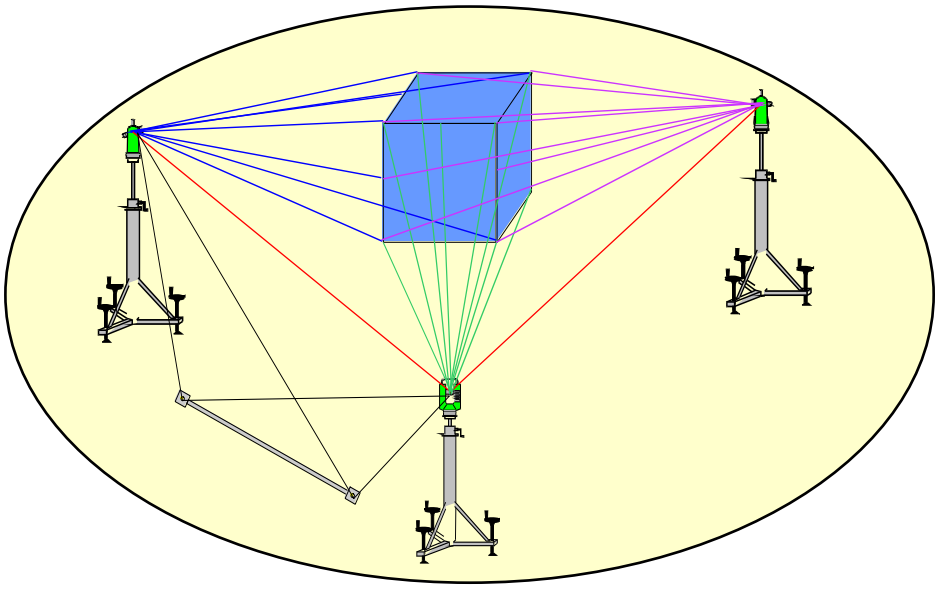
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Geodätisches Institut Professur Ingenieurgeodäsie

Msc G 10
Industriemesstechnik



Ingenieurgeodäsie
3. Semester

Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. M. Möser

http://tu-dresden.de/gi/ig

1 Präzisionsmessungen im Maschinen- und Anlagenbau 4

1.1 Aufgabenstellung 4
1.2 Bezugs- und Koordinatensysteme 6

2 Messunsicherheit 8

2.1 GUM 8
2.2 Messunsicherheit und Toleranz 14

3 Optical Tooling 16

3.1 Fluchtungsmessung 16
3.2 Kollimation 18
3.3 Autokollimation 21

4 Abstands- und Längenänderungsmessungen 25

4.1 Geodätische Abstandsmessungen 25
4.2 Messschieber und Messuhren 25
4.3 Kapazitives Messprinzip 27
4.4 Dehnungsmessung 28
4.5 Interferometer 30
4.6 Neigungssensoren 31

5 Industriemesstechnik 32

5.1 Reverse Engineering 33
5.2 Koordinatenmessgerät 38
5.3 Optische geodätische Messverfahren 40
5.4 Dreidimensionale Koordinatenbestimmung 40
5.4.1 Theodolitfehler im Nahbereich 41
5.4.2 Präzisionsdistanzmessungen im Nahbereich 43
5.5 Industriemesssystem 45
5.5.1 Polarmesssystem 45
5.5.2 Theodolitmesssystem 45
5.5.3 Konfiguration und Systemgenauigkeit 50
5.5.4 Messung verdeckter Punkte 51

6 Lasertracker 53

6.1 Messprinzip 53
6.2 LTD 840 55
6.3 Zusatzkomponenten 57
6.4 Messarm 61
6.5 Laser Radar und Laser Tracer 62

7 Kalibrierung und Rückführung 63

7.1 Kalibrierung 63
7.2 Rückführung 64

8 Baumaschinensteuerung 71

8.1 Dynamisches Modell 71
8.2 Prinzip KALMAN-Filter 71
8.3 Algorithmus 74
8.4 Zielverfolgung 76
8.5 Absteckung mit Baumaschinen 78

Literatur

FAY, E. (2001): Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien. In: Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik. Schriftenreihe des DVW, 42. Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 24-29.

GOTTWALD, R. (1996): Industriemesssysteme in der 4. Generation – Leica Axyz. In: Vermessungswesen und Raumordnung 58, Heft 7, S. 356-362.

MEYER, R.: Theodolitindustriemesssysteme im Automobilbau. AVN 97 (1990) 5, S. 176-184.

MÖSER, M. (2001): Dreidimensionale geodätische Qualitätskontrolle im Schienenfahrzeugbau. In: Flächenmanagment und Bodenordnung. Zeitschrift für Liegenschaftswesen, Planung und Vermessung, Heft 1, S.38-43.

MÖSER, M.; WALLSTAB-FREITAG, ST.; HERRMANN, J. (2007): Der Laser – Tracker LTD 800 – eine neue Generation in der Industriemesstechnik. AVN 114, Heft 5.

MÖSER, M.; MÜLLER, G.; SCHLEMMER, H. (2012): Handbuch Ingenieurgeodäsie, Band: Grundlagen. 4. Auflage, VDE-Verlag.

MÖSER, M.; HEISTER, H.; STAIGER, R.: Messunsicherheit, Instrumententests und Kalibrierung – ein 25-jähriger Rückblick auf Beiträge in der AVN. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 122(2015)1, S. 22-35

HEISTER, H. (2001): Zur Angabe der Messunsicherheit in der geodätischen Messtechnik. Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik. Schriftenreihe des DVW Heft 42, Verlag Konrad Wittwer

HEISTER, H.; WOSCHITZ, H.; BRUNNER, F.K. (2005): Präzisionsnivellierlatten, Komponenten- oder Systemkalibrierung. In: AVN, 112 (6), S. 233-238.

HENNES, M.; RUNGE, P. (2007): Chancen der Ingenieurgeodäsie im modernen Maschinenbau. AVN 113, Heft 7

HENNES, M. (2007): Konkurrierende Genauigkeitsmaße - Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. AVN 114, Heft 4.

HENNES, M.; HEISTER, H. (2007): Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie. In: AVN 114 (11-12), S. 375-383.

HENNES, M. (2010): Ausgewählte Initiativen zur Qualitätssicherung in der Messtechnik. In: Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren. Schriftenreihe des DVW, 61. Wißner-Verlag, Augsburg, S. 239-252.

KUTTERER, H. (2010): Qualitätsmanagement und Unsicherheitsbegriffe – eine Einführung. In: Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren. Schriftenreihe des DVW, 61. Wißner-Verlag, Augsburg, S. 3-14.

SCHWARZ, W. (Hrsg..) (1995): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer Band 28, Stuttgart.

SCHWARZ, W. (2004): Genauigkeitsmaße richtig interpretieren. Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen. Schriftenreihe des DVW Heft 46, Wißner-Verlag, Augsburg

SCHLEMMER, H.; WELSCH, W. (1989): Berührungslose geodätische Messsysteme für die Industrievermessung – ein Überblick. AVN 96, Heft 11-12, Karlsruhe, S. 397-411.

SCHMITT, R.; JATZKOWSKI, P.; SCHWENKE, H. (2009): Kinematische Kalibrierung von 5-Achs Werkzeugmaschinen mit LaserTracern. In: AVN, 116 (6), S. 214-219.

WEISE, K.; WÖGER, W. (1993): „A Bayesian theory of measurement uncertainty“, Meas. Sci. Technol. Vol 4, 1993, pp 1-11.

1 Präzisionsmessungen im Maschinen- und Anlagenbau

1.1 Aufgabenstellung

Als Anfang der 50er Jahre die Ingenieurbauwerke immer größer und höher wurden, wurde der Begriff „**Ingenieurvermessung**“ geprägt.

Ende der 80er Jahre kamen Präzisionsmessungen zur Fertigungs- und Qualitätskontrolle beim Automobil-, Flugzeug- und Schienenfahrzeugbau hinzu. Damit wurde die „**Industrievermessung**“ mit Messaufgaben höchster Präzision im Nahbereich (Submillimeter) als Spezialgebiet der Ingenieurgeodäsie beschrieben.

Parallel dazu entwickelte sich die **rechnergestützte Koordinatenmessung** im Maschinenbau mit „Methoden zur indirekten Bestimmung der gesuchten Maße auf dem Umweg über die aus einzelnen Punkten im Raum mittels analytischer Geometrie zu ermittelnden Formelemente, wie Punkt, Gerade, Ebene, Kreis, Zylinder.“

Die automatisierten Produktionsprozesse im Maschinenbau stellen hohe Anforderungen an die Messtechnik. Dafür werden geodätische Methoden der Triangulation und Interferometrie modifiziert eingesetzt, u.a. bei folgenden Aufgaben

- Geometriebestimmung und Qualitätskontrolle im Automobilbau, Schiffsbau, Flugzeugbau: Lage von Bohrungen, Ecken und signalisierten Punkten an Fahrzeugkarosserien, Fertigungsanlagen im Flugzeugbau, Maschinenanlagen (Pressen, Walzstraßen)
- Einrichtung von Kraftwerksturbinen und Linearbeschleuniger
- Bestimmung der Positioniergenauigkeit und Kalibrierung von Robotern
- Formprüfungen an großen Teilen: Parabolantennen, Kühltürmen, Kugelbehältern,
- Reverse Engineering (vom Objekt zum Modell)

Dabei wird nicht nur die geometrische Darstellung eines Objekts bestimmt, sondern es wird steuernd in den Produktionsprozess als online - Qualitätskontrolle eingegriffen. Daraus ergaben sich für die geodätischen Messverfahren im Maschinenbau folgende Anforderungen:

- Schnelligkeit
- Online-Messdatenverarbeitung
- Echtzeitauswertung
- Zuverlässigkeit der Ergebnisse

Im Planungs- und Fertigungsprozess müssen ständig Informationen über die aktuelle Produktgeometrie vorhanden sein: **Simultaneous Engineering**.

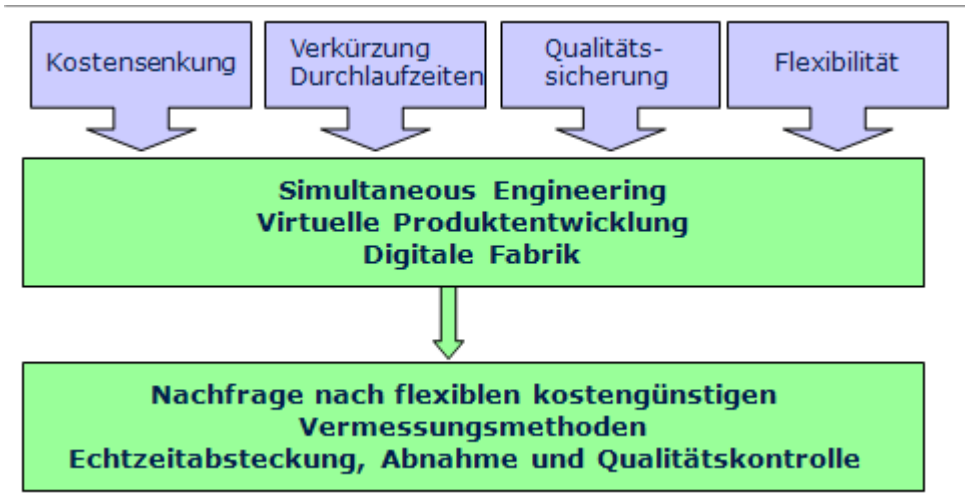
Dies bedeutet, dass weitgehend auf die Prototypenfertigung verzichtet wird. Die virtuelle Fabrik schließt die vollständig digitale Planung, Entwicklung und Führung der Fabrik einschließlich Infrastruktur und Personal mit ein[1].

Die Bedeutung des **Messingenieurs** als System-, Entwicklungs- und ausführender Ingenieur ist daher entscheidend gewachsen. Die Automatisierung verlangt ein genaues Positionieren und Vermessen der Produktionsanlagen.

Beim Einsatz von Robotersystemen (vgl. Maschienensteuerung) müssen Bewegungszyklen und Positioniergenauigkeiten bestimmt werden.

---

[1] HENNES, M. (2007): Chancen der Ingenieurgeodäsie im modernen Maschinenbau. AVN



Die Qualitätssicherung fordert rechnergestützte Prüf-, Mess- und Überwachungssysteme, die eine permanente Kontrolle der geometrischen Eigenschaften des Produktes in der industriellen Fertigung ermöglichen.

Zur Qualitätsprüfung ist die Messtechnik in den Fertigungsablauf zu integrieren. Es gilt Abweichungen am Fertigungsprodukt, so früh wie möglich zu erfassen und die Dokumentation der Produktqualität gegenüber dem Abnehmer zu ermöglichen. Dabei geht es um die fehlervermeidende Qualitätssicherung.

Fertigungsgenauigkeiten

- Feinwerktechnik 10^{-5} bis 10^{-6}
- optische Fertigung 10^{-6} bis 10^{-7}

Aufgrund der hohen Genauigkeiten und der hohen Fertigungsgeschwindigkeiten muss die Mess- und Prüftechnik in unmittelbarer Nähe des Fertigungsprozesses Fehler bzw. Toleranzen nachweisen.

Die daraus resultierenden Probleme der Messdatenerfassung und Verarbeitung sind mit konventionellen Methoden kaum noch zu lösen. Es ergibt sich die Frage:

Ist auch der Maschinenbau ein Arbeitsfeld des Vermessungsingenieurs?

Die vom Geodäten verwendeten Instrumente, Mess- und Auswerteverfahren lassen sich auch im Maschinen- und Anlagenbau einsetzen.

Geodäsie Ingenieurvermessung	**Verfahren**	**Maschinenbau Fertigungsmesstechnik**
1 mm + 1 ppm	Distanzmessung	0,02 bis 0,2 mm
1 mm | 100 m	Neigungsmessung	0,001 mm | 1 m
0,3 mm	Präzisionsnivellement	0,1 mm
0,02 mm	Hydrostatisches Nivellement	0,005 mm
1 mm | 100 m	Alignement	0,1 mm | 10 m
0,1 mm	Abstandsmessungen Längenänderungen	0,01 bis 0,1 mm
0,02 mm	**Industrievermessung**	0,02 mm
0,3 mm	Photogrammetrie	0,3 mm

Was für den Messtechniker groß, ist für den Vermessungsingenieur klein !

Kennzeichnend für den Maschinenbau ist die vorwiegend diskontinuierliche Fertigung geometrisch definierter Körper mit großer Vielfalt der auftretenden Formen und Abmessungen. Die Funktionsfähigkeit der Erzeugnisse wird vor allem durch die

Abweichungen von der SOLL-Geometrie

bestimmt. Dabei beschränkt sich der Messbereich auf die Koordinatenmessmaschinen mit 1/10 bis 1/1000 mm. Der Messraum des Maschinenbauers hat damit die Ausdehnung von mm bis m und die Systeme sind meist stationär.

Geodätische Instrumente sind mobil und reichen vom Nahbereich (Meter) bis km. Der Geodät kann 1/10 mm (Präzisionsdistanzmessung, Längendifferenzen, Neigungsmessung, Nivellement) erreichen und erfasst Strecken besser 1mm + 1ppm.

Daraus folgt: Große Längen in der Fertigungstechnik des Maschinenbaus liegen im **Nahbereich** der Geodäsie und Photogrammetrie oder Längen von 1 bis 3 m stellen für beide Ingenieure Extreme mit unterschiedlichem Vorzeichen dar.

Dadurch nutzt der Fertigungsmesstechniker zu Messtechniken der Ingenieurvermessung und Nahbereichsphotogrammetrie. Die Lösung messtechnischer Aufgaben im industriellen Bereich kann nur interdisziplinär zwischen Maschinenbauer und Geodät betrieben werden. Die verschiedenen Fachbereiche müssen „eine Sprache sprechen“.

1.2 Bezugs- und Koordinatensysteme

Im Maschinenbau wird unterschieden zwischen Koordinatensystemen, die sich auf das Objekt beziehen und die objektunabhängig für die Messungen sind. Verändert das Objekt seine räumliche Lage, so wandert das objektbezogene Koordinatensystem mit. Eine Verbindung zum Bezugssystem "Erde" ist nicht vorhanden.

Um SOLL und IST des Objekts zu vergleichen, ist das Objektkoordinatensystem in das Messkoordinatensystem durch eine Transformation (Ursprung, Orientierung und Maßstab: 3 Verschiebungen, 3 Rotationen, 1 Maßstab) zu überführen.

Partielle Eigenschaften des Messobjektes (z.B. Punktabstände, Winkelbeziehungen, Linienformen usw.) lassen sich im Messkoordinatensystem ermitteln.

a) **Werkzeugkoordinatensystem**: Jedes Werkzeug (Schweißzange eines Industrieroboters, Fräskopf einer Fräsmaschine) baut auf einem eigenen, meist kartesischen Koordinatensystem auf, dessen Achsen sich am Werkzeug orientieren.

