

İMALAT METROLOJİSİNDE LASER KULLANARAK YAPILAN ÖLÇME TEKNİKLERİ

Tanfer Yandayan

TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)

ÖZET

Işık kaynağı kullanarak yapılan ölçümlerde, mekanik değerlerin elektronik değerler cinsinden ifade edilip bilgisayara aktarımı kolayca yapılabilir. Ayrıca mekanik olarak ulaşılması güç olan yerlerde ölçüm yapmak bu sistemlerin kullanımını zorunlu kılmıştır. Bu bildiride lazer esaslı ölçme tekniklerinin kullanıldığı imalat metrolojisinin çeşitli alanlarında geniş bir literatür çalışması yapılmış, endüstride kullanılan teknikler detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Çap ölçümlerinde, lazer mikrometresi olarak bilinen lazer tarama (scanning) sistemleri, yeni geliştirilmiş LDIMS metodu ile işlem esnasında CNC torna tezgahlarında dönen iş parça çaplarının hassas bir şekilde ölçümü ve mekanik yöntem ile ölçmenin mümkün olmadığı su içindeki hava kabarcıklarının ve atomize edilmiş partiküllerin çap ölçümleri anlatılmıştır.

Kalınlık, mesafe ölçümleri için kullanılan interferometrik ve üçgenleme (triangulation) metodlarının temel prensipleri açıklanıp örneklerle pekiştirilmiştir. Açı ölçümlerinin lazer interferometresi kullanarak nasıl yapıldığı, bilinen basit su terazisinde yine lazer ışığı kullanarak ölçülen değerlerin elektronik değerlere dönüştürülüp bilgisayara aktarılması açıklanmış ve sonuç olarak lazer kullanımının ölçme teknolojisine getirdiği faydalar özetlenmiştir.

1. GİRİŞ

İmalat metrolojisinde boyut ölçümlerinin ışık kaynağı kullanarak yapılması birtakım zorunlulardan ortaya çıkmıştır. Bazen mekanik olarak ulaşılması imkansız yerlerde ölçüm yapmak, bazende ölçülen obje ile ölçme cihazı arasında bir temas olmaması istenmiştir. Bunun yanında 1983 yılında metrenin vakumda $1/c$ saniyede (c : Işık hızı) He-Ne/ I_2 stabilize lazer ışığının aldığı yol olarak tanımlanması, ışık kaynağı kullanarak boyutsal ölçümler yapılmasını teşvik etmiştir.

Günümüzde en yaygın ışık kaynağı olarak lazer kullanılmaktadır. LASER (lazer) kelimesi ingilizcede 'Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation' kelimelerinin başharflerinden çıkartılmıştır. Tek dalga boyunda ve farklı güçlerde günümüzde ucuza elde edilebilmesi özellikle interferometrik ölçümlerde lazeri popüler kılmıştır. Bunun yanında uzun mesafelerde coherent yani eş fazda yayılabilmesi ve dalga boyunun kararlılığı (stabilitesi) lazer ışığının en önemli üstünlükleri arasında yer alır.

Günümüzde mekanik ölçme yöntemlerinin, elektronik ölçme yöntemlerine çevrilip, bilgisayara rahatça aktarılması ve yazılım ile hem zaman kaybının hemde kullanıcıya olan

bağımlılığın azaltılması için çalışmalar yapılmaktadır. Lazer kullanımında, ölçme değerleri elektronik değerlere direk olarak aktarılarak bilgisayara alınabilir. Bu yüzden bazı mekanik ölçüm cihazlarında lazer kullanımına yönelen çalışmalar yapılmaktadır.

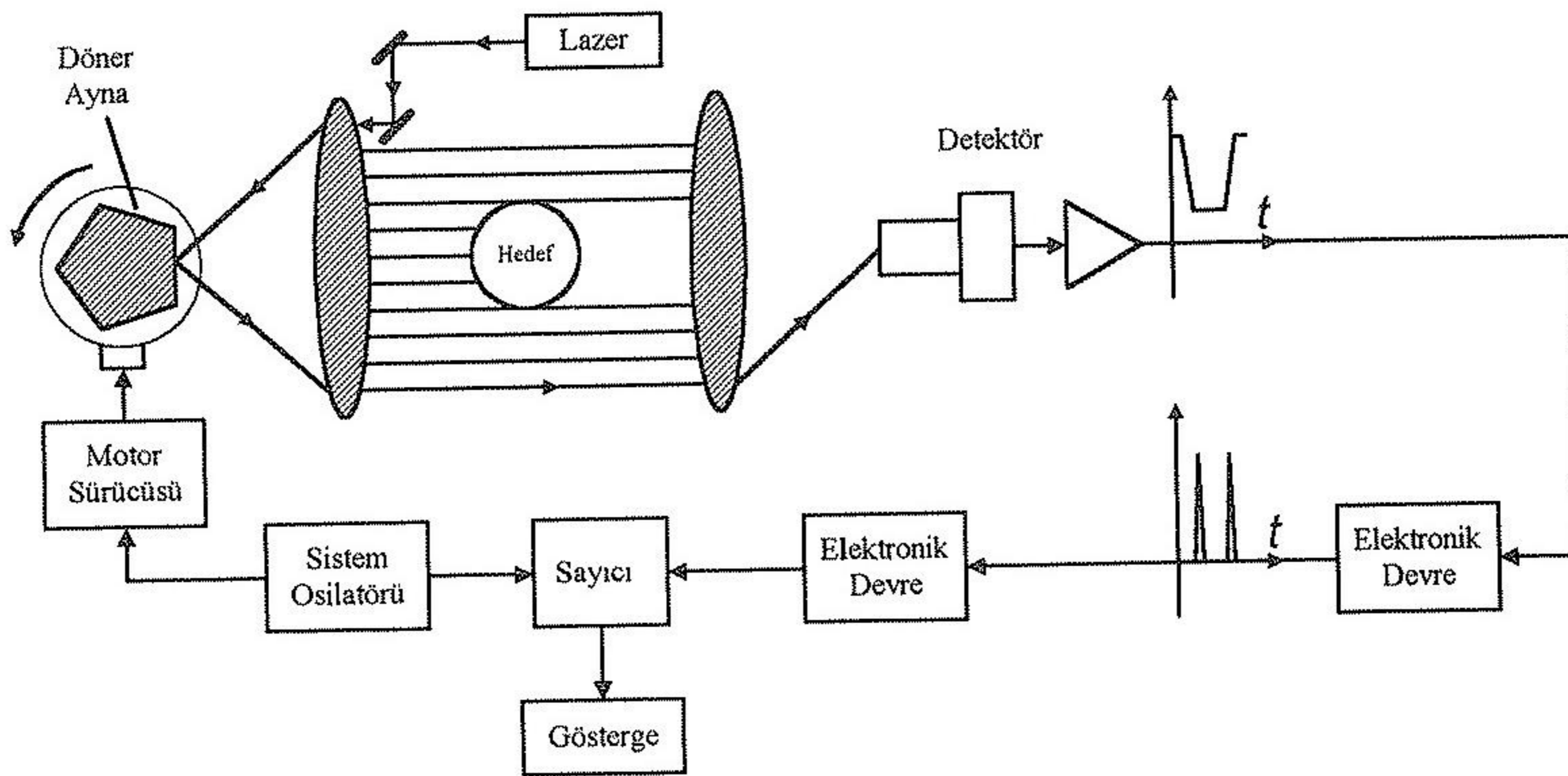
Bu bildirinin amacı imalat metrolojisinde lazer kullanarak yapılan en popüler ölçümlerin prensiplerini açıklayarak okuyucuyu bu konuda bilgilendirmektir.

2. ÇAP VE PROFİL ÖLÇÜMLERİ

2.1 Lazer ışığı ile tarama yaparak ölçüm yapan cihazlar

Şematik olarak bu tip cihazların genel çalışma prensibi Şekil 1 de gösterilmektedir. Lazer ışığı döner ayna yardımıyla ölçümü yapılacak iş parçasını tarar. Tarama esnasında lazer ışığının geçişi iş parçasının boyut sınırları boyunca engellenir. Bu engellenmenin başlangıç ve bitişi arasındaki zaman periyodu lazer ışığının geçişinin bir detektör tarafından takip edilmesiyle bulunur. Döner aynanın hızı, diğer bir deyişle lazer ışığının taranmasının hızı bilindiği için (şekilde görüldüğü gibi hız ayarı üretilen sinyal ile kontrol ediliyor) ışığın bloke edildiği zaman kullanılarak parçanın profili hesaplanabilir. Özellikle küçük çapların ve profillerin hassas bir şekilde ölçümü mümkün olmaktadır [1]. Temassız ölçüm olması bilhassa haddeden geçen sıcak parçaların profillerinin ölçümü için geçerli bir yöntemdir [2].

Ölçümlerde parçanın gelen ışığa dik bir şekilde yerleştirilmesi kritiktir. Tam dik yerleştirilemediği takdirde hassas ölçümlerde hata oranı artar. Büyük çap ve profillerin ölçümleri iki adet tarama ünitesi kullanarak gerçekleştirilebilir. Özellikle seri üretimde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu cihazlarla mikrometrenin altında bir çözünürlüğe inilir ve ölçme doğruluğu ünitelerin doğru konumda yerleştirilmesine bağlıdır.



Şekil 1 Lazer Tarama Cihazı

2.2 Lazer Doppler esaslı, işlem esnasında çap ölçümü yapan cihaz (LDIMS)

CNC torna tezgahlarında dönen iş parçalarının çaplarının temassız bir şekilde yüksek çözünürlükte ölçümü Yandayan [3] tarafından dizayn edilen bir cihaz ile gerçekleştirildi. Sistemin çalışma prensibi Şekil 2 de gösterilmektedir. He-Ne laser ışık kaynağından, ışık ayırıcı ve 45 derecelik ayna kullanarak 2 adet paralel ışın elde edilir. Bu iki ışın akromatik dış bükey mercek yardımıyla dönen silindirik iş parçasının üzerine odaklanır. İş parçasının üzerinden geriye yansıyan ışık demeti küçük bir mercek yardımıyla toplanıp, detektör üzerine odaklanır. İş parçasının dönmesiyle, çevresel hıza bağlı olarak, toplanan ışık demetinin frekansı Doppler kaymasına maruz kalır ve detektör çıktısı rastgele aralıklarla faz kaybına uğramış, amplitüdü değişken fakat periyodu bu çevresel hıza bağlı olan bir analog Doppler sinyaldir. Sinyalin frekansı veya periyodunun direk olarak dönen iş parçasının çapına ve dakikadaki devrine bağlı olması nedeniyle parça çapı aşağıdaki açıklamalar yardımıyla kolayca bulunur. Doppler sinyalin frekansı,

$$f_d = 2V \sin(\alpha/2) / \lambda \quad 1$$

dir. Burada; V : çevresel hız, α : iki laser ışınının arasındaki açı, λ : He-Ne laser ışığının dalga boyu. V yerine çap ve devir ile ilgili formül konulduğunda, aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$f_d = 2\pi D N \sin(\alpha/2) / 60\lambda = \pi D N \sin(\alpha/2) / 30\lambda \quad 2$$

Denklemdede görüldüğü gibi, α açısı sabit olduğu için devir (N) ve frekans bilindiğinden parça çapı kolayca bulunur. Bu felsefeden yola çıkarak bir devir boyunca (iş parçasının çevresi boyunca) kümüle edilen sinyal sayısının o silindirik iş parçasının çapını vereceğini söyleyebiliriz. Parçanın çevresinin taranmasında başlangıç ve bitiş noktası, bir optosiviç yardımıyla tesbit edilirse, otomatik olarak N (Dev/dak) ve birim zamandaki sinyal sayısı (sinyal frekansı f_d) denklemde yerlerine konur ve D çapı elde edilmiş olur. Başka bir deyişle, 1 devirdeki (periyodu optosiviç ile belirlenen) toplam sinyal sayısı, o iş parçasına ait parça çapını temsil eder.

