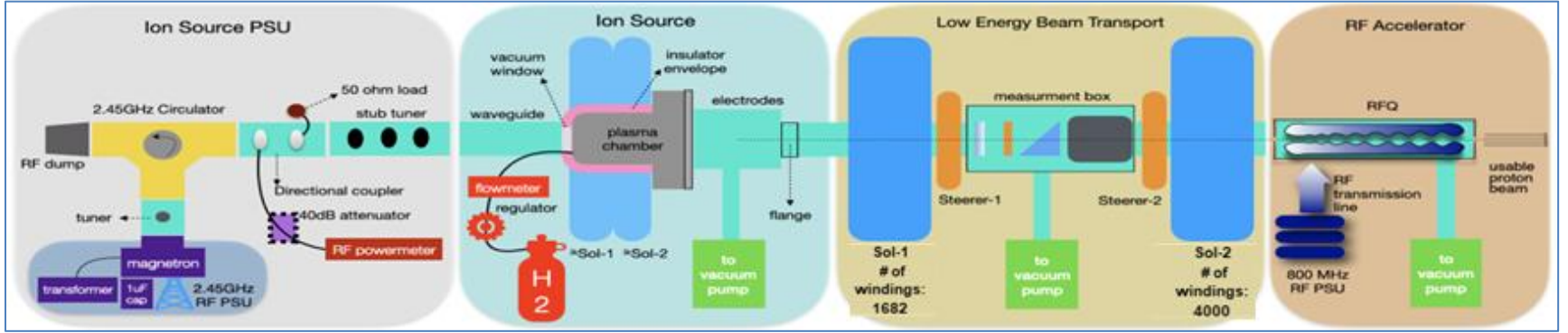
Boğaziçi Üniversitesi ev sahipliğine ek olarak, KAHVElab ekibimiz Türkiye'nin dört bir yanından çeşitli enstitülerden araştırmacılardan oluşmakta ve onlarla yakın işbirliği içinde çalışmaktadır.

Tamamı yerel kaynaklarla keV -MeV enerjileri hedefleyen elektron ve proton hızlandırıcıları ve bir dizi parçacık dedektörü hali hazırda KAHVElab'ta devreye alınmak üzere inşa edilmiştir.

Ayrıca CERN'de deneysel parçacık fiziği araştırmalarına katkıda bulunmaktadır.



KAHVELab-PTAK Projesi:



Radyo frekansı Dört Kutuplusu'nun Çalışma Prensibi

RFQ'nun çalışma prensipleri ilk olarak Kapchinskiy ve Tepliakov tarafından sunuldu.

Demet eksenine paralel olarak düzenlenmiş dört elektrot bulunur.

Elektrotlara **zamanla değişen bir voltaj** uygulanır;

$$\pm \frac{V_0 \cos(\omega t)}{2}$$

Karşıt konumdaki elektrotlar eşit polariteye sahip olur ve bitişik konumdaki elektrotlar zıt polariteye sahip olur, burada V_0 elektrotlar arası voltajı belirtir.

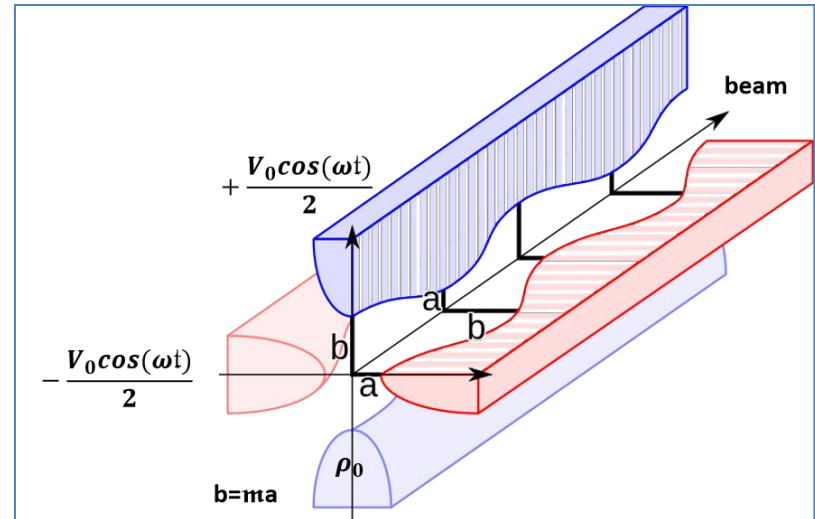
RF dört kutuplusunun dört elektrotunun geometrilerine **uzaysal sinüzoidal benzeri bir modülasyon** uygulanarak, uzunlamasına bir elektrik alanı bileşeni ortaya çıkar, sonuçta **yalnızca enine odaklanma değil, aynı zamanda hızlanma da sağlanır.**

m: modülasyon parametresi

a: minimum yarıçap

b: maksimum yarıçap

m, hızlandırıcı eksenine boyunca elektrot yarıçapındaki değişimin boyutunu belirler

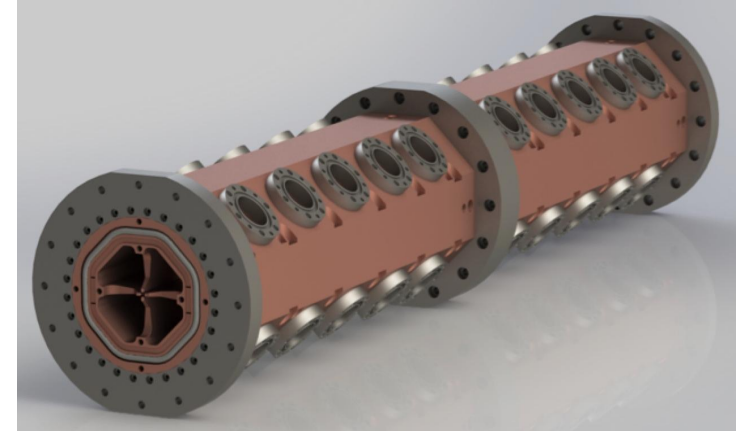


KAHVELab'da PTAK-RFQ'nun Simüle Edilmiş Değerlerinin Benzer Yüksek Frekanslı RFQ'larla Karşılaştırılması

Parameter	Symbol	HF	PIXE	PTAK
Input Energy (keV)	W_{in}	40	20	20
Output Energy (MeV)	W_{out}	5	2	2
RF (MHz)	f_0	750	750	800
Number of modules	-	4	2	2
RFQ length (mm)	-	1964	1072.938	980
Vane tip radius(mm)	ρ_0	1.504	1.439	1.392
Min. Aperture(mm)	a	0.9	0.706	0.642
Simulated Quality Factor	$Q_{0,sim}$	6440	5995	7036
RF Power Loss (kW)	P_0	350	64.5	48.5
Max. Surface Field(MV/m)	E_s	50	39.1	35.98
Kilpatrick value	E_K	2.0	1.5	1.38
Max. Duty Factor(%)	$d.f$	5	2.5	2
Acc. Transmission	T_{acc}	30	30	30

Demetin PTAK-RFQ'dan geçtiği süre: ~140 ns.

$$T_{fill} = \frac{2Q_l}{\omega} \quad \text{Simüle edilmiş } T_{fill} = 1.399\mu s$$



Çap: 130 mm ve toplam uzunluk: 980 mm

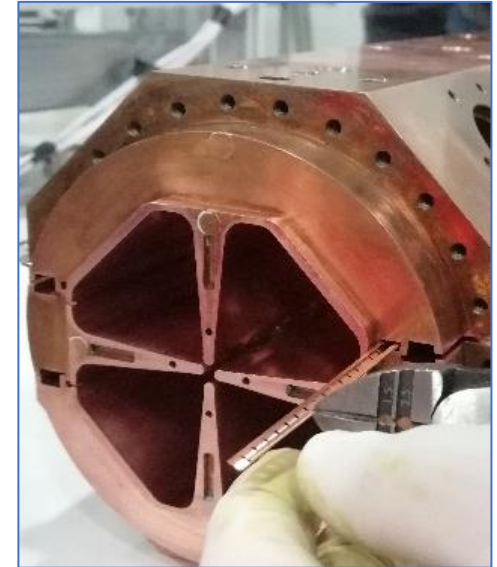
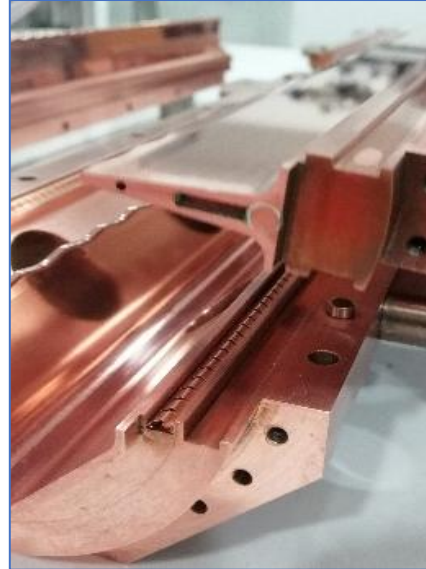
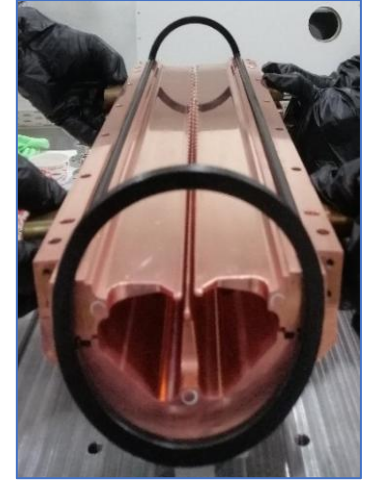
-HF-RFQ tıbbi uygulamalarda kullanılmak üzere,
-PIXE-RFQ malzeme bilimi uygulamalarında kullanılmak üzere
CERN'de tasarlandı

TÜBİTAK Proje no: 118E838.
Boğaziçi Üniversitesi BAP
Proje no: 11481.