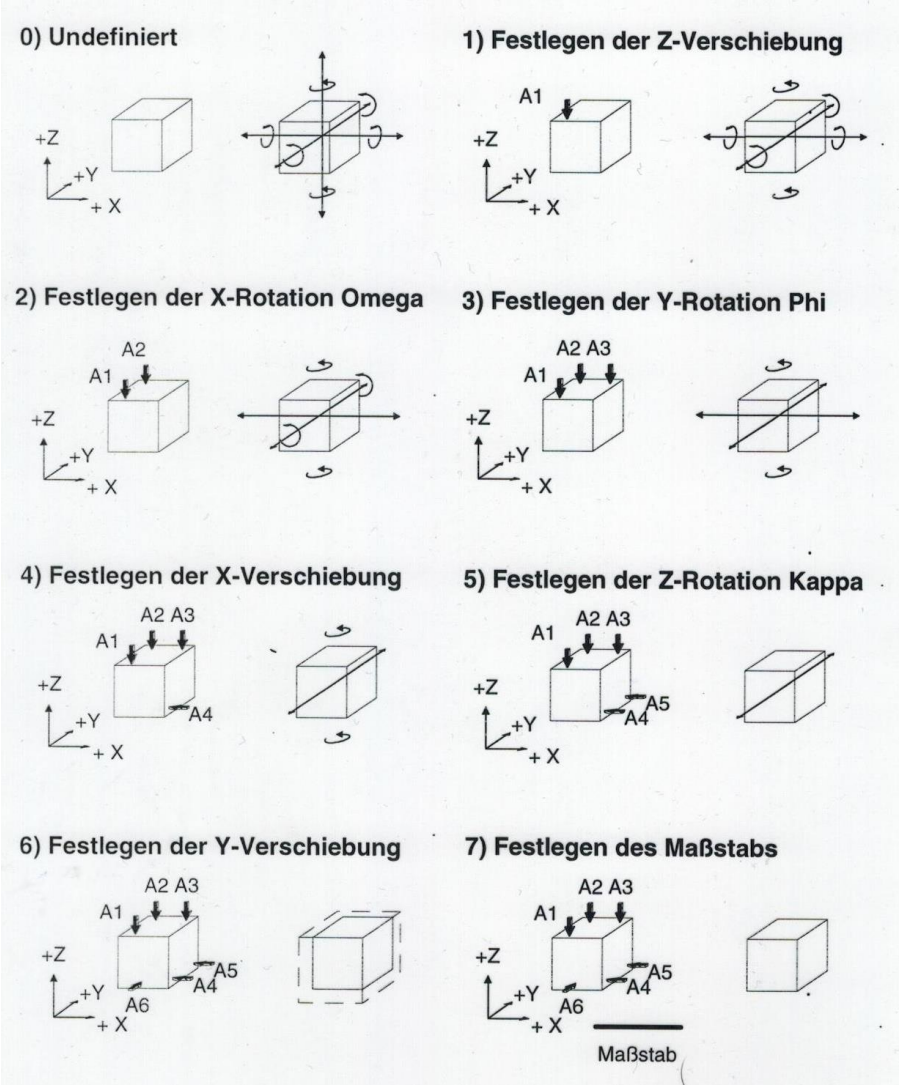
b) **Maschinenkoordinatensystem**: Unabhängig konstruierte Komponenten einer Anlage (Blechpresse, Komponenten eines Turbinentisches) verfügen über eigene KS für Konstruktion, Aufbau und Instandhaltung der Maschine

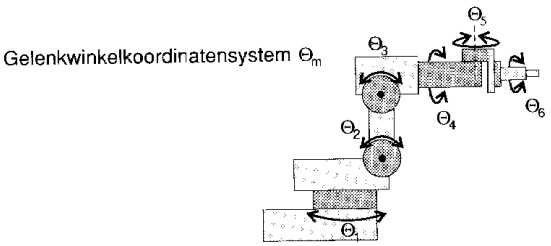
c) **Anlagenkoordinatensystem**: Ein- und Ausrichten der Maschinen in einer Anlage

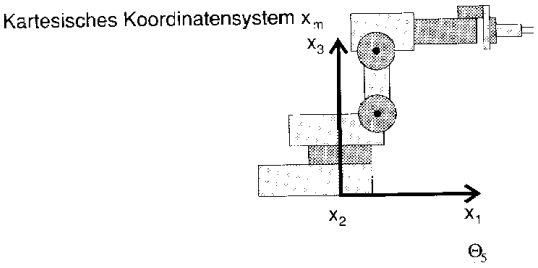
d) **Übergeordnetes Hallen- oder Fabrikkoordinatensystem**: Rechnergestützte Planung des Maschinen- und Anlagenlayouts innerhalb einer Fabrik Bereitstellung eines übergeordneten Bezugskoordinatensystems

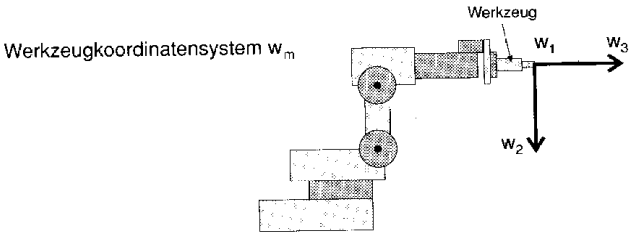
e) **Produktionskoordinatensysteme**: Das Produkt selbst verfügt über ein oder mehrere Koordinatensysteme, die zu seiner Konstruktion und Fertigung benötigt werden.

f) **Weltkoordinatensystem**: Geodätisches Koordinatensystem, absoluter Bezug


0) Undefiniert
+Z
+Y
+ X
1) Festlegen der Z-Verschiebung
A1
2) Festlegen der X-Rotation Omega
A2
A1
3) Festlegen der Y-Rotation Phi
A2 A3
A1
4) Festlegen der X-Verschiebung
A2 A3
A1
A4
5) Festlegen der Z-Rotation Kappa
A1
A2 A3
A5
A4
6) Festlegen der Y-Verschiebung
A2 A3
A1
A5
A4
A6
7) Festlegen des Maßstabs
A2 A3
A1
A5
A4
A6
Maßstab


Gelenkwinkelkoordinatensystem Θ_m
Θ_5
Θ_3
Θ_4
Θ_6
Θ_2
Θ_1


Kartesisches Koordinatensystem x_m
x_3
x_2
x_1
Θ_3


Werkzeugkoordinatensystem w_m
Werkzeug
w_1
w_3
w_2

2 Messunsicherheit

Die klassischen Fehleranalysen beruhen auf dem Prinzip der statistischen Häufigkeit. In der Vergangenheit war es das Ziel der Messung, den „wahren Wert“ der Messgröße zu bestimmen.

- DIN 18710 Ingenieurvermessung (Vertrauensbereich)
- DIN 1319 Grundlagen der Messtechnik (Messunsicherheit)

Das Ergebnis einer Messreihe ist der um die bekannten systematischen Abweichungen berichtigte Mittelwert $\bar{x}$ mit einer unteren und oberen Grenze für das Konfidenzintervall. Die Differenz zwischen der oberen bzw. unteren Grenze und dem berichtigten Mittelwert wird als *Messunsicherheit u* (auch *U*) bezeichnet.

In der Regel sind die beiden Differenzen gleich groß, sodass für das Messergebnis gilt (Parameter *y* nach DIN 1319) $y = \bar{x} \pm u$.

Die Messunsicherheit $\boldsymbol{u}$ setzt sich aus einem zufälligen Anteil $\boldsymbol{u_z}$ und einem systematischen Anteil $\boldsymbol{u_s}$ zusammen. Die Zufallskomponente u_z entspricht den Vertrauensgrenzen $t_f, 1-\alpha/2 \cdot s_{\bar{x}}$ bei unbekannter Standardabweichung.

Im Maschinenbau wird die lineare Addition $u = u_z + u_s$ bevorzugt, weil sie das Risiko der Unterschätzung der Messunsicherheit ausschließt.

Sind die beiden Komponenten u_z und u_s etwa gleich groß, so sollte man die quadratische Addition $u^2 = u_z^2 + u_s^2$ anwenden (Geodäsie).

Für die Bestimmung der Messunsicherheit sind diese nicht erfassbaren systematischen Abweichungen abzuschätzen.

Systematische Einflüsse sind durch Kalibrierung zu erfassen; nicht erfassbare systematische Abweichungen sind abzuschätzen, z. B.:

- Erfassung der atmosphärischen Korrektion bei Laserinterferometern
- Durchbiegung von Endmaßen, Linealen
- Unzureichende Erfassung der Temperatur von Messobjekt und Maß
- Nichtbeachten der Theodolitfehler
- Vernachlässigung von Exzentrizitäten bei der automatischen Kompensation
- Refraktion bei optischen Zielungen → Zielstrahlverschwenkung / Pointing Error

Es geht darum, die unvollkommene Kenntnis des Messprozesses numerisch zu erfassen und dem Messwert der Messgröße eine daraus berechnete Messunsicherheit schlüssig zuzuweisen.

2.1 GUM

Für die Bewertung und Angabe der Messunsicherheit hat sich als internationaler Standard der **GUM** durchgesetzt:

- GUM: **G**uide to the expression of **U**ncertainty in **M**easurement“, 1993, corrected and reprinted 1995, International Organization for Standardization (DIN 13005 „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“)

Bevor eine Messung durchgeführt wird, liegen a priori Informationen vor, die in die Messunsicherheit einbezogen werden sollten. Mit den Messdaten wird nach der Messung das Wissen durch die a posteriori Informationen vergrößert.

Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Schätzwerte kennzeichnet, die der Messgröße auf der Basis vorliegender Informationen vernünftigerweise zugeordnet werden können.

Beispiel 1: Eine Strecke wurde nur einmal gemessen.

Es soll eine Aussage über die Messunsicherheit getroffen werden. Statistische Betrachtungen sind nicht möglich. Man kann aber etwas anderes betrachten: a priori vorhandenes Wissen über den Messprozess einbringen und daraus ein Intervall berechnen, in dem das Messergebnis mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt.

Nach GUM setzt sich die *Messunsicherheit* grundsätzlich aus mehreren Komponenten zusammen. Dabei unterscheidet man zwei Kategorien:

- Typ A: Berechnung der Messunsicherheit mit statistischen Methoden
- Typ B: Berechnung der Messunsicherheit mit anderen Methoden.

Die Komponenten Typ A werden nach der in der Geodäsie bekannten Methode der kleinsten Quadrate und Normalverteilung ermittelt.

Die geschätzte Varianz s_x^2 bzw. Standardabweichung s_x werden hier auch Varianz u_x^2 bzw. Standardunsicherheit u_x und bei einer Zusammenfassung nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz kombinierte Standardunsicherheit u_A genannt.

Die Varianz und Standardunsicherheit von Typ B werden aus wissenschaftlichen Beurteilungen ermittelt, die sich auf alle verfügbaren Informationen über die mögliche Streuung gründen.

Die Komponenten der Kategorie B werden als Näherungen der entsprechenden Standardabweichungen betrachtet. Sie sind durch Größen u_B zu charakterisieren. Dieses Vorgehen wird bisher bei geodätischen Messverfahren kaum angewendet. Es sollen alle verfügbaren Informationen über den Messprozess über die Streuung der Eingangsgröße einfließen.

Kombinierte Standardunsicherheit

Messunsicherheiten der beiden Kategorien, die auf dieser Weise einer Messgröße zuzuordnen sind, können nach dem *Unsicherheitenfortpflanzungsgesetz* quadratisch zur kombinierten Standardunsicherheit u_c zusammengefasst werden:

$$u_c = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + ... + u_{An}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + ... + u_{Bm}^2}\ .$$

In der Regel wird diese Genauigkeitsangabe ausreichen, um das Messergebnis quantitativ zu beschreiben. Wo eine höhere Sicherheitswahrscheinlichkeit gefordert ist oder auch die Beziehungen zu Toleranzen herzustellen sind (industrielle Anwendungen) ist ein Bereich für die Messunsicherheit festzulegen.

Somit gelangt man über die Festlegung eines Erweiterungsfaktors k zur erweiterten Messunsicherheit

$$U_c = k \cdot u_c$$

Häufig wird dabei k = 2 gewählt, was zu einem Intervall ± U (Angabe immer mit Vorzeichen) führt und in statistischer Analogie einen Vertrauensbereich von P ~ 95 %Sicherheitswahrscheinlichkeit festlegt.

Für normalverteilte Messungen gilt

k = 1	k = 2	k = 3
68,3 %	95,4 %	99,7 %

Beispiel 2: Im Maschinenbau wird für eine Strecke das Messergebnis angegeben s = (23,0465 ± 0,0073) m, wobei die auf das Zeichen ± folgende Zahl der Zahlenwert der erweiterten Unsicherheit $U = k \cdot u_c$ ist. U wurde aus einer kombinierten Standardunsicherheit u_c = 2,3 µm mit k = 3,17 für das Quantil der t-Verteilung und f = 9 Freiheitsgrade ermittelt. Der Vertrauensbereich beträgt 99 %.

Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik

Es werden Verfahren der Wahrscheinlichkeitstheorie angewandt, wenn keine statistische Auswertung durchgeführt wird, aber messtechnisch fundierte Kenntnisse vorhanden sind, um die Verteilung der Werte einer Eingangsgröße geeignet einzuschätzen (a priori Wissen). Solches Wissen bzw. Informationen können sein:

- Angaben von Herstellern oder aus früheren Messungen
- Daten aus einer Kalibrierung
- Erfahrungen oder Kenntnisse über die Messgeräte und den Messprozess
- Unsicherheiten, die Referenzdaten aus Handbüchern zugeordnet sind.

Mit der Methode B und dem Bayes-Theorem werden entgegen den Regeln der mathematischen Statistik systematische und zufällige Abweichungen zusammengefasst.

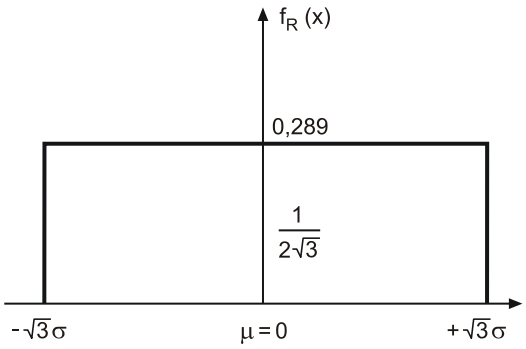
Der Wert der Messgröße wird durch die Zufallsgröße und ihre Wahrscheinlichkeitsdichte ersetzt. Die Methode B nutzt mit der Bayes-Statistik die Kenntnis von a priori Verteilungen (Verteilungsdichtefunktionen), um die **Standardunsicherheiten** abzuschätzen.

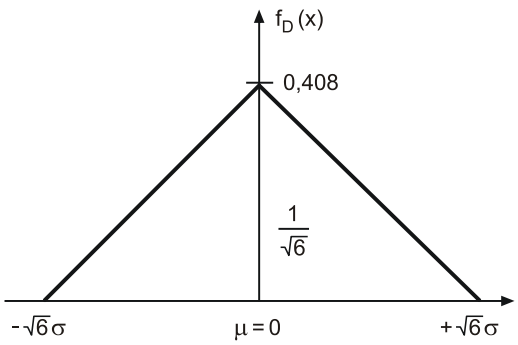
Die metrologische Fragestellung nach der Messung lautet aber etwas anders:

> Liegt die Messgröße mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit im durch a und b begrenzten Intervall, d.h. der Messunsicherheit
>
> $P(a < y < b) = 0{,}95$?

Die Messgröße ist dabei fest, die Messwerte hingegen streuen. Eine einzige Messung liefert keine statistische Aussage, aber man kann a priori Wissen mit einbauen.

1) Wenn Mittelwert und Standardabweichung bekannt sind, nicht aber der Verteilungstyp, geht man von der Normalverteilung aus.
2) Wenn es für einen Messwert eine obere und untere Grenze gibt, gilt die Gleichverteilung (bzw. Rechteckverteilung).
3) Wenn es sich um eine Summe oder Differenz von zwei Werten nach 1) mit gleicher Spannweite handelt, ergibt sich die Dreieckverteilung.





Zu 1) Aufgrund von verfügbaren Informationen wird festgestellt, dass der Wert der Eingangsgröße X_i mit 50 % Wahrscheinlichkeit zwischen a_+ und a_- liegt. Wenn weiterhin angenommen werden kann, dass die möglichen Werte für X_i annähernd normalverteilt sind, lässt sich der Mittelpunkt des Bereichs für den Schätzwert x_i mit

$$a = \frac{1}{2}(a_+ + a_-)$$

angeben. Daraus ergibt sich eine Standardunsicherheit

$$u(x_i) = 1{,}48 \cdot a$$

da der Bereich μ ± σ / 1,48 annähernd 50 % der Normalverteilung einschließt.