Yukarıda anlatılan sistem ikinci bir alternatif yaklaşımla da açıklanabilir. İki lazer ışınının iş parçası yüzeyinde çakıştığı bölge Şekil 3 te gösterilmiştir. İş parçası bu interferans çizgilerinin oluşturduğu ölçme hacminden geçtiğinde, interferans çizgilerinin arasındaki mesafeye ve parçanın çevresel hızına bağlı olarak yine aynı analog Doppler sinyali verecektir. İnterferans çizgileri arasındaki mesafe,

$$s = \lambda / \{2 \sin(\alpha/2)\} \quad 3$$

dir. İş parçası üzerindeki küçük bir yüzey biriminin (parçacığın) bu interferans çizgileri arasından geçme süresi,

$$t = s / V \quad 4$$

olursa, bu süreye karşılık gelen frekans

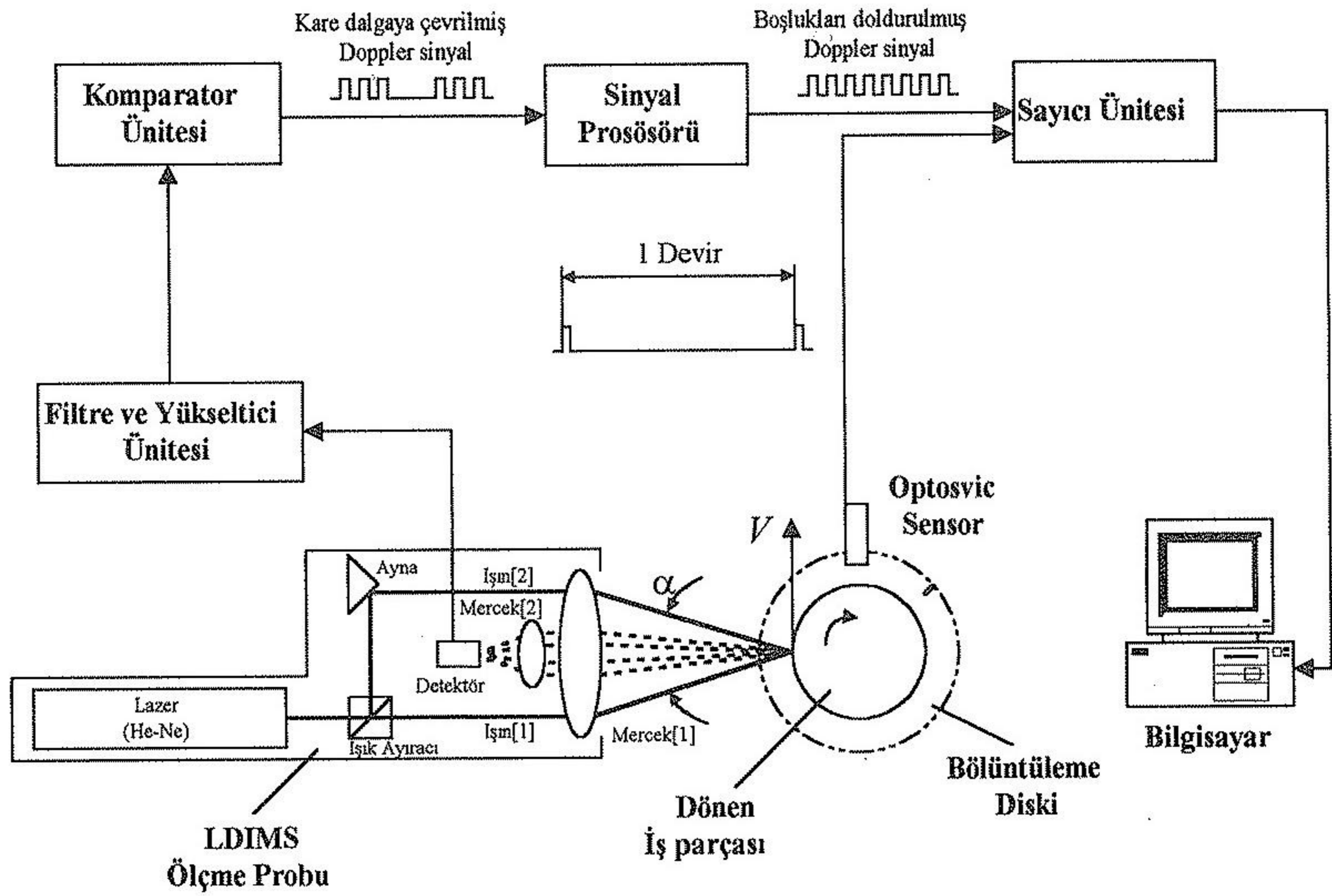
$$f_d = 1 / t = 2V \sin(\alpha/2) / \lambda$$

5

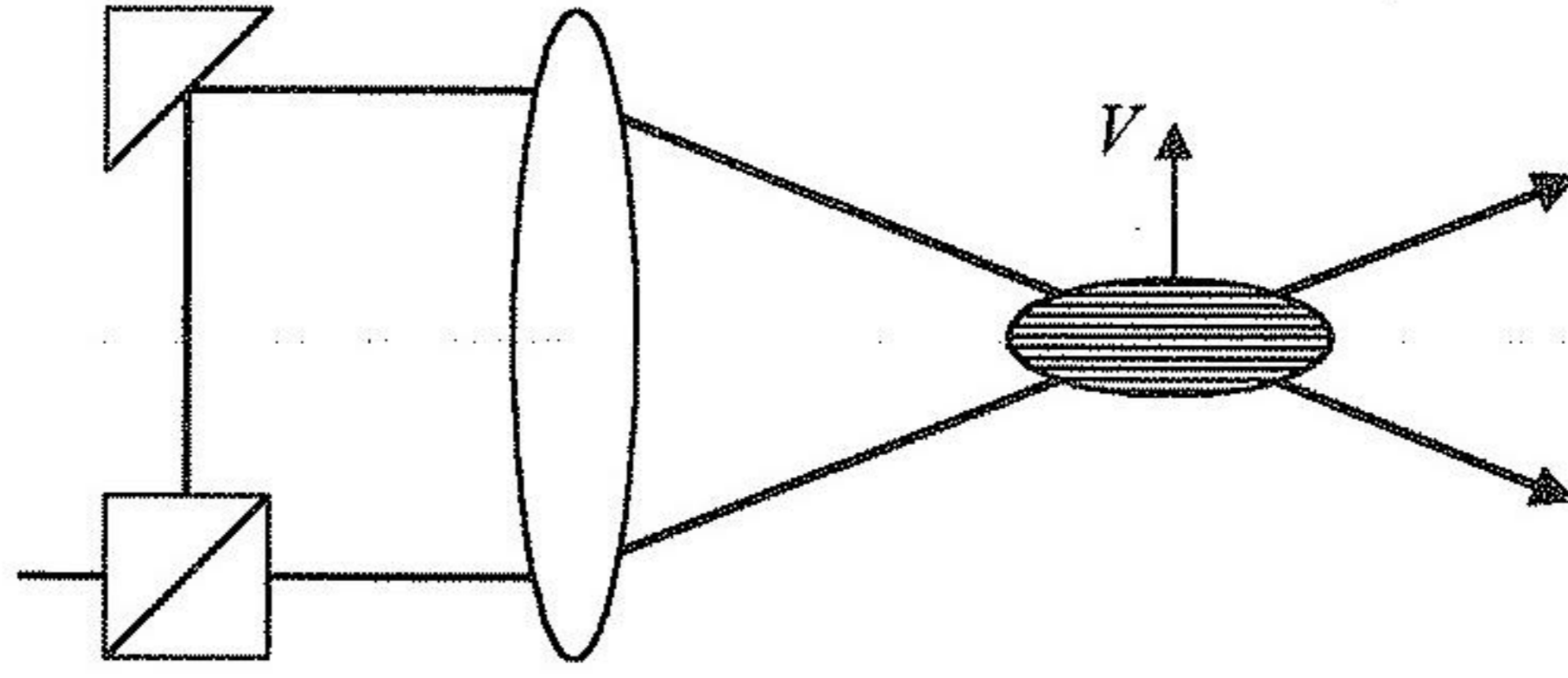
olur ki bu da denklem 1 in aynısıdır. Böylece parça çevresi, aralıkları interferans çizgilerinden oluşan sanal bir cetvel ile ölçülmüş gibi olur. Aynı zamanda da dönen iş parçasının çapı, π sabitinden dolayı, bu interferans çizgilerinin aralıkları ile bölüntülenmiş olur.

Bir devirdeki çözünürlük çevrenin interferans çizgileri arasındaki mesafeye bölünmesinden elde edilen değerin π sabitine bölünmesiyle veya parça çapının toplam sinyal sayısına bölünmesi ile bulunur. Bir devirdeki çözünürlük $0.5 \mu\text{m}$ dir. Ölçüm on devir boyunca gerçekleşirse sayılan sinyal sayısı on kat artar ve çözünürlükte on kat değişerek $0.05 \mu\text{m}$ olur.

Şekil 2 de açıklandığı gibi, analog sinyal sayılmadan önce kare dalgaya çevrilir, gürültü ve faz kaybından dolayı ortaya çıkan boşluklar, bir önceki sinyal çiftinin periyodu esas alınarak sinyal prosösörü ile doldurulur ve sayılmak üzere sayıcıya gönderilir. Sayıcı bilgisayar ile yönlendirilir ve optosiviçten gelen devir sinyaline göre kare dalgaya çevrilmiş, sinyal prosösörde boşlukları doldurulmuş Doppler sinyallerini sayar. Sayım sonucu bilgisayara aktarılır ve yazılım yardımıyla dönen iş parçasının çapı hesaplanır.



Şekil 2 LDIMS laser ölçme sisteminin şematik görünüşü



Şekil 3 İki lazer ışığının çakıştırılması ile elde edilen interferans çizgileri

Ölçme sistemi 2-eksenli eğik yataklı CNC torna tezgahında uygulamaya tabi tutulmuştur. Sistemin çalışması için CNC torna tezgahı ile bağlantı kurulmuş ve ölçme cihazının dışarıdan bilgisayar kontrolü yardımıyla ölçme pozisyonu alması sağlanmıştır. 101.6 mm lik hassas işlenmiş, çapı yüksek doğrulukta bilinen bir master silindirden alınan sonuçlar cihazın kalibrasyonu için kullanılmış ve bunu takiben 3 değişik çapa sahip iş parçasının ölçümleri yapılmıştır. Alınan sonuçların mikrometre ölçümleri ile karşılaştırılması Tablo 1 de verilmiştir. LDIMS ölçme sisteminin tekraredilebilirliği $\pm 4 \mu\text{m}$, doğruluğuda $\pm 10 \mu\text{m}$ olarak verilmiştir. Sinyal prosösörün geliştirilmesi ile bu değer in mikrometre altında bir seviyeye inmesi beklenmektedir.

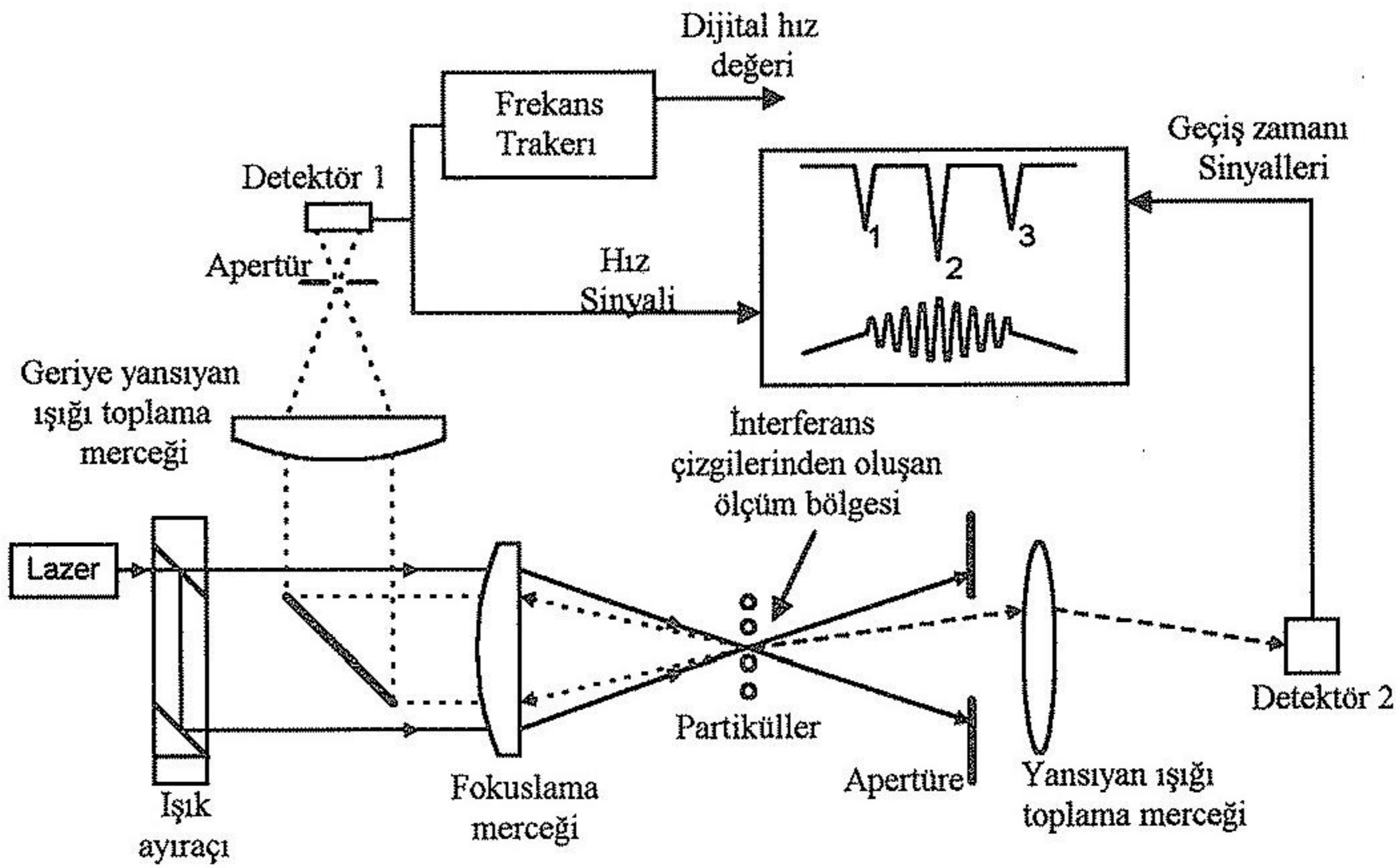
Tablo 1 Lazer ölçme sistemi (LDIMS) sonuçları

| | Mikrometre sonuçları (mm) | LDIMS sonuçları (mm) | | | | |
|---------|---------------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Çap [1] | 79.900 | 79.887 | 79.891 | 79.892 | 79.891 | 79.894 |
| Çap [2] | 89.895 | 89.911 | 89.910 | 89.909 | 89.909 | 89.910 |
| Çap [3] | 98.927 | 98.943 | 98.946 | 98.947 | 98.943 | 98.942 |

2.3 Temassız partikül çapı ölçümleri

Özellikle akışkanlar mekaniğinde su içerisindeki partiküllerin, hava kabarcıklarının, spray teknolojisinde püskürtülen dropletlerin (kabarcık) temassız bir şekilde çaplarının ölçümlerine gereksinim vardır. Bu ölçümler Laser Doppler Anemometry (LDA) tekniklerinin değişik konfigürasyonlarını kullanarak yapılmaktadır. İki lazer ışınının kesiştiği noktadaki interferans çizgileri üzerinden geçen bir dropletin yaydığı ışınların detektöre aktarılmasıyla elde edilen Doppler sinyallerini işleyerek dropletlerin çapları bulunur. Dropletlerin çapları bunların üzerinden yayılan ışınların yoğunluğuna, alınan Doppler sinyalin amplitüdüne ve birden fazla detektör ile elde edilen sinyaller arasındaki bağıntılara göre hesaplanmaktadır.