PTAK-RFQ Modül 0'ın Montajı

- 3 boyutlu özel vakum contası tasarlandı (iki adet dairesel O-ring ve dört adet düz parçadan oluşur)

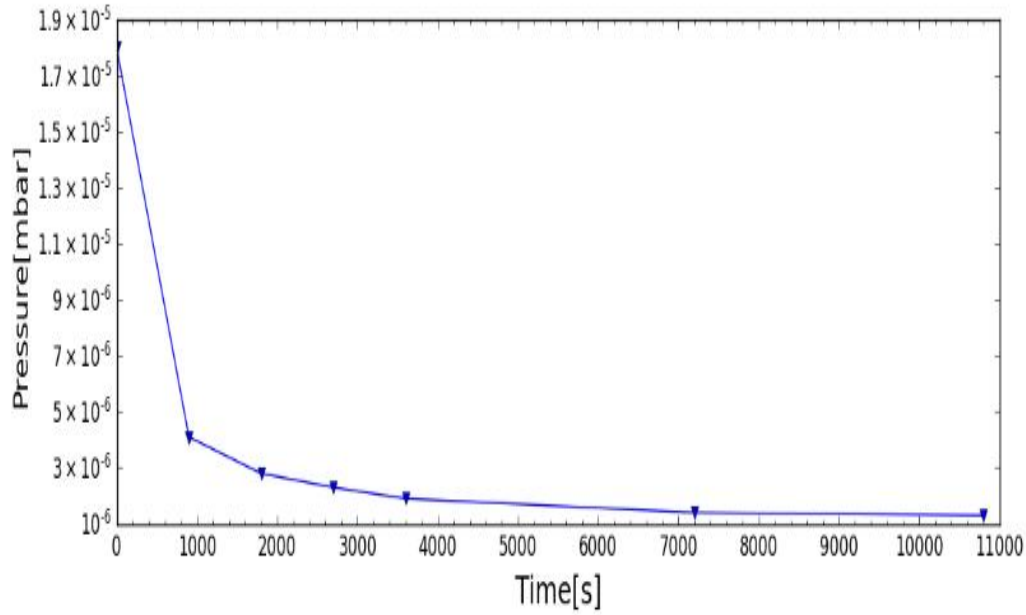
-RF sızıntılarını önlemek için RF kalkanları kullanıldı.



PTAK-RFQ Modül 0'ın İlk Vakum Testleri

-helyum sızıntı testleri sonucu vakum kaçağı tespit edilmedi.

- detaylı temizlikten sonra daha iyi bir basınç seviyesi bekleniyor.



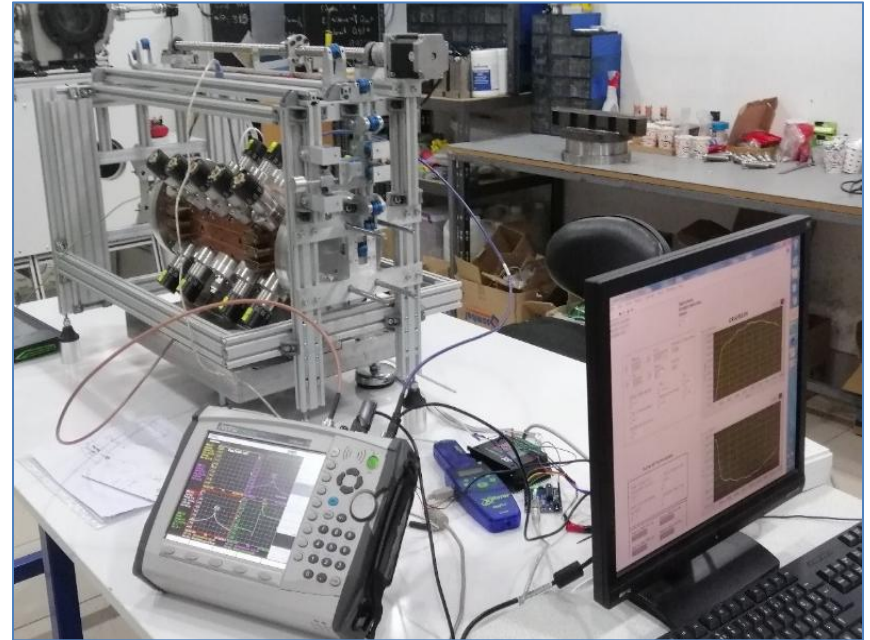
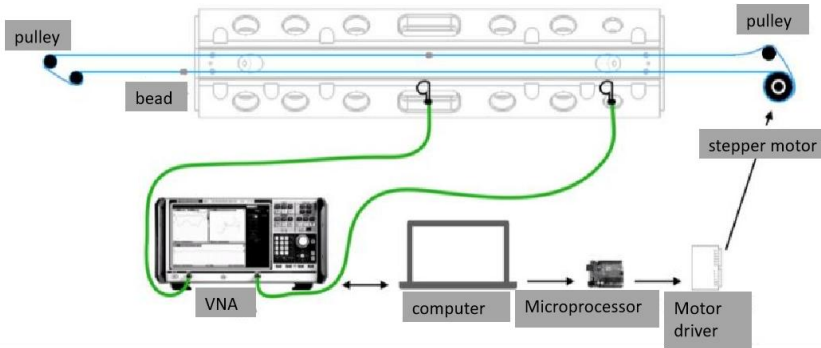
Slater Pertürbasyon Teoremi ve Boncuk Çekme Ölçümleri

Rezonanstaki bir kavite için, elektrik ve manyetik olarak depolanan enerjiler eşittir. Eğer kavite duvarına yakın küçük bir pertürbasyon yapılırsa, bu genellikle depolanan elektrik ve manyetik enerjilerde bir dengesizliğe neden olur ve rezonans frekansı dengeyi yeniden sağlamak için kayar.

Slater pertürbasyon teoremi, V hacmine sahip kaviteden küçük bir ΔV hacmi çıkarıldığında rezonans frekansında meydana gelen kaymayı tanımlar.

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = -\frac{3\Delta V}{4U} \left[\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \epsilon_0 E^2 + \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 2} \mu_0 H^2 \right]$$

Pertürbasyon teoremi kavitedeki alan ölçümlerinin temelini oluşturur.