Zu 2) Es wird eine obere Grenze a_+ und eine untere Grenze a_- für die Eingangsgröße X_i festgelegt. Wenn es keine Kenntnisse über die Werte von x_i gibt, lässt sich nur annehmen, dass im gesamten Bereich die gleiche Wahrscheinlichkeit für die Lage von x_i besteht (Gleichverteilung der Werte). Die Wahrscheinlichkeit, dass x_i außerhalb dieses Bereichs liegt, ist null. Damit liegt x_i in der Mitte des Bereichs und es gilt

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \,.$$

Für die Standardunsicherheit gilt, dass die nicht statistischen Informationen über die Einflussgröße (obere und untere Grenze) durch eine Gleichverteilung im Intervall dieser Grenzen beschrieben werden können:

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{12}}(a_+ - a_-) \,.$$

Wenn die Differenz zwischen den Grenzen a_+ und a_- mit 2a bezeichnet wird, ergibt sich

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{3}} a \approx 0{,}58a \,.$$

Zu 3) Für die Dreieckverteilung gilt eine Standardunsicherheit

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \approx 0{,}41a \,.$$

Beispiel 3: Bei einer Distanzmessung wird zwischen Stand- und Zielpunkt die Temperatur gemessen x_t = 18°C. Als Schwankungsbreite wird a = 2°C angegeben. Daraus ergibt sich die Standardunsicherheit[2]

$$u(x_t) = 0{,}58 \cdot a = 1{,}2°C$$

Es wird als meteorologische Korrektur t = 18°C berücksichtigt. Damit verbleibt für eine Distanz von s = 1000m eine Maßstabsunsicherheit von

$$u(x_m) = 1{,}2\,ppm$$

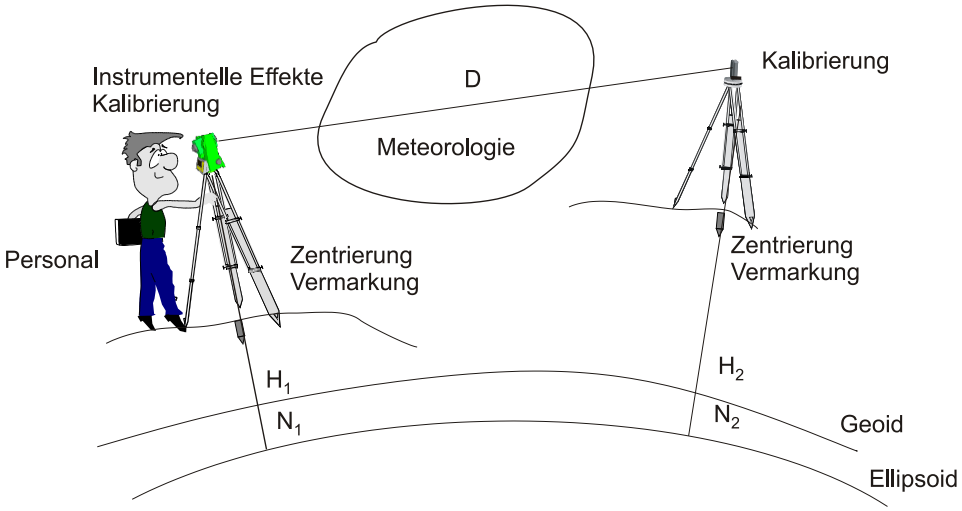
Standardunsicherheit nach Typ A (σ_s = 2mm + 2ppm)

$$u(x_s) = 4mm$$

kombinierte Standardunsicherheit

$$u_c(s) = \sqrt{u(x_s) + u(x_m)} = \sqrt{4mm^2 + 1{,}2mm^2} = 4{,}2mm$$

Elektrooptische Distanzmessung

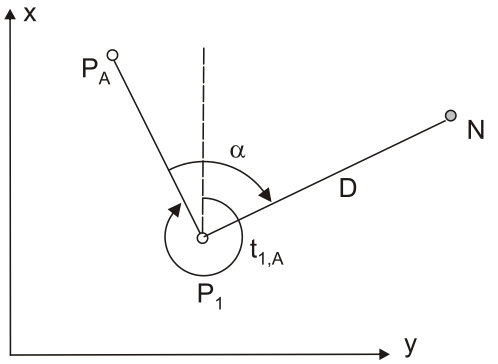


- Instrumentelle Effekte: Temperatur, Phaseninhomogenitäten
- Kalibrierung: Maßstabsfaktor, Additionskonstante
- Atmosphäre: Temperatur, Druck, Luftfeuchte, Formeln für Modelle
- Punktdefinition: Vermarkung, Zentrierung, Horizontierung
- Geometrische Reduktion: Geoidundulation, Instrumenten-, Reflektorhöhen
- Personal: Qualität der Messung, Kontrollen

Beispiel 4: Einflussgrößen und Messunsicherheit beim Polaren Anhängen[3]

Gegeben:	Standpunkt P_1, Anschlusspunkt P_A, Richtungswinkel $t_{1,A}$
Gemessen:	Distanz D und Winkel α
Gesucht:	N (x, y)

[2] HEISTER, H. (2001): Zur Angabe der Messunsicherheit in der Messtechnik
[3] NIEMEIER, W. (2008): Ausgleichungsrechnung. De Gruyter Verlag



Messwerte | Standardabweichungen aus der Ausgleichung des BLN (Typ A)

x_1 = 345,658 m s_x = 18 mm
y_1 = 564,321 m s_y = 16 mm
$t_{t1,A}$ = 345,1234 gon $s_{t1,A}$ = 0,4 mgon
α = 101,0052 gon $s_\alpha = 0{,}5$ mgon

Winkelmessung: Herstellerangaben | $U_\alpha = s_\alpha$ = 0,5 mgon
Distanzmessung: Kalibrierparameter und Vertikalwinkelmessung | U_D = 3 mm
Exzentrizität für Zentrierung, Horizontierung a_e = 3 mm
Horizontalrefraktion a_r = 1 mgon | 5 mm
Abschätzung der Messunsicherheit für die x- Koordinate: $x_N = x_1 + D \cdot \cos(\alpha + t_{1,A})$

„Wirkung“ der Unsicherheiten der Einzelkomponenten über partielle Ableitungen:

$$\frac{\partial x}{\partial x_1} = 1 \qquad \frac{\partial x}{\partial D} =$$

$$\frac{\partial x}{\partial \alpha} = \qquad \frac{\partial x}{\partial t_{1,A}} =$$

Eingangs-Größe X_i	Schätzwert x_i	Standard-unsicherheit	Verteilungs-annahme	Wirk-koeffizient	Unsicherheit U_i [mm]	Typ
X_1	345,658 m	18 mm	NV	1	18	A Ausgleichung
D	290,112 m	3 mm	NV	0,75	2,2	A Abschätzung
α	101,0052 gon	0,5 mgon	NV	- 3,0	- 1,5	B Hersteller
$t_{1,A}$	345,1234 gon	0,4 mgon	NV	- 3,0	- 1,2	A Ausgleichung
e	0	3 mm	Gleich	0,58	1,7	B Erfahrung
r	0	5 mm	NV	1,48	7,4	B Atmosphäre
Ergebnis X_N	561,324 m	$U_{cN} = \sqrt{u_{x1}^2 + u_D^2 + u_\alpha^2 + u_t^2 + u_e^2 + u_r^2}$			19,7 mm	

Für die erweiterte Messunsicherheit ergibt sich U = 2 U_c = 39,4 mm bei einem Vertrauensintervall von 95%.

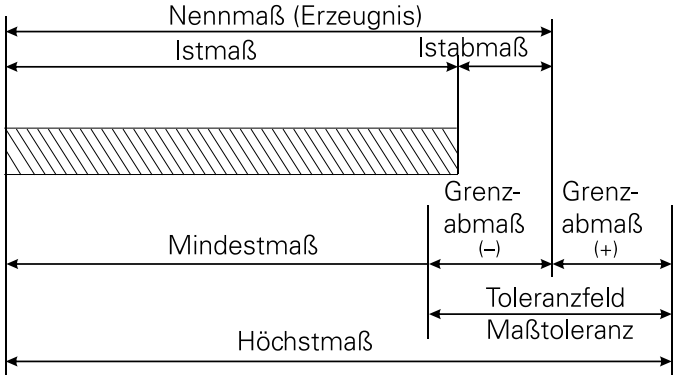
2.2 Messunsicherheit und Toleranz

Aussagen zur Auswahl eines Messverfahrens in Verbindung mit einer vorgegebenen Toleranz T liefern DIN 2257 und DIN 1319. Die Messunsicherheit u darf dabei nur einen Teil der vorgegebenen Fertigungstoleranz T betragen.

Es gilt das Verhältnis

V = Messunsicherheit **u** / Fertigungstoleranz **T** < 0,3

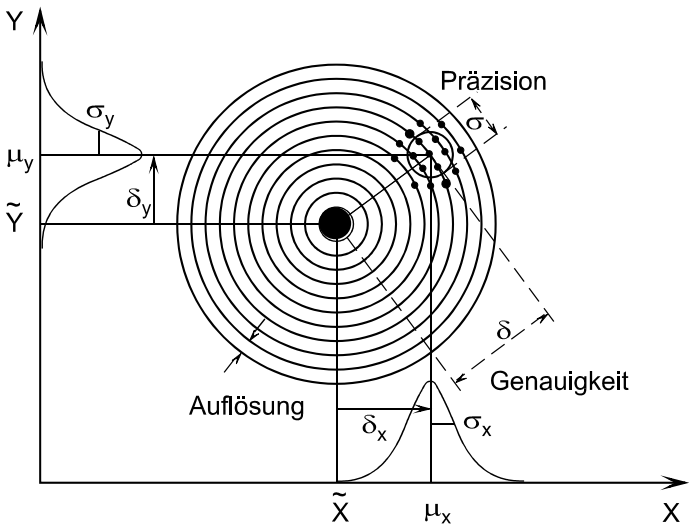
- Toleranzen begrenzen die Abweichungen von den Nennmaßen der Größe, Gestalt und der Lage von Werkstücken und Bauteilen (Fertigungs-, Vermessungs- und Montageabmaße)
- Differenz zwischen dem Höchstmaß und dem Mindestmaß (= Grenzmaße) ist die Maßtoleranz T (Intervall = Toleranzfeld).
- Um festzustellen, ob die geforderten Toleranzen eines Werkstückes bei der Fertigung eingehalten worden sind, ist das Werkstück auszumessen.
- Dabei ergeben sich Wechselwirkungen zwischen den Toleranzvorgaben und der Genauigkeit, mit der die Messungen durchzuführen sind.



In der Messtechnik werden die Begriffe Auflösung, Präzision, Genauigkeit und in der Metrologie die Richtigkeit verwendet[4]:

- **Auflösung**: kleinste Zähleinheit
- **Präzision**: statistische Maß für die Streuung mit der Standardabweichung σ
- **Genauigkeit**: Nähe der Übereinstimmung eines Messergebnisses zum wahren Wert (systematische Abweichungen werden berücksichtigt)
- Begriff „***Messgenauigkeit***“ ***vermeiden***
- **Richtigkeit**: Messergebnis mit einer systematischen Abweichung

[4] SCHWARZ, W. (2004): Genauigkeitsmaße richtig interpretieren.



Je kleiner die systematische Abweichung, desto **richtiger** ist das Messergebnis.
Je kleiner die Wiederholstandardabweichung, desto **präziser** ist das Messergebnis.

3 Optical Tooling

- Messungen im Maschinenbau zum „Optischen Ausrichten“
- Bestimmung geometrischer Größen: Geradheit, Ebenheit, Rechtwinkligkeit, Lotrechtstellung, Fluchtung, Parallelität, Abstandsgleichheit

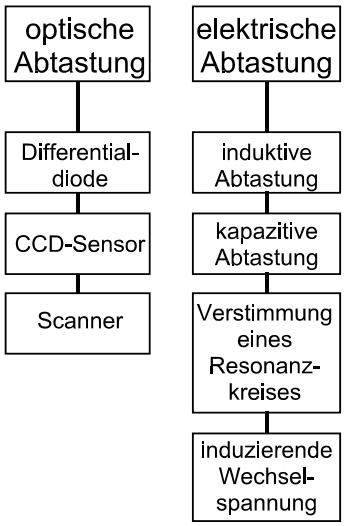
3.1 Fluchtungsmessung

Messpunkte längs einer Geraden ausrichten bzw. die Ablagen der Messpunkte von einer Geraden in horizontaler oder vertikaler Richtung ermitteln (siehe BWÜ Alignement)

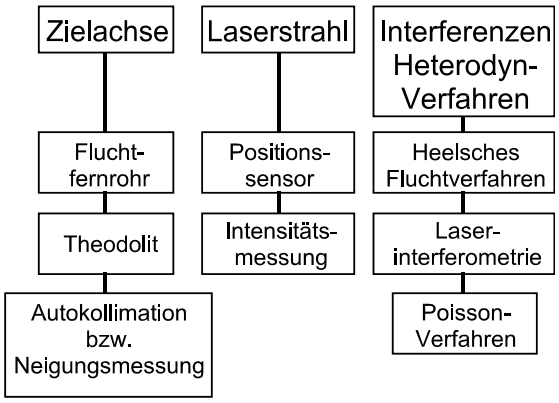
- relative Lageveränderungen der Messpunkte
- Entfernungsbereich von einigen Metern bis zu einigen Hundert Metern
- Genauigkeit unter einem Millimeter bis Mikrometer

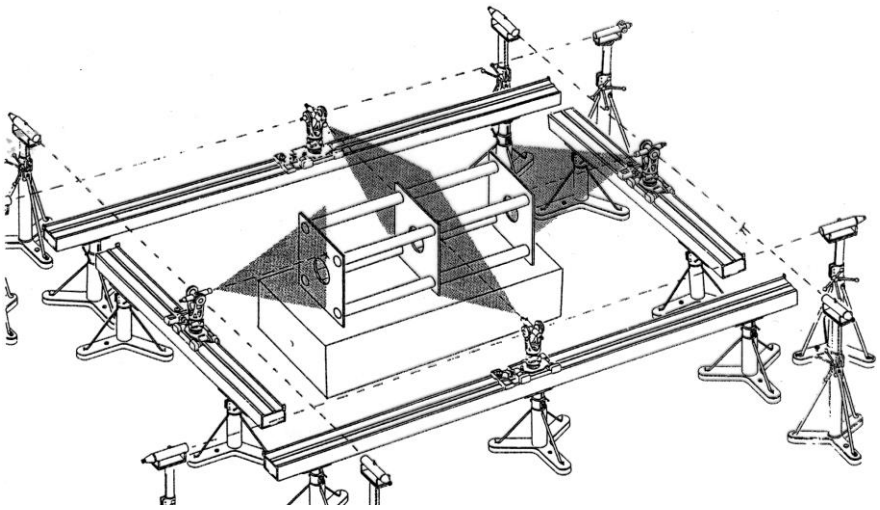
- Bezugsgerade: gespannter Draht oder optisch mit Fernrohren
- mechanische Bezugslinie: gespannter Draht wird berührungslos angetastet
- Geradlinigkeit des Drahtes (z.B. Federstahl); Inhomogenitäten in der Dichte des Drahtmaterials; Biegemomente.

mit mechanischer Bezugslinie



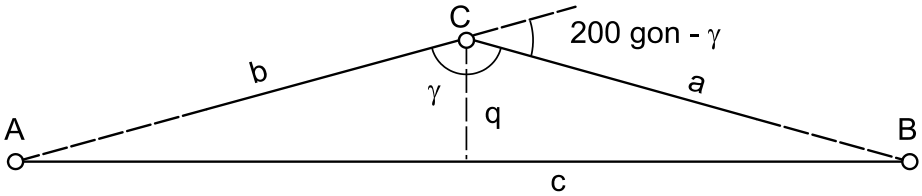
mit optischer Bezugslinie





Optisches Alignement

Die optische Referenzlinie ist ein Laserstrahl oder wird durch ein Fadenkreuz und im Objektivmittelpunkt definierte Ziellinie eines Fernrohres definiert.



Für die Querabweichung q ergibt sich

$$q = \frac{a \cdot b}{c} \cdot \sin\gamma \,.$$

Die Genauigkeit von q lässt sich durch Differenzieren abschätzen.

$$\frac{dq}{q} = \frac{da}{a} + \frac{db}{b} - \frac{dc}{c} + \cot\gamma \cdot d\gamma \,.$$

Da q klein ist im Verhältnis zu a und b, kann man c durch a + b ersetzen. Mit dc = (da + db) ergibt sich

$$dq = \frac{\sin\gamma}{(a+b)^2} \cdot (b^2 \cdot da + a^2 \cdot db) + \frac{a \cdot b}{a+b} \cdot \cos\gamma \cdot d\gamma \,.$$

Der Einfluss der Streckenunsicherheit da und db bleibt unter 0,01 mm, wenn da = db $\leq$ 3 cm und $d\gamma$ = 200 – $\gamma \leq$ 0,02 gon bleibt.

Dann hängt die Genauigkeit der Querabweichung q nur noch von der Winkelmessung ab. Wegen des kleinen Winkels $d\gamma$ kann man cos γ = 1 setzen und erhält

$$\sigma_q = \frac{a \cdot b}{a+b} \cdot \sigma_\gamma$$

mit σ_γ als Standardabweichung des Brechungswinkels γ in [rad].

Beispiel:

Neben dem Auflösungsvermögen bzw. der Stabilität der Referenzlinien, wird die Genauigkeit optischer Alignements durch die Refraktionserscheinung des Mediums bestimmt. Eine Reduzierung des Refraktionseinflusses lässt sich entweder über refraktionsfreie Richtungsmessungen oder im Vakuum (ca. $10^{-2} \cdots 10^{-3}$ hPa) erzielen.

Alignement im Maschinenbau

Die Bezugslinie wird durch die Ziellinie des Fernrohrs gegeben, die über den gesamten Fokussierbereich einer Geraden hoher Genauigkeit entspricht.

Beim System der Firma Taylor-Hobson ist das zylindrische Fernrohr in einer Kugel gelagert, deren Mittelpunkt in der Ziellinie liegt und gleichzeitig den Messpunkt definiert.

Die Kugel wird über einen Federbügel in einer konischen Buchse gehalten, sodass das Fernrohr spielfrei um den Kugelmittelpunkt verschwenkt werden kann. Man zielt eine Zielmarke am Ende der Strecke an, die in einer entsprechenden Kugel zentrisch eingebaut ist. Sie zentriert sich ebenfalls in einer konischen Buchse.

Die Referenzlinie wird durch die Verbindungsgerade der Kugelmittelpunkte der Endpunkte der Alignementsstrecke definiert. In dieser Gerade wird die Ziellinie des Fluchtfernrohres eingerichtet, so dass weitere Zwischenpunkte eingewiesen bzw. die Ablagen dieser Punkte ausgemessen werden können.