Şekil 4 te Wigley [4] tarafından gerçekleştirilen 0.1 ile 1 mm arasında çap ölçümlerinin yapıldığı düzenek sunulmaktadır. İki ışının kesiştiği ölçme bölgesinden geçen droplet, öncelikle 1 nolu ışını yansıtarak, detektör 2 de ölçümün başladığını belirten bir sinyal üretir. Droplet bölgeyi terkederken bu sefer 2 nolu ışını yansıtarak geçişin tamamlandığını belirten sinyali verir. Bu iki sinyal ile belirlenen geçiş zamanı ve interferans çizgilerinden geçerken 1 nolu detektör tarafından üretilen, dropletin hızını belirleyen Doppler sinyalini kullanarak droplet çapı bulunur. Eğer çap, ölçüm bölgesinin çapından büyük ise, geçiş esnasında bir ara sinyal daha alınır. Bu üç zamanlı sinyal ve Doppler sinyal yardımı ile büyük droplet çapları bulunur. Wigley' nin ölçüm sonuçları Tablo 2 de verilmiştir.



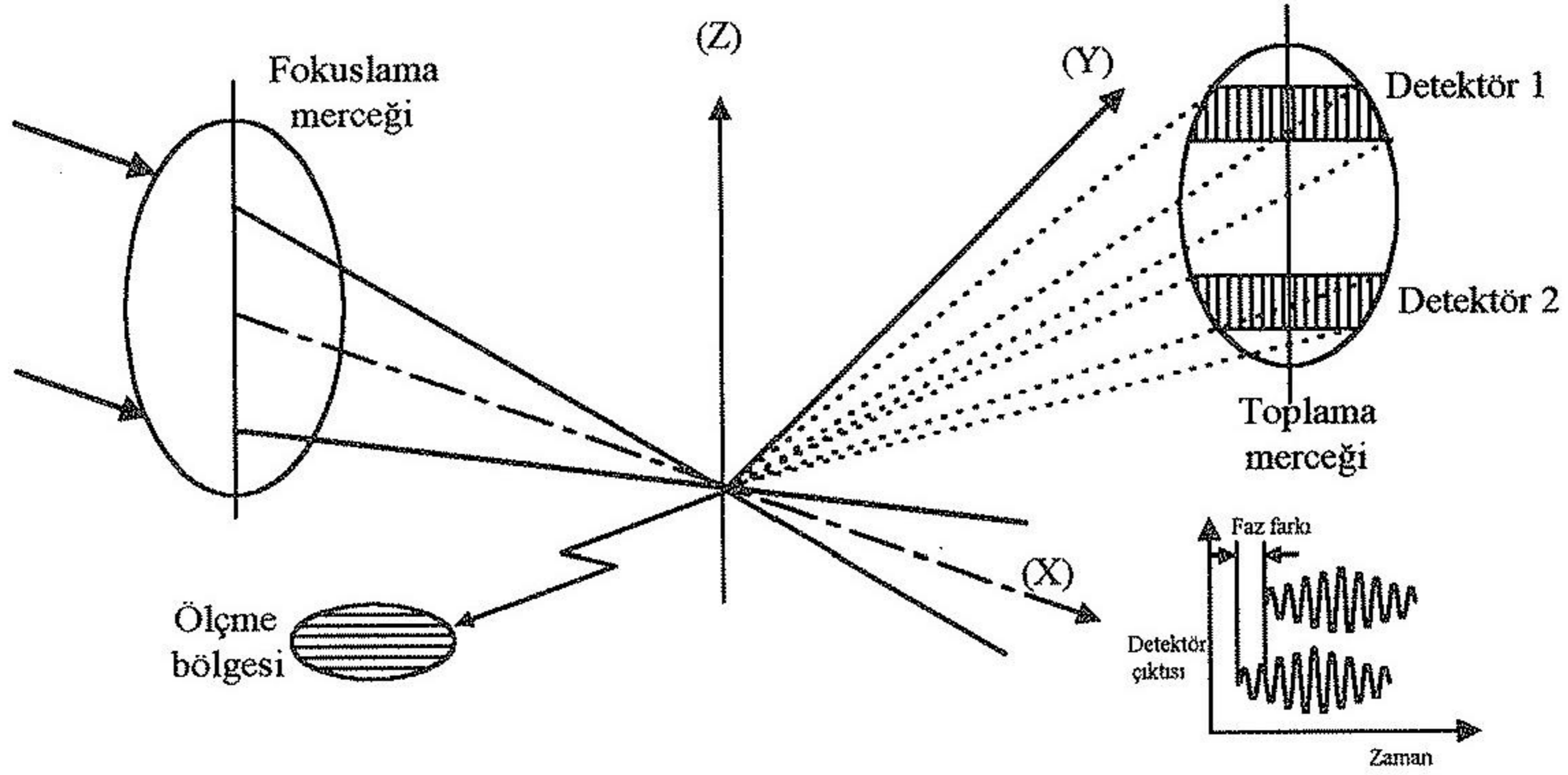
Şekil 4 Partikül çapı ölçümü yapan düzenek

Tablo 2 Wigley tarafından lazer kullanarak alınan sonuçlar

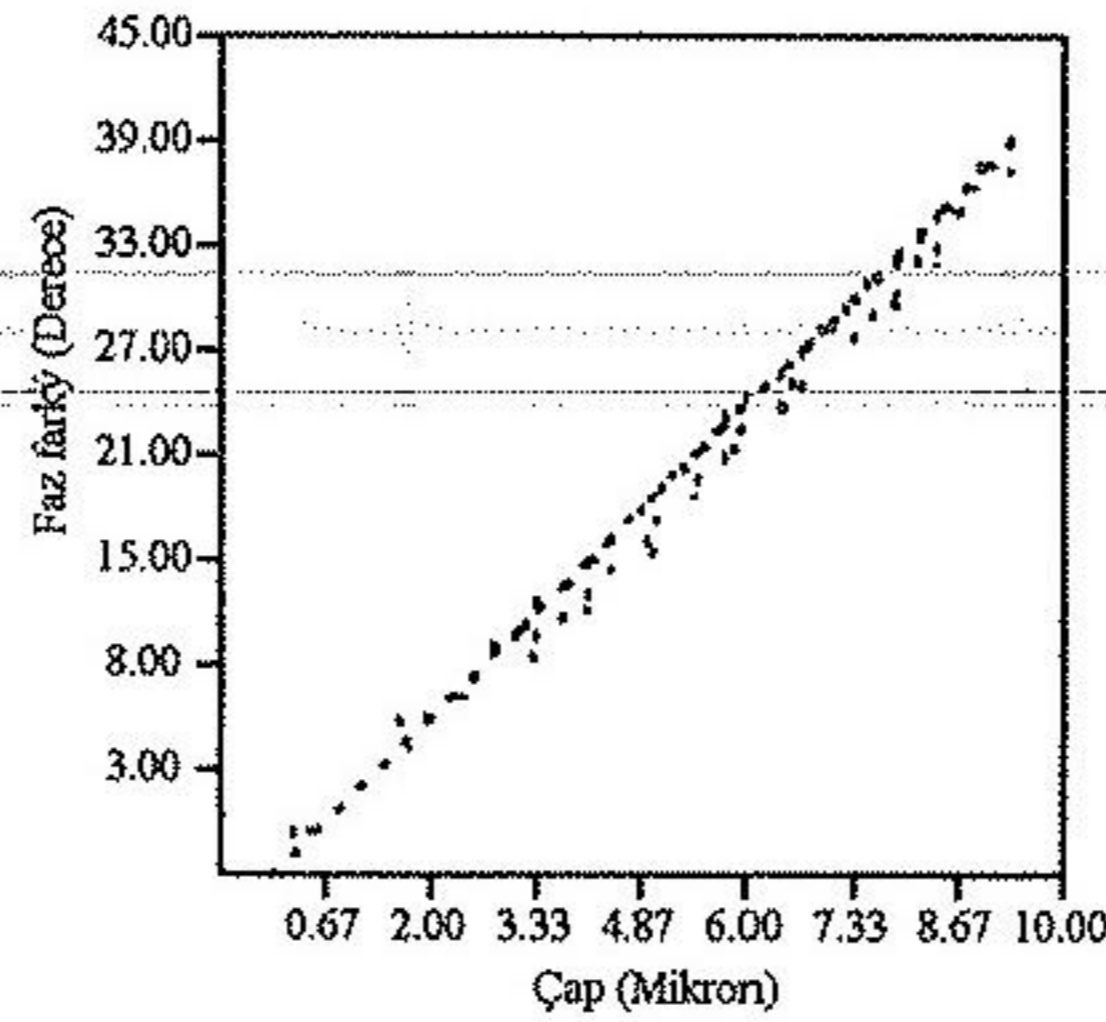
| Malzeme | Fotografik ölçme sonuçları (mm) | Lazer ölçme sonuçları (mm) |
|-----------------|------------------------------------|-------------------------------|
| Su kabarcıkları | 1.0 | 1.0 ±0.05 |
| | 0.43 | 0.47 ±0.03 |
| | Mikrometre ölçme sonuçları (mm) | Lazer ölçme sonuçları (mm) |
| Tel (Kablo) | 0.965 | 0.976 ±0.05 |
| | 0.514 | 0.508 ±0.03 |
| | 0.404 | 0.424 ±0.03 |
| | 0.178 | 0.182 ±0.02 |
| | 0.099 | 0.094 ±0.01 |
| | 0.045 | 0.031 ±0.015 |

İlk defa Durst ve Zare [5] tarafından iki detektör yardımıyla alınan Doppler sinyaller arasındaki faz farkının, droplet çapı ile arasında lineer bir ilişki olduğu gösterilmiştir. Daha sonra bu teknoloji geliştirilerek çap ölçme aralığı genişletilmiştir [6].

Şekil 5a günümüzde endüstride kullanılan Phase Doppler Anemometry (PDA) olarak bilinen düzeneği göstermektedir [7]. 1 ve 2 nolu detektörler yardımı ile elde edilen iki sinyal arasındaki faz farkı ile parça çapı arasındaki lineer ilişki Şekil 5b teki grafikte sunulmaktadır. Referans [6] da PDA'nın su tünellerinde kavitasyon ölçümlerinde, hava kabarcığı yoğunluğunun nasıl bulunduğu verilmiştir.



