
Elektrooptische Distanzmessung

Distanzmessertechnologien

*J. Hinderling
H. Ingensand*



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Literaturverzeichnis

- Burnside, C.D.: Electromagnetic distance measurements, 2nd ed., Granada, London (1982)
- Deumlich, F. Staiger R.: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, 9. Auflage, Verlag Wichmann (2002)
- Grimm, K., Frank, P., Giger, K.: Distanzmessung nach dem Laufzeitmessverfahren mit geodätischer Genauigkeit; Distomat WILD DI3000, Firmenschrift, Heerbrugg (1986)
- Joeckel R.: Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung, Wittwer Verlag, Stuttgart, (1995)
- Kahmen, H.: Elektronische Messverfahren in der Geodäsie, 2. Auflage, Wichmann Verlag (1978)
- Kahmen, H.: Vermessungskunde. Verlag Walter de Gruyter, 19. Auflage (1997)
- McCormac, J.: Surveying, 5th edition, Wiley (2004)
- RCA: Electro-Optics Handbook
- Rueger, J.M.: Electronic Distance Measurement, 3rd ed., Springer (1990)
- Scherrer, R.: Distanzreduktion bei Infrarot-Distanzmessern, Firmenschrift, Heerbrugg (1982)
- Zetsche, H.: Elektronische Entfernungsmessung, Wichmann Verlag (1979)
- Diverse Patente der Klasse G01S 7/48
Fachliteratur bei Trimble, Leica, Topcon, Sokkia, Pentax, ... (Internet)

Inhalt

1.0 Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

Fizeau Experiment

2.0 Grundlagen zu den Funktionsprinzipien EDM

Methoden der Streckenmessung
 Elektrooptische EDM-Module in Messsystemen
 Funktionsprinzip elektrooptischer Distanzmesser
 Formen der Signalmodulation und Auswertemethoden

3.0 Funktionsprinzipien

Interferometrie (Michelson, HP)
 Pulslaufzeit
 Phasen
 Chirp
 Signalanalyse

4.0 Fehler, Abweichungen, Systematiken



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit



Hippolyte **FIZEAU** 1819-1896



www.quarks.de

Eine aufwendige Versuchsanordnung, die grosses experimentellen Geschick erfordert, stammt von Fizeau aus dem Jahre 1849

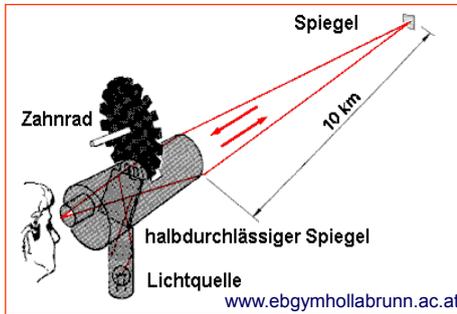
Dabei musste wegen des bekannten grossen Wertes (ca. 300000 Km/s) der Lichtgeschwindigkeit ein möglichst grosser Lichtweg von 8.3 Km hergestellt werden.



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Fizeauprinzip



Zunächst versetzt man das Zahnrad in rasche Rotation.

Während des Zunehmens der Rotationsgeschwindigkeit stellte man zuerst eine Abschwächung der Intensität des reflektierten Lichtstrahls fest, weil er durch die Zahnücke ging und dann durch den folgenden Zahn verdeckt wurde.

Aus der Zeit t , in der eine Lücke der nächsten Lücke folgte, und aus der Entfernung s des Spiegels vom Zahnrad errechnete sich die Lichtgeschwindigkeit zu

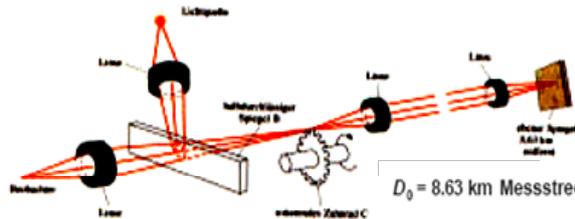
$$c = 2s / t$$

- c Lichtgeschwindigkeit
- $2s$...Weg für Hin- und Hergang
- t Zeit für Hin- und Hergang

Aus der Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit trat wieder ein Maximum an Helligkeit ein (ging durch Zahnücken). Dreht sich das Zahnrad genau um einen Zahn weiter, während der Lichtstrahl zum Spiegel und wieder zurück gelaufen ist, so fällt der Lichtstrahl durch zwei Lücken



Das Fizeau Experiment



$D_0 = 8.63$ km Messstrecke

$f_0 = 25.3$ Hz (Zahnrad)

$N_0 = 720$ (Zähne)

$$c_{\text{Fizeau}} = 3.15 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$c_{\text{heute}} = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$



Die Entwicklung elektronischer Distanzmesser

- ***Bis anfang 80er Jahre Distanzmessung > 4 Km mit Mikrowellengeräten → GPS***
- ***heute ausschliesslich mit elektrooptischen Verfahren***



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

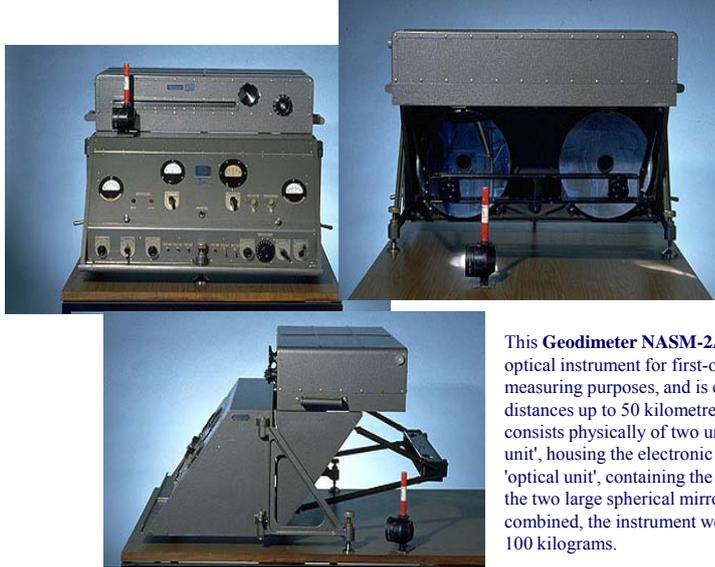
Mikrowellendistanzmesser „Tellurometer“



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Geodimeter 2A Der erste optische Distanzmesser ca. 1958



This **Geodimeter NASM-2A** is an electronic-optical instrument for first-order geodetic distance measuring purposes, and is capable of measuring distances up to 50 kilometres. The instrument consists physically of two units, the 'measuring unit', housing the electronic equipment, and the 'optical unit', containing the light conductor and the two large spherical mirrors. With the two units combined, the instrument weighs approximately 100 kilograms.



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Geodimeter 4 und 8



The 4D used a high-pressure mercury vapor lamp rather than a common tungsten light bulb as its light source. First manufactured in 1963, the "D" in its designation indicated that it could be used in daylight. The Coast and Geodetic Survey (C&GS) used this model throughout the 1960s.

In 1966, the 4D was modified to use a laser as its light source, in order to increase its range in moderate haze and to measure longer distances in bright sunlight. C&GS technician George Lesley replaced the mercury vapor lamp with a three-milliwatt helium-neon gas laser. The modified 4D was designated "4L," and replaced the 2A and 4D models on the Transcontinental Traverse. Later, the three-milliwatt laser was replaced with a six-milliwatt laser and the model was renamed "4L 6A."

As a result of the technology developed by C&GS, AGA produced the first commercially available electronic distance measurement instrument with a laser light source, which it designated Model 8. These models were also used in Transcontinental Traverse observations.

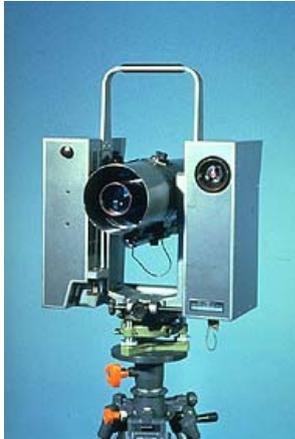
www.noaa.gov



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Entwicklungen



Geodimeter 6A

1973



HP

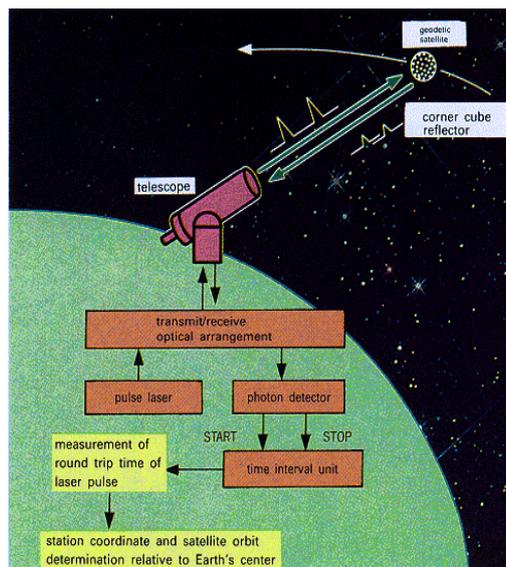
1980



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Lunar Laser Ranging Wettzell



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Mobile Satellite Laser Ranging Systeme



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

WILD DI 10 (Der erste Aufsatzdistanzmesser) 1978



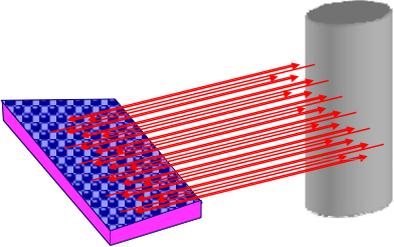
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

3D Sensor *A new Technology in "One-Shot" 3-D Data Capture*



RT Close Range Scanning

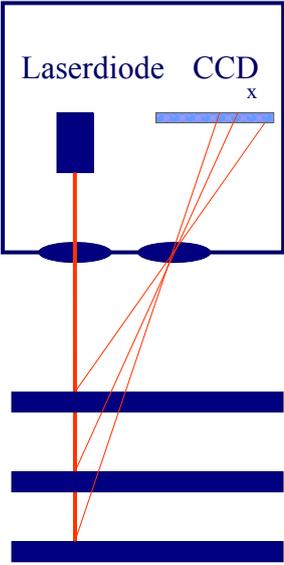


CMOS Chip
160 x 124 pixel array

geomETH
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Triangulationstaster



Laserdiode CCD_x

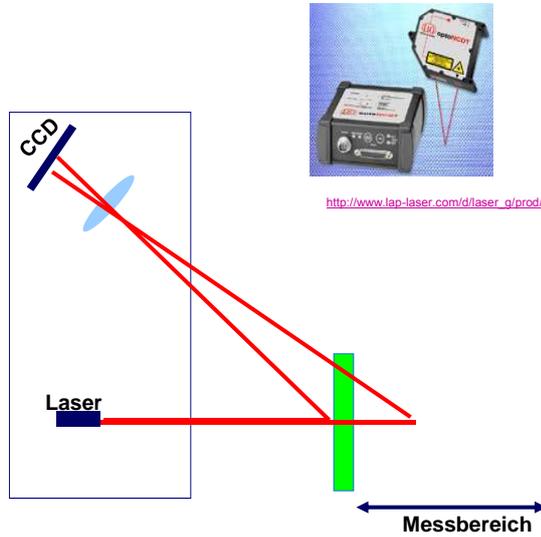
$D=F(x)$

D Messbereich

geomETH
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

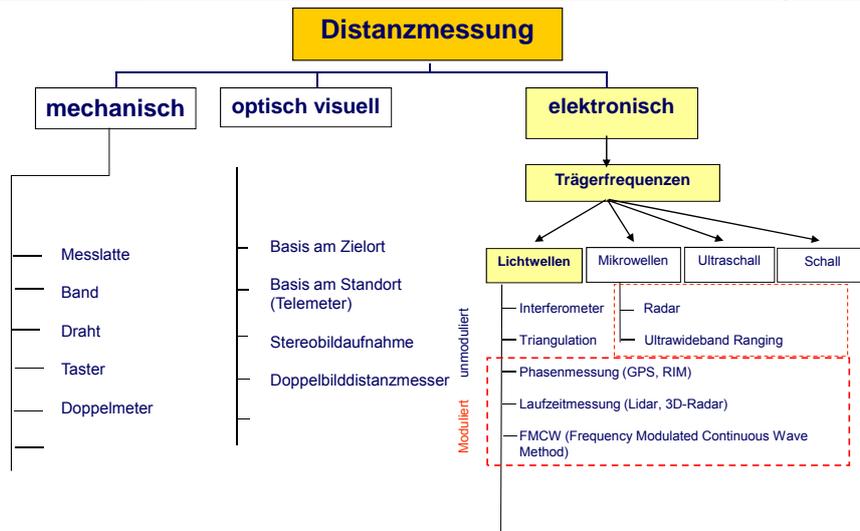
Geometrische Distanzbestimmung: Triangulationssensor



http://www.lap-laser.com/d/laser_g/prod/mess.html

Triangulationssensoren senden einen Laserstrahl aus, der je nach Abstand vom Messobjekt in unterschiedlichem Winkel reflektiert wird. Der reflektierte Strahl wird über Umlenkspiegel und Optik auf eine CCD oder PSD abgebildet