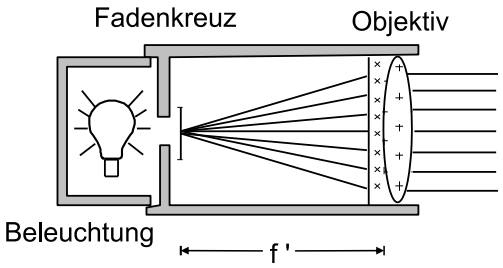
Das Fluchtfernrohr hat zwei in senkrecht zueinander stehenden Richtungen wirkende Planplattenmikrometer mit einem Messbereich von ±1,25 mm.

Bis 30 m können Ablagen ca. 0,04 mm bis 0,10 mm bestimmt werden.

3.2 Kollimation

Ein **Kollimationsfernrohr** oder ein Kollimator ist ein „Projektor“, der eine Fadenkreuzplatte mit einer Beleuchtungseinrichtung nach ∞ abbildet. Die abzubildende Marke liegt in der Brennebene des Objektivs und wird okularseitig beleuchtet.

Der Kollimator stellt also ein umgekehrtes, auf unendlich fokussiertes Fernrohrsystem dar, bei dem das Okular durch die Beleuchtungseinrichtung ersetzt ist.

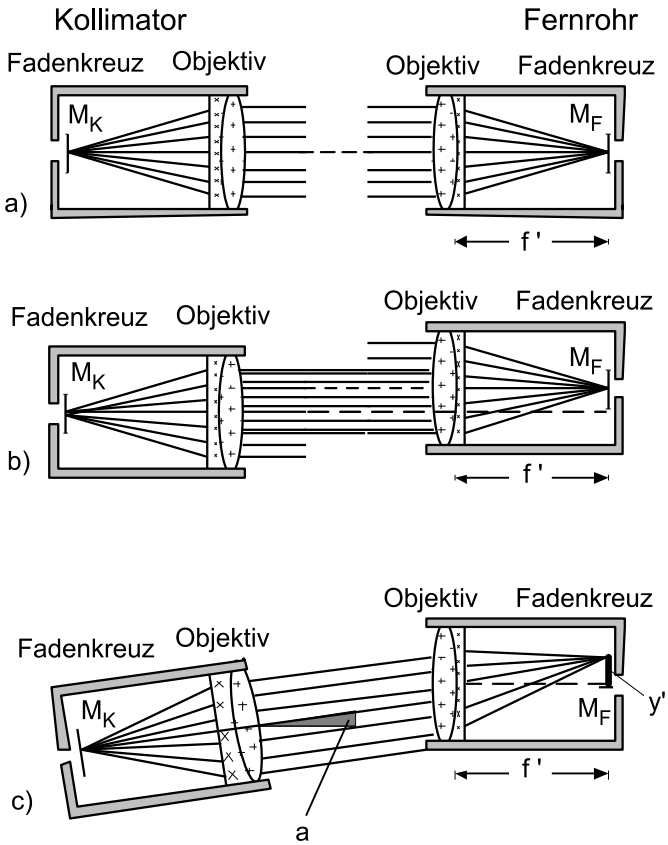


Alle vom Fadenkreuz ausgehenden Lichtstrahlen sind nach dem Durchgang durch das Objektiv in sich und zur Ziellinie parallel.

Sie scheinen von einem Punkt im Unendlichen hinter dem Kollimator zu kommen und bilden damit das Fadenkreuz des Kollimators im Unendlichen ab.

Stellt man einem solchen Kollimator ein auf unendlich fokussiertes Zielfernrohr gegenüber, so wird das vom Kollimator entworfene Bild der Marke in der Fadenkreuzebene des Fernrohrs scharf abgebildet.

Für den Beobachter am Fernrohr scheint das Markenbild aus dem Unendlichen zu kommen.



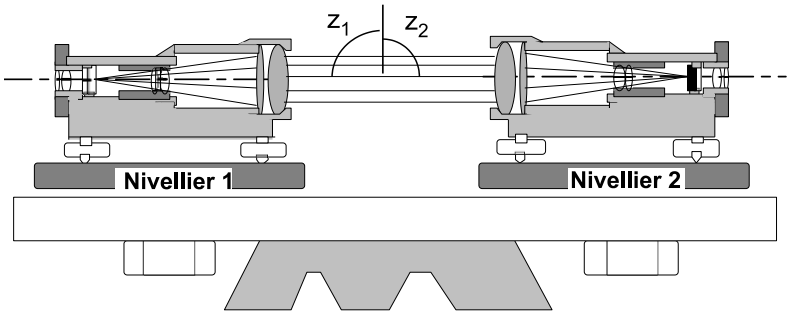
a) Stehen sich Kollimator und Fernrohr so gegenüber, dass ihre Zielachsen zusammenfallen, so wird die vom Kollimator projizierte Marke in der Mitte des Fernrohrfadenkreuzes abgebildet.

b) Sind die beiden Zielachsen parallel gegeneinander versetzt, so bleibt die Koinzidenz der Kollimatormarke M_K mit der Fernrohrmarke M_F trotzdem erhalten. Die aus dem Kollimator tretenden Strahlen bleiben parallel zur Zielachse des Fernrohrs, weshalb sich die Lage des Bilds im Fernrohr nicht verändert.

c) Sind die Ziellinien von Fernrohr und Kollimator geneigt, so koinzidieren Kollimatormarke und Fernrohrmarke nicht. Das Bild der Kollimatormarke M_K wandert seitlich aus. Damit kann die Richtungsdifferenz α zwischen den beiden Achsen aus der Bildverschiebung y´ bestimmt werden.

- Justier- und Kontrollarbeiten: Winkeldifferenzen zwischen Achsen oder Flächen
- Kollimator als Fernziel; Zielmarkierung und Beleuchtung hohe Einstellgenauigkeiten
- kleine Parallelverschiebungen des Prüflings gehen nicht als Richtungsfehler in das Messergebnis ein

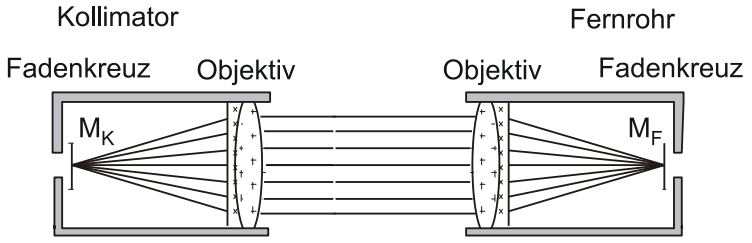
- Justierung der horizontalen Zielachse bei Nivelliergeräten
- Untersuchung und Beseitigung von Achsfehlern bei Theodoliten
- Ermittlung der Teilkreisexzentrizität bei Theodoliten
- Justieren der Höhenindexlibelle
- Bestimmung der Einspielgenauigkeit des Kompensators bei automatisch horizontierenden Nivellierinstrumenten

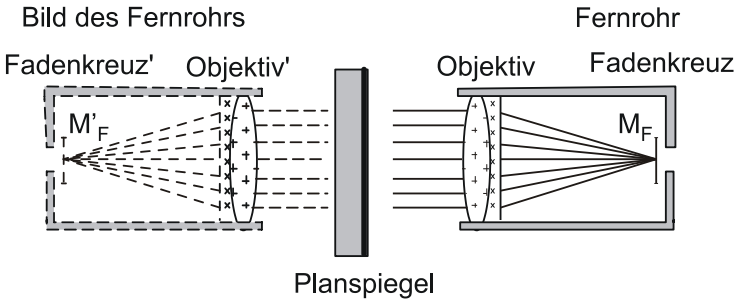


$z_1+z_2=200$ gon

Bringt man zwei auf unendlich fokussierte Nivellierinstrumente in gegenseitige Kollimation und justiert die Zielachse eines der Instrumente so, dass die Bilder beider Fadenkreuze zusammenfallen, so sind beide Zielachsen parallel.

Die Zenitwinkel der beiden Zielachsen ergänzen sich zu 200 gon, d. h. das eine Instrument zielt in Bezug zum wahren Horizont um genauso viel nach oben wie das andere nach unten.





Beobachtet man mit einem solchen Instrumentenpaar eine Nivellierlatte und liest jeweils ab, so bildet der Mittelwert aus beiden Ablesungen den wahren Horizont auch bei ungleichen Zielweiten (vgl. Stromübergangsnivellement).

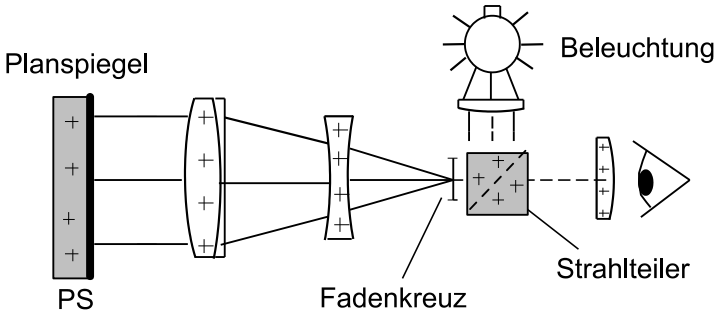
Bei Richtungsübertragungen mit sehr kurzen Zielweiten können zwei Theodolite zur gegenseitigen Kollimation gebracht werden, sodass ihre Zielachsen parallel ausgerichtet sind. Dazu werden beide Fernrohre auf unendlich fokussiert, die Fadenkreuze durch die Okulare beleuchtet (z. B. mit einem halb durchlässigen Spiegel) und die Bilder der Fadenkreuze zur Deckung gebracht.

3.3 Autokollimation

Beim **Autokollimationsfernrohr** wird die Kollimatormarke durch Zwischenschaltung eines Planspiegel mit einem Fernrohr beobachtet. Anstelle des Kollimators tritt das durch den Spiegel erzeugte virtuelle Bild des Fernrohrs.

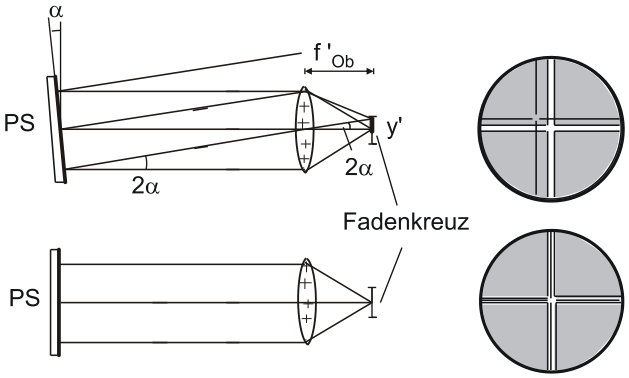
Wird der Spiegel rechtwinklig zur optischen Achse des Fernrohrs ausgerichtet, stellt das virtuelle Bild des Fernrohrs gleichzeitig den Kollimator dar.

Dafür wird die in der Brennebene des Fernrohrs liegende Strichplatte beleuchtet. Dazu wird das Licht einer seitlich des Fernrohrs angebrachten Beleuchtung über einen Strahlteiler in Richtung Strichplatte abgelenkt.



Das von der beleuchteten Strichplatte projizierte Licht verlässt das auf unendlich fokussierte Fernrohr als paralleles Strahlenbündel. Steht der Planspiegel exakt rechtwinklig zur Zielachse, werden die Strahlen in sich selbst reflektiert und erzeugen ein Bild des projizierten Fadenkreuzes in der Brennebene des Fernrohrobjektivs.

Ein Beobachter sieht beim Blick in das Okular das Fadenkreuz der Strichplatte des Fernrohrs und das projizierte Fadenkreuz in Koinzidenz.



Neigt man den Planspiegel (PS) um einen Winkel α, werden die reflektierten Strahlen um 2α abgelenkt und fallen unter diesem Winkel in das Objektiv zurück. In der Brennebene entsteht ein Bild des Fadenkreuzes, das zum Fernrohrfadenkreuz um den Betrag y' verschoben ist.

Die Verschiebung y' ist eine Funktion der Neigung des Planspiegels und der Objektivbrennweite des Fernrohrs.

$$y' = f'_{Ob} \tan 2\alpha \,.$$

Ist die Brennweite des Objektivs f'_{Ob} bekannt und wird die Verschiebung y' gemessen, können kleine Winkel, um die der Spiegel geneigt ist, einfach und sehr genau gemessen werden.

Dazu wird ein Fadenkreuz verwendet, das eine auf die Objektivbrennweite abgestimmte Skala hat, sodass an dieser Skala unmittelbar der Neigungswinkel α abgelesen werden kann.

- Autokollimationsfernrohr Objektivbrennweite f_{Ob} = 500 mm
- Skala im Fadenkreuz mit Teilstrichabstand y' = 0,073 mm
- entspricht ein Intervall dieser Teilung einer Spiegelneigung α von 15"
- Schätzen 0,1 Skalenteile: Schätzgenauigkeit von 1,5" für den Neigungswinkel α
- Skala ±30 Intervalle: Messbereich ±7'

Der Abstand vom Objektiv zum Spiegel spielt für die Auflösung und die Messgenauigkeit keine entscheidende Rolle. Wichtig ist nur, dass die vom Spiegel reflektierten Strahlen (wenigstens ein Teil davon) wieder in das Objektiv zurückfallen können. Bei größer werdendem Abstand wird der Messbereich kleiner.

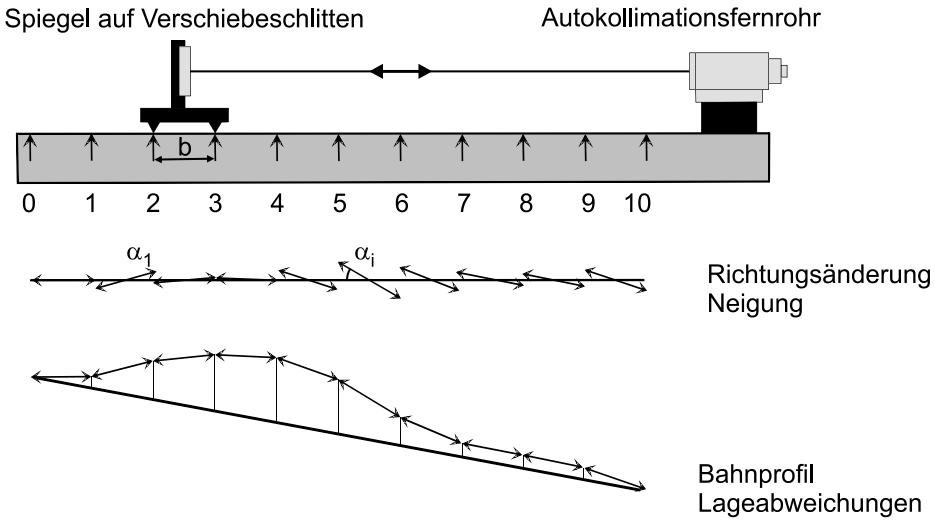
Beispiel: Messung Bildversatz Δy und Spiegelverdrehung

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta y}{2f}$$

Δα	Verdrehwinkel im Bogenmaß
Δy	Versatz des Bildes der beleuchteten Strichplatte zur Strichplatte des Mikrometerokulars in der Brennebene
f	Brennweite des Fernrohrobjektivs

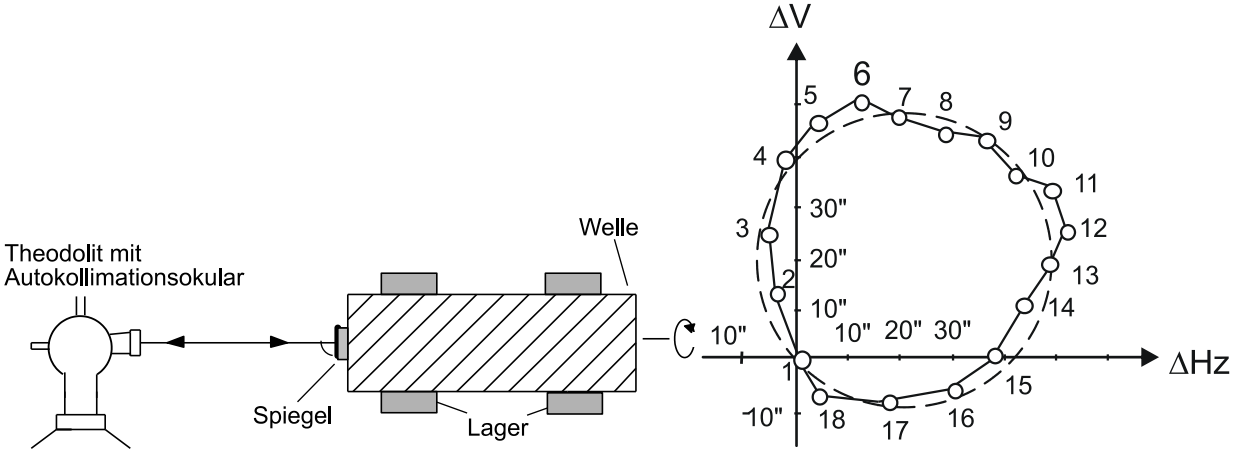
- Bildversatz auf 1µm genau, Brennweite f = 500 mm; Auflösung von Richtungsänderungen von 0,2 ″
- Messbereich auf ungefähr 50 m begrenzt

Übung: Die Ebenheit einer Schiene oder einer Maschinenanlage soll geprüft werden. Dazu wird ein Autokollimationsspiegel senkrecht stehend auf einer Grundplatte befestigt. Die Grundplatte sollte möglichst gut definierte Auflagepunkte haben, deren Abstand in Messrichtung die Basislänge b festlegt.