Şekil 5a Partikül çapı ölçen Phase Doppler Anemometry (PDA) düzeni



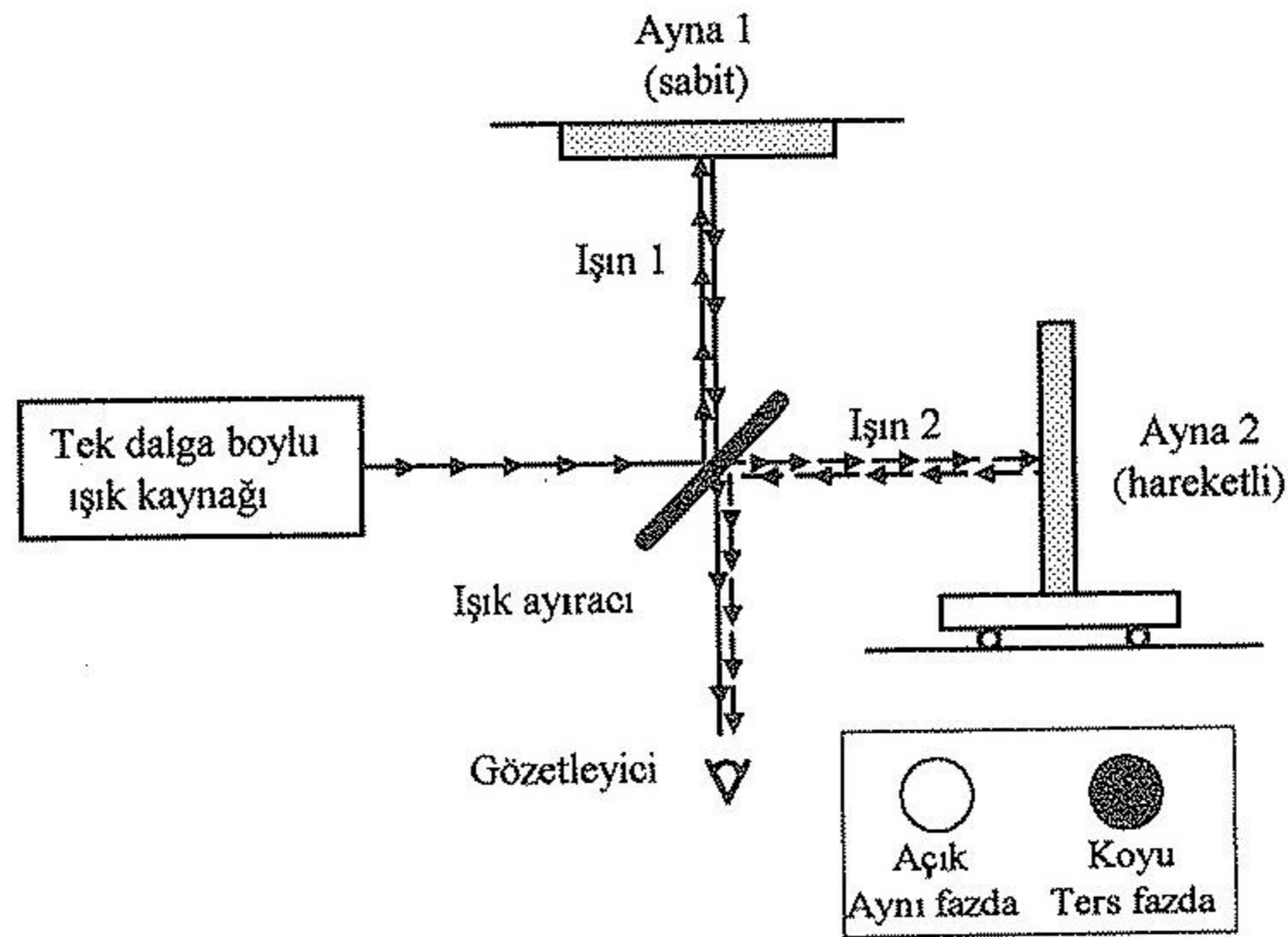
Şekil 5b Faz farkı ve partikül çapı arasındaki bağıntı

3. UZUNLUK, KALINLIK ÖLÇÜMLERİ

3.1 Mesafe interferometreleri

Işık interferans prensiplerinin mesafe ölçümü amacı ile kullanımları fizikte en çok rastlanan faaliyet dallarından biridir. Özellikle metre standartının ışığın dalga boyuna göre nitelendirilmesi interferometrik uygulamaların önemini daha da arttırmıştır.

İlk mesafe interferometresi uygulamaları Şekil 6 gösterilen Michelson İnterferometresi [8] ile başlamıştır. Bu interferometrede monochromatic (tek dalga boyu) ışık kaynağı kullanılarak şekilde gösterilen hareketli aynanın (2 nolu) yer değiştirme miktarı ışığın dalga boyu cinsinden bulunabilir. 2 nolu aynanın hareketi sonucu bu aynadan yansıyan 2 nolu ışın ile 1 nolu ışın arasında faz farkı oluşur. Bu faz farkı sonucu gözetleyici, hareket miktarına göre parlak veya koyu görüntüler gözlemler. Aynadan yansıyan ışınlar eğer aynı fazda ise parlak, ters fazda ise koyu görüntüler oluşur. Işığın dalga boyu bilindiği takdirde, örneğin $0.5 \cdot 10^{-6}$ m, her $0.25 \cdot 10^{-6}$ m lik 2 nolu aynanın hareketinde, gözlemci farklı görüntü alacaktır (açıktan koyuya geçiş gibi). Bu değişiklikler sayıldığı takdirde aynanın almış olduğu yol, toplam sayının $\lambda/2$ ile çarpımı sonucu elde edilir.



Şekil 6 Michelson İnterferometresi

Gözetleyicinin bulunduğu noktaya bir detektör koyulduğunda bu parlak ve koyu görüntüler sonucu, detektörün bağlı olduğu elektronik devre çıkışından bir sinüsodal sinyal elde edilir. Bu sinyaller komparatör devresinde kare dalgaya çevrilip ve sonra sayıcıya aktarılıp, toplam sayı $\lambda/2$ ile çarpıldığında elektronik bir göstergeden 2 nolu aynanın aldığı mesafeyi okuyabiliriz.

Işık kaynağı olarak lazer kullanılmasının en büyük avantajı bu ışığın sürekli olarak kendisiyle aynı fazda yayılmasıdır. Buna lazerin tutarlılık (coherent) özelliği denir. Örneğin ışın ayırıcı ile ayrılan iki ışın f_1 ve f_2 nin yansıyan ışınları, 2 nolu aynanın çok uzak mesafelere hareket etmesi sonucu (aralarındaki mesafenin yani optik yörünge farkının artması) birleştiğinde hala interferans çizgileri görmek mümkündür. Dalga boyunun hassas bir şekilde bilinmesi ve kararlı olması lazerin interferometrik uygulamalarda kullanılmasında en önemli etkidir.

Işığın atmosferik bir ortamda ilerlemesinde dalga boyu, sıcaklık, basınç ve nem den etkilenir. Bu etkilenmeden dolayı dalga boyunda meydana gelen değişiklikler tesbit edilip standart ölçme koşullarına göre kompanze edilirse, çok hassas ve doğru mesafe ölçümleri yapmak mümkün olur.

Bu prensipten hareket ederek akıllıca yapılmış optik, mekanik ve elektronik dizaynlar sonucu yeni mesafe interferometreleri geliştirilmiştir. Bunları iki ana başlıkta toplayabiliriz; AC (Heterodyne) ve DC (Homodyn) interferometreler. DC interferometrelerinde ölçüm ile ilgili bilgi ışık yoğunluğundaki değişikliklere kodlanarak elde edilir. AC interferometrelerinde ise bu bilgiler frekans değişikliklerinde yer alır. DC interferometrelerin, kısa mesafe ile sınırlı oluşu, elektronik gürültü problemleri vs. dezavantajlarından dolayı günümüzde AC interferometreler tercih edilmektedir. Heterodyne veya iki frekanslı interferometre diye adlandırılan bir AC interferometresinin şematik diyagramı Şekil 7 de gösterilmektedir [8,9,10]. Işık kaynağı farklı frekansta, ve farklı polaritede (daireysel polarite sağ ve sol) iki adet ışın üretmektedir. Bu ışınların arasındaki frekans farkı 2 MHz dir. $\lambda/4$ pleytler kullanarak bu ışınların polaritesi daireysel polariteden lineer polariteye (yatay ve dikey olmak üzere) çevrilir. Bir ışık ayırıcı ile ayrılan ışınların bir kısmı dış ortama, yani ölçme amacı ile kullanıma, diğer kısmında referans detektöre gönderilir. Laser başlığından dış ortama çıkan f_1 ve f_2 ışınları, bir polarize ışık ayırıcı ile reflektörden oluşan interferometre vasıtasıyla polaritelerine göre f_1 ve f_2 olmak üzere ayrıştırılıp farklı yönlere gönderilirler. Böylece dikey polariteye sahip f_1 ışını ölçme amacıyla kullanılmak üzere hareketli aynadan yansıtılırken, yatay polariteye sahip f_2 ışını referans olarak kullanılmak üzere reflektörden yansıtılarak f_1 ile birlikte ölçme detektörüne gönderilirler. Ölçme reflektörü hareket etmemesine rağmen f_1 ve f_2 ışınlarının arasındaki frekans farkından dolayı ölçme detektöründen bu iki frekans farkına ait 2 MHz lik bir analog sinyal alınır.

Bu analog sinyalin frekans farkından dolayı oluşumu heterodyne prensibine göre şu şekilde açıklanabilir [11]. Detektör üzerine düşen, aralarında belli bir frekans farkı olan iki ışığın elektrik alanları $E_1(t)$ ve $E_2(t)$ olarak ifade edilir:

$$E_1(t) = a_1 \exp[-i\omega_{f1} t] \quad 6$$

$$E_2(t) = a_2 \exp[-i\omega_{f2} t + \phi] \quad 7$$

ϕ faz farkını $\omega_{f1} = 2\pi f_1$, $\omega_{f2} = 2\pi f_2$ elektromanyetik dalgaların açısal frekanslarını, a_1 ve a_2 amplitüdlerini, f_1 ve f_2 frekanslarını, t zamanı ifade etmektedir. Bu iki elektromanyetik dalganın detektör üzerine aktarılmasıyla karışımı

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t) \quad 8$$

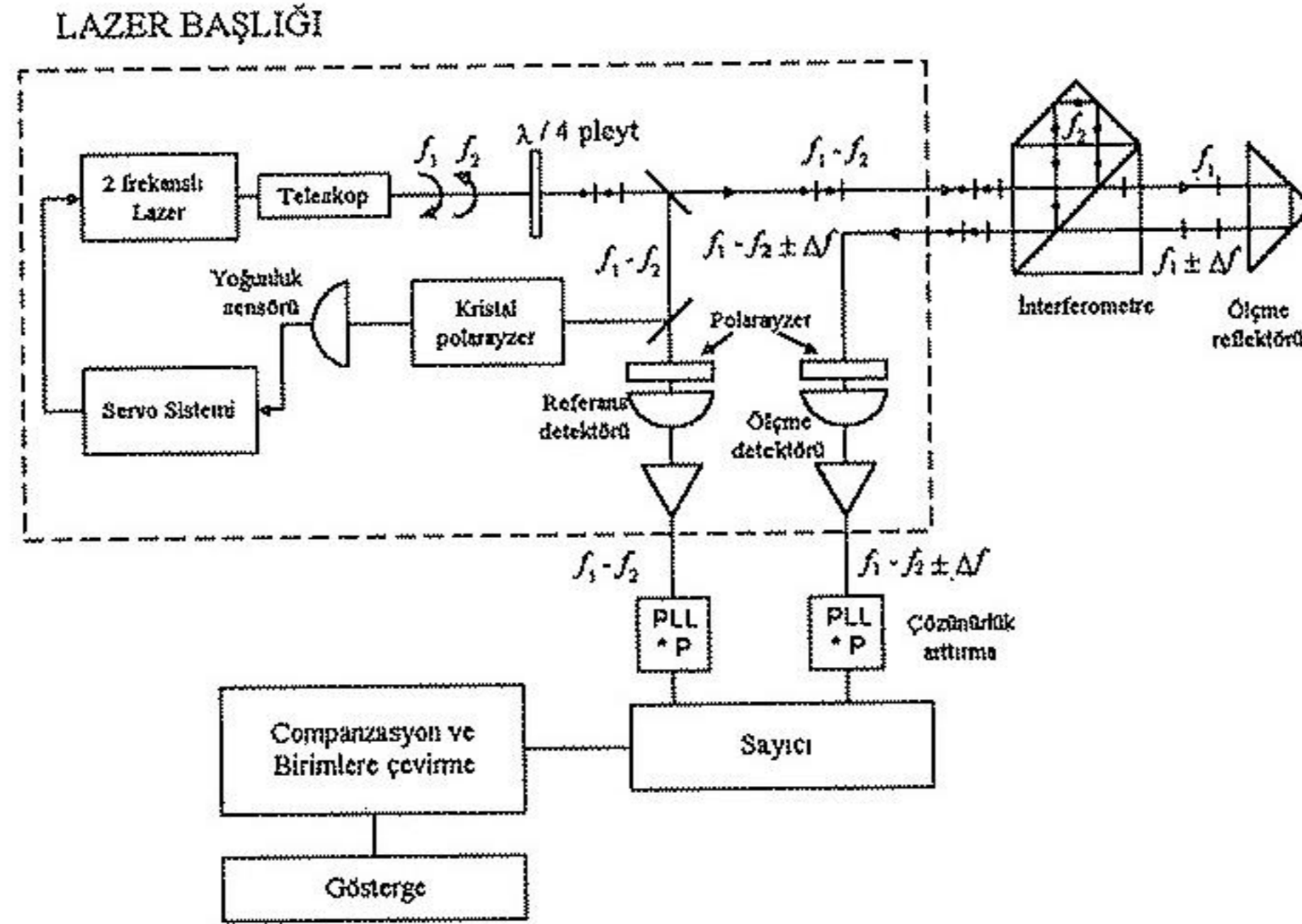
değerini verir. Detektör çıktısı akımın, ışık yoğunluğu $I = E(t) \cdot E(t)^*$ (* conjugate ifade eder) doğru orantısına bağlıdır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$I(t) = (1/2)a_1^2 + (1/2)a_2^2 + (1/2) \{a_1^2 \text{Cos}(2\omega_{f1} t) + a_2^2 \text{Cos}(2\omega_{f2} t + \phi)\} + a_1 a_2 \text{Cos}\{\omega_{f1} + \omega_{f2}\}t + \phi\} + a_1 a_2 \text{Cos}\{\omega_{f2} - \omega_{f1}\}t + \phi\} \quad 9$$

Burada üçüncü, dördüncü ve beşinci ifadelerin frekans değerleri çok yüksek olduğundan bir pratik fotodetektör tarafından algılanamazlar. Bu yüzden detektör çıkışı aşağıdaki formül ile belirlenir:

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \text{Cos}\{(\omega_{f_2} - \omega_{f_1})t + \phi\}$$

İlk iki ifade I_1 ve I_2 , ışınların yoğunluğunu temsil eder ve sabittir. Üçüncü ifade ise $f_1 - f_2$ frekans farkını veren $\omega_{f_2} - \omega_{f_1}$ açısal frekanslarını temsil eder. Heterodyne interferometreleri bu prensibe göre çalışır ve interferans çizgileri sabit değil hareketlidir ve insan gözüyle görülemez.