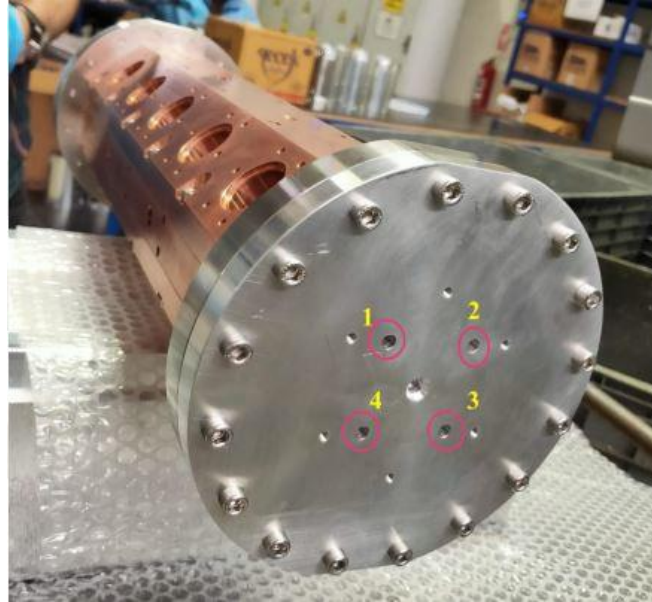


KAHVELab'da Boncuk Çekme Ölçümleri için Deneysel Kurulum

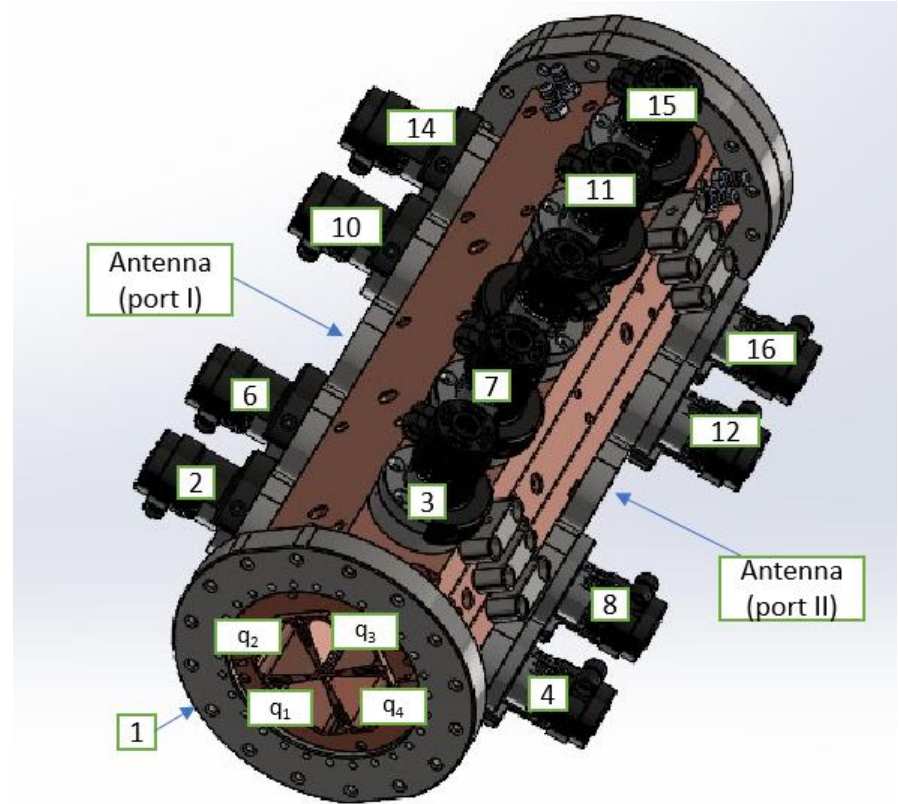
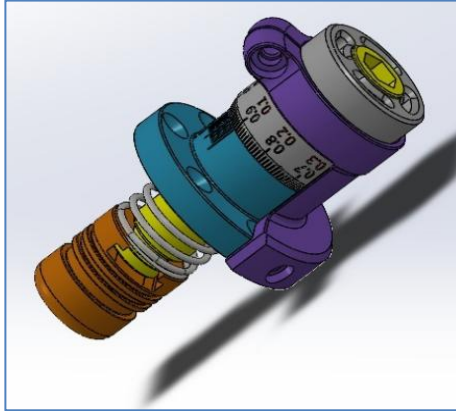
KAHVELab'da PTAK-RFQ modül 0 için pertürbasyon teoremine dayalı boncuk çekme ölçümleri yapıldı.

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = -\frac{3\Delta V}{4U} \left[\frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 2} \mu_0 H^2 \right]$$

Boncuk kavitenin uzunlamasına eksenini boyunca küçük adımlarla hareket ettirilir. Ölçüm, PTAK-RFQ modül 0'ın dış duvarına yakın olan manyetik alan cinsinden dağılımı ölçmek için kullanıldı.



Etiketli Ayarlayıcıların ve Çeyrek Dairelerin Düzeni



Alan genlikleri; Dört Kutup Mod ve İki Kutuplu Modlar

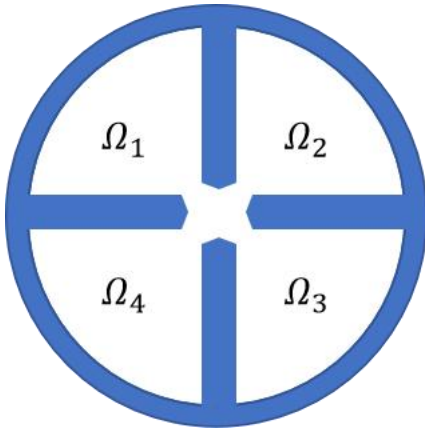
Boyuna konumların her biri için manyetik alan dağılımları, dört kutuplu mod ve iki kutuplu modlardaki alan genlikleri ile belirlenir.

$$\Omega_1 = +\sqrt{\Delta\phi_1}, \Omega_2 = -\sqrt{\Delta\phi_2}, \Omega_3 = +\sqrt{\Delta\phi_3}, \Omega_4 = -\sqrt{\Delta\phi_4},$$

$$Q^{amp} = \frac{\Omega_1 - \Omega_2 + \Omega_3 - \Omega_4}{4}$$

$$D_s^{amp} = \frac{\Omega_1 - \Omega_3}{2}$$

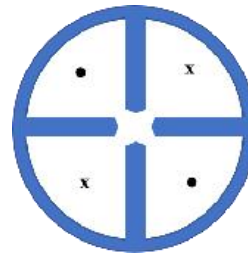
$$D_t^{amp} = \frac{\Omega_2 - \Omega_4}{2}$$



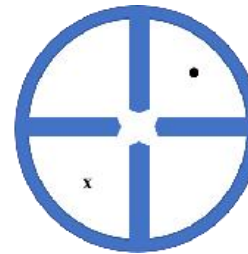
TE_{210} modunun alternatif alan yönelimini hesaba katmak için her çeyrekteki manyetik alana uygun işaretler (+, -, +, -) atanır.

Azimuthal modları

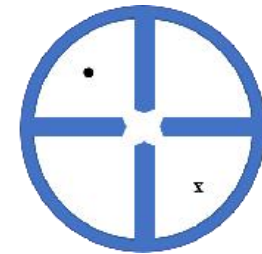
- (a) Dört Kutuplu TE_{21n} ,
- (b) İki kutuplu I TE_{11n} ,
- (c) İki kutuplu II TE_{11n}



(a)



(b)

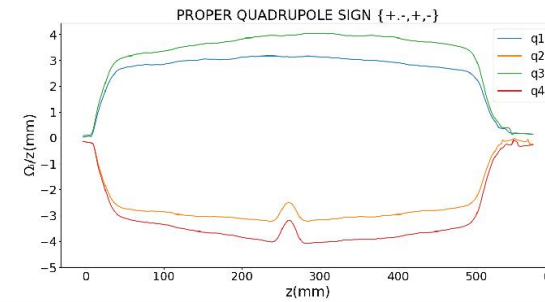
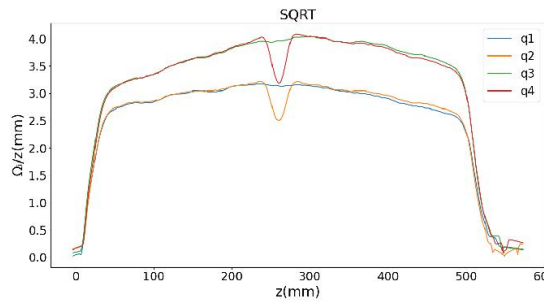
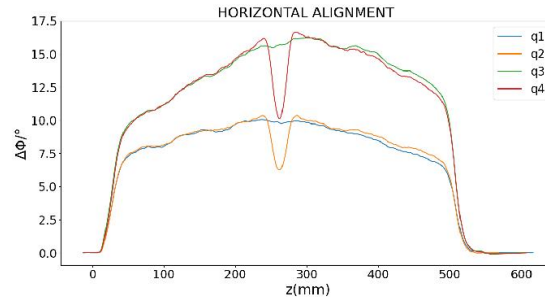
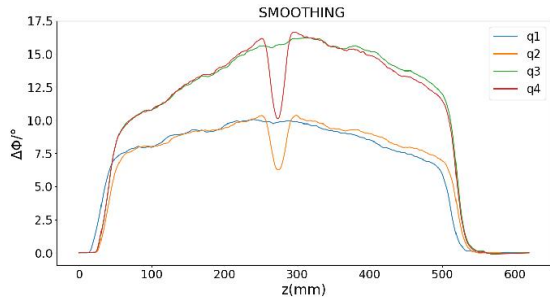
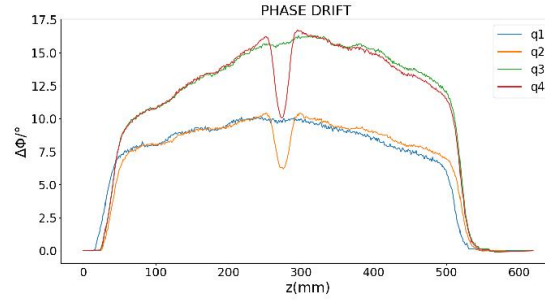
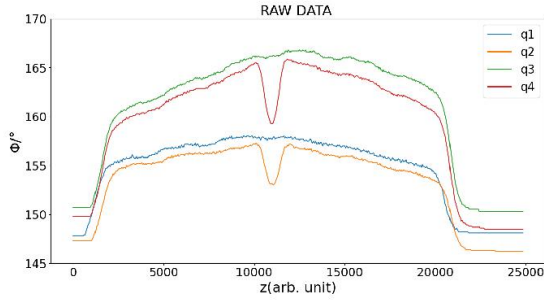