Legt man eine Basislänge von b = 100 mm und eine Auflösung der Winkelmessung im Autokollimationsfernrohr von 5" zugrunde, so entspricht dies einer Genauigkeit im Höhenunterschied von $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ mm.

Beispiel: Der Taumelfehler einer Achse oder Welle soll festgestellt werden. Dazu wird ein Autokollimationsspiegel an einem zugänglichen Ende der Welle befestigt.



Die Welle wird um beliebige, konstante Winkelwerte β gedreht und im Autokollimationsfernrohr die Neigungsänderungen des Spiegels an der horizontalen und vertikalen Skala abgelesen. Die erste Zielung der vollen Umdrehung ist der Bezugswert. Liefe die Welle exakt rund, wäre das Bild in der Abbildung kreisrund und der Radius des Kreises entspräche der Neigung der Spiegelnormalen gegenüber der Wellenachse. Die Abweichungen vom Kreis stellen den **Taumelfehler** dar.

Vorteile in der Industrie- und Laborvermessung

- Da immer ein Spiegel angezielt wird, erhält man das reflektierte Bild des Fadenkreuzes als Ziel. Dieses bildet eine ideale Zielmarke für Präzisionsmessungen.
- Da eine kleine Neigung des Spiegels um den Winkel α eine Ablenkung der reflektierten Strahlen um 2α bewirkt, ist die Messgenauigkeit doppelt so groß wie bei einer Zielung auf einen Kollimator.
- Da beim Autokollimationsfernrohr mit parallelen Strahlen gearbeitet wird, braucht man das Fernrohr nicht exakt auf dem Standpunkt zu zentrieren.

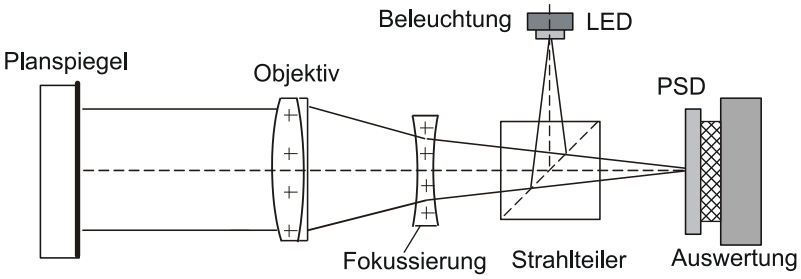
- Da es sich um Parallelstrahlen handelt, entfällt die kürzeste Zielweite. Der Planspiegel kann sich unmittelbar vor dem Objektiv befinden.

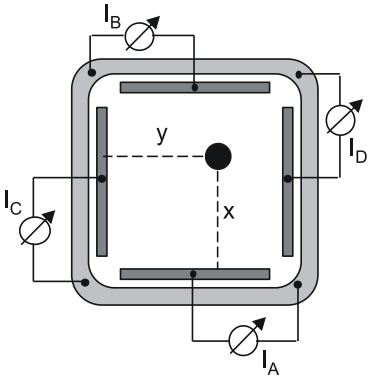
Anwendung

- Prüf- und Kontrollmessungen
- Erfassung kleiner Winkeländerungen und Winkelabweichungen (Durchbiegung)
- Festlegung und Kontrolle rechter Winkel
- Eichung von Winkelmesseinrichtungen
- Bezugsrichtung bei Absteckung und Winkelmessung

Autokollimationsfernrohre mit elektronischer Auswertung

Das Kollimatorfadenkreuz wird durch den Lichtpunkt einer Leuchtdiode ersetzt, deren Strahlung über den Strahlteiler in das Fernrohr eingespiegelt wird. Nach der Reflexion am Autokollimationsspiegel wird der reflektierte Lichtpunkt auf eine positionsempfindliche Diode (z. B. Lateraleffektdiode) abgebildet. Die Position des Lichtpunkts wird auf der Diodenoberfläche detektiert.





Es werden die Teilströme I_A, I_B, I_C und I_D gemessen. Die Position des Lichtflecks ergibt sich aus den elektrischen Strömen der Diode für die Richtungen x und y:

$$x = \frac{I_B}{I_A + I_B}; \; y = \frac{I_C}{I_C + I_D} .$$

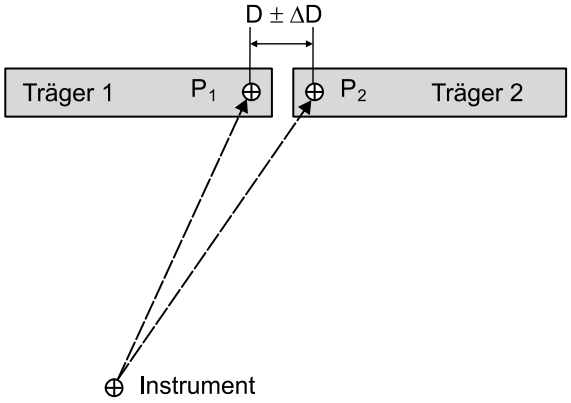
Automatische und kinematische Messung der Spiegelneigungen in allen Richtungen.

4 Abstands- und Längenänderungsmessungen

4.1 Geodätische Abstandsmessungen[5]

Aus den „eindimensionalen“ Messelementen **Länge** und **Winkel** lassen sich die „mehrdimensionalen“ Informationen Lage, Abstand, Neigung, Form ableiten.

Die Verwendung eines Tachymeters für kleine Abstände, Abstandsänderungen oder Längenänderungen ist aus fehlertheoretischer Sicht ungünstig.



An der Fuge zweier Brückenträger soll der Abstand der Messpunkte P_1 und P_2 mit großer Genauigkeit gemessen werden. Mit einem Tachymeter werden die x-, y-Koordinaten der Punkte bezogen auf den Instrumentenstandpunkt bestimmt.

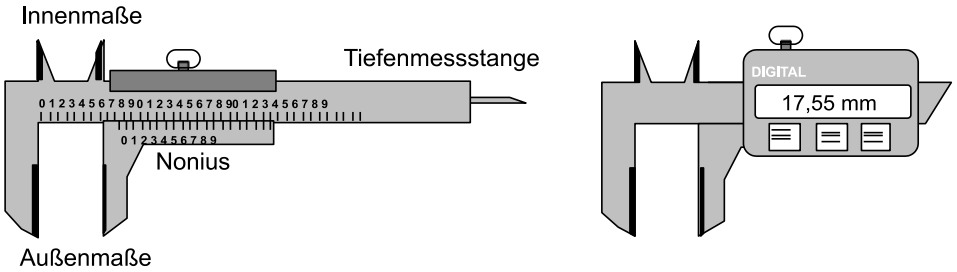
$$D = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \ .$$

Damit gehen aber auch die Unsicherheiten der (langen) Strecken sowie die Unsicherheiten der Richtungsmessung in die Bestimmung des Abstands D ein. Fehlertheoretisch und praktisch ist es günstiger, den gesuchten Abstand D direkt zu messen.

4.2 Messschieber und Messuhren

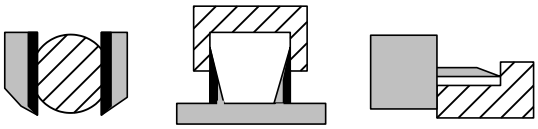
Messschieber

- Messschiene und gleitender Schieber mit einen oder zwei Messschenkeln und ein oder zwei Messflächen
- Messspannen bis 160 mm, analoge oder digitale Anzeige und Tiefenmessstange



[5] Siehe auch VL „Bauwerksüberwachung“

Das kritische Merkmal an Messschiebern ist das Nichteinhalten des *Abbe*'schen Komparatorprinzips beim Messen mit den Messflächen der beiden Messschenkel.



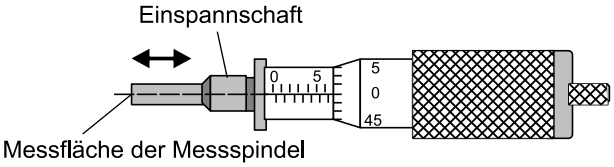
Die durch das Abkippen des Schiebers entstehenden Einflüsse bewirken Messfehler 1. Ordnung. Messschieber mit möglichst kurzen Messschenkeln benutzen und der Prüfgegenstand sollte nahe an der Schiene an den Messflächen anliegen.

Messuhren haben einen unter Federkraft stehenden und längs beweglich geführten Messbolzen. Bei mechanischen Systemen wird sein Weg durch eine Zahnstange über ein Zahngetriebe auf einen Zeiger übertragen.

Bei Messuhren mit elektronischem Messsystem tritt an die Stelle der Zahnstange ein inkremental geteilter Maßstab. Messuhren mit dem Skalenteilungswert 0,01 mm sind in DIN 878 genormt. Es sind Messspannen von 0,4 mm bis 100 mm üblich.

Einbaumessschrauben stellen die Grundformen der **Messschrauben** dar. Sie dienen als Verstell- oder Messelement an kleinen Koordinatenmessmaschinen, an Anschlägen von Werkzeugeinstellungen oder zum direkten Messen kleiner Distanzen.

Bei Messspannen bis 25 mm Messgenauigkeit 3 μm bis 5 μm.



4.3 Kapazitives Messprinzip

- Klassisches Verfahren der industriellen Weg-, Abstands- und Positionserfassung
- Berührungslos | verschleißfrei | nanometergenau (10^{-9})
- Sensor und Messobjekt bilden „Platten“ eines idealen Kondensators

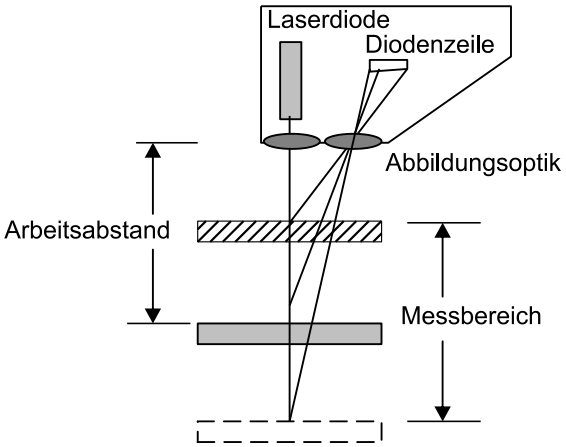
Wegaufnehmer

Elektrische Sensoren für die Messung von Wegen, Verschiebungen oder Verformungen beruhen auf elektrischen, magnetischen, optischen oder akustischen Wechselwirkungen zwischen der gesuchten Länge bzw. Längenänderung und den entsprechenden Ausgangssignalen der Geber.

Wegaufnehmer zur Längenmessung im extremen Nahbereich					
Sensortyp	**Prinzip**	**Abtastung**	**Messbereich**	**A/D**	**Genauigkeit**
resistiv	elektrisch	tastend	0 – 1 000 mm	A	10^{-2}
kapazitiv	elektrisch	berührungslos	0 – 50 mm	A	10^{-3}
induktiv	elektrisch	berührungslos	0 – 200 mm	A	10^{-4}
magnetisch	elektrisch	berührungslos	0 – 1 000 mm	A/D	10^{-4}
Ultraschall	Schall	berührungslos	0 – 10 000 mm	A	10^{-3}
codiert	optisch	berührungslos	0 – 1 000 mm	D	10^{-5}
inkremental	optisch	berührungslos	0 – 1 000 mm	D	10^{-5}
Radar	EM-Wellen	berührungslos	0 – 10 000 mm	A	10^{-2}
Interferometer	optisch	berührungslos	0 – 10 000 mm	A	10^{-6}

Triangulationstaster

Bei der Punkt-Triangulation wird ein Lichtpunkt (meist Laserlicht) auf die Objektoberfläche projiziert und das rückgestreute Licht unter einem Winkel von 15° bis 35° auf einem positionsempfindlichen Empfänger abgebildet.



Sollen die Sensoren für Messaufgaben (Messunsicherheit 0,1 %) eingesetzt werden, sind hohe Anforderungen an den physikalisch-optischen Aufbau und an die verwendeten optoelektronischen Bauelemente zu stellen.

Eine scharfe Abbildung des Lichtpunkts auf dem Empfänger ist möglichst für den gesamten Messbereich des Sensors zu gewährleisten. Die Beeinflussung der Schärfentiefe über die Blendenöffnung ist nur bedingt möglich.

Die Genauigkeit des Verfahrens kann mit etwa 0,1 % des Messbereichs angegeben werden, die Reproduzierbarkeit beträgt ca. 0,05 %. Es ist zu beachten, dass eine Kalibrierung auf die jeweilige Oberfläche (Reflexionseigenschaften) notwendig ist.

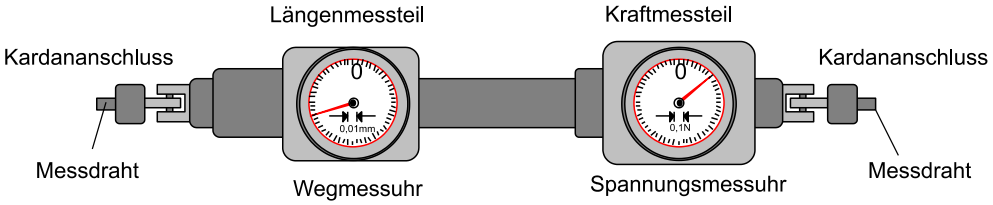
Distometer ETH

Das Distometer ETH von Solexperts ist ein Präzisionsgerät zum Messen von Längen mithilfe von Invardrähten. Es ist vor allem zur genauen Bestimmung von Abstands- und Längenänderungen bei Verschiebungs- und Deformationsmessungen geeignet.

Die wesentlichen Bestandteile sind ein Kraftmessteil und ein Längenmessteil. Beide Teile haben Messuhren als eigentliche Messsysteme. Als Spannungsmesser für den Invardraht wird eine Präzisionsfederwaage verwendet, deren Ausschlag von einer Messuhr angezeigt wird.

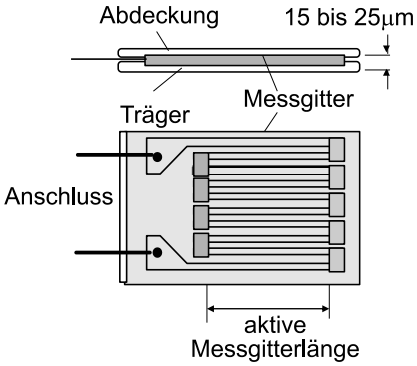
Eine Längenänderung zwischen den beiden Messpunkten kann an der Längenmessuhr abgelesen werden, wenn die Drahtspannung – mithilfe der Messuhr der Federwaage – auf den entsprechenden Wert eingestellt wurde.

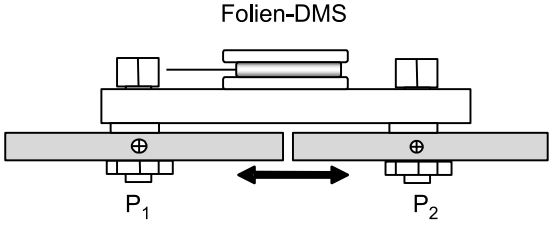
Es lassen sich Invardrähte von 1 m bis 50 m Länge verwenden, die messbare Längenänderung kann dabei bis 100 mm betragen, und die erreichbaren mittleren Fehler (20 m-Draht) liegen etwa bei ±0,02 mm.



4.4 Dehnungsmessung

Folien- **Dehnungsmessstreifen** (DMS) sind Messmittel zur Erfassung von mechanischen Spannungen und Dehnung an Bauteilen





Folien-DMS Fugenmesser mit Folien-DMS

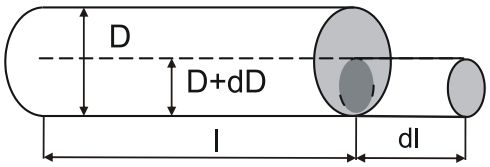
Treten an einem Bauteil infolge äußerer oder innerer Kraftwirkungen Gestaltänderungen auf, so ergeben sich Verzerrungen (Dehnungen oder Stauchungen) seiner Oberfläche.

Ein an dieser Oberfläche befestigter Dehnungsmessstreifen folgt nun den ihm vom Messobjekt aufgezwungenen Dehnungen und verändert dabei seinen elektrischen Widerstand. Die Widerstandsänderung ist ein Maß für die Dehnung (= Fuge).

DMS wandeln mechanische nichtelektrische Größen in eine elektrische Größe.

Beispiele: Messung mechanischer Beanspruchung sind Sensoren für Kraft, Druck, Drehmoment, Beschleunigung, Weg und Dehnung

Der Dehnungsmessstreifen (DMS) nutzt die Änderung des elektrischen Widerstands eines Drahts unter dem Einfluss einer Dehnung.