Şekil 7 İki frekanslı lazer interferometresinin şematik resmi

İki frekanslı interferometrede yukarıda açıklanan ifadeler iki ışının detektöre düşmesi esnasında gerçekleşir ve aralarındaki frekans farkını temsil eden sinyal, detektör çıktısından alınır.

Ölçme reflektörünün ışın doğrultusundaki hareketi sonucu f_1 nolu ışının frekansı $\Delta f = 2V/\lambda$ olarak reflektörün yönüne bağlı şekilde artar veya azalır. Aslında bu, ışının frekansının Doppler prensibine göre kaymasından kaynaklanır.

Şekil 7 de görüldüğü gibi dış ortamdan lazer başlığına gelen $f_1 - f_2$ farkı bir sayıcıya gönderilir. Ölçme detektörü hareketsiz iken $\Delta f = 0$ olacağından her iki detektöre gelen sinyal sayımı $f_1 - f_2$ dir ve $(f_1 - f_2) - (f_1 - f_2)$ fark sayımında sıfırdır. Ölçme reflektörünün sağa veya sola hareket etmesiyle, ölçme detektörüne düşen f_2 frekansı $\Delta f = 2V/\lambda$ miktarı kadar artar veya azalır. Sayıcının verdiği değer ise $(f_1 - f_2) - (f_1 - f_2 \pm \Delta f) = \Delta f$ tir. Bu değerdeki her bir atma (pulse) $\lambda/2$ değerine eşittir. Böylece $\lambda/2$ lik bir ölçme reflektörü hareketi ölçülebilir. Fakat sayıcıya giden $(f_1 - f_2)$ ve $(f_1 - f_2 \pm \Delta f)$ frekansındaki sinyaller, sistemin çözünürlük değerini yükseltmek amacıyla belli bir oranda P değeri ile çarpılarak yükseltilir. Böylece Δf frekansı P kadar yükselmiş olup (P değeri örneğin HP5529A sisteminde [12] 512 dir) çözünürlük değeri $(\lambda/2) \cdot (1/512) = \lambda/1024$ e ulaşmış olur. Herbir sayım değeri $\lambda/1024$ ile çarpılarak katedilen mesafe hesaplanabilir. Bu değer aynı zamanda basınç, sıcaklık, nem farklılıklarından elde edilen kompanzasyon değeri ile çarpılınca mesafe ölçümleri yüksek hassasiyette gerçekleştirilir. Hewlett Packard uzunluk ölçümleri için 1nm çözünürlük ve ± 1.5 ppm doğruluk vermektedir [12].

3.2 Master Bloğu İnterferometresi

Günümüzde master bloklarının primer seviyede kalibrasyonunun yapılmasında, primer standart olan ionize edilmiş He-Ne/I₂ lazer ile karşılaştırılarak izlenebilirliği sağlanan stabilize

lazerler kullanılır. Bu amaçla Fizeau ve Twyman Green interferometrelerinin [13] çalışma prensibi esas alınarak master bloğu kalibrasyonu yapan interferometreler dizayn edilmiştir. Konunun açıklanması için öncelikle bu interferometrelerde kullanılan referans yüzey ile master bloğu üzerinde elde edilen interferans çizgileri yardımıyla master bloğunun boyunun hesaplanması açıklanacaktır.

Şekil 8 de optik flat yardımıyla referans yüzey ve master bloğu üzerinden elde edilen interferans çizgileri ve iki yüzey arasındaki yükseklik farkından dolayı oluşan interferans çizgileri arasındaki fraksiyon 'a' gösterilmektedir [14,15]. Bölüm 3.1 de belirtildiği gibi iki ışının girişimi ile oluşan interferans çizgileri, bu iki ışın arasındaki kadar yörünge farkından oluşmaktadır. Bu fark değeri $\lambda/2$ nin çift sayı ile çarpımından elde ediliyorsa interferans çizgisi parlak, tek sayı ile çarpımından elde ediliyorsa koyu olarak oluşur. Bu tamamen iki ışının $\lambda/2$ aralıklarla aynı ve ters fazda olmasıyla ilgilidir.

Her iki yüzeyden yansıyan ışının kat ettikleri yol, bu iki yüzey arasındaki yükseklik farkından dolayı farklı olacaktır ve 'a' ve 'b' mesafesi ile ifade edilen interferans çizgileri arasındaki fraksiyon bu mesafenin bulunmasına yardımcı olacaktır. Aşağıdaki semboller yardımıyla konuyu açıklayalım.

| | | |
|--|---|--|
| G | = | Master Bloğu yüksekliği |
| $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ | = | Kullanılan ışık kaynağının dalga boyları, |
| F_1, F_2, F_3, F_4 | = | 4 dalga boyu kullanımı sonucu oluşan farklı fraksiyonlar (a/b) |
| K_1, K_2, K_3, K_4 | = | Bilinen nominal master bloğu boyunun yarım dalga boylarına bölümü ile elde edilen değerler |

G mesafesi dört çeşit dalga boyu kullanarak şu şekilde bulunabilir;

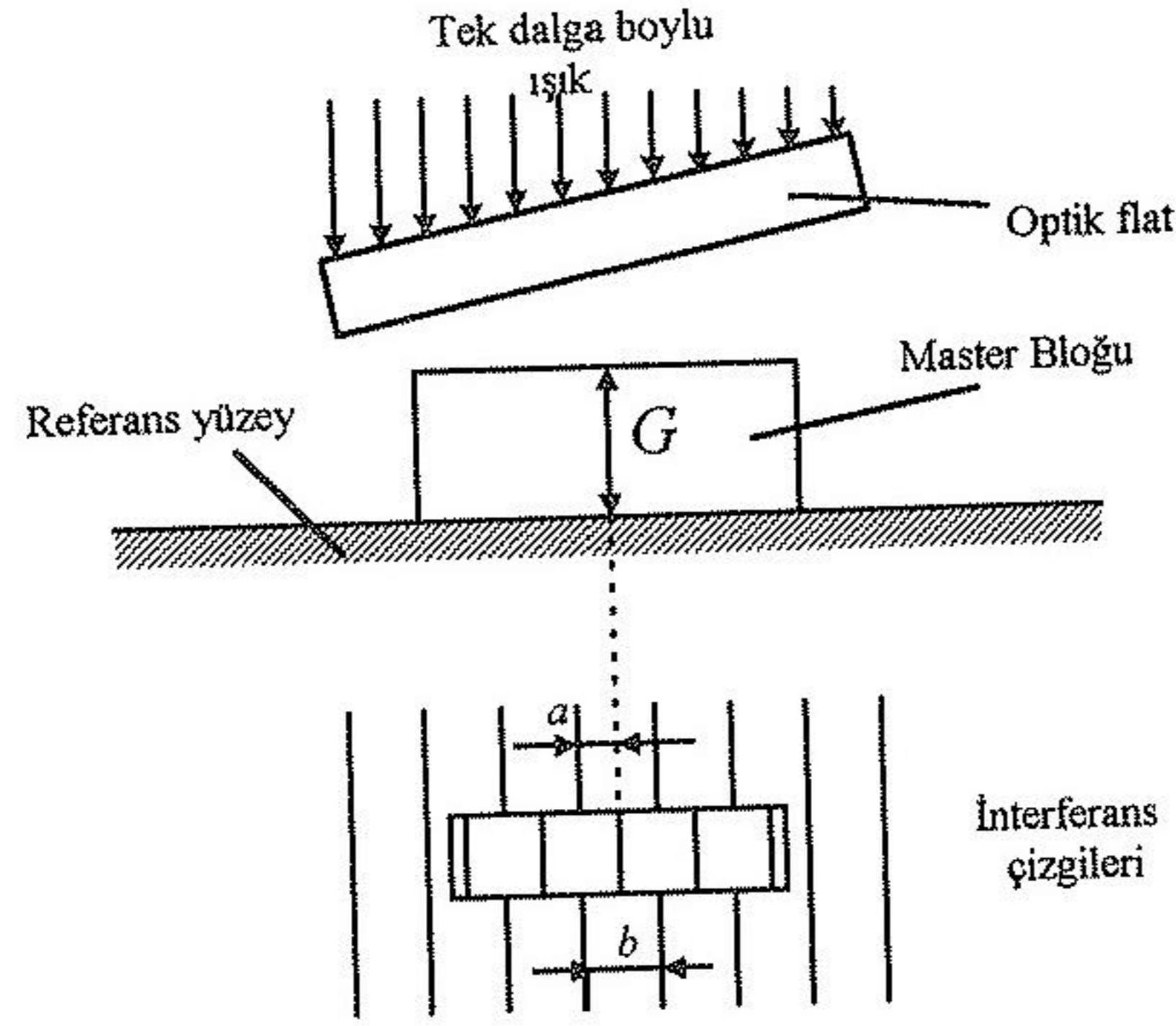
$$G = (K_1 + F_1) \lambda_1 / 2 \quad 11$$

$$G = (K_2 + F_2) \lambda_2 / 2 \quad 12$$

$$G = (K_3 + F_3) \lambda_3 / 2 \quad 13$$

$$G = (K_4 + F_4) \lambda_4 / 2 \quad 14$$

Burada master bloğunun tahmini yüksekliğinin önceden bilinmesi gerekiyor. Böylece yaklaşık K_1 değerleri, tahmini master bloğu yüksekliği G yi $\lambda/2$ lere bölerek elde edilir. Bu değer F_1 fraksiyon değeri ile toplanır ($F_1 + K_1^1$ olarak) ve daha sonra sıra ile (λ_1/λ_2) , (λ_1/λ_3) ve (λ_1/λ_4) değerleri ile çarpılıp, $(K_2^1 + F_2^1)$, $(K_3^1 + F_3^1)$, $(K_4^1 + F_4^1)$ değerleri bulunur. Eğer bu hesaplanan değerlerin fraksiyonları gözlenen fraksiyon değerleri ile 0.1 oranında çakışmıyorsa, K_1^1 ve diğer K değerleri yukarıdaki denklemde gözlenen fraksiyon değerleri ile kullanılarak G gerçek boyu hesaplanabilir. Eğer çakışmaz ise K_1^1 değeri bir birim değiştirilerek bu hesaplamalar çakıştırılana kadar tekrar tekrar yapılır.