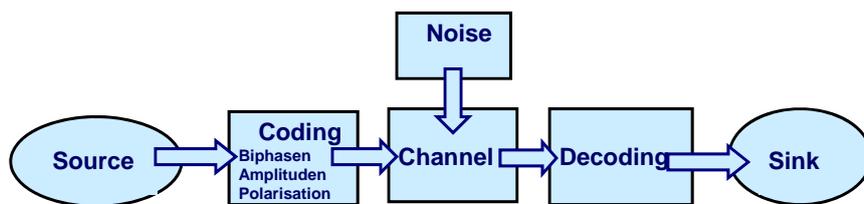
2.1 Methoden der Distanzbestimmung



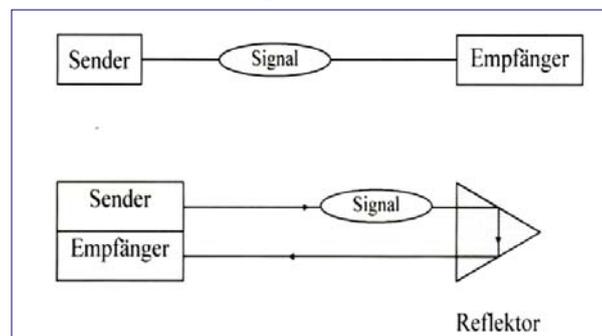
EDM für Geodätische Anwendungen

- *Informationsübertragung und Morphologie*
- *Grundaufbau*
- *Trägerfrequenzen*
- *Reichweite (Absorption, Dispersion, Lichtquellen)*
- *Augensicherheit*

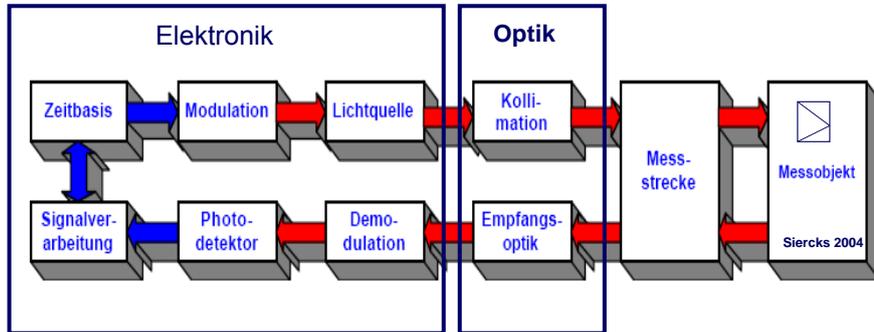
Der Informations Transfer



Konfigurationen bei EDM



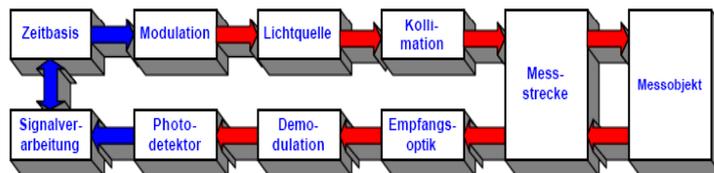
Distanzmessung (Komponenten, Übertragungsmedium, Messobjekt)



Die maximale Messdistanz hängt ab von:

Grenzen

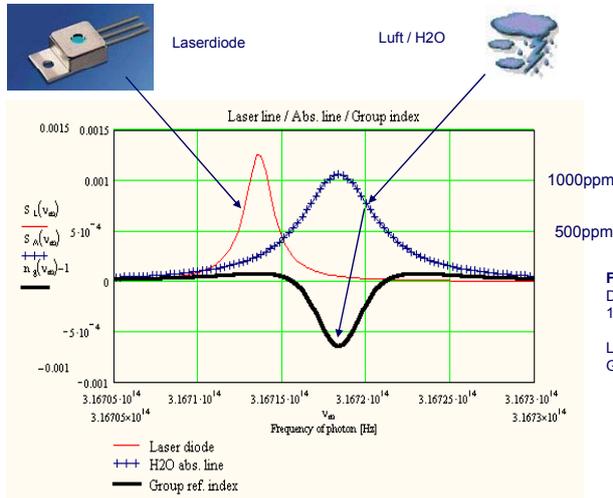
- | | |
|--|--------------------------------------|
| Energie im Sende-Strahl | → Signalquelle / Augensicherheit |
| Divergenz des Sendestrahles | → Beugung |
| Atmosphärische Bedingungen | → Streuung, Dispersion |
| Eigenschaften des Ziels | → Reflektivität |
| Umgebende Lichtquellen/Streulicht | → Störsignal, Rauschen |
| Empfängerempfindlichkeit | → Apertur, Empfängerschaltung |
| Messmethode | → Nutzungsgrad der Signalinformation |
| Geforderte Messgenauigkeit | → Zeitbasis, Messzeit |



2. Grundlagen zu den Funktionsprinzipien EDM

Beispiel: Gruppenindex einer lokalen Absorptionslinie von Wasserdampf bei der Wellenlänge $\lambda = 946.55081570$ nm.

x-Achse: Frequenz der optischen Strahlung
y-Achse: Skala gilt für den Gruppenbrechungsindex.

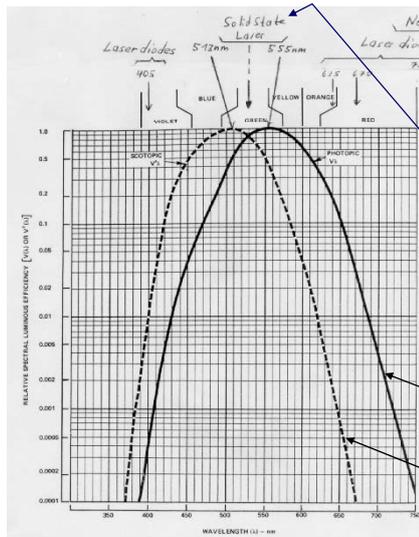


Fazit:
Distanzmessabweichung bis gegen 100ppm (= +/- 100mm auf 1km) möglich.

Literatur: Galkin, Tatevian; Journal of Geodesy (1997) 71: 680-684.

Grundlagen zu den Funktionsprinzipien EDM

Relative spektrale Augenempfindlichkeit und Laser



Aufgelistet sind Wellenlängen von typischen Lasern verwendet in geodätischen Distanzmessern.

Standard Strahlungsquelle:
Halbleiter-Laser

Seit 2000:
High-Power Mikro-Chip Laser



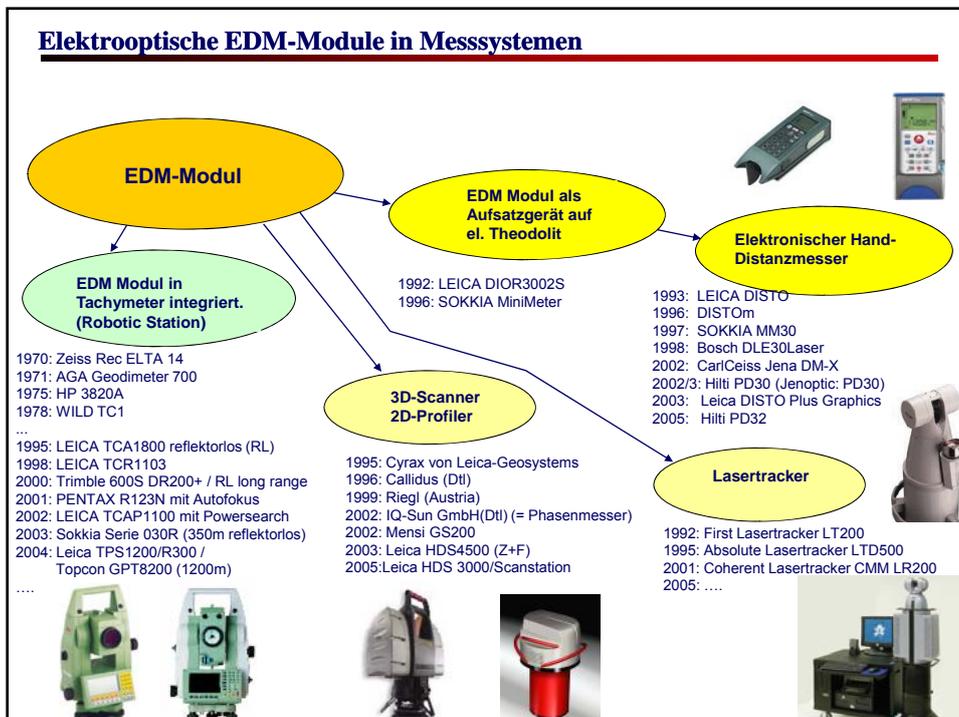
Tagsehen

In Zukunft:
Gepulste Faserlaser

Dämmerungssehen

Relative spectral luminous efficiency as a function of wavelength. The relative response of the human eye to radiation of a given wavelength.

Formen der Signalmodulation und Auswertemethoden	
Auswertemethoden (empfängerseitig)	EDM-Technologie
Zeitmessschaltung (Start/Stopp eines Einzelimpulses):	Time-of-Flight
Korrelationsempfänger von Zufallssignalfolgen (PN-Code)	Spread Spectrum
Hochfrequenzabtastung von Signalimpulsen Möglichkeit der Signalsummation (Signal-Sampling)	Time-of-Flight mit digitaler Signalabtastung und Aufsummierung
Phasenvergleichsschaltung, Phasenvergleichsalgorithmus	Phase-Meter - Phasenvergleichsschaltung
Nullphasenabgleich, Nullphasenmessung durch Frequenzanpassung -> Frequenzmessung	Fizeau-Principle
Frequenzmodulation, lineares Frequenz-Chirping (=Frequency Modulated Continuous Wave)	FMCW
System Analyzer: ähnlich Phasenmesser aber mit ausgewähltem Set an Modulationsfrequenzen und „Laufzeitmesserauswertung“	Leica Pinpoint



EDM Messtechnologien (Übersicht)

Messung mit der unmodulierten Trägerwelle

Michelson Interferometer

Pulslaufzeitmessung (TOF)

Laserscanner, Handdistanzmesser, GPS Codemessung...

Phasenmessung mit Amplitudenmodulation (AMCW)

Die meisten geodätischen EDM/Laserscanner (ZF), GPS

Nullphasenmessung und Polarisationsphasenmodulation (PMCW)

Mekometer

Frequenzmodulation der optischen Welle (O-FMCW)

Laserradar

Gemischte Formen

Leica Pinpoint



Interferometrie

Messung mit der unmodulierten Trägerwelle mit kohärentem Licht

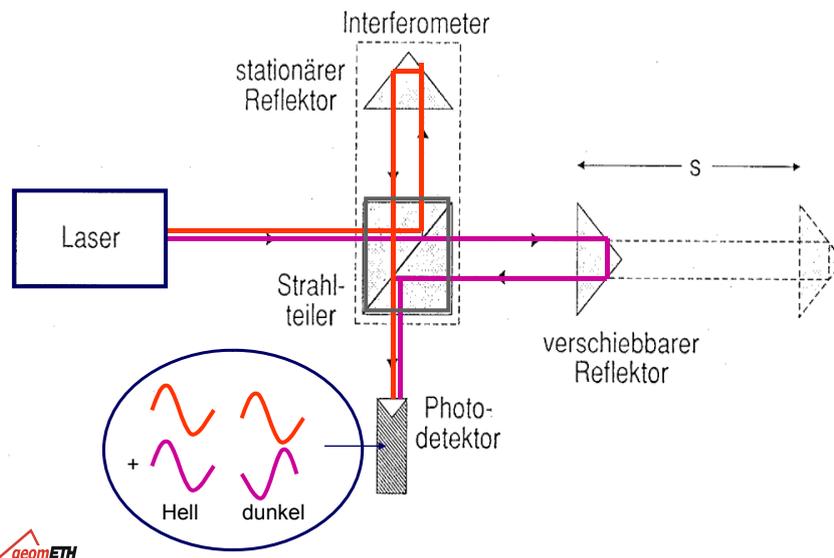
Interferometertypen

-Michelson

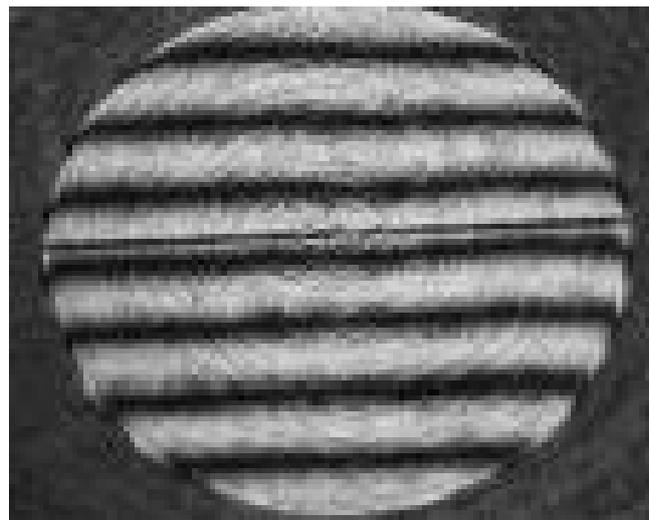
-2 Frequenz Interferometer HP



Interferometer (Michelsonsontyp) keine Modulation, kohärentes Licht



Teilerwürfel Interferenzen



Homodyn (aus Wiki)