- Länge l des Drahts wird auf die Länge l + dl vergrößert
- Durchmesser D wird um den Betrag dD verringert

Mit dem spezifischen Widerstand ρ berechnet sich der elektrische Widerstand des Drahts:

$$R = \rho \frac{l \cdot 4}{D^2 \pi} .$$

Unter dem Einfluss der Dehnung ändert sich der Widerstand R auf den Wert R+dR:

$$R + dR = (\rho + d\rho) \frac{(l + dl)4}{(D + dD)^2 \pi} .$$

Für unendlich kleine Änderungen dρ, dl, dD ergibt sich die relative Widerstandsänderung dR/R:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2\frac{dD}{D} + \frac{d\rho}{\rho} = \frac{dl}{l}\left(1 - 2\frac{dD/D}{dl/l} + \frac{d\rho/\rho}{dl/l}\right) .$$

Die relative Längenänderung dl/l bezeichnet man als Dehnung ε:

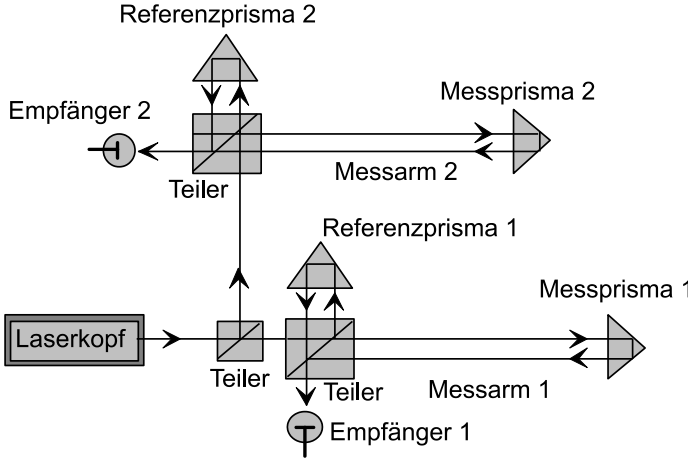
$$\varepsilon = \frac{dl}{l} .$$

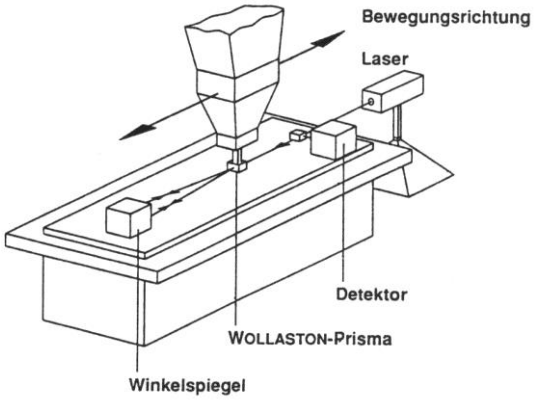
4.5 Interferometer

Messung einer Distanzänderung, durch die Bewegung eines Retroreflektors längs des Laserstrahls im Interferometer.

Bei mehrachsigen Systemen wird der aus dem Laserkopf kommende Strahl mehrfach geteilt und in unterschiedliche Richtungen gelenkt.

Jeder Teilstrahl wird dann mit dem jeweiligen Referenzstrahl überlagert und von einem eigenen Empfänger überwacht. Damit lassen sich mehrere Achsen gleichzeitig messen und überwachen, Aufbau einer 3D-Koordinatenmessmaschine.





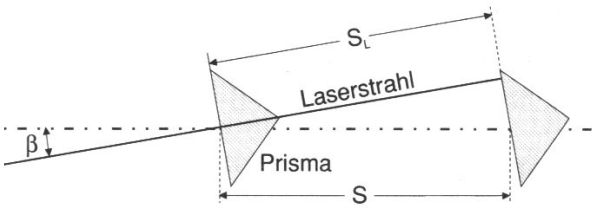
Werden zwei Lichtstrahlen überlagert und die Wellen gegeneinander verschoben entstehen Lichtinterferenzen in Form von periodischen Helligkeitsschwankungen.

Die Anzahl der Interferenzen multipliziert mit der Wellenlänge des Lichts (< 1µm) ergibt den Verschiebungsbetrag einer Welle zur anderen. Voraussetzung: konstante Phasenbeziehung = kohärente Wellen.

Es ergeben sich hochpräzise Streckenänderungen mit einem He-Ne-Laser λ = 633 nm.

Wellenlänge: $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$

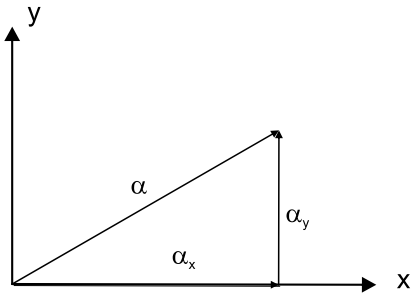
- Brechungsindex: $n = 1 + 2{,}8793 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{p}{1 + 3{,}671 \cdot 10^{-3} \cdot t} - 4{,}2 \cdot 10^{-8} \cdot p_w$
- Änderung von 1ppm: Δt = 1,0 K, Δp = 3,4 hPa, Δp_w = 17 hPa
- Frequenzstabilität (10^{-8})
- Justierungenauigkeiten, Kosinusfehler
- Eigenschaften der optischen und elektronischen Bauteile
- Temperatur des Messobjekts
- Genauigkeit: σ_s = 0,2 ppm, s_{max} = 50 m, σ_s = 0,01 ppm



4.6 Neigungssensoren

- Bezugssystem: lokales kartesisches KS und Neigungswinkel α
- z-Achse lokale Lotrichtung; x- und y-Achsen Horizontalebenen
- Objektsysteme im Bezugssystem positionieren
- z-Achse fällt nicht mit der lokalen Lotrichtung in ihrem Nullpunkt zusammen
- x- und y-Achse Winkel mit den Lotrichtungen, die von 90° um die Beträge α_x und α_y abweichen
- Festlegung der Neigung der Achsen in Bezug auf die Horizontalebene
- Größe und Orientierung des Neigungswinkels α

Werden die Neigungen α_x und α_y als Vektoren in der Horizontalebene dargestellt, dann sind Betrag und Richtung der Neigung α der z-Achse die Resultierende.



Maschinenwasserwaagen

Wellenwaagen (Abb. a). Eine Röhrenlibelle ist in einem Stahlgehäuse mit V-förmig geschliffener Messfläche eingebaut. Sie kann auf ebenen Flächen und auf Wellen aufgelegt werden. **Rahmenwasserwaagen** (Abb. b): auf schwach geneigten Unterlagen aufgesetzt oder an vertikal stehenden Setzlinien angehalten. Libellenangaben (Empfindlichkeit) von wenigen 0,1 mm/m bis 0,02 mm/m. Messbereich: ±0,15 mm/m

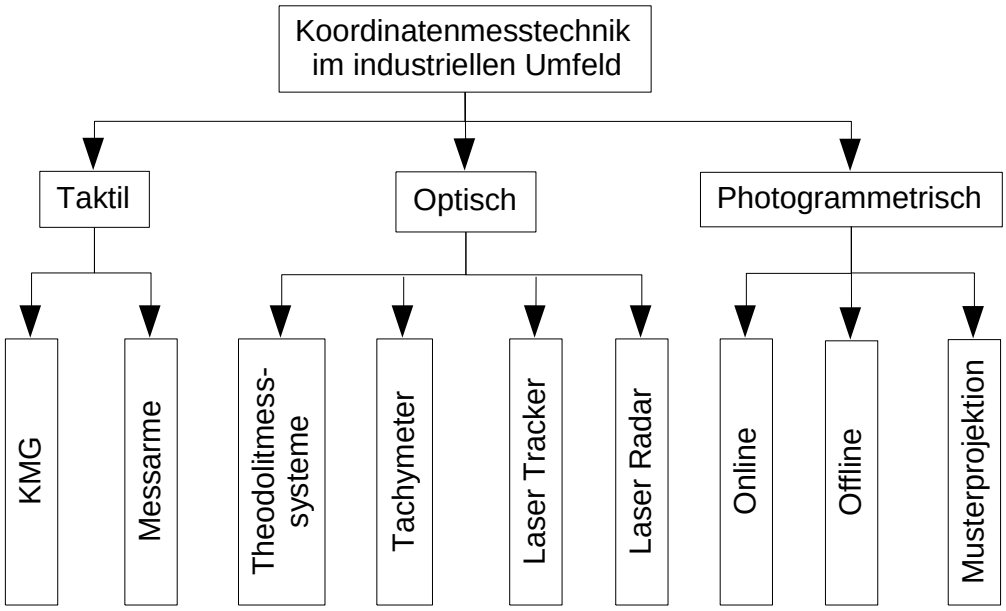
a) Wellenwaage, b) Rahmenwaage, c) Koinzidenzlibelle

Koinzidenzlibellen (Abb. c). Libelle wird mit einer Mikrometerschraube gegen die Aufsatzfläche des Gehäuses gekippt. Über eine Koinzidenzoptik die Blasenenden zur Deckung gebracht, womit die Libelle einspielt und die Neigung der Aufsatzfläche aus der Ablesung der Mikrometerschraube ermittelt wird. Messbereich ±10 mm/m Messunsicherheit < 0,01 mm/m.

5 Industriemesstechnik

Die ursprüngliche Technologie der Objekterfassung ist die diskrete Punkterfassung. Die Punkterfassung erfolgt bei den Koordinatenmessgeräten (KMG) und Gelenkarmen taktil, d.h. mit Berührung.

Die geodätischen Technologien mit Theodolit, Tachymeter und Laser Tracker sind optische Verfahren, die meist eine Punktsignalisierung (Vermarkung, Reflektoren) erfordern. Bei den Lasertrackern sind Scanfunktionen integriert. Bei den digitalen online Photogrammetriesystemen sind für hohe Bildmessgenauigkeiten codierte und uncodierte Zielmarken erforderlich.



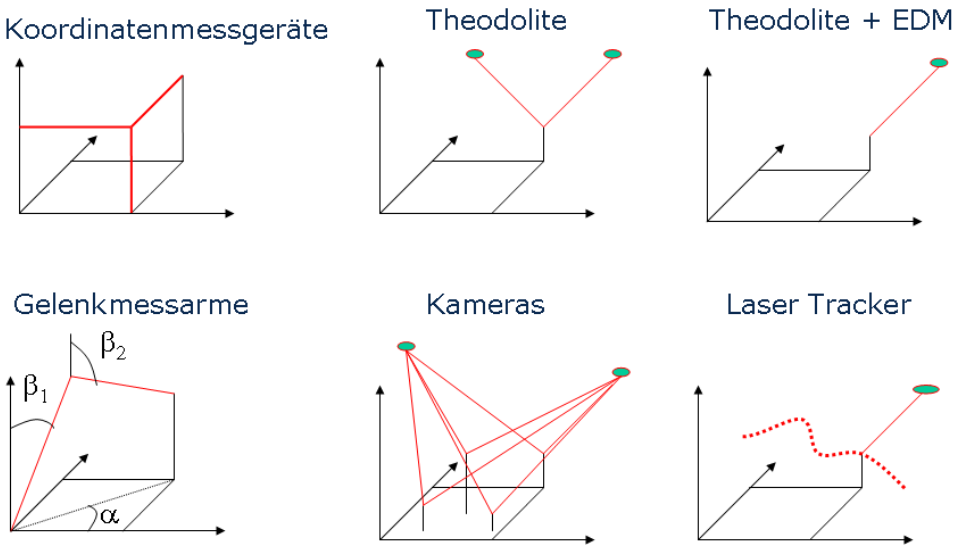
	Industriemesstechnik	Koordinatenmessgerät
Sensoren	mobil	stationär
Anordnung	freie Konfiguration	zwangsweise
Bezugssystem	global	lokal
Messvolumen	Umkreis 40m	12m x 3,5m x 2,4m
Messunsicherheit	10^{-5} bis 10^{-6}	10^{-6} bis10^{-8}

Optische Messtechnik: 1999 etwa 75% der Unternehmen rein taktile Messgeräte; 2003 41% und 2009 75 % berührungslose Systeme.

Industrievermessung ist höchste Präzision im Nahbereich (max. 30 m) im Submillimeterbereich:

- Bestimmung der Formelemente Punkt, Gerade, Ebene, Kreis, Zylinder
- Qualitätskontrolle im Automobil-, Schiff- und Flugzeugbau
- Bestimmung der Lage von Bohrungen, Ecken und signalisierten Punkten an Fahrzeugkarosserien, Fertigungsanlagen (Pressen, Walzstraßen)
- Einrichtung von Kraftwerksturbinen und Linearbeschleunigern
- Bestimmung der Positioniergenauigkeit und Kalibrierung von Robotern
- Formprüfungen an Parabolantennen, Kühltürmen, Kugelbehältern
- Reverse Engineering als Rückführung vom Objekt zum Modell

Präzise 3D-Koordinatenbestimmung mit folgenden Messsystemen

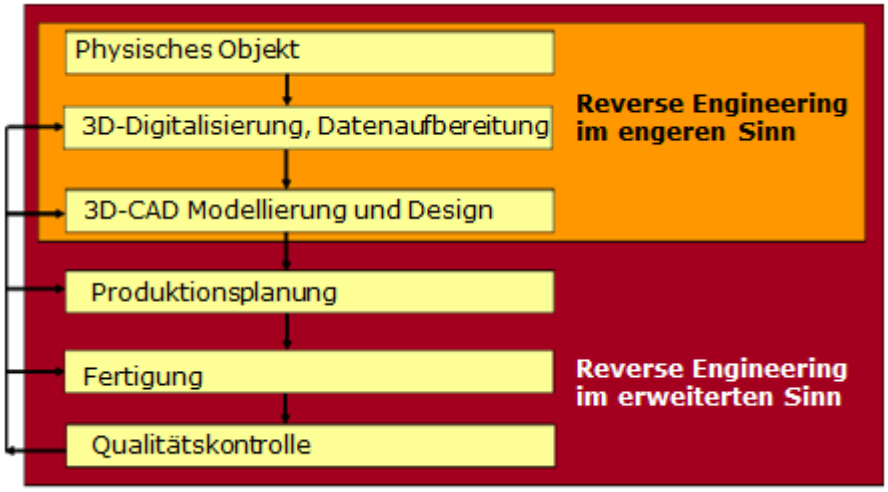


5.1 Reverse Engineering

Reverse Engineering – Vom Objekt zum Modell

(bedeutet: *umgekehrt entwickeln*, *rekonstruieren*)….

….bezeichnet den Vorgang, aus einem bestehenden, fertigen System oder einem industriell gefertigten Produkt durch Untersuchung der Strukturen und Zustände, die Konstruktionselemente zu extrahieren. Aus dem fertigen Objekt entsteht wieder ein Plan[6].



- 3D-Digitalisierung von Freiformflächen für die Fertigung und FEM-Simulation
- Anwendungen: KFZ-Technik, Umformtechnik, Energiemaschinen
- Soll-Ist-Vergleich: Ein Spritzgussteil wird im CAD modelliert, gefertigt und RE-digitalisiert; danach erfolgt der Vergleich im CAD mit dem Sollteil

[6] Wikipedia

- RE beginnt an der Schnittstelle mit der Punktwolke des Scanners und dem CAD-Modell mit Objekt- und Flächeneigenschaften

Freiformflächen

Unter Freiformflächen werden nicht einfach zu beschreibende Oberflächen verstanden, die in der Regel nur durch Polynome höheren Grades oder hinreichend dichte Dreiecksflächen beschrieben werden können.

- Energiemaschinenbau bei Turbinen,
- Fahrzeugbau für Karosserien und den Designentwurf,
- Medizintechnik | Zahnmedizin

Die numerische Erfassung der Oberfläche von Werkstücken erfolgt durch Abtasten mit einem optischen oder 3D-Laserscanner. Als Ergebnis liegt eine Menge diskreter Punkte der gescannten Oberfläche als Basis für die Flächenrückführung vor.

Der Reverse Prozess bildet die Schnittstelle zwischen der gescannten Punktewolke und dem CAD-Modell mit Objekt- und Flächeneigenschaften.

Für die Flächenrückführung in CAD-Modellen stehen verschiedene mathematische Flächenmodelle zur Verfügung: Triangulation (nachteilig: sehr viele Dreiecke, unstetige Oberflächen) und NURBS (*N*on*U*niform *R*ational *B*-*S*plines)[7].

Berechnung

Bei der Flächentriangulation und Dreiecksvermaschung (Delaunay Triangulation) werden die drei unmittelbar benachbarten Punkte einer Fläche zu einem Dreieck verbunden.

Die Ecken der Dreiecke werden als Knoten und die Verbindungen der Knoten als Kanten bezeichnet. Jede entstehende Dreiecksfläche hat die Flächennormale als Richtung. NURBS- Flächen, Nonuniform Rational B-Splines (deutsch: *Nicht-uniforme rationale B-Splines*), sind mathematisch definierte Kurven oder Flächen

Dabei bezieht sich Nonuniform auf die Gewichtung einzelner Knoten bzw. deren Gewichtsfunktion. Diese müssen bei NURBS nicht einheitlich für jeden Knoten sein, sondern können von Kurvensegment zu Kurvensegment unterschiedlich sein. Die Darstellung der Geometrieinformation erfolgt über stückweise funktional definierte Geometrieelemente.

Eine NURBS-Fläche wird durch die beiden Parameter u und v nach folgender Gleichung aufgespannt

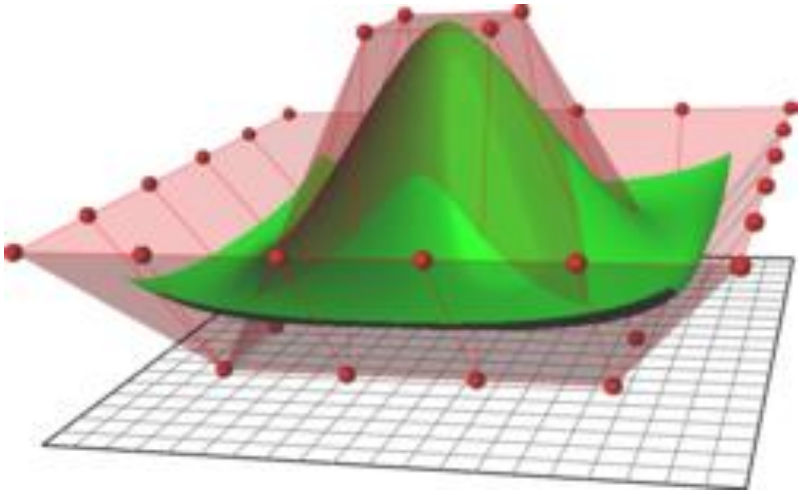
$$S(u,v) = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} R_{i,j}(u,v) P_{i,j}$$

und sind definiert durch ein Kontrollgitter $P_{i,j}$ und die rationale Basisfunktion

[7] SCHÖNE, CH. (2006): Reverse Engineering für Freiformflächen. Studienbrief TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen.

$$R_{i,j}(u,v) = \frac{N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}}{\sum_{k=0}^{n}\sum_{l=0}^{m} N_{k,p}(u)N_{l,q}(v)w_{k,l}}$$

mit einer zweidimensionalen Gewichtematrix $w_{i,j}$.