(c)

Tüm ölçümler sırasında akının korunumunu sağlamak önemlidir:

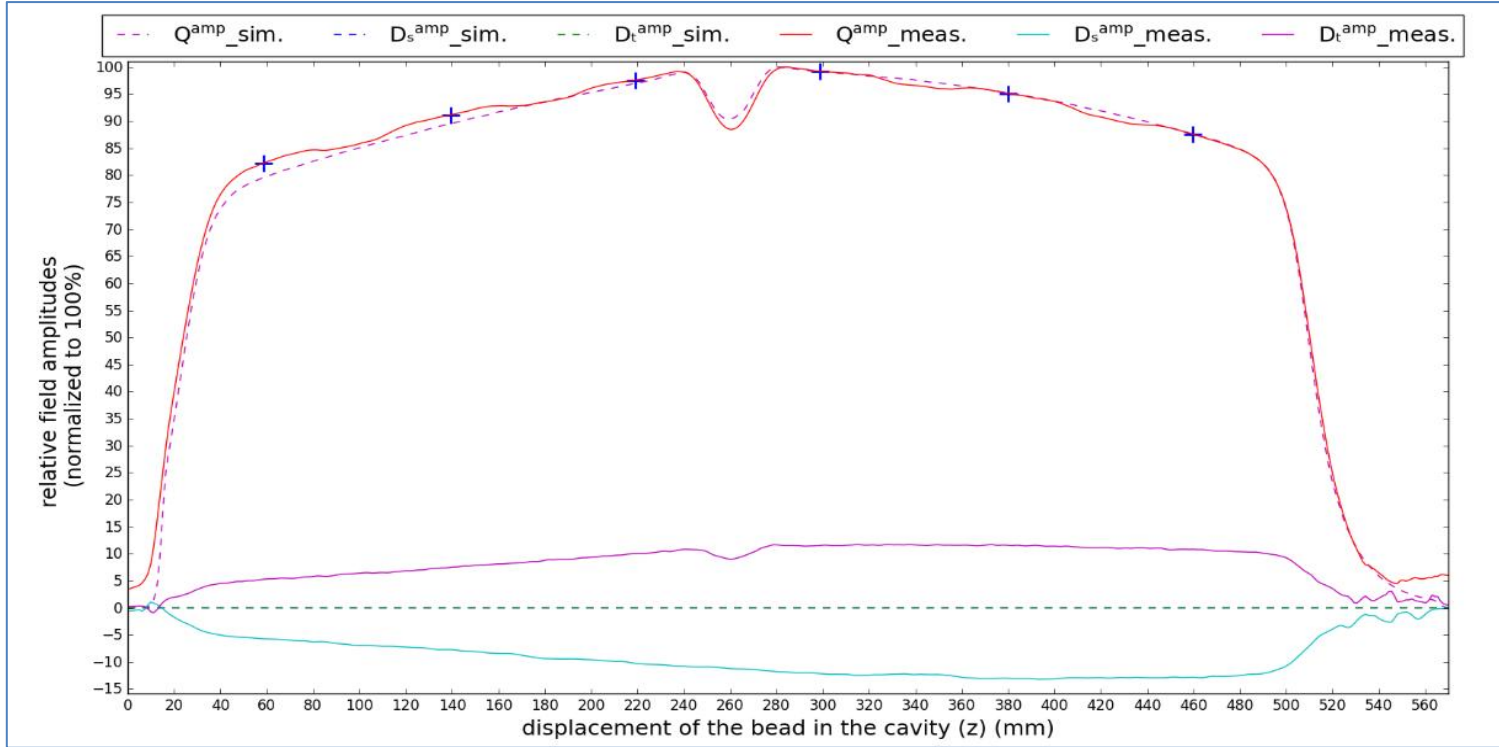
$$\Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_3 + \Omega_4 = 0$$

Ham Veri İşleme Adımları



-bir adım için keyfi birimler:
50
-toplam adımlar için keyfi
birimler: 24850
-adım numarası:497

Alan Ayarlama Öncesi Ölçülen Alan Bileşenleri ile Simüle Edilen Alan Bileşenleri Arasında Bir Karşılaştırma



+ 'lar ayarlama algoritması için kullanılan alan test noktalarına atıfta bulunur.

CERN'de Geliştirilen Saha Ayarlama Algoritmasının Optimizasyonu

Algoritma, PTAK-RFQ modül 0'ın uzunlamasına alan dağılımını ayarlamak için modül 0 üzerine yerleştirilen ayarlayıcılar (tuner) setinin herbiri için olası uzunluk ayarlarını verir.

$$\Delta V = R\Delta T$$

PTAK-RFQ modül 0 için 6 alan test noktası kullanıldı

$$\begin{bmatrix} 80.2 - Q_1^{AMP} \\ 89.8 - Q_2^{AMP} \\ 97.1 - Q_3^{AMP} \\ 99.1 - Q_4^{AMP} \\ 95.1 - Q_5^{AMP} \\ 87.8 - Q_6^{AMP} \\ 0 - D(S)_1^{AMP} \\ 0 - D(S)_2^{AMP} \\ 0 - D(S)_3^{AMP} \\ 0 - D(S)_4^{AMP} \\ 0 - D(S)_5^{AMP} \\ 0 - D(S)_6^{AMP} \\ 0 - D(T)_1^{AMP} \\ 0 - D(T)_2^{AMP} \\ 0 - D(T)_3^{AMP} \\ 0 - D(T)_4^{AMP} \\ 0 - D(T)_5^{AMP} \\ 0 - D(T)_6^{AMP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial T_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial T_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial T_{16}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_6}{\partial T_1} & \frac{\partial Q_6}{\partial T_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial Q_6}{\partial T_{16}} \\ \frac{\partial D_{s1}}{\partial T_1} & \frac{\partial D_{s1}}{\partial T_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial D_{s1}}{\partial T_{16}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial D_{s6}}{\partial T_1} & \frac{\partial D_{s6}}{\partial T_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial D_{s6}}{\partial T_{16}} \\ \frac{\partial D_{t1}}{\partial T_1} & \frac{\partial D_{t1}}{\partial T_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial D_{t1}}{\partial T_{16}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial D_{t6}}{\partial T_1} & \frac{\partial D_{t6}}{\partial T_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial D_{t6}}{\partial T_{16}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 - 0 \\ T_2 - 0 \\ T_3 - 0 \\ T_4 - 0 \\ T_5 - 0 \\ T_6 - 0 \\ T_7 - 0 \\ T_8 - 0 \\ T_9 - 0 \\ T_{10} - 0 \\ T_{11} - 0 \\ T_{12} - 0 \\ T_{13} - 0 \\ T_{14} - 0 \\ T_{15} - 0 \\ T_{16} - 0 \end{bmatrix}$$