- Der Begriff *homodyn* in der optischen Interferometrie drückt aus, dass die Referenzstrahlung (der lokale Oszillator) aus der gleichen Quelle wie das Signal, jedoch vor dessen Modulierung, gewonnen wird. Im Fall eines Streuexperiments mit einem Laser zum Beispiel, wird der Laserstrahl in zwei Teile geteilt.
- Einer ist der lokale Oszillator, während der andere auf das zu untersuchende System gelenkt wird.
- Das gestreute Licht wird dann mit dem des lokalen Oszillators im Detektor gemischt.
- Diese Anordnung hat den Vorteil, dass sie unempfindlich gegenüber Schwankungen in der Frequenz des Lasers ist.



Laserinterferometrie Distanzmessung durch Interferenzen

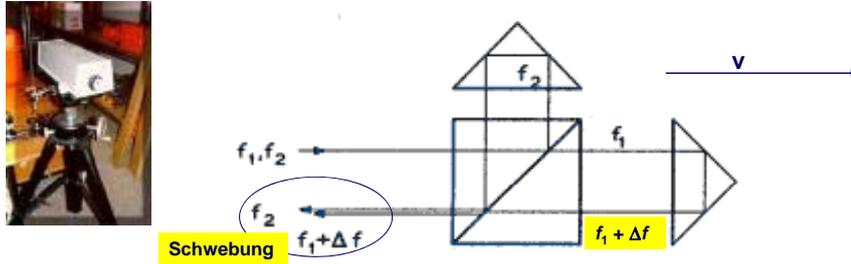
$$D = \frac{\lambda}{2} \cdot N \quad N : \text{Anzahl Wellen}$$

Die Auflösung dieses Verfahrens beträgt also $\lambda/2$ und damit bei $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$ etwa $0.3 \mu\text{m}$.

Diese Auflösung lässt sich jedoch durch elektronische Interpolation weiter steigern.



Zwei-Frequenz Interferometrie HP Interferometer



Schwebung
2. Strahl ist leicht
versetzt

Doppler-Messprinzip

Fährt ein Objekt mit der Geschwindigkeit v radial gegen eine Referenzstation, die einen Strahl mit Frequenz f_1 aussendet, so hat die am Objekt reflektierte Welle infolge des Dopplereffekts die Frequenz $f_1 + \Delta f$ mit:

$$\Delta f = 2f_1 v/c \quad v: \text{Objektgeschwindigkeit} \quad c: \text{Lichtgeschwindigkeit}$$



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

HP Interferometer

Die Differenz Δf lässt sich als Frequenz der Schwebung messen, die bei der Überlagerung von ausgesandter und reflektierter Welle entsteht. Eine Frequenz lässt sich durch Auszählen der Anzahl Perioden pro Zeiteinheit messen:

$$\Delta f = p / \Delta t \quad p: \text{Anzahl Perioden der Dopplerfrequenz im Zeitintervall } \Delta t$$

$$v = \frac{\Delta f \cdot c}{2f_1} = \frac{\Delta f \cdot \lambda_1}{2} = \frac{p \cdot \lambda_1}{2 \cdot \Delta t} \quad \lambda_1 = \frac{c}{f_1}$$

Da der Weg s gleich dem Integral der Geschwindigkeit v über die Zeit ist, gilt:

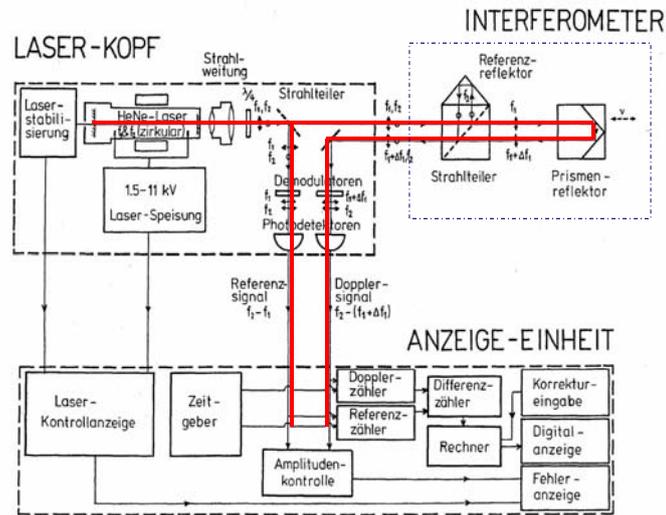
$$s = p \cdot \lambda_1 / 2$$



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

HP Zweifrequenzinterferometer (Dopplereffekt)



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Längen-Interferometer

Hersteller	Reichweite	Geschwindigkeit	Auflösung	Meßrate
	[m]	[m/s]	[nm]	[Hz]
Hewlett Packard 5528A	40	0,71	15 - 2,5	20 - 1500
Zygo AXIOM	± 5,3	1,80	2,5	500 - 2000
Spindler&Hoyer ZLI	20	1,20 - 0,01	80 - 1,0	
Metra-Blasko	30	1,00	20,0	
Renishaw	40	1,00	1	10 - 5000
Feinmeß LMS 200	25	0,4	100 - 10	
Zeiss Jena ZLM 300	20	6,4 - 1,6	10 - 2,5	bis 20000
Nanomach Mach-1	5 - 20	1,0	80 - 10	

Tabelle 5.9 Interferometersysteme [SCHWARZ, 1995]



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

EDM Messtechnologien (Übersicht)

Messung mit der unmodulierten Trägerwelle

Michelson Interferometer

Pulslaufzeitmessung (TOF)

Laserscanner, Handdistanzmesser, GPS Codemessung...

Phasenmessung mit Amplitudenmodulation (AMCW)

Die meisten geodätischen EDM/Laserscanner (ZF), GPS

Nullphasenmessung und Polarisationsphasenmodulation (PMCW)

Mekometer

Frequenzmodulation der optischen Welle (O-FMCW)

Laserradar

Gemischte Formen

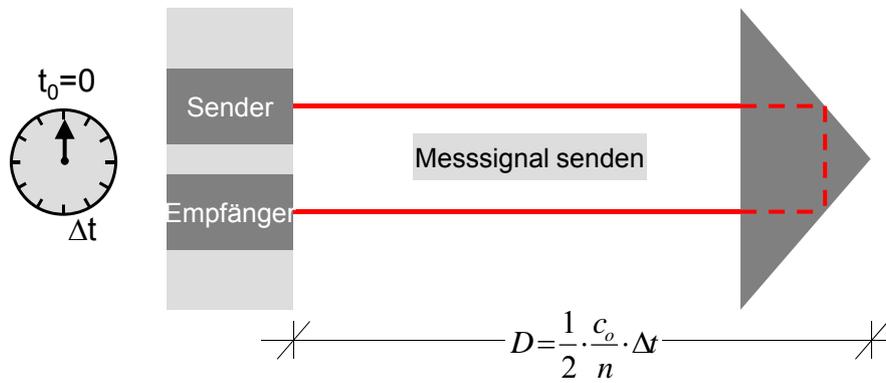
Leica Pinpoint



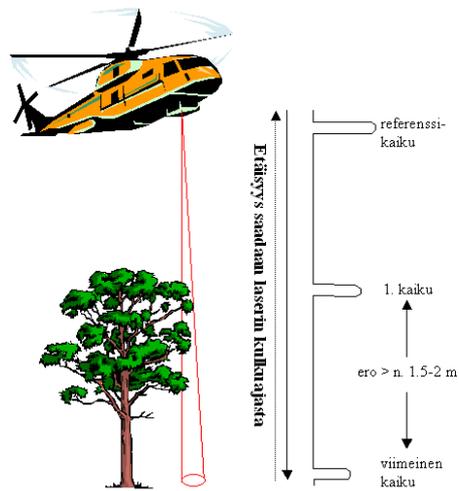
Pulslaufzeitverfahren



Impulsmessverfahren

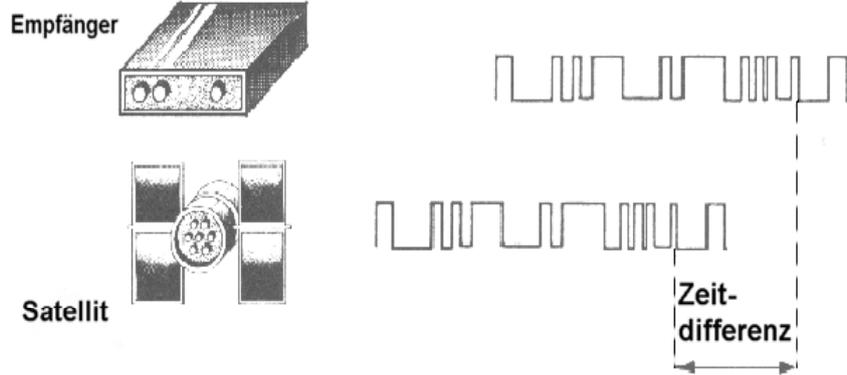


Pulslaufzeitverfahren First --Last pulse Detektion



http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/13/laser_periaate_pr.gif

Laufzeitmessung bei GPS (Korrelationsverfahren/Spread Spektrum)



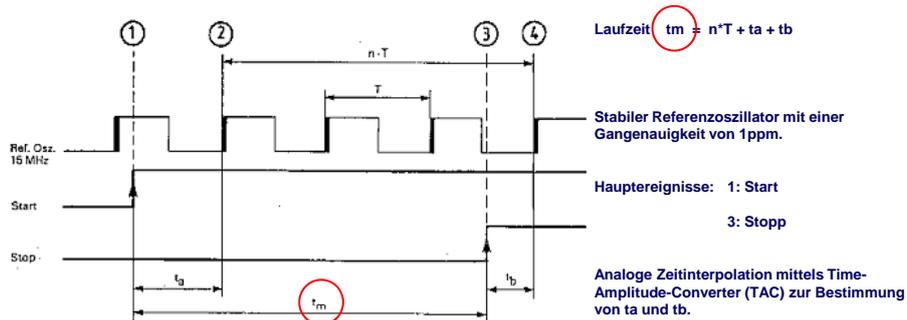
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Funktionsprinzip des Laufzeitmessers

Zeitmess-Schaltung mit analoger Zeitinterpolation (Leica DI3000)

Triggerereignisse:



Status heute:

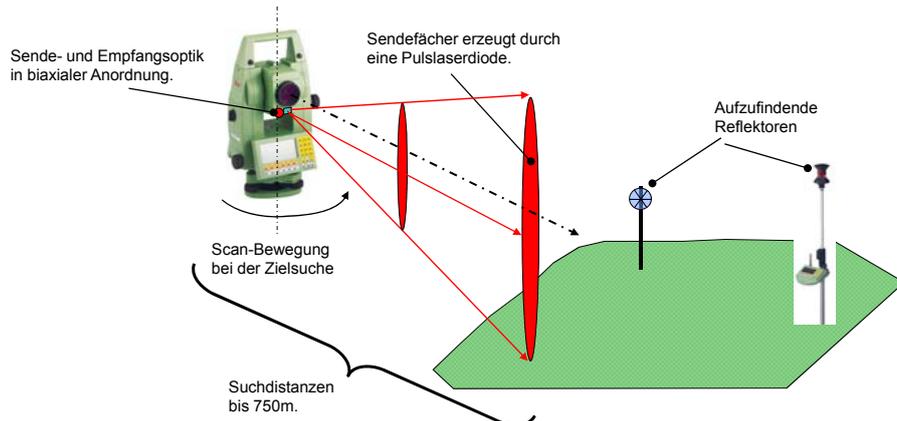
- 1-Chip-Lösungen (= Time Digital Converter)
- Zeitliche Abtastung mit 16Bit digitalisiert
- Least significant bit (LSB) = 8mm Auflösung (=1psec)
- => $8\text{mm} \cdot 2^{16} = 524\text{m}$ Eindeutigkeit (Maximal Range).