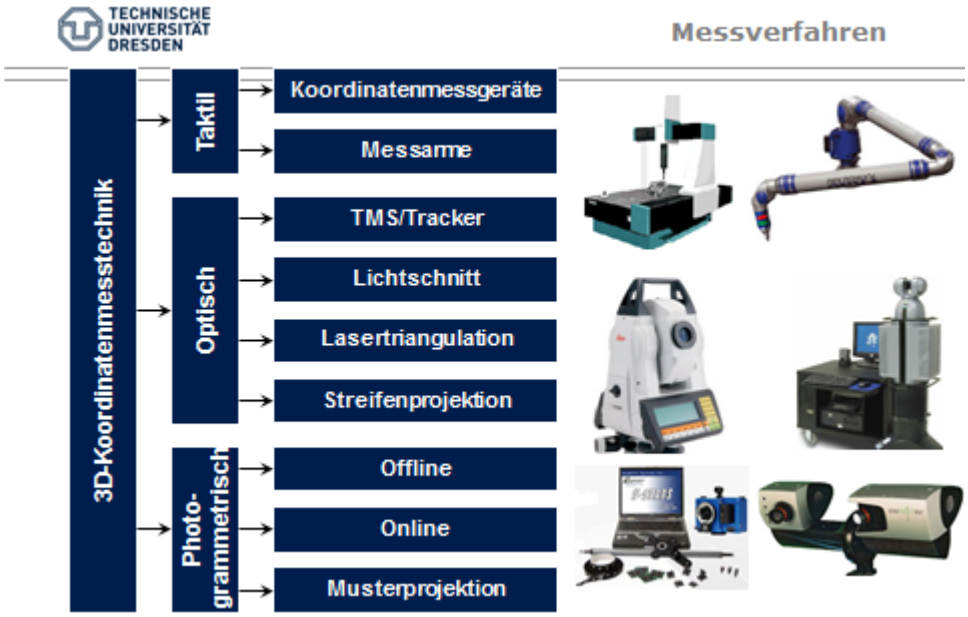


Beispiel: NURBS-Fläche (innen) vom Grad 4, die durch 36 Kontrollpunkte (äußeres Gitter) über einem zweidimensionalen Parametergebiet (unteres Gitter) definiert wird

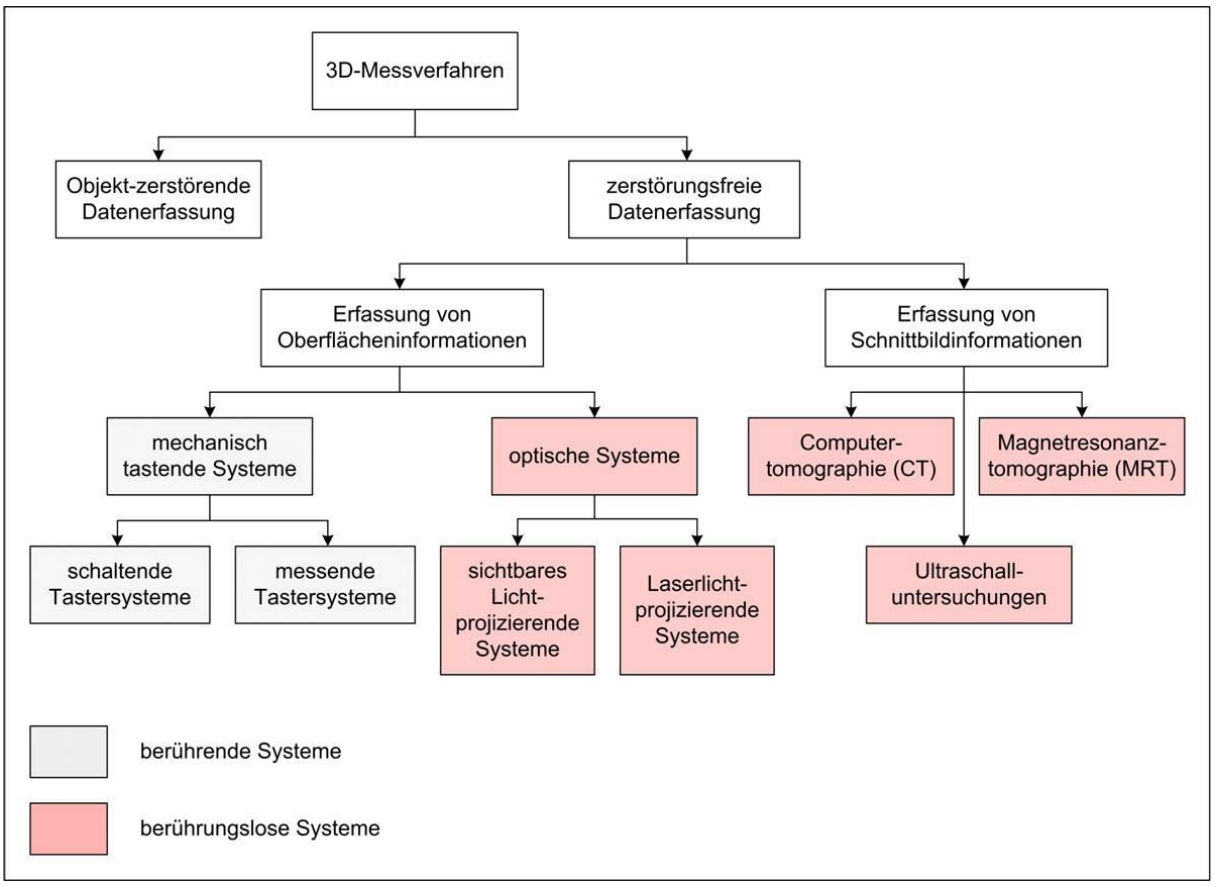
Messverfahren

Bei den 3D-Messverfahren zur geometrischen Werkstückerfassung werden im Maschinenbau die Digitalisierverfahren in Objektzerstörend und zerstörungsfrei arbeitenden Systemen unterschieden.

Bei zerstörender Digitalisierung wird das Teil des Werkstücks in dünnen Schichten zerfräst und jede Schicht einzeln digitalisiert. Die einzelnen Schichten werden dann zum 3D-Modell zusammengefügt.



Für das Digitalisieren von Werkstücken mit Freiformflächen werden **mechanische** und **optische** Messverfahren angewandt.



Datenerfassung

- taktil oder optisch
- Installation auf Werkzeugmaschine oder separate Anlage
- Digitalisierbare Objektgröße (mm bis m-Bereich)
- Genauigkeit, Reproduzierbarkeit (0.01 – 0.3 mm)
- Portabilität der Anlage (ja oder nein)
- Automatische/handgeführte Datenerfassung
- Anzahl de rotatorischen Achsen (0 –3)

	3D-Koordinatenmesstechnik	**Digitalisiertechnik**
Datenumfang	gering Dateigröße in KByte	hoch Dateigröße in MByte
Zeitumfang zur Datenerfassung	sehr hoch maximal 1 Punkt/s	gering über 20000 Punkte/s
Punktabstand	groß	gering
Genauigkeit	sehr hoch <0,001mm	hoch >0,01mm

Microscribe 3D

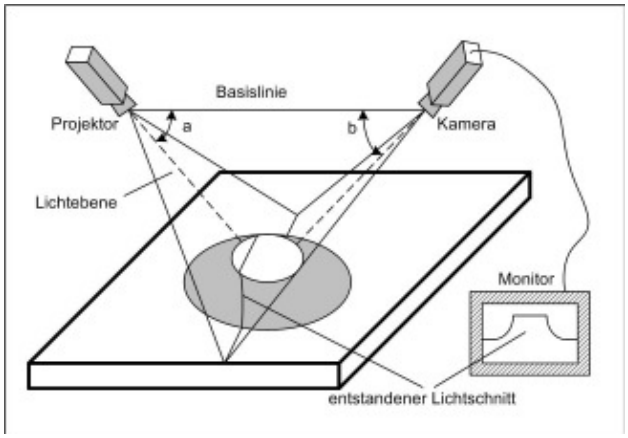
- Taktiles Digitalisiersystem mit Tastspitze an PC
- 5 rotatorische Achsen
- Handgeführte Punkterfassung
- Genauigkeit: 0,3 mm

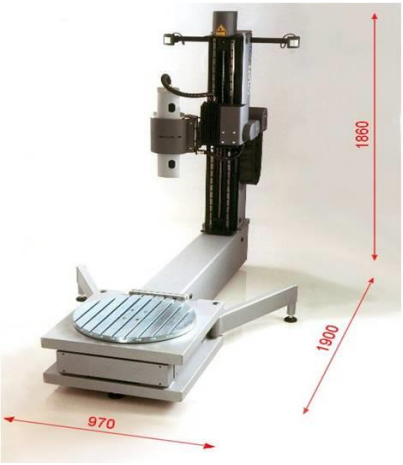
ATOS III

- optische Messmaschine basierend auf dem Triangulationsprinzip
- Zwei Kameras beobachten projizierte Streifenmuster
- Pixel: 3D-Koordinaten
- Streifenmuster mit Weißlichtprojektion
- Polygonnetz der Oberfläche

Lichtschnittverfahren

Ein Lichtband wird auf das Objekt projiziert. Der Lichtschnitt wird mittels Videokamera erfasst und nach dem Triangulationsprinzip ausgewertet.





Lasertriangulation

Der Strahl der Laserdiode mit einer Wellenlänge von 400 bis 720 nm wird von der Antastoptik zu einem schmalen Strahlkegel geformt, der auf dem Messobjekt einen kleinen, sichtbaren Lichtpunkt erzeugt.

Dieser Messfleck wird von der Abbildungsoptik auf den positionsempfindlichen Detektor abgebildet. Ändert sich der Abstand des Messobjekts zum Sensor, so verschiebt sich der Auftreffort des Abbildungsstrahls auf dem Detektor.

5.2 Koordinatenmessgerät

Koordinatenmessgeräte (KMG) sind portable Messmaschinen mit einem maximalen Messvolumen von 12 m x 3,5 m x 2,4 m zur dreidimensionalen Bestimmung der Geometrie von Werkstücken.

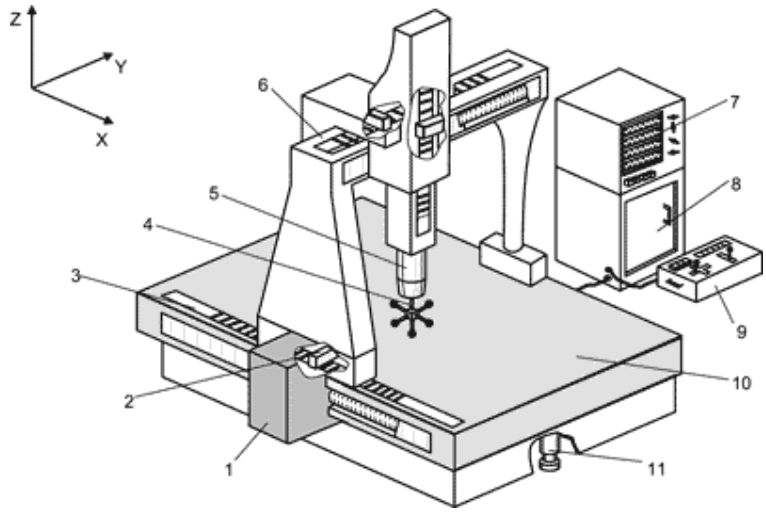
Messobjekt kommt zum Messmittel

- Verschiebegestell mit drei senkrecht aufeinander stehenden Achsen bilden ein kartesisches Bezugskoordinatensystem, in dem ein Tastkopf beweglich angeordnet ist Damit lassen sich Maß, Form und Lage eines Werkstückes in einem einheitlichen Koordinatensystem bestimmen
- Grundbauarten entsprechend Messbereichen (Ständer, Ausleger, Portal)
- Längenmessunsicherheit:
  - ⇒ Portal-KMG: U = [4 + (L / 200)] μm, 9 μm / Meter
  - ⇒ Doppelständer-KMG: U = [60 + (L / 12,5)] μm, 0,3 mm auf 3 m.

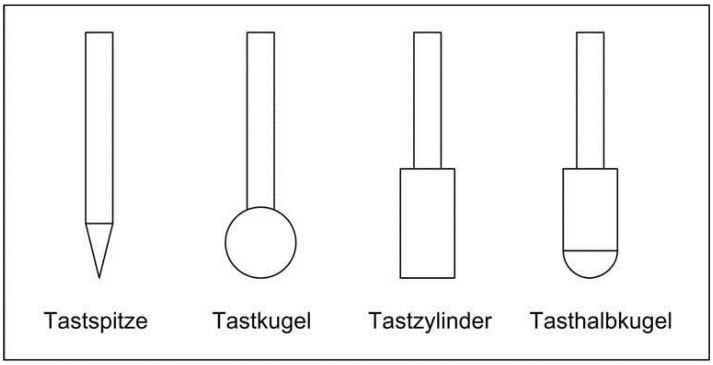
Aus der abgetasteten Ist-Geometrie werden Informationen über die Einhaltung von Maß-, Form- und Lagetoleranzen erhalten. Aus den Koordinaten der Messpunkte werden die gesuchten Kenngrößen berechnet, z. B. CNC-Koordinatenmessgerät mit online Kopplung und Steuerung

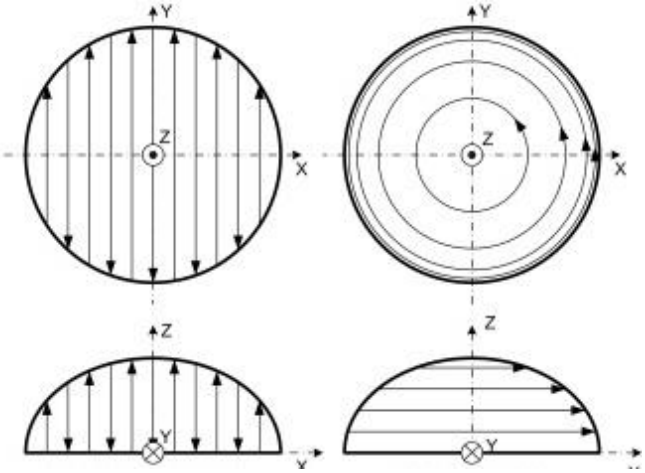
Universelle KMG besitzen ein kartesisches Koordinatensystem (x, y, z) und speziell für rotationssymmetrische Teile (Zahnräder) ein Zylinderkoordinatensystem (r, φ, z). Kombinationen mit einem Drehtisch als vierte Achse sind gebräuchlich.