Şekil 8 Master Bloğu interferometresinin temel çalışma prensibi

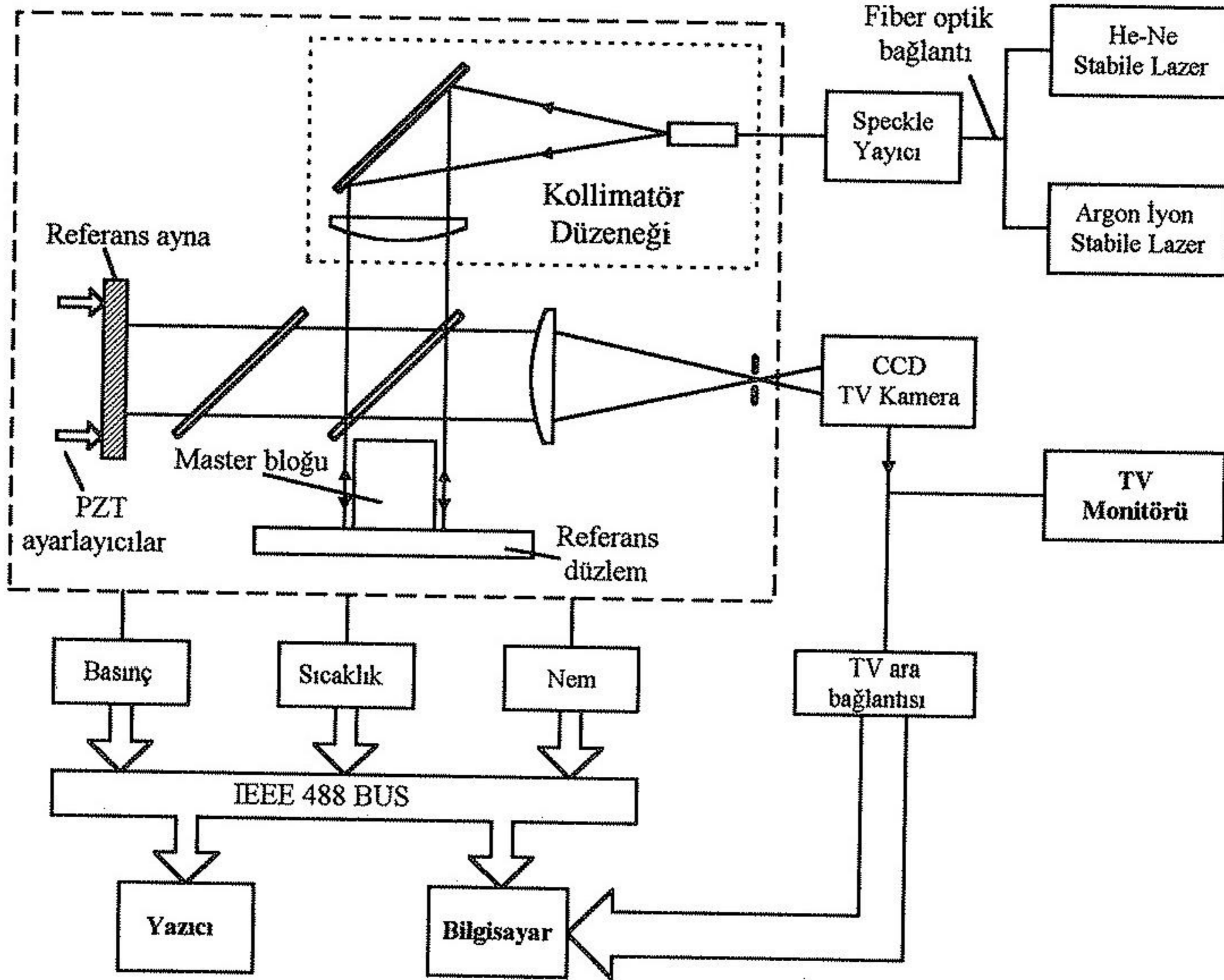
Değişik optik konfigürasyonlar uyguluyarak ve daha stabile ışık kaynakları ile elde edilen interferans çizgiler arasındaki ilişkiler yardımıyla master bloğunun uzunluğu dalga boyu cinsinden bulunmuştur. NPL 1960 lı yıllardan itibaren Fizeau interferometresi esaslı Hilger-NPL interferometresi (15,16) kullanarak master bloğu kalibrasyonu yapmıştır. Bu interferometrede ışık kaynağı olarak Cadmium ve Mercury izotoplarından elde edilen ışık kaynağı kullanarak 644, 509, 480 ve 468 nm dalga boylarında ölçüm yapılmıştır. Hilger-NPL interferometresinde master blokları referans düzlem üzerine yerleştirilir, interferans çizgileri arasındaki ' α ' değerleri göz kararı ile dört dalga boyunda bulunur. Master bloğu boyu daha önceden $1.5 \mu\text{m}$ doğruluğunda biliniyorsa, fraksiyonları kullanarak master bloğu boyu daha yüksek doğrulukta bulunur. Verilen belirsizlik 100 mm lik bir master bloğu için $\pm 50 \text{ nm}$ dir (%99 güvenilirlik).

Bu interferometre ile yapılan ölçümün doğruluğunun kullanıcıya yüksek derecede bağlı olması ve işlemin uzun sürmesi yeni bir interferometre geliştirilmesine sebep olmuştur. Kullanıcının karşılaştığı en büyük sorunlardan biri, özellikle uzun master bloklarında (90, 100 mm gibi), interferans çizgilerinin belirginliğinin az olmasıdır. Bunun nedeni kullanılan ışık kaynağının coherence boyunun az olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca sıcaklık, basınç, nem değerlerinin kullanıcı tarafından ölçülüp hesaba katılması işlem süresini uzatmış ve ölçümün daha az sık aralıklarla yapılması sonucu atmosferik koşullar sürekli izlenememiştir. Buda belirsizliğin yükselmesine sebep olmuştur.

NPL yeni bir cihazı bu tip problemlerin üstesinden gelmek amacıyla geliştirmiştir [18]. Işık kaynağı olarak stabilize lazerlerin kullanılması, coherence boyunun uzun olması nedeniyle interferans çizgilerinin daha net ve belirgin oluşması sağlanmıştır. Buna ek olarak interferans çizgilerinin okunması ise kamera yardımı ile yapılmıştır. Sıcaklık, basınç ve nem otomatik olarak sensörler yardımı ile ölçülüp bilgisayara direk olarak aktarılmış ve sürekli olarak atmosferdeki değişiklikler kontrol altında tutulmuş, belirsizlik düşürülmüştür.

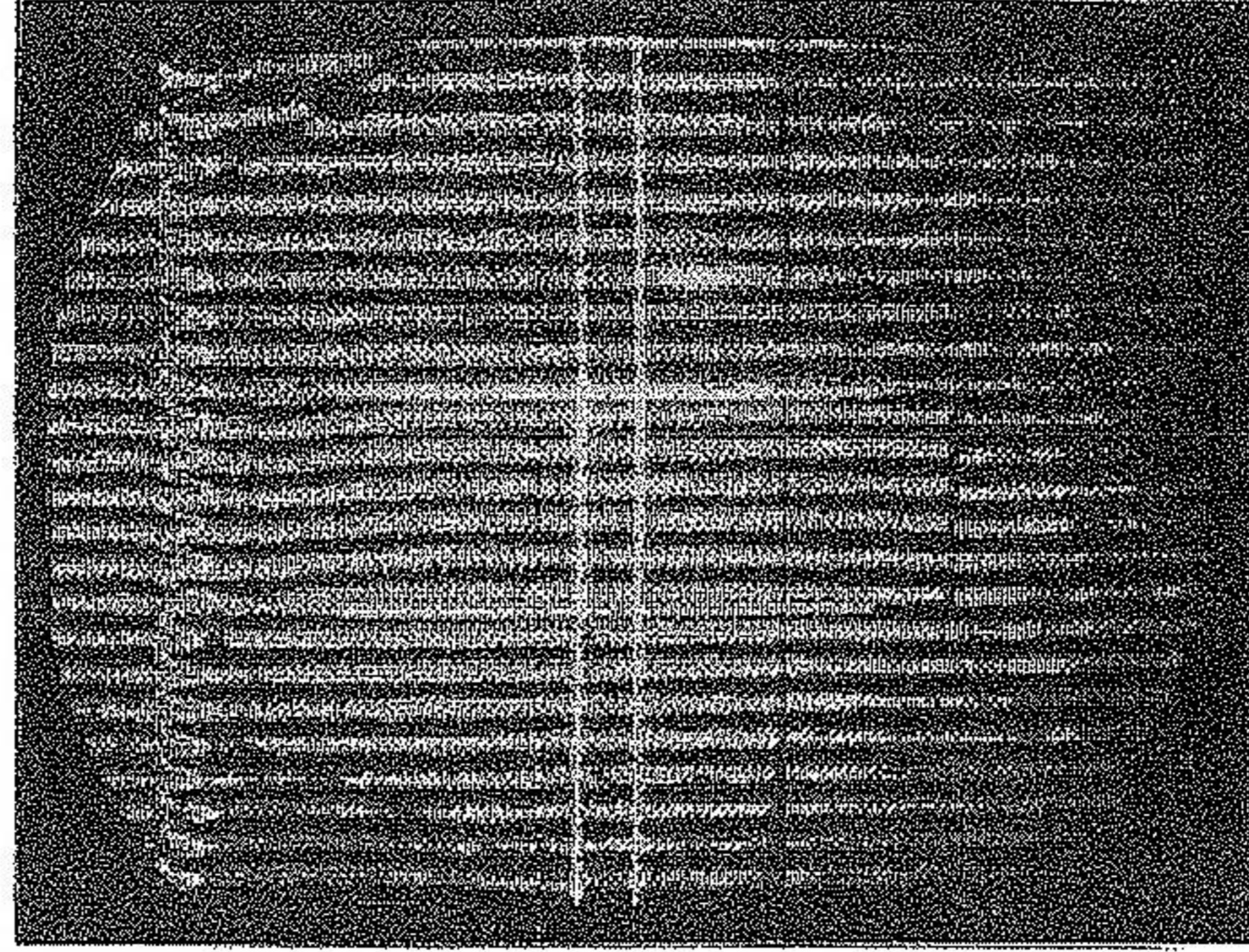
Şekil 9 yeni NPL interferometresini şematik olarak göstermektedir. Interferometre Twyman Green esaslı olup, ışık kaynağı olarak izlenebilirliği He-Ne/I₂ stabilize lazerden sağlanan,

satabilize Zeeman He-Ne (633 nm) ve Argon İyon (568 nm) lazerleri kullanılmıştır. Lazerlerin kararlılığı He-Ne için $2 \cdot 10^{-8}$ Argon İon için $5 \cdot 10^{-9}$ dir. Işık fiber optik kablo yardımı ile interferometreye ulaştırılmış ve iki dalga boyu seçimi otomatik olarak bilgisayar yardımı ile yapılmaktadır. Multimode fiber kullanılmasından dolayı oluşan speckle, interferometre ile fiber arasına yerleştirilen diffuser yardımıyla önlenmiştir. PZT elemanlarının kullanılması ile interferans çizgilerinin gerekli ayarı, kullanıcının elle müdahalesini önlemek amacı ile uzaktan kumanda edilerek yapılmaktadır.



Şekil 9 Yeni NPL master bloğu interferometresi şematik görünüşü

Şekil 10 da master bloğu ve referans düzlemden alınan interferans çizgileri gösterilmektedir. Eski Hilge-NPL interferometresinden farklı olarak interferans çizgilerinin yatay olarak geçişi ayarlanmıştır. Bu elektronik sisteminin ve bilgisayar yazılımının görüntüyü daha kolay işlemesini sağlamıştır. Şekilde görüldüğü gibi iki yatay çizgi yardımı ile master bloğu uygun konuma getirilir, ve iki dikey çizgi vasıtasıyla nominal boy ölçümü için interferans çizgilerinin fraksiyonunun bulunacağı orta bölge tespit edilir.



Şekil 10 Yeni master bloğu interferometresinin ekranından gözlenen interferans çizgileri

NPL in geliştirdiği bu interferometre daha sonra ticari amaçla konfigüre edilmiş, ışık kaynağı olarak kararlılığı $1 \cdot 10^{-8}$ olarak izlenebilirliği NPL den sağlanmış kırmızı ve yeşil olan He-Ne lazerler kullanılmıştır [19]. Şekildeki interferans çizgileri CCD kamera ve bilgisayar yardımı ile analiz edilerek, yaklaşık 3 nm lik bir çözünürlük sağlanmıştır. Fraksiyonların gözlenmesinde kullanıcıya bağımlılıktan kurtulmuş, master bloğu sıcaklığı ve atmosfer koşulları otomatik olarak kompanze edilerek $\pm(0.02+0.2L)$ μm lik bir belirsizlikle ölçüm yapmaya olanak verilmiştir (Not: L boyu metre olarak alınır). Ayrıca otomatik olarak master bloğunun düzlemselliği ve paralelliği 0.01 nm çözünürlükle grafiksel ve nümerik olarak bilgisayar yazılımında sağlanmıştır.

Geliştirilen yazılım kullanıcının ölçme işlemindeki etkisini azaltmış ve basitleştirmiştir. Ayrı bir ekran ile master bloğunun pozisyonunu, interferans çizgilerini gözlemleyerek ayarlama olanağı vermiştir. Master bloğu, 150 mm çapında 50 nm düzlemsellikte laplanmış bir çelik referans düzlem üzerine yerleştirilir ve yazılımın verdiği komutlar doğrultusunda gerçekleştirilir. Tabii ki master bloğu nominal boyunun 1.5 μm doğrulukta önceden bilinmesi gerekmektedir. Şekil 11 de görüldüğü gibi yeni interferometreye birden fazla master bloğu yerleştirilip, referans düzlemin döndürülmesiyle sıra ile master bloklarının kısa sürede kalibrasyonu yapılır. Bir master bloğunun interferans çizgilerinin fraksiyonlarının bulunması 3 saniye, toplam ölçme süresi 45 saniye ve maksimum ölçülebilecek master bloğu boyu 300 mm olarak belirtilmiştir.