Funktionsprinzip des Laufzeitmessers (vgl. Scannen)

PowerSearch von LEICA als Beispiel eines Laufzeitmessers

PowerSearch ist ein Sensor zum Suchen und Lokalisieren von Retroreflektoren, um das Zielobjekt aber eindeutig zu erkennen benutzt die Vorrichtung das Prinzip eines Laufzeitmessers.

Funktion: Zielsuche mittels Rotation um eine vertikale Achse eines ebenfalls vertikalen Sendefächers. Wird ein Signal von einem Zielobjekt reflektiert so wird dies vom Detektor empfangen und an eine Auswerteeinheit zur Merkmalsanalyse weitergegeben. Ist ein Reflektor als Zielobjekt erkannt, so wird der Scan-Vorgang abgebrochen und das aufgefundene Ziel präzise angefahren.



Funktionsprinzip des Laufzeitmessers (Scannen mit vertikalem Fächer)

Signalauswertung im Empfangsteil mit Zielerkennung

Der zurückgeworfene Laserimpuls wird mit 50MHz digitalisiert (abgetastet) und einer Auswerteeinheit (RISC-Prozessor & FPGA) zugeführt. Gemessen werden Signalamplitude, Distanz und horizontaler Scan-Winkel. Während des Scan-Vorgangs entsteht dadurch eine 3 dimensionale Landschaft. Die Peaks stellen aufgefundene Zielobjekte dar.

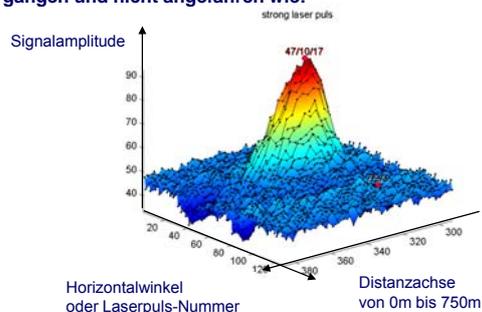
Merkmale des Empfangssignals zur Erkennung eines Zielobjekts:

- Pulshöhe → Reflexionsgrad
- Pulsbreite → Zielausdehnung, Beispiel: Strassenschilder
- Pulslänge → Harte Ziele / weiche Ziele wie Längsreflexe an Tunnelwänden

Powersearch identifiziert ein aufgefundenes Zielobjekt durch Vergleich der gemessenen Merkmale mit intern abgelegten Toleranzwerttabellen.

Fremdreflexe werden dadurch übergangen und nicht angefahren wie:

- Strassenschilder
- Autoscheinwerfer
- Fensterscheiben
- Sonnenreflexe
- Nebel oder Rauchfahnen



EDM Messtechnologien (Übersicht)

Messung mit der unmodulierten Trägerwelle

Michelson Interferometer

Pulslaufzeitmessung (TOF)

Laserscanner, Handdistanzmesser, GPS Codemessung...

Phasenmessung mit Amplitudenmodulation (AMCW)

Die meisten geodätischen EDM/Laserscanner (ZF), GPS

Nullphasenmessung und Polarisationsphasenmodulation (PMCW)

Mekometer

Frequenzmodulation der optischen Welle (O-FMCW)

Laserradar

Gemischte Formen

Leica Pinpoint



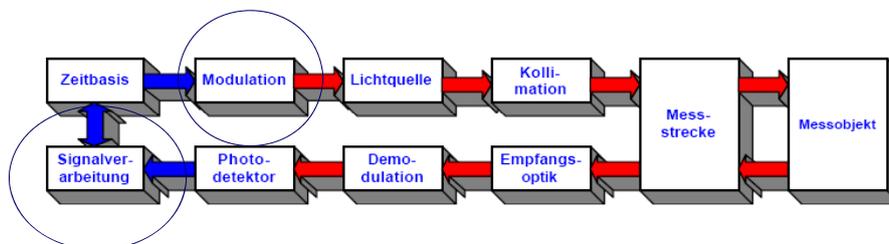
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Phasenmessverfahren

- Modulationsverfahren

- Auswerteverfahren



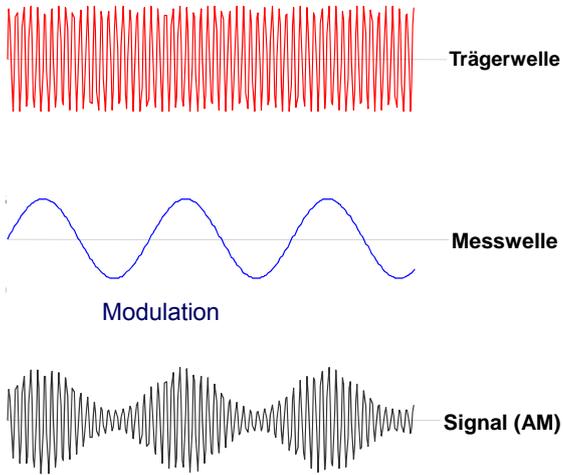
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Phasenvergleichsverfahren

9.11 Elektronische Distanzmessung

Beim Phasenvergleichsverfahren wird eine kontinuierlich ausgestrahlte (**kurzwellige**) **Trägerwelle** eine **langwellige** sinusförmige **Messwelle** aufmoduliert. Die aufmodulierte Welle dient dann als Masseinheit für die Streckenmessung.



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

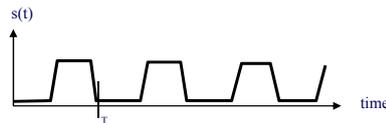
ETH Zürich

Grundlagen zu den Funktionsprinzipien EDM

Formen der Signalmodulation und Auswertemethoden

Modulationsformen des Sendesignals $s(t)$:

Phasenmessung mit rechteckförmigem Impulszug:



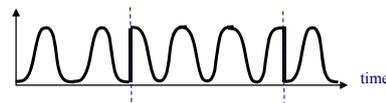
Trägersignal rechteckig:
Bps: Leica TD5005

Phasenmessung mit Burst-Modulation:



Bsp: Leica: TC800

Phasenmessung mit Phasenumtastung des Trägers:
(PSK=Phase Shift Keying)



Bsp: Leica TPS2000



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Phasenvergleichsverfahren

Sender
Empfänger

λ_M

$d\lambda$

$D = \frac{1}{2} \left(N \cdot \lambda + \frac{\varphi}{2\pi} \right)$

Ambiguities Restphase

geomETH
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand ETH Zürich

Phasenvergleichsverfahren 9.11 Elektronische Distanzmessung

Ein eindeutiges Ergebnis für die Streckenmessung liegt dann vor, wenn die Masstabswellenlänge λ grösser als die zu messende doppelte Maximaldistanz ist.

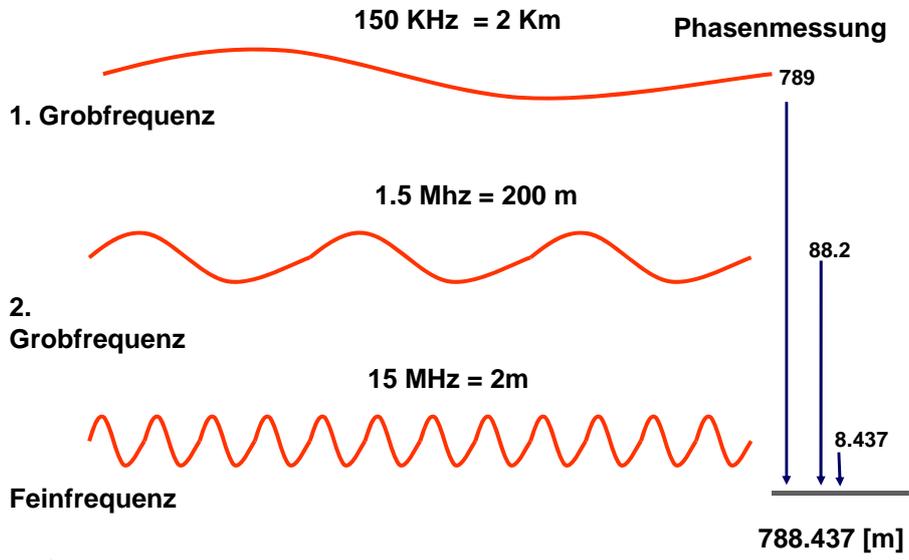
Sender
Empfänger

$\frac{\lambda_M}{2} > D$

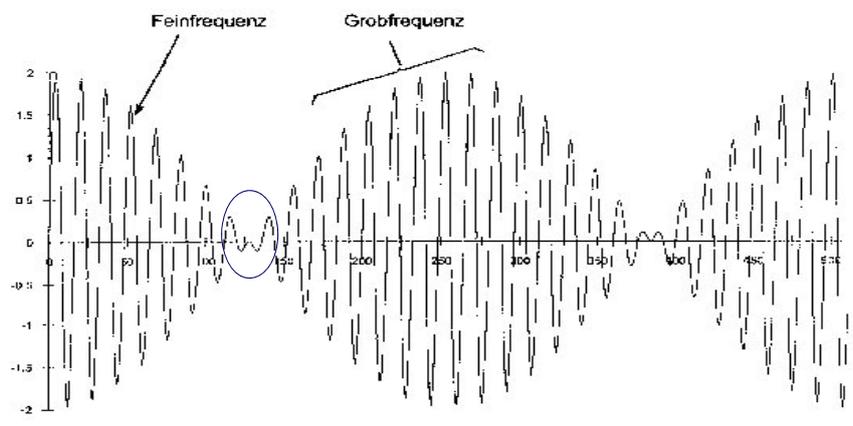
D

geomETH
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand ETH Zürich

Bestimmung der Vielfachen (Ambiguities)

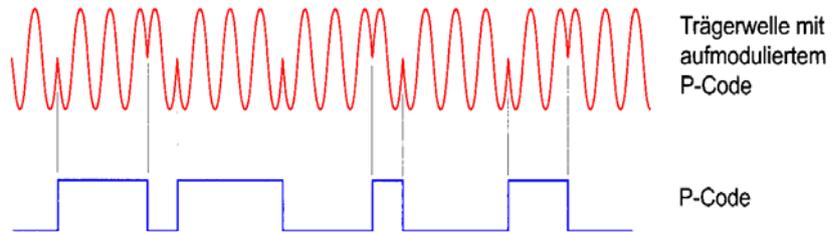


Kombination Amplitudenmodulation und Biphasenmodulation



Biphase-Modulation der Trägerfrequenz, Kombination von Modulationen

Zur eigentlichen Distanzmessung werden auf beiden Trägerfrequenzen Codes durch Biphasenmodulation aufmoduliert,



Phasenmessung: Multimodulation des Z&F Scanners

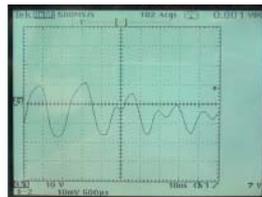


Abb. 4-47 Eindeutigkeitsbereich „far“, Periode von 24 ns (41.67 MHz) feststellbar.

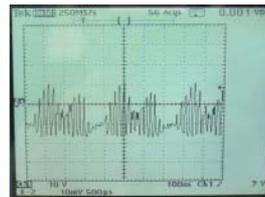


Abb. 4-48 Eindeutigkeitsbereich „far“, Perioden von 180 ns (5.56 MHz) und 360 ns (2.78 MHz) sind feststellbar.

Bei der Untersuchung des Eindeutigkeitsbereichs „close“ kann beobachtet werden, dass neben dem Feinmasstab nur der Grobmasstab „close“ der Trägerwelle aufmoduliert wird (vgl. Abb. 4-50). Dieser ist entscheidend für die beschränkte Distanzmessung bis 25.2 m.

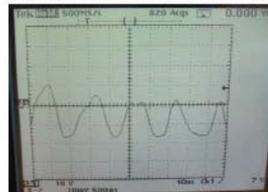


Abb. 4-49 Eindeutigkeitsbereich „close“ mit Periode von 24 ns (Frequenz: 41.67 MHz).

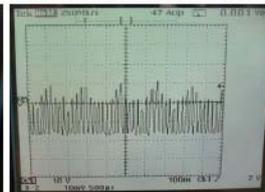


Abb. 4-50 Eindeutigkeitsbereich „close“ Nur Aufmodulation des Grobmasstabs „close“ (Periode: 180 ns, Frequenz: 5.56 MHz).