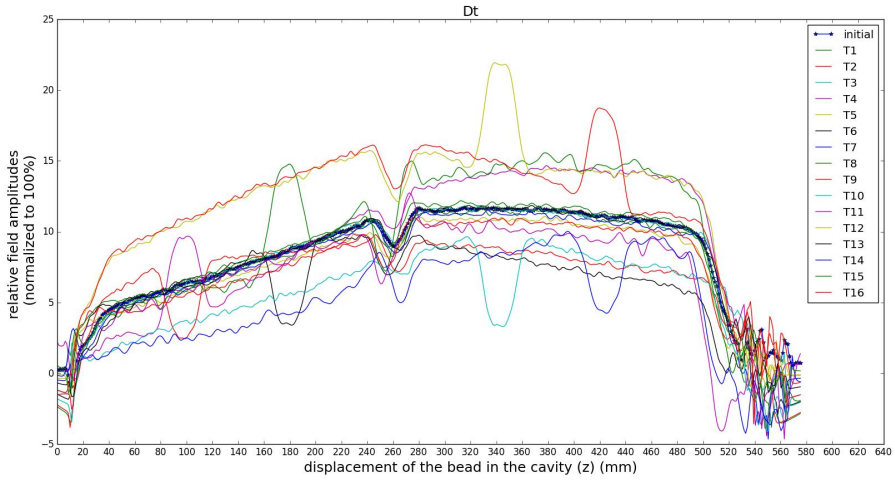
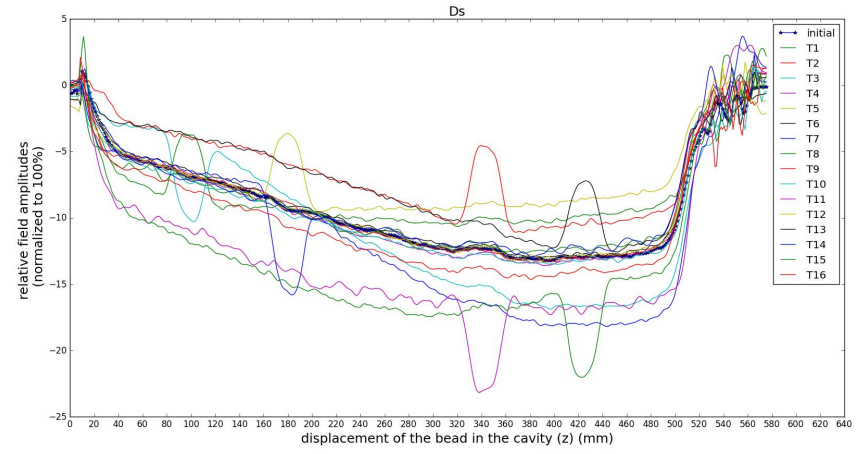
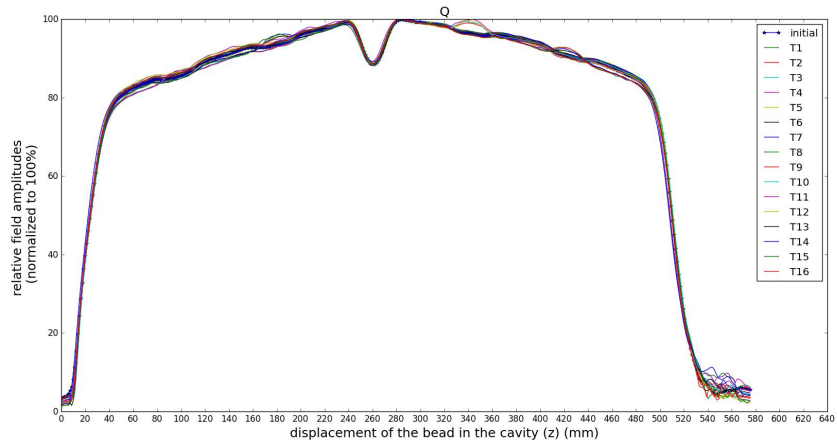
Uzunlamasına alan test noktalarında ayarlayıcıların bu alan bileşenlerinin her biri üzerindeki etkileri gözlemlemek için, diğer ayarlayıcılar aynı hizada tutulurken ayarlayıcıların her biri birer birer hareket ettirilir.

Böylece her bir tuneri ayrı ayrı hareket ettirmenin etkisiyle manyetik alan dağılımındaki değişiklikler ölçülebilir. Dahası tuner ayarlarındaki değişiklikler de hesaplanabilir.

$$\Delta V = \frac{\partial V_{current,k}}{\partial T_{current,l}} \Delta T$$

Aşırı belirlenmiş sistem (overdetermined system) ($K > L$) sistem için temel bir gerekliliktir.

PTAK-RFQ Modül 0 İçerisine Ayarlayıcıların Herbiri Ayrı Ayrı 3 mm Yerleştirilerek Ölçülen Alan Genlikleri



Tekil Değer Ayırıştırma Yöntemiyle Yanıt Matrisinin Tersini Elde Etme

Yanıt matrisini $R(K, L)$ ayırştırmak için SVD yöntemi kullanılır:

$R=U\Sigma V^T$, ortogonal matrisler $U(K, K)$, $V(L, L)$, Diyagonal matris $\Sigma(\sigma_i)$

R matrisinin köşegenindeki tekil değerler $\sigma_i=1, 2, 3, \dots, \rho$

$\Delta V = R\Delta T$ R matrisinin tersi ile çarpılır.

$\Delta T = R^\dagger \Delta V$ R^\dagger , R matrisinin Moore-Penrose sözde tersidir.

R^\dagger benzer şekilde çarpanlara ayrılabilir:

$R^\dagger=V\Sigma^\dagger U^T$ $\Sigma^\dagger(\frac{1}{\sigma_i})$ sıfır olmayan tekil değerlerin tersi alınarak elde edilir.

Tekil Değer Ayırıştırma Yöntemiyle Yanıt Matrisinin Tersini Elde Etme

$$\Sigma^\dagger\left(\frac{1}{\sigma_i}\right) = \left[\begin{array}{ccccccccc} \frac{1}{\sigma_1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2} & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \frac{1}{\sigma_3} & \ddots & 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \ddots & \frac{1}{\sigma_g} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{array} \right] \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{array}{c} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array}} \right\} g \text{ rows} \\ \left. \vphantom{\begin{array}{c} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array}} \right\} L - g \text{ rows} \end{array}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{g \text{ columns}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{K-g \text{ columns}}$

$\Sigma_{M.P,0}^\dagger = \Sigma^\dagger$ ilk Moore-Penrose (M.P.) tersidir.

Alan genliklerini telafi etmek amacıyla ayarlayıcı uzunlukları için n olası yararlı çözüm şu şekilde verilir:

$$\Delta T_{svd,t} = V \Sigma_{M.P,t}^\dagger U^T \Delta V \quad (t=1, 2, \dots, (L-1))$$

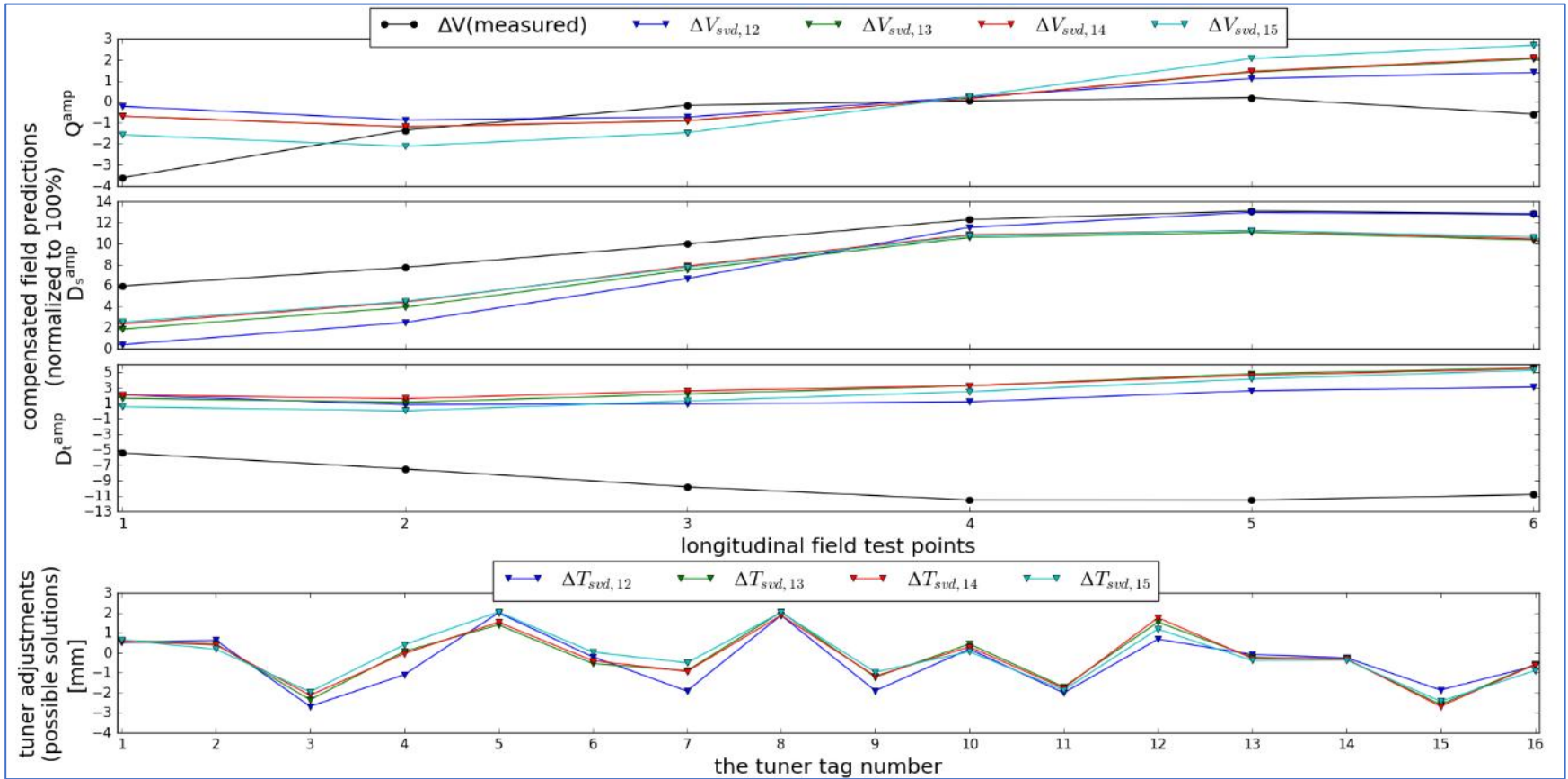
$$T_{target,t} = T_{current} + V \Sigma_{M.P,t}^\dagger U^T \Delta V$$