3.3. Üçgenleme Metodu :

Şekil 12 de üçgenleme metodu kullanarak mesafe ölçümü gösterilmektedir. Diyod lazer ışık kaynağından elde edilen lazer ışını, mercek yardımı ile ölçümü yapılacak yüzeye odaklanır. Genelde ışının geliş açısı yüzeye 90 derecedir. Yüzeyden yansıyan ışının görüntüsü bir CCD görüntü sensörü veya pozisyon takibi yapan detektör üzerine yine bir mercek yardımıyla odaklanır. Görüntü açısı α genelde 30° ile 45° arasında değişir. Işığın yansıdığı yüzeyin proba doğru yaklaşması veya uzaklaşması detektör üzerindeki görüntünün hareket etmesini sağlar. Görüntü hareketindeki değişiklik BB' ile yüzeyin hareketindeki değişiklik AA' aşağıdaki denklem ile belirlenir [8]:

$$AA' = d \cdot b \cdot \cos\alpha / (b \sin\alpha + BB')$$

Burada,

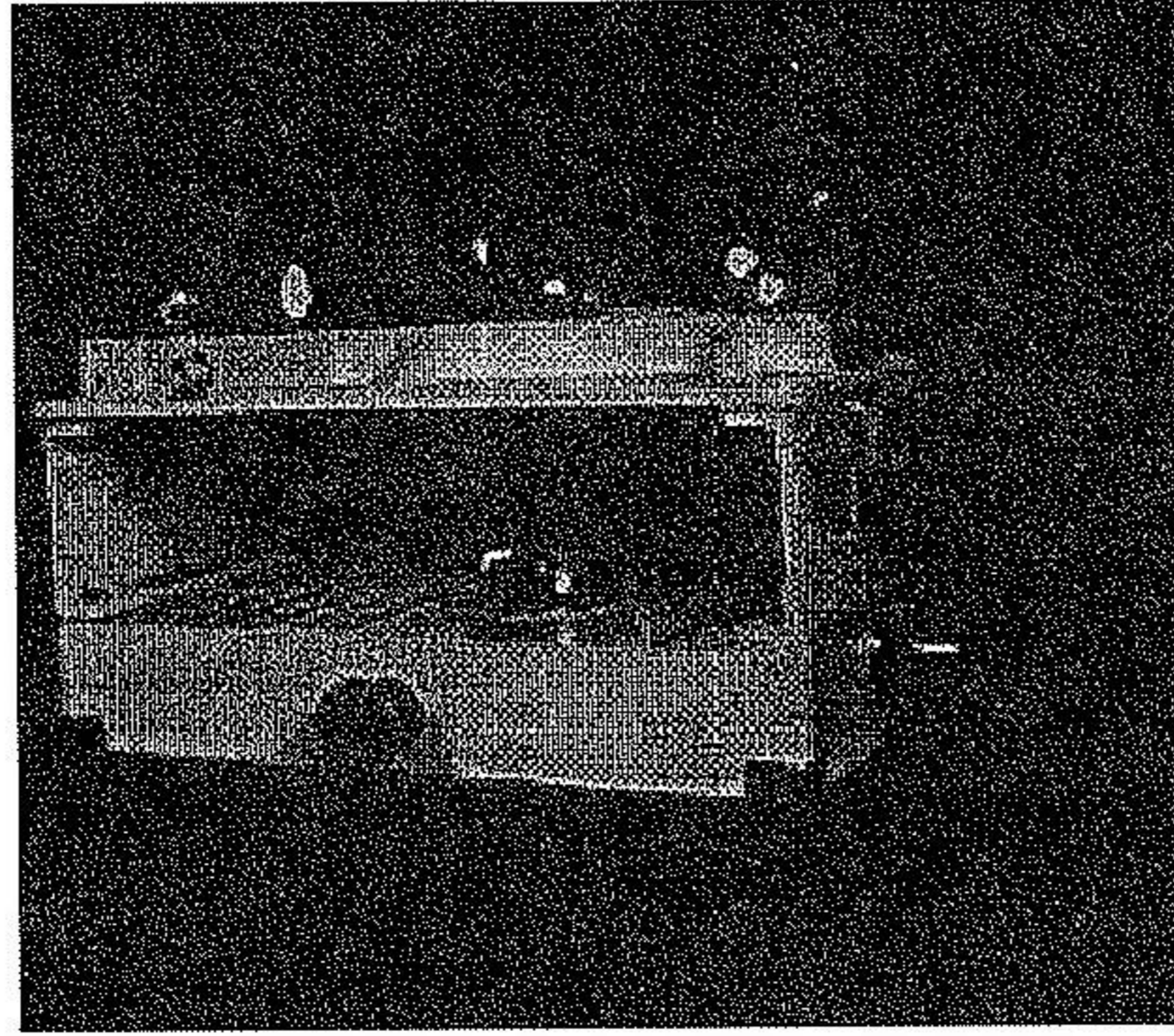
d = görüntü merceği ile ölçme merceği arasındaki sabit mesafe,

b = detektör ile görüntü merceği arasındaki sabit mesafe,

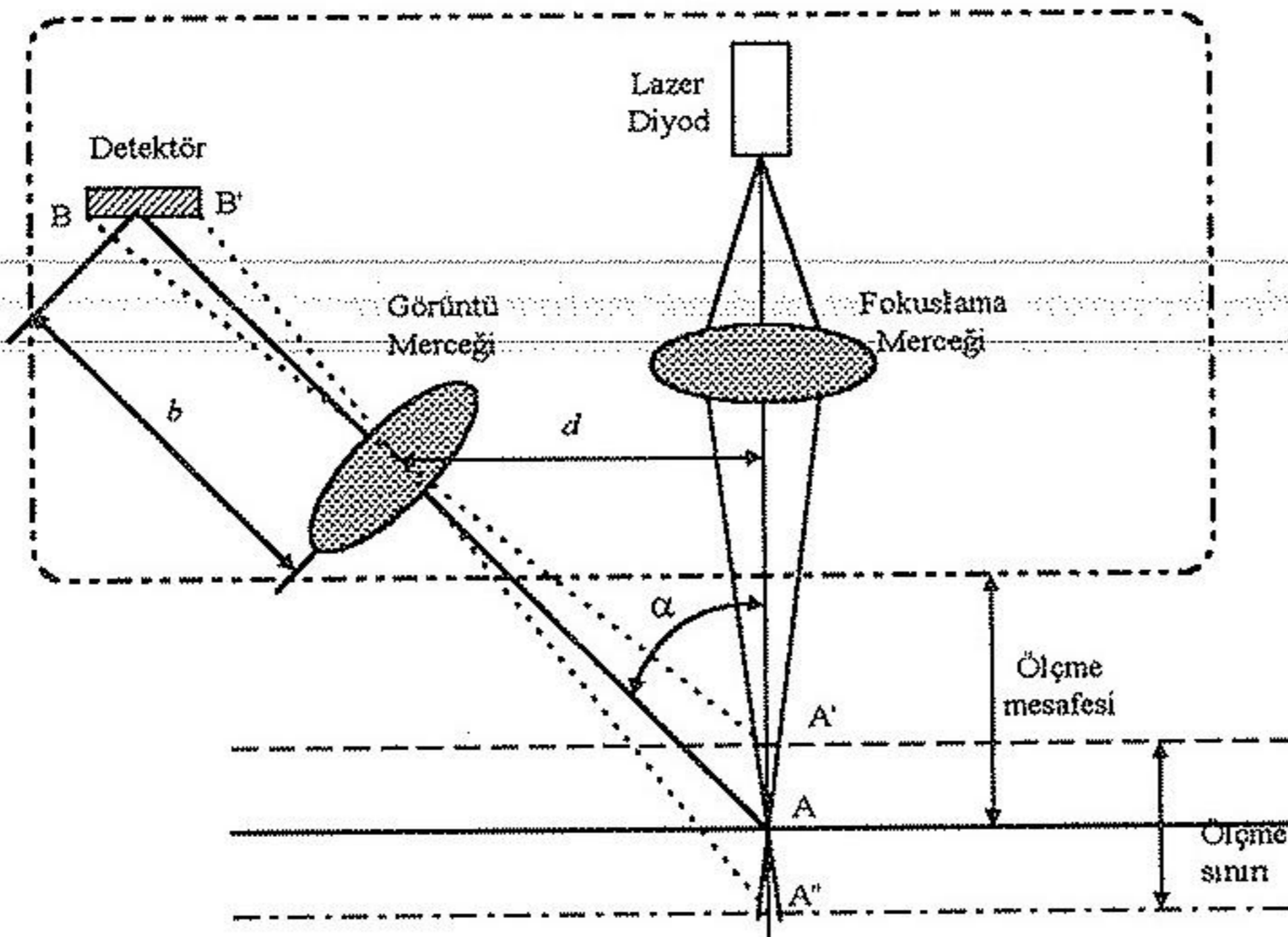
α = görüntü açısı

BB' = lazer ışınının detektör üzerindeki kayma miktarı.

Tipik ölçme mesafe sınırları: 60 mm ölçme sınırı - (115 mm yakınlıkla) 200 mm ölçme sınırı - (450 mm yakınlıkla). Cihazın ölçme doğruluğu ölçme sınırına bağlı olarak değişir. 10 mm ölçme sınırına sahip bir sensörün çözünürlüğü 0.005 mm doğruluğu ± 0.025 mm dir [20].



Şekil 11 NPL in geliştirdiği yeni master bloğu interferometresi



Şekil 12 Üçgenleme Metodu

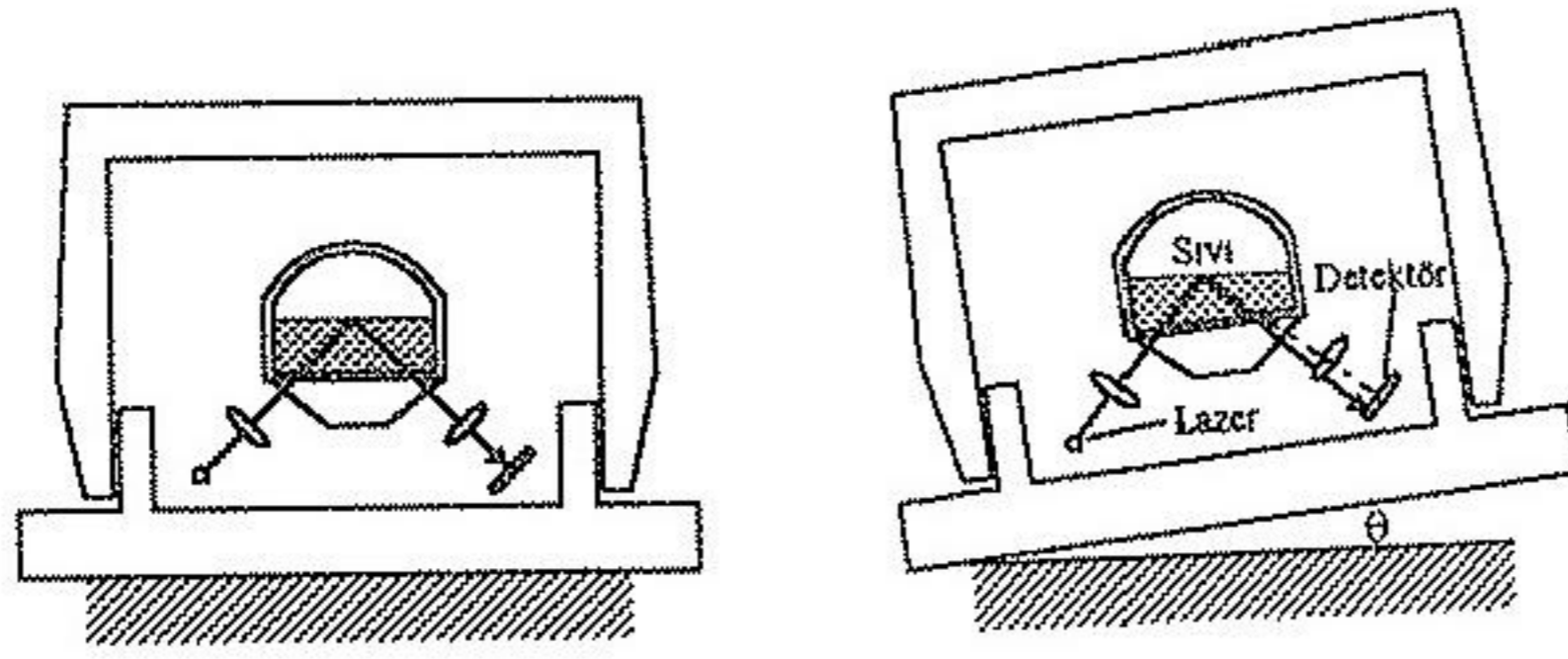
4. AÇI ÖLÇÜMLERİ

Açı ölçümlerinde uzunluk ölçümlerinden farklı olarak bir referans standart mevcut değildir. Açı birimi dairenin eşit bölünmesiyle elde edilmektedir. Açı standartlarının doğruluğunda dairenin ne ölçüde hassas ve doğru olarak bölünmesine bağlıdır. Bunun yanında sinüs yada tanjant prensibi kullanarak açığı oluşturmak ve kalibre etmek mümkündür.