EDM Messtechnologien (Übersicht)

Messung mit der unmodulierten Trägerwelle

Michelson Interferometer

Pulslaufzeitmessung (TOF)

Laserscanner, Handdistanzmesser, GPS Codemessung...

Phasenmessung mit Amplitudenmodulation (AMCW)

Die meisten geodätischen EDM/Laserscanner (ZF), GPS

Nullphasenmessung und Polarisationsphasenmodulation (PMCW)

Mekometer

Frequenzmodulation der optischen Welle (O-FMCW)

Laserradar

Gemischte Formen

Leica Pinpoint



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

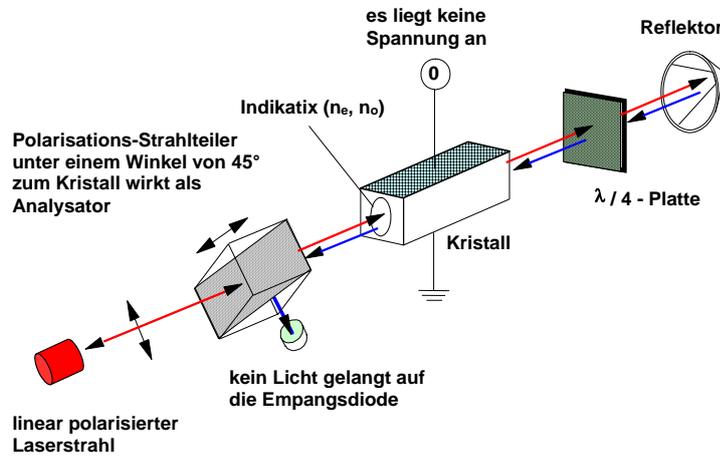
Mekometer



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

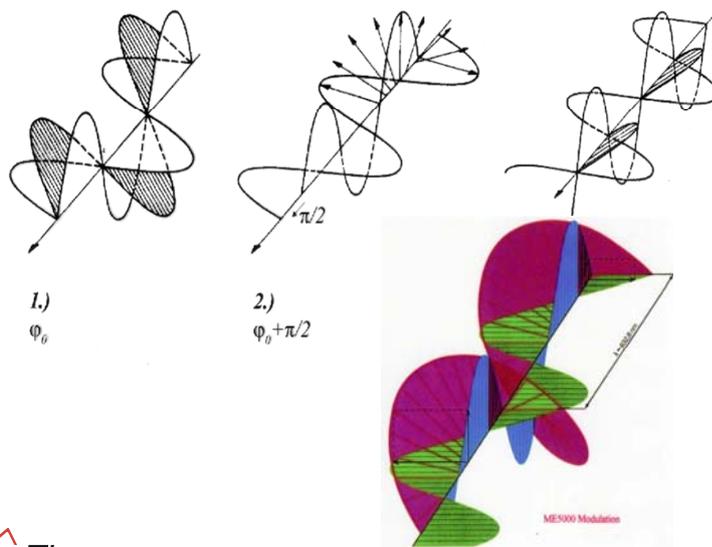
Polarisationsmodulation (Mekometerprinzip)



Aus Diss. Loser ETHZ 2001



Polarisationsmodulation und Nullphasendetektion (Mekometer)



EDM Messtechnologien (Übersicht)

Messung mit der unmodulierten Trägerwelle

Michelson Interferometer

Pulslaufzeitmessung (TOF)

Laserscanner, Handdistanzmesser, GPS Codemessung...

Phasenmessung mit Amplitudenmodulation (AMCW)

Die meisten geodätischen EDM/Laserscanner (ZF), GPS

Nullphasenmessung und Polarisationsphasenmodulation (PMCW)

Mekometer

Frequenzmodulation der optischen Welle (O-FMCW)

Laserradar

Gemischte Formen

Leica Pinpoint



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Frequenzmodulation der optischen Welle (O-FMCW) Chirp

***bekannt aus Radartechnik
Einsatzgebiet: Laserscanning***

Metricvision



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

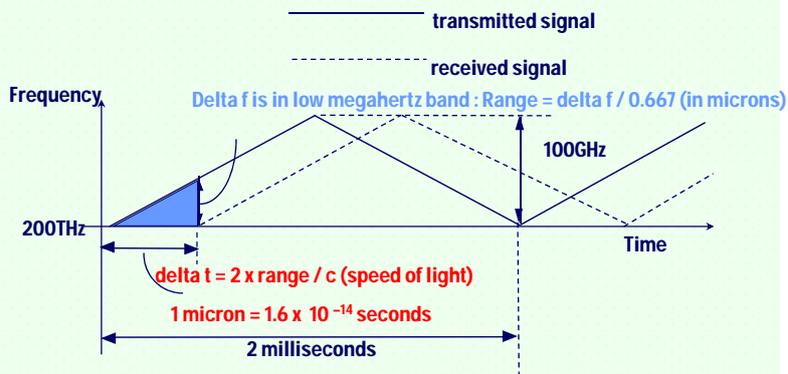
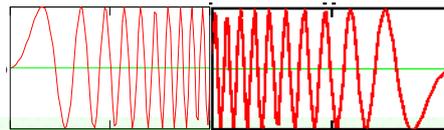
Frequenzmodulation (FM)



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

FMCW Distanzmesser (Chirp Technologie)



Vrgl. Radartechnologie



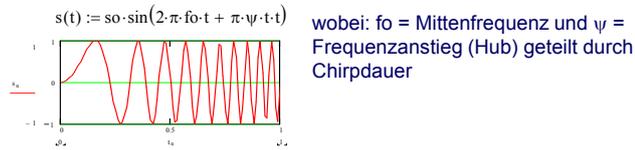
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Modulation des Trägers FMCW Laserradar

Frequenzmodulation der optischen Welle(O- FMCW)

periodisch wiederholenden linearen Frequenzchirp belegt.



Obere Hälfte der nachfolgenden Grafik zeigt:
den Zeitverlauf der momentanen Frequenz $f_s(t)$ des Sendesignals $s(t)$ und der Frequenz $f_e(t)$ des Empfangssignals $e(t)$. Die Frequenz wird dabei wiederholt linear hochgefahren. Das Zwischenfrequenzsignal $g(t)$ entsteht durch die Schwebung bei der Überlagerung von Sende- und Empfangssignal, $g(t)$ hat in diesem Fall während des Chirps konstante Frequenz f_{ZF} .
Untere Hälfte der nachfolgenden Grafik zeigt:
den Zeitverlauf der momentanen Frequenz $f_{ZF}(t)$ des Zwischenfrequenzsignals $g(t)$.

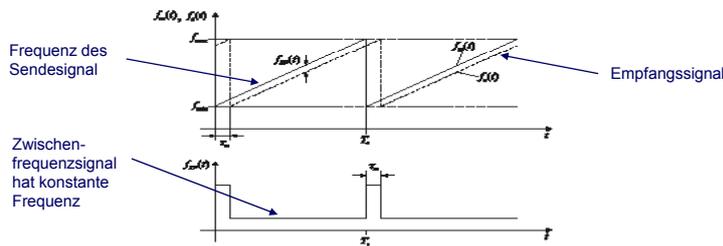


Abb. 4: Zeitverlauf der Momentanfrequenz von Sende-, Empfangs- und Zwischenfrequenzsignal

O- FMCW-Distanzmessers

Distanzmess-Prinzip:

Das vom Zielobjekt reflektierte Empfangssignal $e(t)$ ist um die Signallaufzeit verzögert, beim simultanen Vergleich mit dem Sendesignal $s(t)$ entsteht dabei ein Dopplereffekt. Dieser äußert sich als Zwischenfrequenz, denn das momentan emittierte Signal hat im Vergleich zum Empfangssignal, welches vor einer Laufzeit (t_0) ausgesandt wurde, eine höhere Frequenz.

Die Zwischenfrequenz ist ein Grobschätzer für die Distanz.

Auch gibt es einen Feinschätzer für die Distanz, welcher theoretisch die hohe Genauigkeit eines Phasennessers erzeugt.

Das Zwischenfrequenzsignal wird beispielsweise mittels eines sogenannten Homodyne-Mischers gewonnen. Dieser multipliziert das Sendesignal mit dem Empfangssignal und am Ausgang entsteht das Zwischenfrequenzsignal $g(t) = s(t) \cdot e(t)$

$$g(t) := \frac{s_0}{2} \cdot \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \psi \cdot t_0 \cdot t + 2 \cdot \pi \cdot \left(f_0 - \frac{\psi \cdot t_0}{2} \right) \cdot t_0 \right]$$

wobei die gesuchte Signallaufzeit bedeutet.

Neben dem Homodyne-Prinzip ist auch das Heterodyne-Prinzip möglich. Auf dieses Empfänger-Prinzip wird an dieser Stelle nicht eingegangen (Wesentliches siehe Kapitel: "Phasennesser").

Distanzberechnung:

Die Zwischenfrequenz steckt im ersten Phasenterm des cos:

$$\rightarrow f_{ZF} = -\psi \cdot t_0$$

Auch der zweite Phasenterm des cos wird ausgewertet:

$$\rightarrow \text{Phi}_{ZF} = \pi \cdot t_0 \cdot (\psi \cdot t_0 - 2 \cdot f_0)$$

f_{ZF} und Phi_{ZF} sind Messgrößen und werden dem Zwischenfrequenzsignal entnommen.

Die erste Gleichung ergibt eine Grobschätzung der Laufzeit:

$$\rightarrow t_0 = -f_{ZF} / \psi$$

Die zweite Gleichung liefert das endgültige Resultat für die Laufzeit.

$$t_{0 \text{ fein}} = \frac{f_0}{\psi} - \frac{f_0 \cdot f_0}{\psi \cdot \psi} + \frac{\text{Phi}_{ZF} - 2 \cdot \pi \cdot k}{\pi \cdot \psi}$$

Die ganzzahlige Größe k ist so zu wählen, dass $t_{0 \text{ fein}}$ möglichst nahe beim Grobschätzwert zu t_0 liegen kommt.

Mit der Phasennessung von Phi_{ZF} sollte theoretisch die Genauigkeit eines klassischen Phasennessers erreichbar sein.

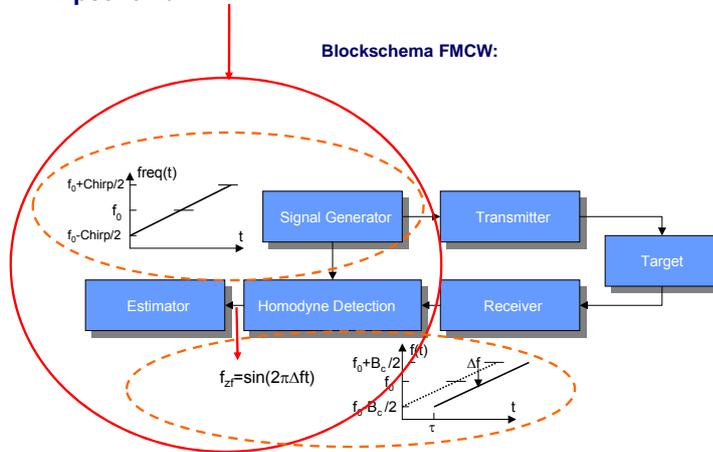
Genauigkeitsbegrenzend sind vor allem Nichtlinearitäten der chirp-artigen Frequenzmodulation.

In der Praxis werden Frequenz- und Phasennessung nicht direkt gemessen sondern mittels der **Fouriertransformierten** des Mischersignals $g(t)$ algorithmisch berechnet. Es braucht daher weder eine Frequenzmessvorrichtung noch eine klassische Phasennessvorrichtung.

5. Funktionsprinzip des FMCW-Distanzmessers

5.3 Prinzipschema

Blockschema FMCW:



Beispiel:

Mittenfrequenz $f_0 = 250\text{MHz}$
 Frequenzhub $B_c = 50\text{MHz}$
 Messzeit $T_c = 5\text{msec}$
 Laufzeit $t_0 \Rightarrow \text{Distanz}$

EDM Messtechnologien (Übersicht)

Messung mit der unmodulierten Trägerwelle

Michelson Interferometer

Pulslaufzeitmessung (TOF)

Laserscanner, Handdistanzmesser, GPS Codemessung...