Düzeltilici Tuner Hareketleri İçin Olası Çözümler

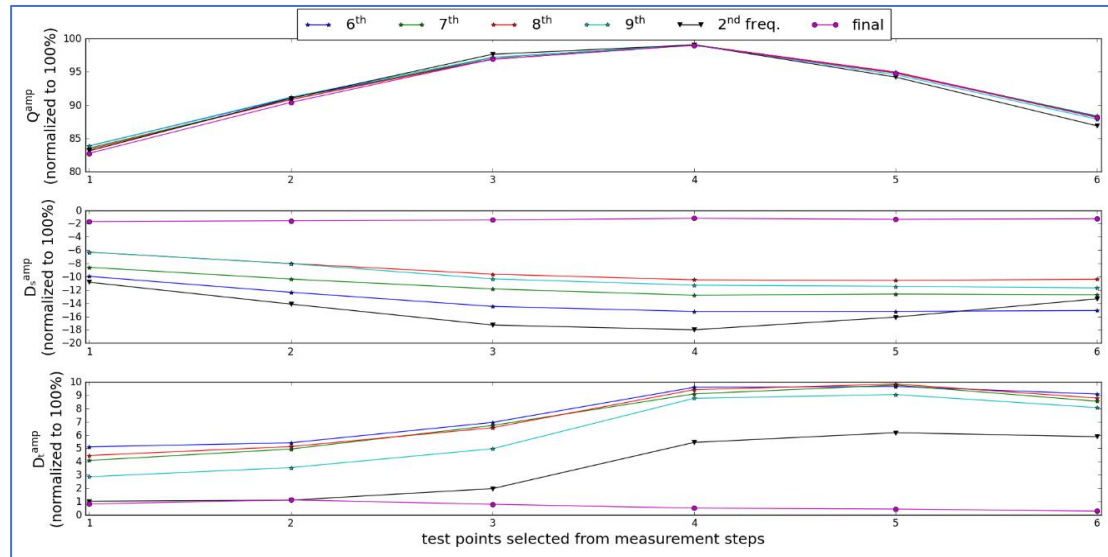
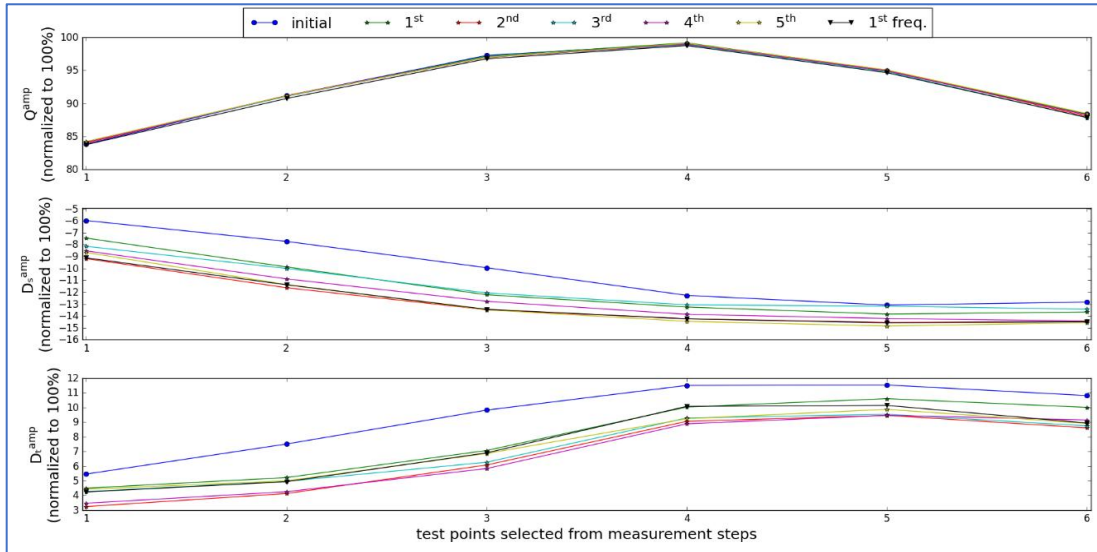
16 olası çözümün her biri için karşılık gelen alan genliklerine ait tahminler vardır,

$$\Delta V_{svd,t} = R \Delta \vec{T}_{svd,t}$$

$$\Delta V_{target,t} = V_{current} + \Delta V_{svd,t}$$

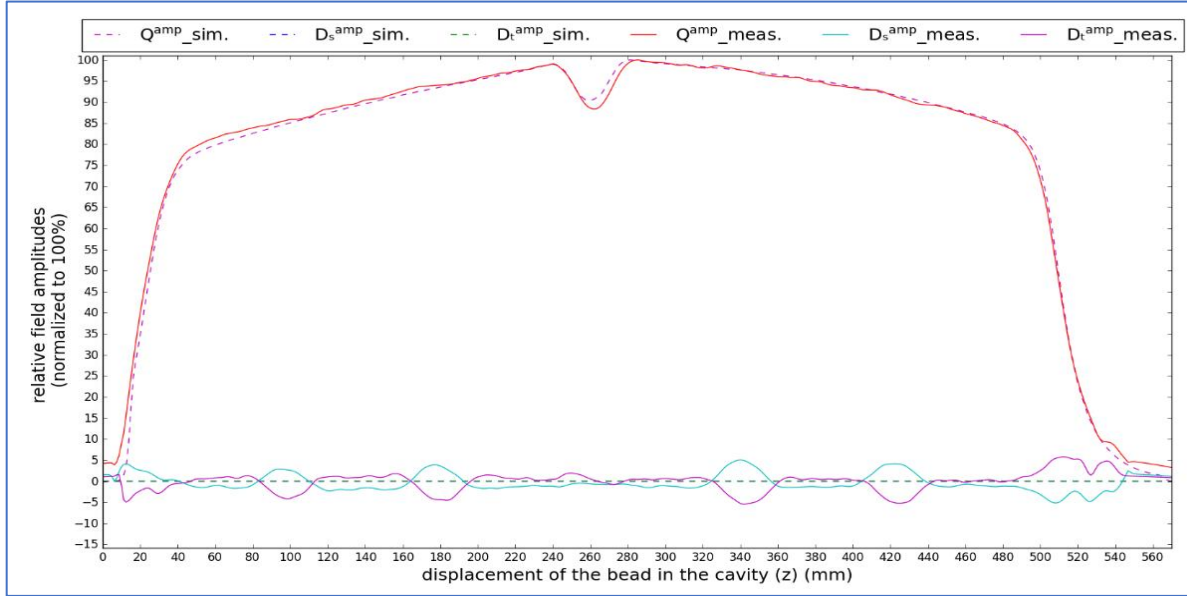


Her Ayarlama Adımı İçin Ölçülen Alan Genlikleri

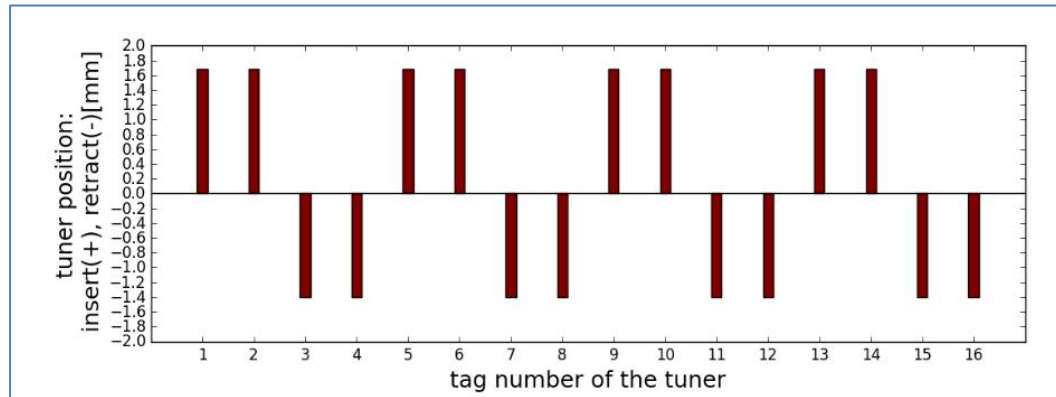


Son Ayarlamadan Sonra Alan Genlikleri ve Son Ayarlayıcı Uzunlukları

Son ayarlamadan sonra simüle edilen alan bileşenleri ile ölçülen alan bileşenleri arasındaki karşılaştırma:



Son Ayarlayıcı Uzunlukları:

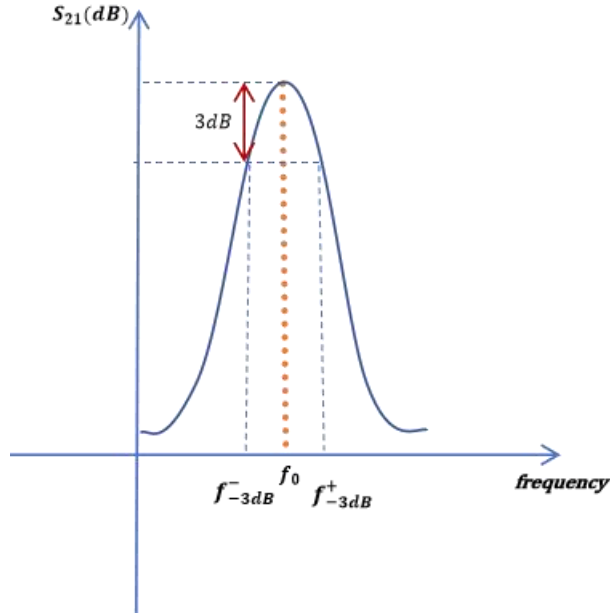


Kalite Faktörlerine İlişkin İlk Ölçümler

Kalite faktörü, rezonanstaki sistemin enerjini ne kadar iyi depolayabildiğinin bir ölçüsüdür.

İletim tipi ölçümler yapıldı. (S_{21})

Eşit olmayan boyuttaki iki alıcı antenin (her ikisi de 50Ω empedanslı) neden olduğu bağlantı kayıplarını en aza indirmek için, rezonansta weak-coupling yöntemi kullanıldı $Q_0 \approx Q_l$



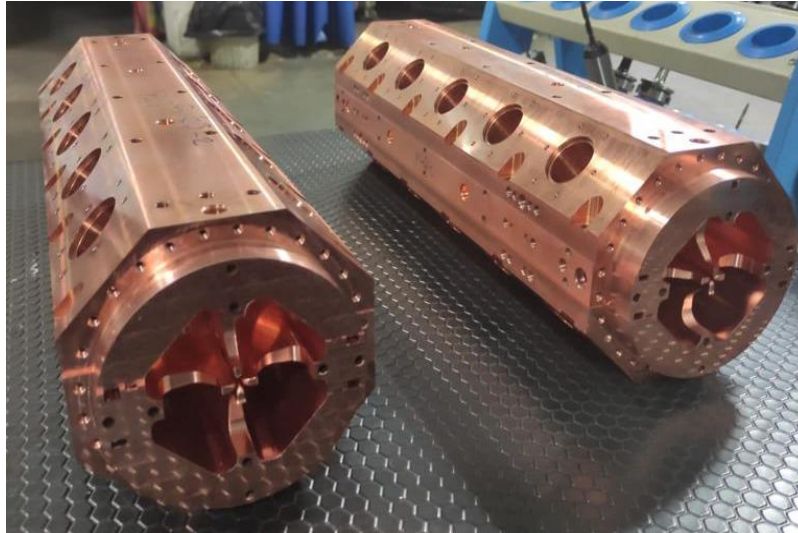
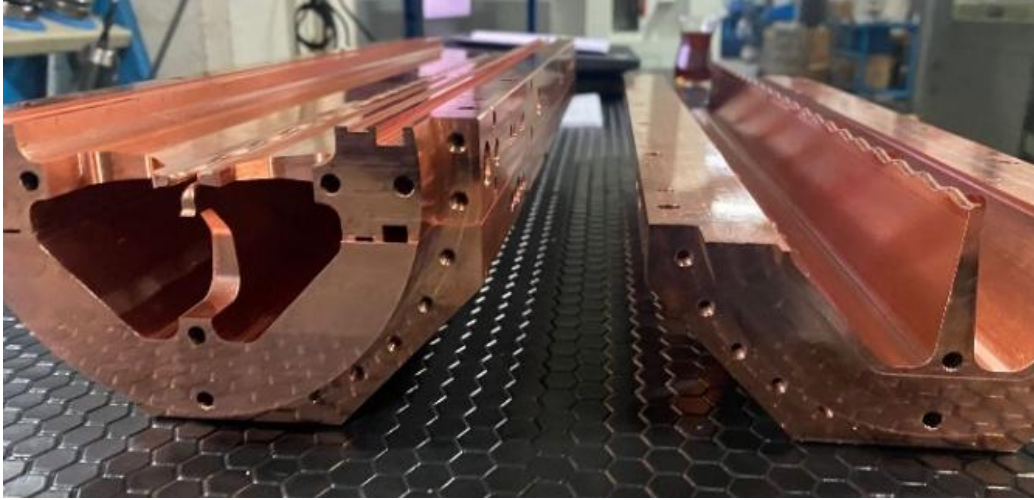
$$Q_l = \frac{f_0}{f_{-3dB}^+ - f_{-3dB}^-}$$

Ölçülen yüksüz kalite faktörü, dış kapaklarda RF kalkanları kullanılmadığı durumda, simüle edilmiş yüksüz kalite faktörünün yaklaşık %50'si kadar bulundu.

PTAK-RFQ Modül-1 ve Modül-2

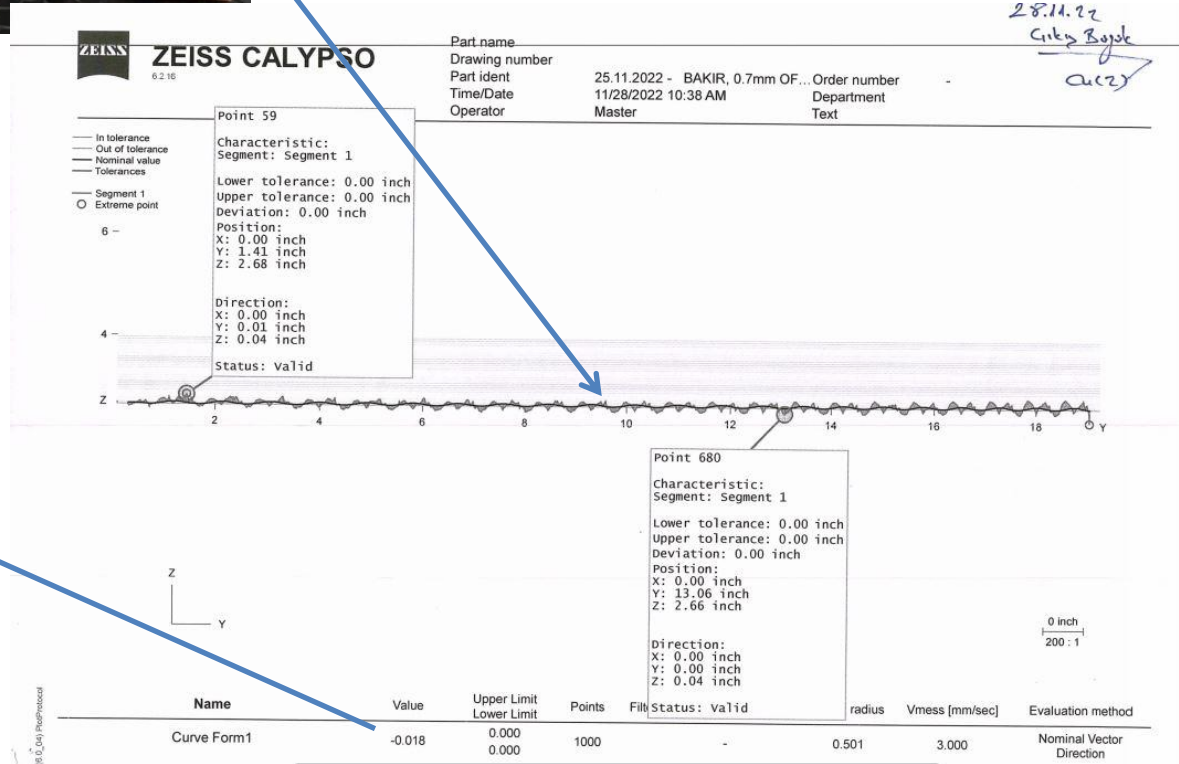
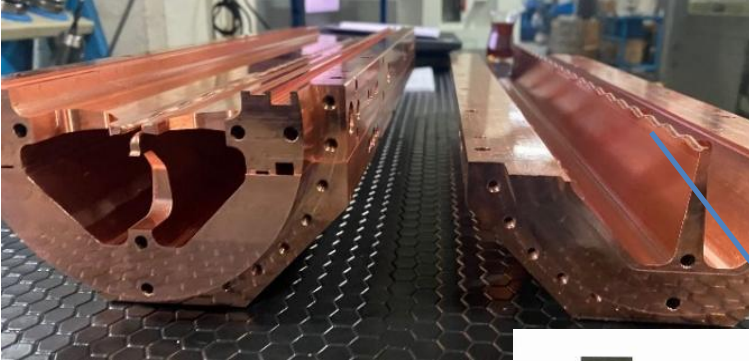
PTAK-RFQ iki modülden oluşur ve 800 MHz frekansında çalışır.