Lazer ışığı kullanarak açı ölçümü yapan cihazlar bu temel prensiplerden faydalanarak kalibre edilir ve açı ölçümü yapılır.

4.1 Akışkan seviyesi ve lazer kullanarak açı ölçümü

Şekil 13 te basit bir su terazisi prensibinden yola çıkarak dizayn edilmiş küçük açılarda ölçümü şematik olarak gösterilmektedir. Çözünürlüğü 0.2 saniye olan bu düzeğin doğruluğunu kullandığı akışkanın çeşidi belirler. Kullanılan akışkan ışığı iyi yansıtmalı ve sıvı yüksekliğindeki küçük titreşimlerden kaynaklanan dalgalanmalara dayanıklı olmalıdır. Hareketten sonra sıvının durulması için 10 saniyelik bir süre uygun görülmüştür [21]. Işık kaynağı olarak diode lazer kullanılabilir. Burada interferometrik bir ölçüm söz konusu olmadığından kullanılan lazerin stabilize olmasına gerek yoktur. Üçgenleme metodunda olduğu gibi, sıvı yüzeyden yansıyan ışının fotodetektör üzerindeki pozisyonu ve bu harekete sebep olan seviye değişimi ile bağlantı kurularak, θ açısı hesaplanır. Bu işlemde cihaz 1 metrelik referans standart olarak kullanılabilecek sinüs çubuğu ile kalibre edilmelidir. Daha sonra cihazın kullanımında θ açısından dolayı yansıyan lazer ışınının fotodetektördeki pozisyon değiştirmesi kalibrasyon esnasındaki voltaja ve açı değerine işlenir.



Şekil 13 Lazer ve sıvı seviyesi kullanarak açı ölçümü

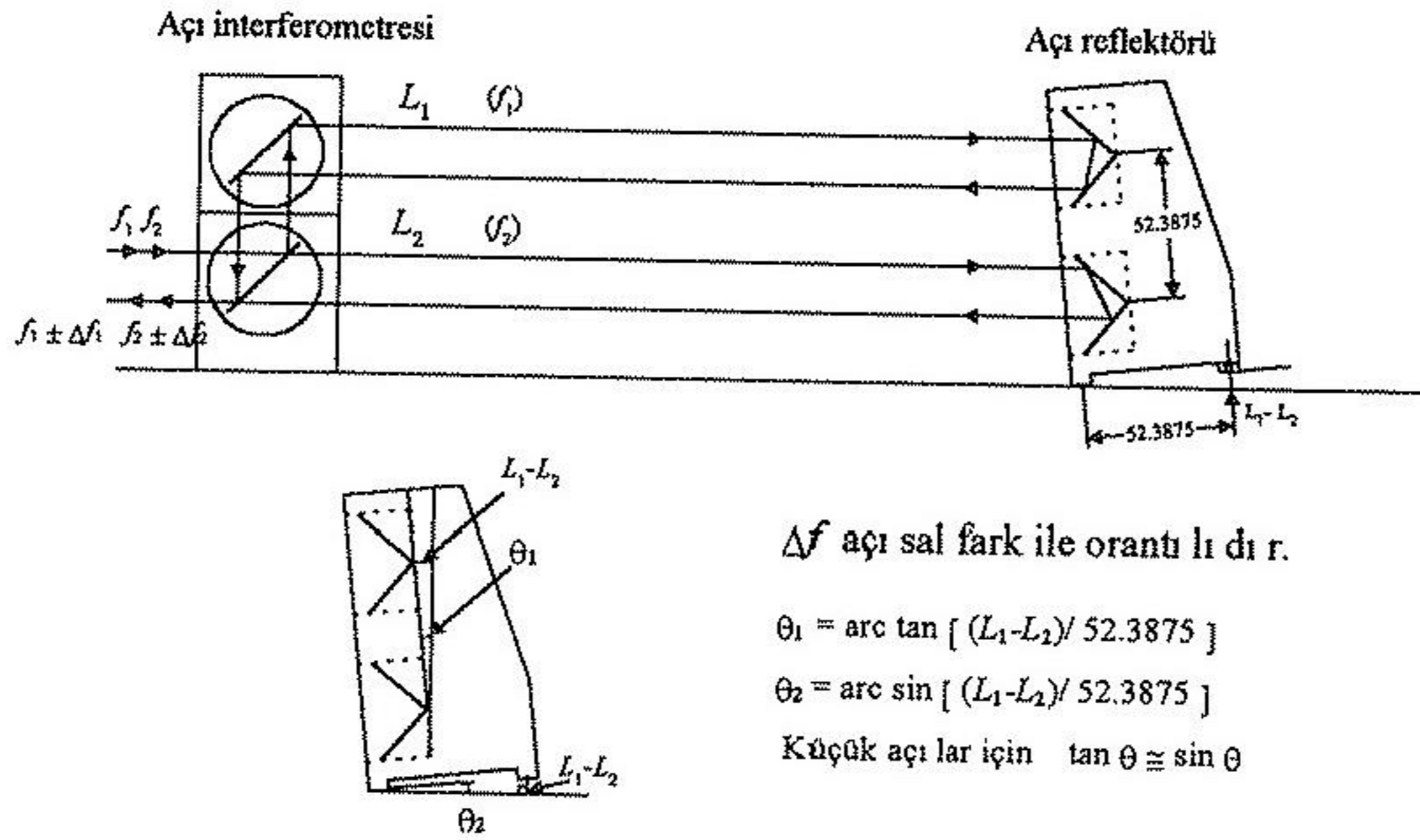
4.2 İki frekanslı lazer interferometresi kullanarak

Bölüm 3.1 de açıklanan lazer interferometre sistemi mesafe ölçümleri için geliştirilmiştir. Fakat uygun optikler kullanarak küçük açılarda ölçümü içinde kullanılabilir. Daha önceden belirtildiği gibi, iki frekanslı interferometre iki lazer ışınının optik yörüngeleri arasındaki fark değişiminin ölçümü prensibi ile çalışmaktadır. Açısal bir değişim optik düzenlemelerle lineer değişime dönüştürülürse açı ölçümünde bu interferometre kullanılabilir. Şekil 14 te böyle bir düzenleme ile interferometre kullanarak açı ölçümü gösterilmektedir. Burada her iki ışın L_1 ve L_2 boylarındaki değişikliğe bağlı olarak Doppler frekans kaymasına uğrarlar. Ve sonuç

$$(f_1 \pm \Delta f_1 - (f_2 \pm \Delta f_2)) = \Delta f_1 - \Delta f_2$$

Δf_1 ve Δf_2 farkı $L_1 - L_2$ olacaktır. İki reflektör arasındaki mesafe bilindiği takdirde $L_1 - L_2$ farkına sebep olan θ açısı kolayca bulunur. Burada çözünürlük 0.005 saniye olarak doğruluk ise okunan değer in yüzde ± 0.2 olarak belirlenmiştir [12]. Atmosferdeki koşullar her iki ışın da etkileyeceğinden ve bunların arasındaki frekans farkı önemli olduğundan açı ölçümleri atmosferdeki değişikliklerden etkilenmez. Burada önemli olan iki reflektör arasındaki mesafenin stabilitesidir.

Lazer interferometre ve açı optikleri kullanılarak 360° döner bir tablanın, doğruluğu yüksek başka bir döner tablaya göre adım adım kalibrasyonu yapılabilir. Bunun için referans tablanın üzerine açı optikleri bağlanarak kalibrasyonu yapılacak tablanın üzerine monte edilir. Belli aralıklarla adım adım üstteki tabla döndürülür, her döndürmeden sonra, altaki tabla aynı miktarda ters yöne döndürülür. Üstteki tabla referans kabul edildiğinden, alttaki tabla ters döndürüldüğünde referans tablaya göre alt tablanın hatası bulunur. Bu işlem belli açı aralıklarında (maksimum 10°) 360° boyunca devam eder ve altta bulunan tablanın (bu bir takım tezgahının X-Y tablası da olabilir) üstteki hassas tablaya göre kalibrasyonu yapılmış olur.



Şekil 14 Açı optikleri kullanarak iki frekanslı lazer interferometresi ile açı ölçümü

5. SONUÇ

1. Metrolojide lazer kullanımı özellikle mekanik verilerin, elektronik verilere kolayca aktarılmasını sağlayıp bilgisayar ile cihazın bütünleşmesini kolaylaştırmıştır.
2. Ölçme prensibine göre, ya ışığın dalga boyu esas alınmıştır, yada yansıyan ışığın yer değiştirme miktarı ve yayılma özellikleri ile ölçülen mesafe arasında ilişki kurulmuştur.
3. Dalga boyunun esas alınmasında izlenebilirlik direk olarak referans standardtan, ışığın yayılma özelliklerinin incelenmesinde izlenebilirlik, aracı etolonlar yardımı ile sağlanmıştır.
4. Lazerin tek dalga boyunda ve eşfazda yayılması, imalat metrolojisinde en çok kullanılan ışık kaynağı olmasına sebep olmuştur.
5. Lazer kullanımı, temassız ölçüm yapmayı ve bu ölçümü yapabilen hassas cihazların dizaynını kolaylaştırmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] Ticari Katolok, 'World's smallest laser scan micrometer': Commercial 6-Page Brochure, Keyence Corporation, Sensing Techniques, PO Box. 174, Welywyn Garden City, Herts AL7 4TT, UK (İngiltere), (1990).
 - [2] Binks, S. D. 'The Development of A Laser -operated Scanning Rod Gauge', Measurement and Control, Vol.4, pp.T49-T53, (April 1971).
 - [3] Yandayan, T., 'A Laser Doppler System For In-process Measurement of Diameters on CNC Turning Machines, Ph.D. Thesis, Mechanical Eng. Dept., UMIST, UK (İngiltere), (1996).
 - [4] Wigley, G., 'The Sizing of Large Droplets by Laser Anemometry', Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 11, pp. 639-642, (1978).
 - [5] Durst, F., and Zare, M. 'Laser Doppler Measurements in Two-Phase Flows', Proceedings of the LDA-Symposium Copenhagen, (1976).
 - [6] Saffman, M., Bunchave, P., and Tanger, H., 'Simultaneous Measurement of Size, Concentration and Velocity of Spherical Particles by A Laser Doppler Method', The Second International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon, (2-4 July 1984).
 - [7] Lading, L., Wigley, G., and Bunchave, P., 'Optical Diagnostics for Flow Process', Plenum, New York, NY, (1994).
 - [8] Doebelin, E. O., 'Measurement Systems Application and Design', McGraw-Hill Int., Fourth Ed., London, (1990).
 - [9] Gopel, W., Hesse, J. and Zemel, J. N., 'Sensors: A Comprehensive Survey' Vol.6, 'Optical Sensors', Wagner, E., Dandliker, R. and Spenner, K. (eds.), VCH, Cambridge, UK, (1991).
 - [10] Kullanma Kılavuzu, '5525A Laser Interferometer Systems': Service Manual, Hewlett-Packard Ltd., Cain Road, Bracknell, Berkshire RG12 1HN, UK (İngiltere), (1978).
 - [11] Sirohi, R. S. and Kothiyal, M. P., 'Optical Components, Systems, and Measurement Techniques', Marcel Dekker, New York, NY, (1991).
 - [12] Kullanma Kılavuzu, 'HP5529A, Dynamic Calibrator', Hewlett-Packard Ltd., Cain Road, Bracknell, Berkshire RG12 1HN, UK, İngiltere, (1994).
 - [13] Hariharan, P., 'Basics of Interferometry', Academic Press, London, (1991).
 - [14] Parsons, S. A. J., 'Metrology and Gauging', Macdonald & Evans, London, (1960).
 - [15] Galyer, J. F. W. and Shotbolt C. R., 'Metrology for Engineers', British Library Cataloguing Data, Martins the Printers, Fifth Ed., Berwick-upon-Tweed, UK, (1995).
 - [16] Poole, S. P. and Dowell, J. H., Applications of Interferometry to the Measurement of Gauge Blocks, Optics in Metrology, Pergamon Press, Oxford, (1960).
 - [17] Miller, L., 'Engineering Dimensional Metrology', Edward Arnold, London, (1962).
 - [18] Pugh, D. J. and Jackson, K. 'Automatic Gauge Block Measurement Using Multiple Wavelength Interferometry', Proceedings of Contemporary Optical Instrument Design, Fabrication, and Testing, Innsbruck, Austria, (17-18 April 1986).
- Ticari katolok, 'NPL-TESA Automatic Gauge Block Interferometer': Commercial

- [19] Brochure, TESA Metrology Ltd., Box 418, Halesfield 8, Telford, Shropshire TF7 4QN, UK (İngiltere), (1997).
- [20] Ticari Katolok, 'LDS Laser Distance Sensor', Commercial Brochure, Leuze Elektronik GmbH+Co., Postfach 1111, D-7311 Owen-Teck, Almanya, (1990).
- [21] Kern Swiss Nivel 20 Handbook, Leica Aarau AG Industrial Metrology, Switzerland.