Phasenmessung mit Amplitudenmodulation (AMCW)

Die meisten geodätischen EDM/Laserscanner (ZF), GPS

Nullphasenmessung und Polarisationsphasenmodulation (PMCW)

Mekometer

Frequenzmodulation der optischen Welle (O-FMCW)

Laserradar

Gemischte Formen

Leica Pinpoint

System Analyzer

Vom Phasemesser -> zum System Analyzer

Messprinzip:

1. Keine niedrige Frequenzen, sondern nur hohe Frequenzen im 100MHz-Bereich, damit umfasst jede Teilmessung Distanzinformationen mit sub-mm Auflösung.
2. Aussenden ultrakurzer Laserpulse mit < 1nsec Pulsbreite im ≥ 100MHz-Takt. Dadurch werden ebenfalls höherharmonische Signalanteile mit Frequenzen bis gegen 1000MHz simultan ausgesendet.
3. Empfangen der reflektierten Laserpulssignale mit Frequenzanteilen bis gegen 500MHz.
4. Die Anzahl der vermessenen Laserpulsfrequenzen wird nach der Stärke des Empfangssignals gesteuert. Bei starkem Empfangssignal genügen bereits 5 Frequenzen. Bei schwachem Empfangssignal umfasst das Frequenzsampling mehr als 10 Laserpulsfrequenzen.
5. Nach abgeschlossener Messung wird ein impulsartiges Zeitsignal berechnet, welches die Laufzeit (Time-of-Flight) des Systems mit hoher Genauigkeit beinhaltet. Das Time-of-Flight-Signal wird aus den Analysedaten rekonstruiert. Hier ein Beispiel:

$$\text{Timesignal}(t) := \text{function} \left(\sum \text{Amplitude}, \sum \text{Timedelay} \right)$$

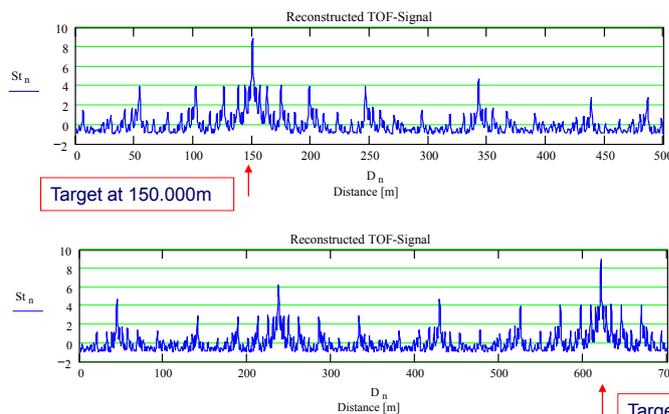
Insgesamt werden alle gemessenen Amplituden und Timedelays bei den k Modulationsfrequenzen in diese „Cost Function“ eingesetzt. Amplituden und Timedelays (Phasen) sind die Zwischenergebnisse aus den vorangegangenen Einzelmessungen (Systemanalyse), welche bei den k Modulationsfrequenzen inklusive deren Höherharmonischen bestimmt wurden.

Das Zeitsignal (Time-of-Flight-Signal) hat ein **impulsartiges** Aussehen ähnlich wie bei einem **Laufzeitmesser**.

Vom Phasemesser -> zum System Analyzer

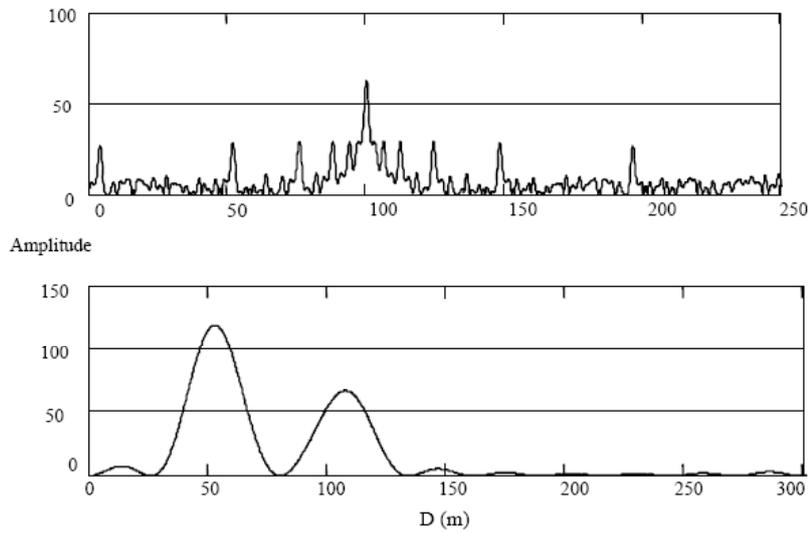
An illustration of the „pulsed time-of-flight signal“ for the case of a single target:

The calculated time-of-flight signal looks like the figure below. The targets are easily recognized at a distance of 150.000m or at a distance of 620m, respectively.



Einer von vielen Vorteilen: Kein zyklischer Phasenfehler.

System Analyzer



geomETH
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

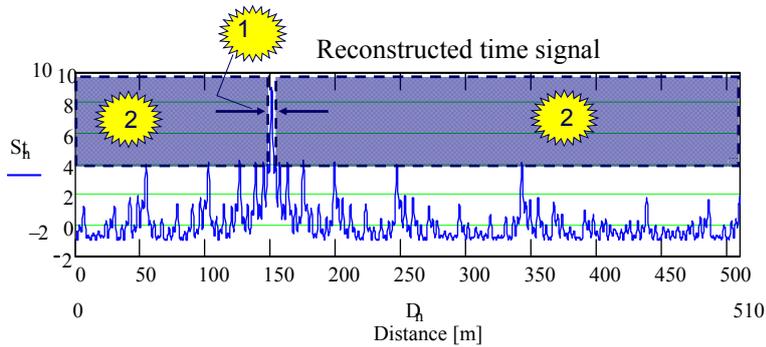
ETH Zürich

Vom Phasemesser -> zum System Analyzer

Modulation-Frequency Concept of the System Analyzer TPS1200-R300:

It has more than one concept, the one for reflectorless is designed such that the time-of-flight signal is characterized by the properties shown in the figure below :

- #1: Tight signal peak at the target distance and
- #2: No peaks within the gray shaded areas



Leistungssteigerung im Vergleich zu herkömmlichen Phasemessern:

Im Vergleich zum Phasemesser sind mit diesem Prinzip 4..6 mal schwächere Empfangssignale noch korrekt auswertbar.

=> Auf weisse Zielobjekte beträgt die reflektorlose Reichweite 1000m.

Optischer und elektronischer Aufbau von Distanzmessern

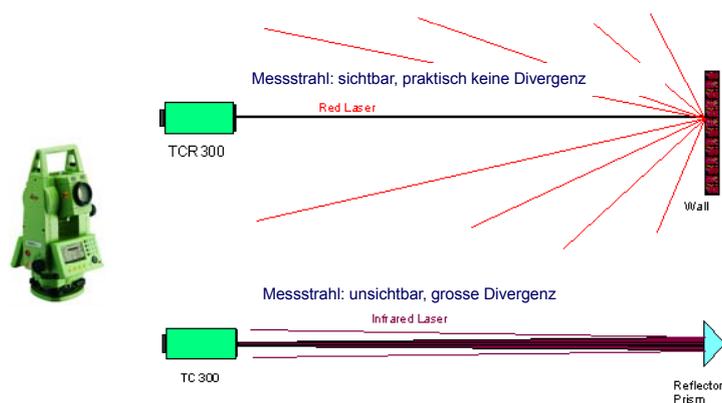


Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

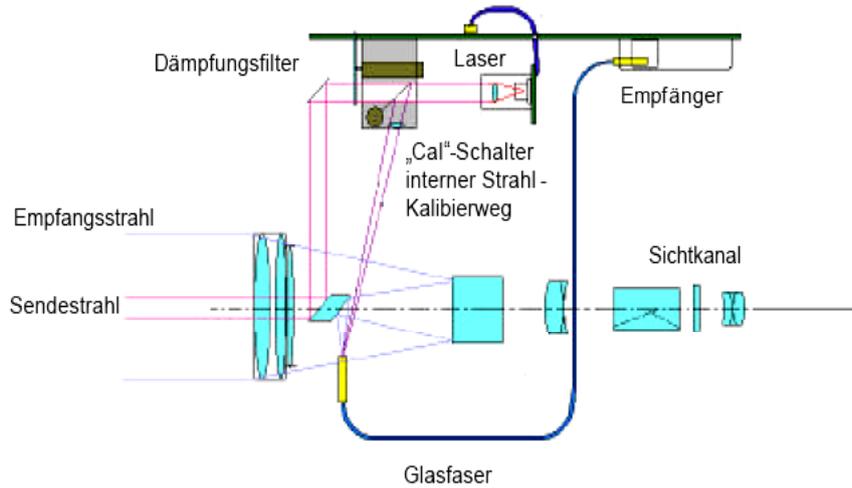
ETH Zürich

Optimaler Tachymeter für natürliche und reflektorunterstützte Ziele

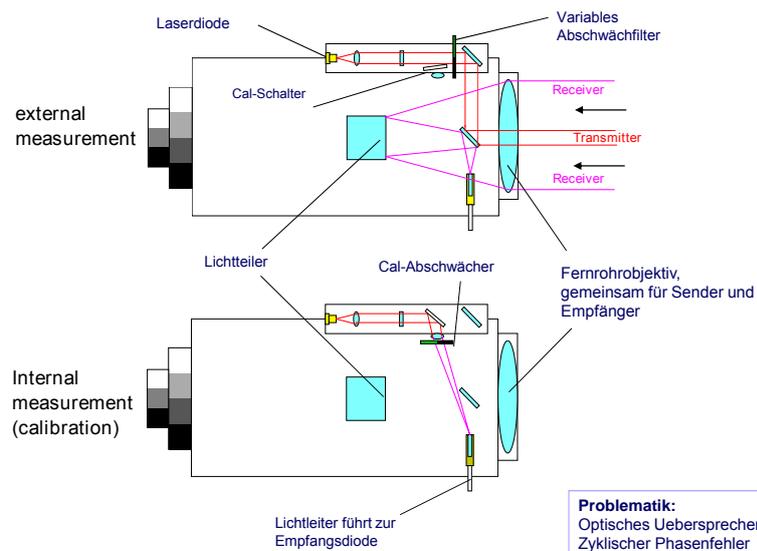
LEICA-TCR als Tachymeter mit 2 Sendereinheiten,
einer roten mit kollimiertem Strahl für reflektorlose Ziele und
einer infraroten mit divergentem Strahl für Prisma-Ziele:



Teleskop im Querschnitt mit Komponenten des Distanzmessers



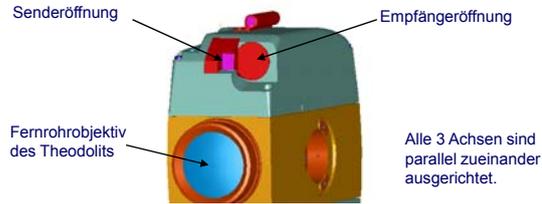
Optikschema eines koaxialen Tachymeters (Mit symmetrischer optischer Apertur)



Problematik:
Optisches Uebersprechen -->
Zyklischer Phasenfehler

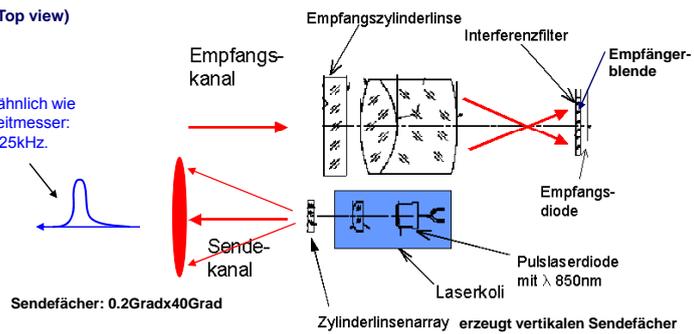
Morphologie und Optikschemata bei Tachymetern

Morphologie:
PowerSearch mit biaxialer Optik ist im Theodolitdeckel integriert:



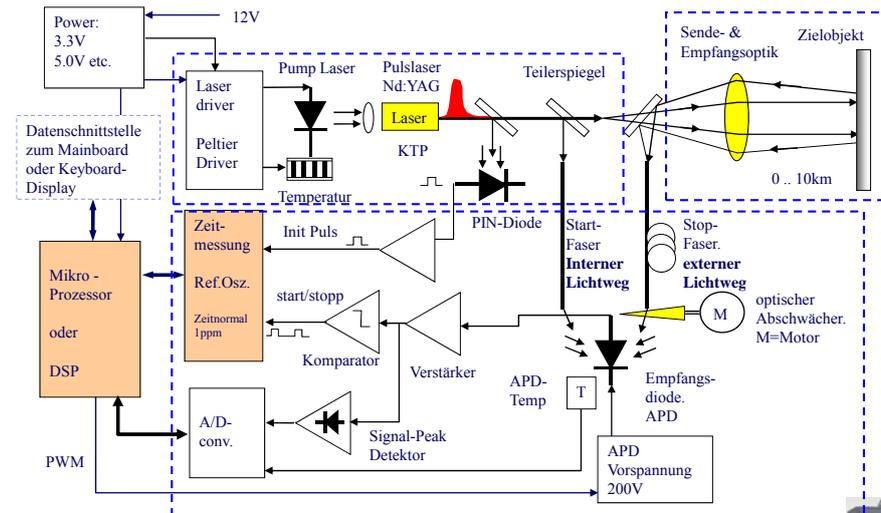
Optikschemata: (Top view)

Pulsmodulation ähnlich wie bei einem Laufzeitmesser:
80nsec, 15Watt, 25kHz.