Oksijensiz bakır (OFC) malzemeden üretilmiştir.



PTAK-RFQ Modül-1 ve Modül-2

Kanatların uçlarındaki hatalar 20 μ m'den azdı.



-18 μ m

PTAK-RFQ Modül-1 ve Modül-2

Kanatların yan yüzeylerinin pürüzlülüğü yaklaşık Ra 0,2 μm olarak ölçülmüştür. Ra 0,2 μm yüzey profilindeki yükseklik farklarının mutlak değerlerinin ortalama olarak 0,2 μm olduğunu ifade eder.



PTAK-RFQ Modül-1 ve Modül-2

Hizalama pimlerinin kullanılmasıyla ölçülen hizalama hatası yaklaşık 20-30 μm olarak ölçüldü.



PTAK-RFQ Modül-1 ve Modül-2

Hizalama pimlerinin kullanılmasıyla ölçülen hizalama hatası yaklaşık 20-30 µm olarak ölçüldü.

DORA Makina		ZEISS			
Sipariş No	Parça Adı	Tarih	Çizim No		
Müşteri	ÇİRBİS	September 10, 2023	DMK1586		
Rapor No	Revizyon	Operatör	Katba Tarih		
0000000		FURKAN ALTIN	14.09.2024		
		Okunur No			
		18.09.2023 - SIKILMIS SON			
OLÇUM SÜRÜŞÜ : 0000000					
Actual Okunur	Nominal Reklam Ok.	Upper Tol. Üst Tol.	Lower Tol. Alt Tol.	Deviation Sıpması	
ON - SOL	-1.3034	-1.3079	0.0200	-0.0200	0.0045
ARKA - SOL	-0.6774	-0.6840	0.0200	-0.0200	0.0066
ON SOL SİMETRİ	-0.0136	0.0000	0.0100	-0.1000	-0.0036
ARKA SOL SİMETRİ	-0.0133	0.0000	0.0200	-0.0200	-0.0133
ON SOL DÜZLEM	-0.0012	0.0000	0.0100	-0.1000	-0.0012
ON - SAG	1.3855	1.3979	0.0200	-0.0200	-0.0124
ARKA SAG	0.6931	0.6840	0.0200	-0.0200	0.0091
ON SAG SİMETRİ	0.0021	0.0000	0.0200	-0.0200	0.0021
ARKA SAG SİMETRİ	-0.0063	0.0000	0.0200	-0.0200	-0.0063
ON SAG DÜZLEM	0.0161	0.0000	0.0100	-0.1000	0.0161
Actual Okunur	Nominal Reklam Ok.	Upper Tol. Üst Tol.	Lower Tol. Alt Tol.	Deviation Sıpması	
ON - UST	1.3811	1.3979	0.0200	-0.0200	-0.0168
ON UST SİMETRİ	0.0169	0.0000	0.0200	-0.0200	0.0169
ON - ALT	-1.3060	-1.3079	0.0200	-0.0200	0.0019
ARKA - UST	0.6256	0.6510	0.0200	-0.0200	-0.0254
ARKA UST SİMETRİ	0.0284	0.0000	0.0200	-0.0200	0.0284
ON UST DÜZLEM	0.0065	0.0000	0.0100	-0.1000	0.0065
ALT - ARKA	-0.6425	-0.6510	0.0200	-0.0200	0.0085

-25µm

28µm

DORA Makina		ZEISS			
Sipariş No	Parça Adı	Tarih	Çizim No		
Müşteri	ÇİRBİS	September 20, 2023	DMK1586		
Rapor No	Revizyon	Operatör	Katba Tarih		
0004310		FURKAN ALTIN	14.09.2024		
		Okunur No			
		09.20.2023 - SIKILMIS SON			
OLÇUM SÜRÜŞÜ : 0004310					
Actual Okunur	Nominal Reklam Ok.	Upper Tol. Üst Tol.	Lower Tol. Alt Tol.	Deviation Sıpması	
X Vaka_on sol	-0.042	-0.000	0.0200	-0.0200	0.018
Z Vaka_on sol simetri	-0.008	0.000	0.0200	-0.0200	-0.008
Y Vaka_on sol düzlem	0.014	0.000	0.0100	-0.0100	0.014
Z Vaka_arka sol simetri	-0.010	0.000	0.0200	-0.0200	-0.010
X Vaka_arka sol	-0.029	-0.048	0.0200	-0.0200	0.019
X Vaka_on sag	0.038	0.000	0.0200	-0.0200	-0.002
Z Vaka_on sag simetri	0.002	0.000	0.0200	-0.0200	0.002
Y Vaka_on sag düzlem	0.005	0.000	0.0100	-0.0100	0.005
Z Vaka_arka sag simetri	-0.002	0.000	0.0200	-0.0200	-0.002
X Vaka_arka sag	0.056	0.048	0.0200	-0.0200	0.008
Actual Okunur	Nominal Reklam Ok.	Upper Tol. Üst Tol.	Lower Tol. Alt Tol.	Deviation Sıpması	
Z Vaka_on ust	1.389	1.398	0.0200	-0.0200	-0.009
X Vaka_on ust simetri	0.023	0.000	0.0200	-0.0200	0.023
Y Vaka_on ust düzlem	0.003	0.000	0.0100	-0.0100	0.003
X Vaka_arka ust simetri	0.012	0.000	0.0200	-0.0200	0.012
Z Vaka_arka ust	0.045	0.000	0.0200	-0.0200	-0.005
Z Vaka_on alt	-1.409	-1.398	0.0200	-0.0200	-0.011
Z Vaka_arka alt	-0.093	-0.090	0.0200	-0.0200	-0.013
Fitness1	0.007	0.000	0.0200	-0.0200	0.007

Planlar/ Yapılacaklar:

Özel 3 boyutlu vakum contası, son PTAK-RFQ'da da kullanılacaktır.



Nihai PTAK-RFQ'nun RF sızıntılarını önlemek için parmak tipi RF kalkanları da kullanılacaktır.



Nihai PTAK-RFQ için tüm ayarlama adımlarında ortam sıcaklığı ve hava nemi dikkate alınacaktır.

Ayarlama algoritması, denklem sistemindeki matrislere yeni girdiler (yani ekstra ayarlayıcılar ve yeni alan test noktaları) eklenerek nihai PTAK-RFQ'nun uzunlamasına alan dağılımını ayarlamak üzere optimize edilecektir.

Nihai PTAK-RFQ'nun 2024'te Türkiye'deki KAHVELab'da faaliyete geçmesi bekleniyor.

TEŞEKKÜRLER...

dB Values and their equivalent values in power and voltage ratios

$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} |_{a_2=0}$: Input reflection coefficient ,
 $S_{12} = \frac{b_1}{a_2} |_{a_1=0}$: Backward transmission coefficient ,
 $S_{21} = \frac{b_2}{a_1} |_{a_2=0}$: Forward transmission coefficient ,
 $S_{22} = \frac{b_2}{a_2} |_{a_1=0}$: Output reflection coefficient .

[dB]	Power Ratio	Voltage Ratio
-50	0.00001	0.003162
-40	0.0001	0.01
-30	0.001	0.03162
-20	0.01	0.1
-10	0.1	0.3162
-3	0.50	0.71
-1	0.74	0.89
0	1	1
1	1.26	1.12
3	2.00	1.41
10	10	3.162
20	100	10
30	1000	31.62
40	10000	100
50	100000	316.2
$n \times 10$	10^n	$10^{\frac{n}{2}}$

$$P [dB] = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

$$V [dB] = 20 \times \log_{10} \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right)$$