Funktionsprinzip des Laufzeitmessers

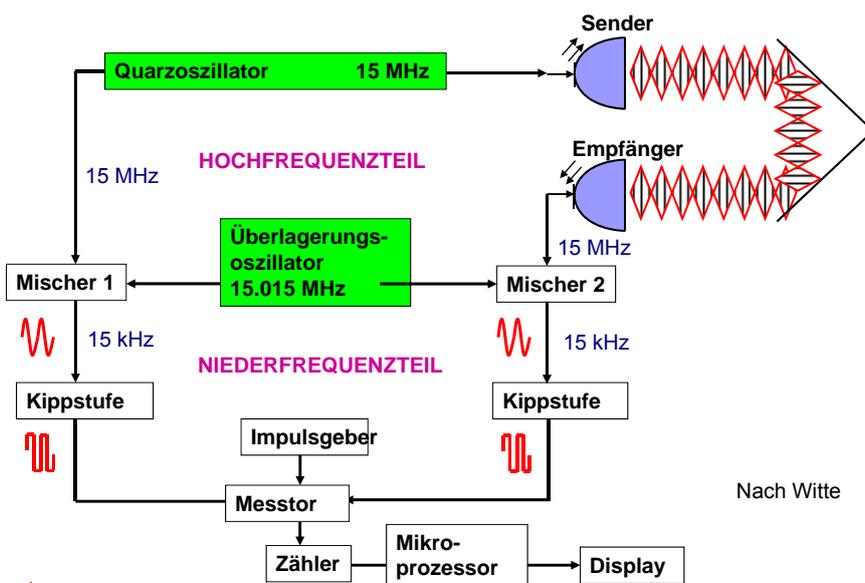
Detektionsprinzip nach dem Einzelschussverfahren (Jeder optische Impuls wird separat detektiert).



Heterodyn Empfänger (aus Wiki)

- **Heterodyne Detektion** ist eine Methode der Signalverarbeitung um Wellen einer unbekanntem Frequenz durch nicht-lineare Mischung mit Wellen einer Referenzfrequenz zu detektieren.
- Die Referenzwelle wird als lokaler Oszillator bezeichnet. Das Signal und der lokale Oszillator werden an einem Mischer überlagert. Für gewöhnlich ist der Mischer eine (Photo-)diode mit einer nicht-linearen Antwort auf die Amplitude, so dass zumindest ein Teil des Ausgangssignals proportional zum Quadrat des Eingangssignals ist.

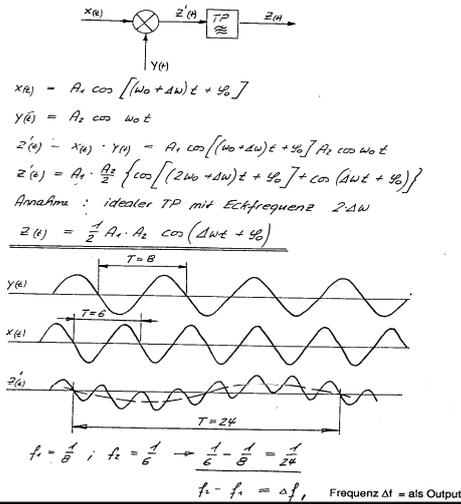
Blockschema eines phasenmessenden Distanzmessgerätes



Phasemesser

Elektronische Mischer zur Erzeugung der niederfrequenten Zwischenfrequenz

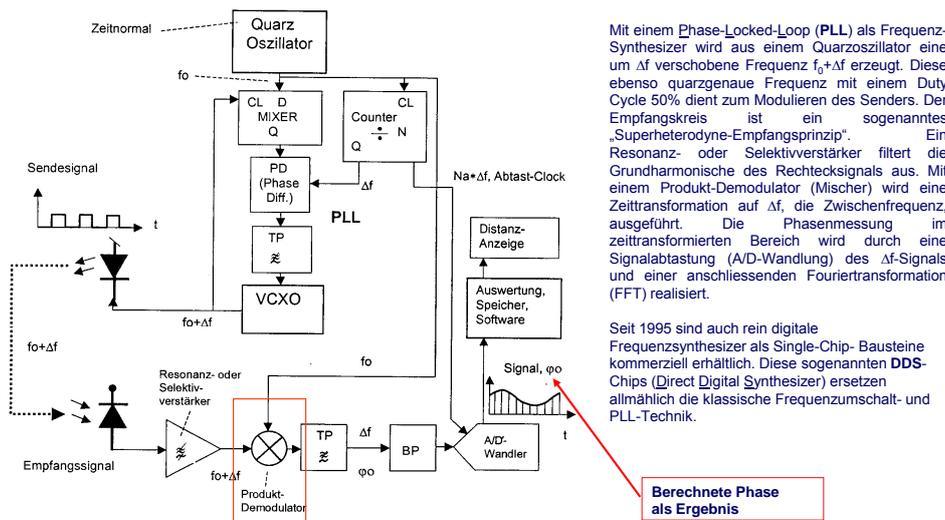
Analog Mixer im Empfängerteil: (In der Literatur auch als Produktdemodulator bekannt)



Merke:
Im niederfrequenten Zwischenfrequenzsignal bleibt die Phase φ_0 erhalten.

Elektronisches Schema nach dem Heterodyne Prinzip

Prinzipschema eines Phasemessers wie es bei den TACHYMETERN angewendet wird



Mit einem Phase-Locked-Loop (PLL) als Frequenz-Synthesizer wird aus einem Quarzoszillator eine um Δf verschobene Frequenz $f_0 + \Delta f$ erzeugt. Diese ebenso quartzgenaue Frequenz mit einem Duty Cycle 50% dient zum Modulieren des Senders. Der Empfängerkreis ist ein sogenanntes „Superheterodyne-Empfangsprinzip“. Ein Resonanz- oder Selektivverstärker filtert die Grundharmonische des Rechtecksignals aus. Mit einem Produkt-Demodulator (Mischer) wird eine Zeittransformation auf Δf , die Zwischenfrequenz, ausgeführt. Die Phasenmessung im zeittransformierten Bereich wird durch eine Signalabtastung (A/D-Wandlung) des Δf -Signals und einer anschließenden Fouriertransformation (FFT) realisiert.

Seit 1995 sind auch rein digitale Frequenzsynthesizer als Single-Chip-Bausteine kommerziell erhältlich. Diese sogenannten DDS-Chips (Direct Digital Synthesizer) ersetzen allmählich die klassische Frequenzschalt- und PLL-Technik.

Berechnete Phase als Ergebnis

- **Heterodyne Detektion** ist eine Methode um Strahlung durch nicht-lineare Mischung mit Strahlung einer Referenzfrequenz zu detektieren. Sie wird häufig in der [Telekommunikation](#) und [Astronomie](#) zur Detektion und Analyse von Signalen verwendet.
- Bei der Strahlung handelt es sich in den meisten Fällen um Radiowellen (siehe [Überlagerungsempfänger](#)) oder Licht (siehe [Interferometrie](#)). Die Referenzstrahlung wird als [lokaler Oszillator](#) bezeichnet. Das Signal und der lokale Oszillator werden an einem [Mischer](#) überlagert. Für gewöhnlich ist der Mischer eine (Photo-)Diode mit einer nicht-linearen Antwort auf die Amplitude, so dass zumindest ein Teil des Ausgangssignals proportional zum Quadrat des Eingangssignals ist.

Sei

$$E_{\text{sig}} \cos(\omega_{\text{sig}} t + \varphi)$$

das elektrische Feld des empfangenen Signals und

$$E_{\text{LO}} \cos(\omega_{\text{LO}} t)$$

das des lokalen Oszillators.

Zur Vereinfachung nehmen wir an, dass das Ausgangssignals des Detektors, I , proportional zum Quadrat der Amplitude ist:

$$\begin{aligned} I &\propto (E_{\text{sig}} \cos(\omega_{\text{sig}} t + \varphi) + E_{\text{LO}} \cos(\omega_{\text{LO}} t))^2 \\ &= E_{\text{sig}}^2 (1/2) (1 + \cos(2\omega_{\text{sig}} t + 2\varphi)) \\ &\quad + E_{\text{LO}}^2 (1/2) (1 + \cos(2\omega_{\text{LO}} t)) \\ &\quad + E_{\text{sig}} E_{\text{LO}} [\cos((\omega_{\text{sig}} + \omega_{\text{LO}}) t + \varphi) + \cos((\omega_{\text{sig}} - \omega_{\text{LO}}) t + \varphi)]. \end{aligned}$$

- Das Ausgangssignal hat hochfrequente ($2\omega_{\text{sig}}$ and $2\omega_{\text{LO}}$) und konstante Anteile. In der heterodynen Detektion werden die hochfrequenten Anteile und gewöhnlich auch die konstanten Anteile herausgefiltert. Übrig bleiben die dazwischenliegenden [Schwebungsfrequenzen](#) $\omega_{\text{sig}} + \omega_{\text{LO}}$ und $\omega_{\text{sig}} - \omega_{\text{LO}}$. Die Amplitude dieser Anteile ist proportional zur Amplitude der zu untersuchenden Strahlung. Mit geeigneter [Signalanalyse](#) kann auch die Phase des Signals ermittelt werden.



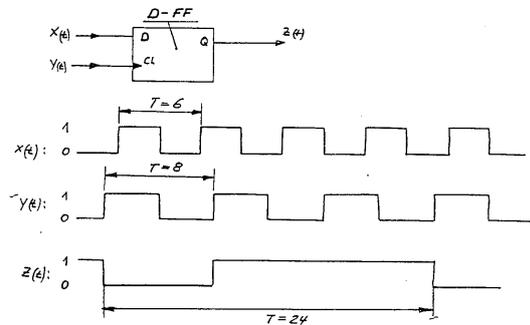
4. Phasemesser

4.4 Elektronische Mischer zur Erzeugung der niederfrequenten Zwischenfrequenz

4.4.2 Digitaler Mixer im Frequenzsynthesizer:

Einflankengetriggerter D-FF:
Wirkt als Speicherzelle (=Data Latch)

$x(t)$: Signal (input)
 $y(t)$: Taktimpuls („Steuerimpuls“)
Übergabe der Eingangsfunktion bei positiver Taktflanke (pos. edge triggered)
Bei positiver Taktflanke wird $Q = D$.



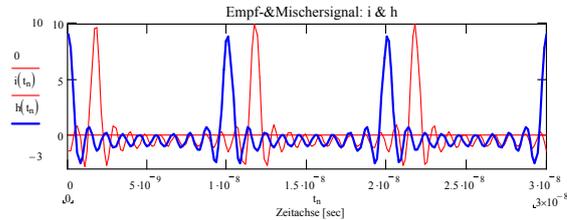
$$f_1 = \frac{1}{6}; \quad f_2 = \frac{1}{8} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{6} - \frac{1}{8} = \frac{1}{24}$$

$$f_1 - f_2 = \Delta f, \quad \text{Frequenz } \Delta f \text{ als Output}$$

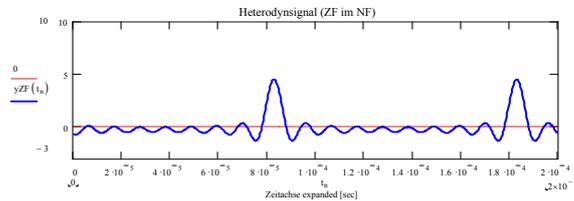
Elektronische Mischer zur Erzeugung der niederfrequenten Zwischenfrequenz

Sampling Technik mit „Time Expansion“ unter Anwendung eines Mixers

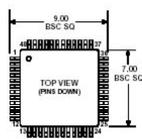
Zeittransformation um den Faktor 10^5 mit einem breitbandigen analogen Mischer im Empfängerteil eines Distanzmessers. Die hochfrequenten, pulsartigen Eingangssignale des Mixers sind einerseits das Empfangssignal $i(t)$ andererseits das Mischersignal $h(t)$ direkt abgezweigt vom Frequenzsynthesizer. Die Modulationsfrequenzen der beiden Signale unterscheiden sich dabei nur wenig, eben lediglich um den Faktor 1 zu 1.00001



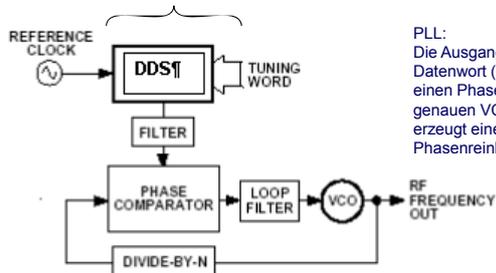
Am Ausgang des Mixers entsteht ein niederfrequentes Signal. Man beachte die Zeitdehnung, es ist gegenüber dem Empfangssignal um 10^5 im zeitlichem Verhalten verlangsamt. Die Phasenmessung ist im zeittransformierten Bereich einfacher zu handhaben.



Direct Digitaler Synthesizer mit PLL-Frequenzumformer



Direct Digital Synthesizer



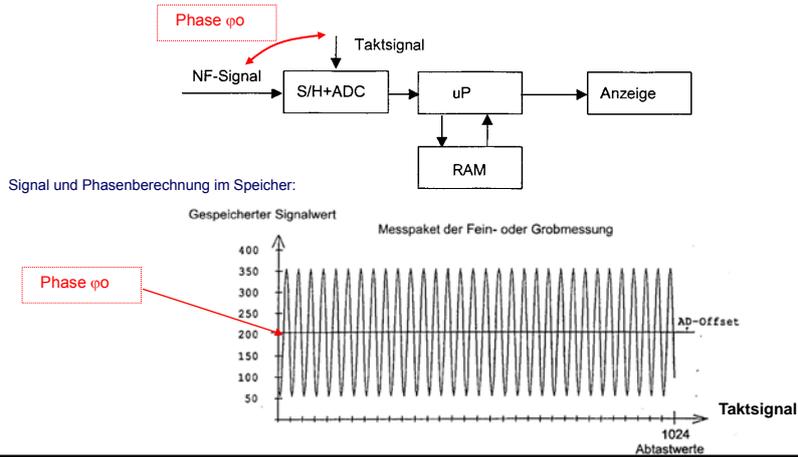
Frequency/Phase-Agile Reference for PLL

PLL:
Die Ausgangsfrequenz des DDS-Bausteins wird über ein Datenwort (Tuning Word) gesetzt. Die Frequenz wird auf einen Phasencomparator gegeben, welcher einen ppm-genauen VCO-Oszillator ansteuert. Dieser VCO-Oszillator erzeugt eine um den Faktor N höhere Frequenz mit hoher Phasenreinheit.

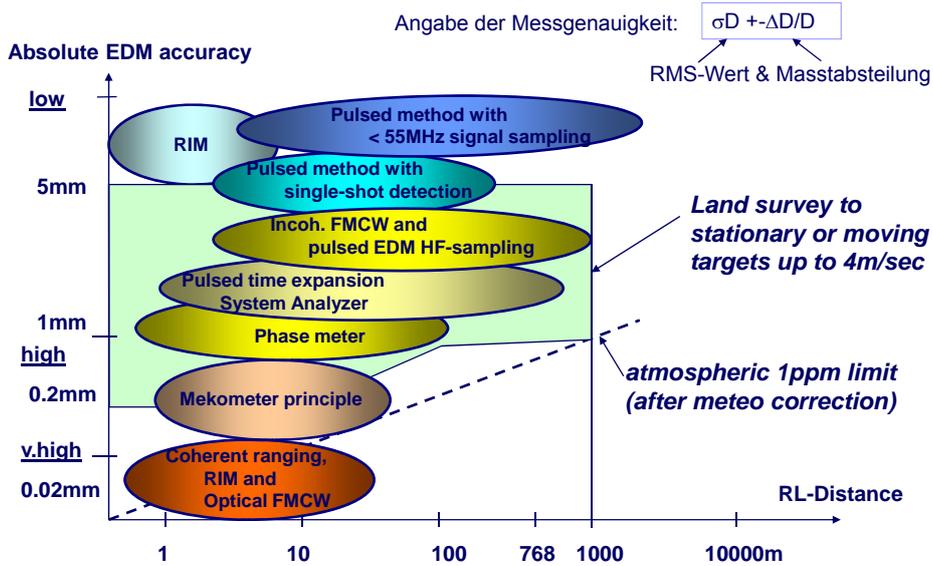
Die Phasenmess-Einheit

Heute sind ausschliesslich digitale Phasenmessschaltungen gebräuchlich.

Alle Distanzmesser sind heute mit AD-Wandlern und Mikroprozessoren oder gleichwertigen Prozessoren ausgestattet. Die Phasenmessung ist daher verbunden mit einer digitalen Signalauswertung. Das am AD-Wandler anliegende NF-Signal wird durch diesen abgetastet und die Daten fortlaufend in einem Speicher (RAM) abgelegt. Am Schluss der Messung wird die Phasenverschiebung anhand der im Datenspeicher abgelegten Signalform mittels Kurvenfit, Fouriertransformation oder einer anderen algorithmischen Auswertemethode berechnet.



Performance von EDM-Technologien auf natürliche Oberflächen



Abweichungen, Fehler, Systematiken



Phaseninhomogenität und Zyklischer Phasenabweichungen

Phaseninhomogenität:

Die Phasenlage des modulierten Signals ist im Querschnitt des Lichtkegels nicht konstant. Dies wird verursacht durch Inhomogenitäten in der sendenden Lumineszenzdiode und der empfangenden Avalachediode.

Damit ist die gemessene Strecke davon abhängig, mit welchem Teil der Lichtkeule die Messung erfolgt, d.h. wie genau das Reflexionsprisma angezielt wird.

Die dadurch auftretende Abweichung hat die Größenordnung von 2 mm bis 20 mm.

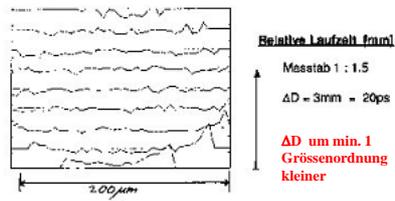


3.3 Räumliche Laufzeitabweichung am Beispiel eines Pulsasers

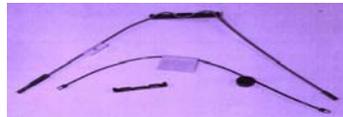
Laufzeitunterschiede über die emittierende Fläche am Laserchip



Laufzeitunterschiede am Austrittsende eines Lichtleiters
-> Lichtleiter wirkt als Homogenisierer der örtlichen Laufzeitunterschiede



Abhilfe:
Homogenisierung der Laufzeitunterschiede mit optischen Lichtleiter:



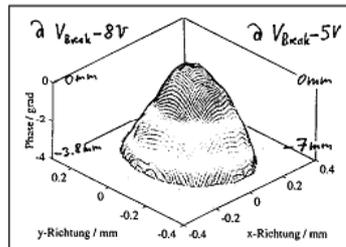
Phaseninhomogenitäten (Empfänger)

APD-Diode als Empfänger sensor EDM

Kommerzielles Bauteil: typische Detektionsfläche mit Durchmesser 0.5mm



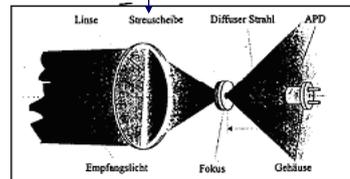
Problematisches beziehungsweise Herausforderung für die Distanzmessung:
-> Homogenität der Signalantwortzeit über die sensitive Oberfläche.



Oberflächenortsabhängigkeit der Empfindlichkeit des Fotostroms (a) und der Phase (b) der APD C30902S / EG&G beim Empfang einer mit 440 MHz intensitätsmodulierten fokussierten optischen Strahlung bei einer Betriebsspannung von 200V

Lösungsansatz:

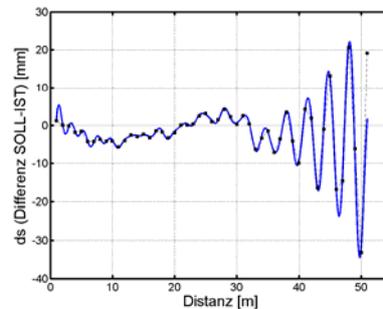
Streuscheibe als Lichthomogenisierer über die sensitive Fläche



Einbau eines streuenden Mediums vor der Fotodiode

Zyklische Phasenabweichungen (Laserscanner)

Bei der Phasenmessung kann es zu einem optischen und/oder einem elektrischen "Übersprechen" zwischen Send- und Empfangssignal im Instrument kommen. Dies verursacht eine fehler-hafte Phasenmessung, so dass das Ergebnis verfälscht wird. Die Auswirkung zeigt sich in einem von der Feinmessfrequenz (meist 10 MHz = 10 m) abhängigen, in diesem Zyklus auftretende Abweichung. Die Größenordnung liegt bei modernen Instrumenten etwa bei 1 mm bis 5 mm.



Modulationsfrequenzabweichungen (Massstab)

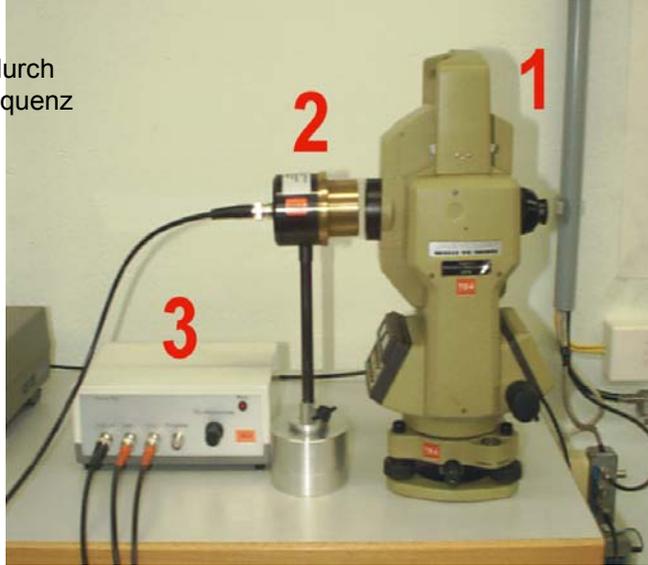
Die Modulationsfrequenz zur Erzeugung des Maßstabs λ wird von einem Quarz-Oszillator erzeugt.

Die Frequenz ist abhängig von der Temperatur und der Alterung des Quarzes. In normalen elektrooptischen Distanzmessern liegt die Genauigkeit der Frequenz bei etwa $1 \cdot 10^{-5}$, womit auch die Genauigkeit der Streckenmessung charakterisiert ist.

Frequenzmesseinrichtung im Messlabor des IGP

Masstab wird durch Modulationsfrequenz vorgegeben

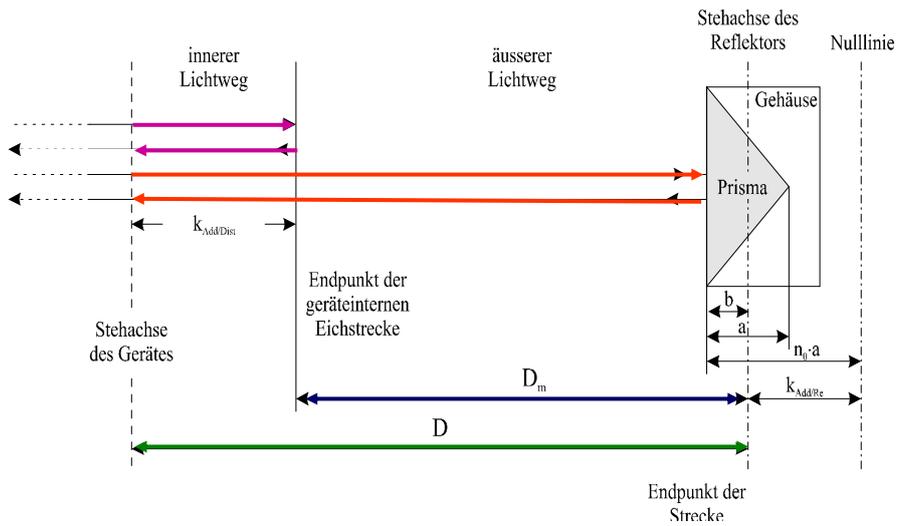
- 1 Prüfling
- 2 Empfangsdiode
- 3 Elektronik



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Additionskonstante bei EDM



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Ende