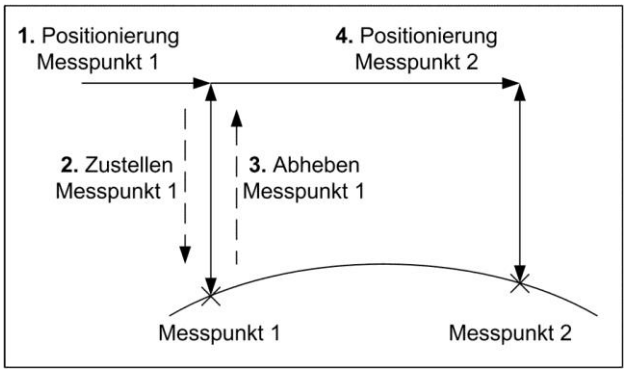
1 Antrieb für X–Achse | 2 Ablesesystem für X–Achse | 3 Maßverkörperung für X–Achse | 4 Taster | 5 3D–Tastkopf | 6 Lagerung für Y–Achse | 7 Anzeige | 8 Steuer– Anpasselektronik | 9 Steuerpult 10 Werkstückaufnahme | 11 Gerätebasis

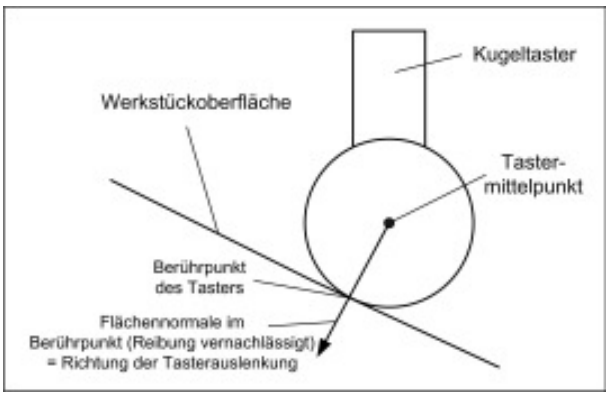


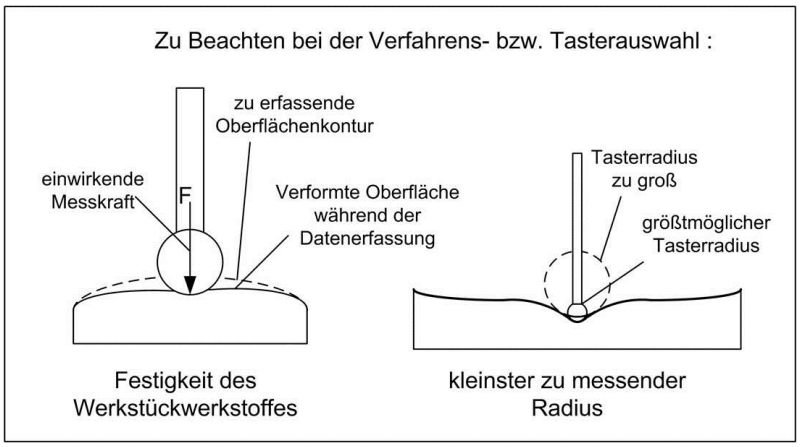
RENISHAW
OMP
MADE IN UK
40


Tastspitze
Tastkugel
Tastzylinder
Tasthalbkugel


Y
Z
X
Y
Z
X
Z
Y
Z
Y


1. Positionierung
Messpunkt 1
4. Positionierung
Messpunkt 2
2. Zustellen
Messpunkt 1
3. Abheben
Messpunkt 1
Messpunkt 1
Messpunkt 2


Kugeltaster
Werkstückoberfläche
Taster-
mittelpunkt
Berührpunkt
des Tasters
Flächennormale im
Berührpunkt (Reibung vernachlässigt)
= Richtung der Tasterauslenkung


Zu Beachten bei der Verfahrens- bzw. Tasterauswahl :
zu erfassende
Oberflächenkontur
einwirkende
Messkraft
F
Verformte Oberfläche
während der
Datenerfassung
Tasterradius
zu groß
größtmöglicher
Tasterradius
Festigkeit des
Werkstückwerkstoffes
kleinster zu messender
Radius

5.3 Optische geodätische Messverfahren

Die geodätische Industriemesstechnik kann in vier Sensorsysteme eingeteilt werden

- Triangulation mit zwei oder mehreren Theodoliten
- polare Punktbestimmung mit Präzisionstachymeter
- interferometrische Punktbestimmung mit Lasertracker
- Nahbereichsphotogrammetrie mit Digitalkameras.

Für Messobjekte, die aufgrund ihrer Abmessungen, ihres Gewichtes oder der räumlichen Verhältnisse nicht mehr bewegt werden können (Flugzeug- und Schiffsbau), war eine Vermessung durch die Umkehrung

Messmittel kommt zum Messobjekt

nur mit Genauigkeitsverlust und zeitaufwendig zu realisieren.

Bei der 3D-Messung mit online-Kopplung der Messgeräte am PC bzw. Notebook erfolgt stationär die numerische Steuerung des Messablaufs.

Daraus folgen die rechnergestützte dreidimensionale Koordinatenbestimmung diskreter Punkte und die Möglichkeit der indirekten Bestimmung der gesuchten Maße mittels analytischer Geometrie.

- Das Messverfahren ist geeignet, sich den örtlichen Gegebenheiten sowie der Größe und Form des Messobjektes anzupassen.
- Berührungslosigkeit: Zielpunkt wird nicht mechanisch sondern optisch angetastet.
- Messung in Funktionslage: Das Messobjekt wird in der Gebrauchslage gemessen.
- Das Messvolumen ist nur durch die angestrebte Genauigkeit begrenzt.

T3000 (1992)

TDA 5005 (2005) | Leica

TDRA 6000 (2013) | Hexagon

5.4 Dreidimensionale Koordinatenbestimmung

Beim **Vorwärts- und Rückwärtsschnitt** werden mindestens zwei elektronische Theodolite an einem Laptop angeschlossen, der aus den Rohdaten (Horizontalrichtungen und Zenitwinkel) und mindestens einer bekannten Strecke im Objektraum dreidimensionale Koordinaten berechnet.

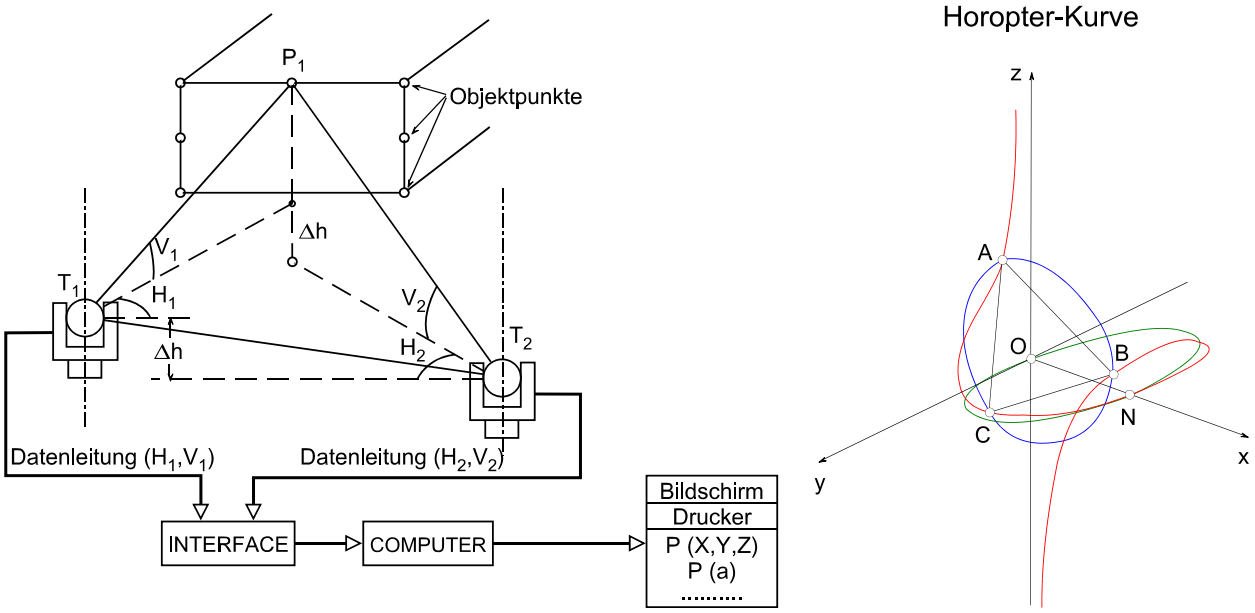
Der Rückwärtsschnitt entspricht in der Photogrammetrie der Bestimmung von Position und Orientierung einer Kamera im Raum.

Die Parameter, die die richtungsmäßige Orientierung der Stehachse festlegen, werden während der Auswertung berechnet. Die gemessenen Zenitwinkel stellen allgemeine Raumwinkel dar, die keinen Bezug zur Lotrichtung haben.

Bei drei Festpunkten gibt es zwei gefährliche Konstellationen:

- drei Punkte liegen auf einer Geraden
- drei Festpunkte liegen gemeinsam mit dem gesuchten Standpunkt auf einer Zylinderoberfläche, die auf der Ebene durch die drei Festpunkte senkrecht steht.

Der gefährliche Ort beim räumlichen Rückwärtsschnitt ist vergleichbar mit dem "gefährlichen Kreis" beim ebenen Rückwärtsschnitt. Es gibt keinen gefährlichen Ort, wenn mindestens vier bekannte Punkte für den Rückwärtsschnitt genutzt werden, die nicht auf einer Horopter-Kurve liegen.



Konfiguration Theodolitmesssystem (1988)

5.4.1 Theodolitfehler im Nahbereich

Die Ziel- und Kippachsenfehler sind vor jeder Messung zu bestimmen und an jede gemessene Richtung als Korrektur anzubringen.

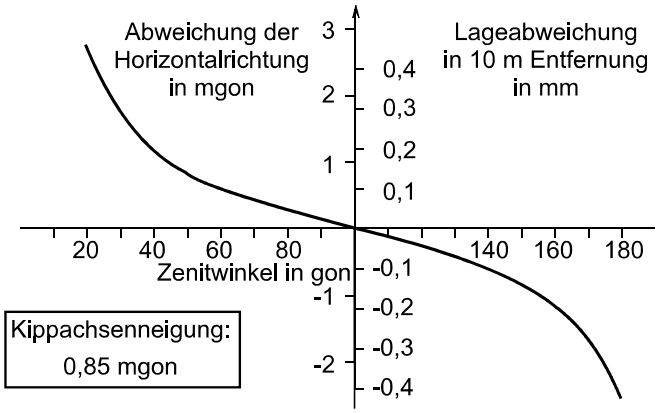
Da die Theodolite über Flüssigkeitskompensatoren zur Erfassung und Korrektion der Stehachsneigung verfügen und bestimmte Fertigungsschritte Schwingungen auslösen können, die zwar nicht die Winkelmessung stören, aber ein Einpendeln der Flüssigkeitsoberfläche verhindern, muss auf die Kompensation der Stehachsneigung verzichtet werden können (sorgfältige Horizontierung !).

Beachte: Diese Fehler, deren Einfluss auf die gemessene Richtung vom Zenitwinkel abhängt, können nicht immer als mit der Zeit unveränderbar angesehen werden.

Die Bestimmung der Fehlerkomponenten mit der Korrektion einer in einer Lage gemessenen Richtung liefert aufgrund des zeitlichen Verhaltens der Theodolitfehler nicht die gleiche hohe Genauigkeit, wie bei 2 FRL.

Der Kippachsenfehler, bzw. die zeitliche Veränderungen, werden nicht durch den Stehachsenneigungssensor korrigiert.

Beispiel: Einfluss von Temperaturänderungen auf die Neigung der Kippachse: Träger des Theodolits aus Stahl mit dem Längenausdehnungskoeffizienten 11,5 mm/m pro K, Fernrohrstützen 140 mm, Kippachse 120 mm lang. Einseitige Temperaturänderung der Fernrohrstütze um 1 K, Neigung der Kippachse um 0,85 mgon



Exzentrizität infolge Restneigung der Stehachse bei elektronischen Theodoliten

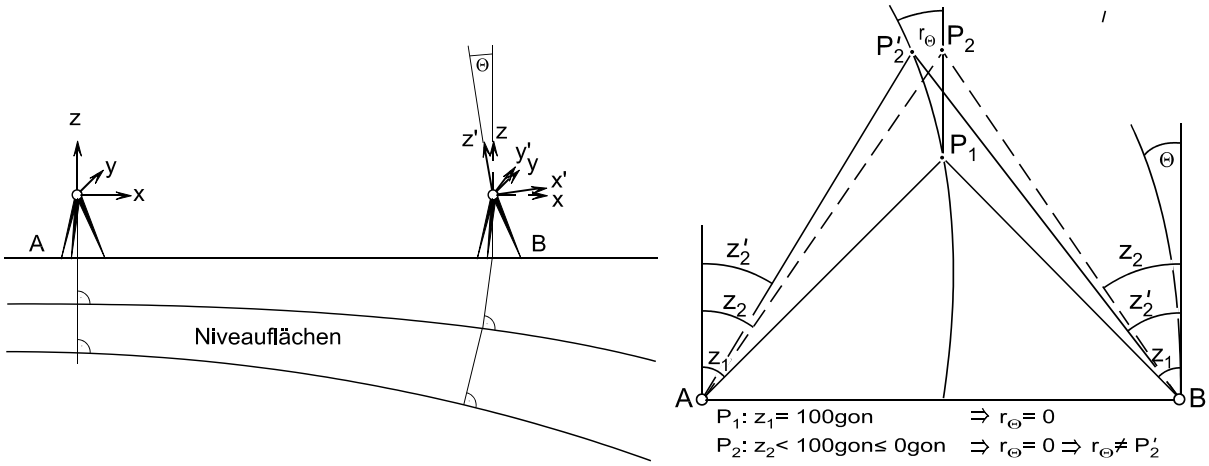
Bei elektronischen Theodoliten wird die verbleibende Abweichung der Stehachse von der Lotrechten mit dem Stehachsneigungsmesser erfasst und Horizontalrichtungen und Zenitwinkel werden korrigiert.

Bei unexakter Feinhorizontierung ergibt sich für die Horizontalrichtungen eine Exzentrizität zwischen dem Punkt der Winkelmessung (Schnittpunkt Kipp-, Ziel- und Stehachse) und dem Zentrum des Theodolitstandpunktes.

Beispiel: Kippachsenhöhe 200 mm, Arbeitsbereich des Stehachsneigungsmessers von 50 mgon, Exzentrizität bis 0,16 mm. Auswirkung bei kurzen Zielweiten auf die Horizontalrichtungen, Zielweite 5 m, Richtungsabweichung 2,0 mgon

Konvergenz der Lotlinien und Wirkung der Lotabweichung bei kurzen Distanzen

Theodolitmessungen beziehen sich auf die örtliche Lotrichtung. Da die Lotlinien untereinander konvergieren sind die Messungen für weitere Auswertungen in ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem zu reduzieren. Unterbleibt diese Reduktion, sind die Reduktionsbeträge systematische Messabweichungen.



Beispiel: Zwei Theodolite 30 m entfernt, so hat der eine Theodolit gegenüber dem anderen aufgrund der Konvergenz der Lotlinien eine Stehachsneigung von 0,3 mgon.

Lageveränderungen der Fokussierlinse

Die Verschiebung der Fokussierlinse in der Strichkreuzebene („Scharfstellung“) erfolgt nicht exakt längs der optischen Achse des Fernrohrsystems, sondern wird von zufälligen und systematischen Abweichungen überlagert; z.B. einseitige Temperaturänderungen des Fernrohrgehäuses mit der Zeit verändert die Lage der Zielachse.

Diese Abweichungen führen im Nahbereich jeweils zu einer anderen Lage der optischen Achse, (Zielachsenfehler hängt von der momentanen Position der Fokussierlinse ab) und wirkt sich auf die Richtungsmessung aus.

Dieser Effekt wirkt sich auf die Messungsergebnisse in zwei Fernrohrlagen nicht aus, wenn die Lage der Fokussierlinse beim Durchschlagen unverändert bleibt.

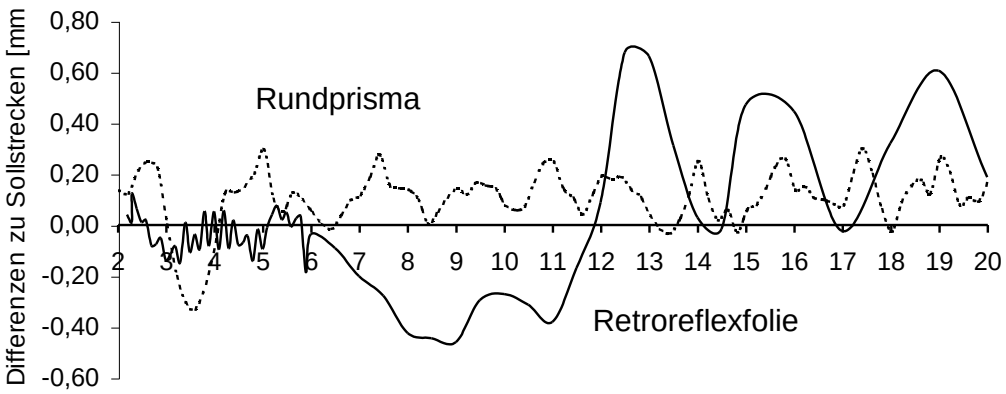
Beachte: Bei der satzweisen Richtungsmessung mit kurzen Zielweiten sind die Ziele direkt nacheinander in der ersten und dann in der zweiten Fernrohrlage - ohne die Fokussierlinse zu verstellen - zumessen.

5.4.2 Präzisionsdistanzmessungen im Nahbereich

Für die Distanzmessung wird eine absolute Messgenauigkeit von σ_S = 1 mm + 1 ppm und im Nahbereich von σ_S = 0,5 mm bis 120 m und 0,25 mm bis 30 m (TDRA 6000) angegeben. Als Zielpunktmarkierung werden Retroreflexfolien (20 x 20, 40 x 40, 60 x 60 mm), Hohlspiegelreflektoren und Prismareflektoren signalisiert.

Die Reichweite der Distanzmessung zu den Reflexfolien beträgt 2 m bis etwa 180 m. Bei Distanzen bis 20 m wird eine Vorsatzlinse auf das Objektiv gesetzt.

Sie hat die Form einer Spaltblende und ist innen und außen verspiegelt. Damit wird die Sende- und Empfangsoptik gegen Störsignale abgeschirmt. Die Messgenauigkeit für eine Distanz im Nahbereich bis 90 m liegt bei 0,7 mm. Bei Objekten mit einer Ausdehnung von 50 x 50 m entspricht die Genauigkeit der Distanzmessung damit der Winkelmessung.



Bis 15 m treten bei Messungen auf 20 x 20 mm Reflexfolien systematische Abweichungen von ± 0,6 mm auf. Bis 90 m unterscheiden sich die Genauigkeiten bei Messung auf unterschiedliche Reflektortypen nicht mehr.

Der Grenzeinfallswinkel der Verdrehung beträgt bei den Reflexfolien 15°. Bei diesen Einfallswinkeln übersteigen die Distanzdifferenzen nicht den Wert von 1 mm.

Differenzen in der Distanzmessung auf Retroreflexfolien können zwischen der ersten und zweiten Fernrohrlage 1,5 mm bei einer Verschwenkung der Zielmarken zum Zielstrahl über 20° ergeben.

Beachte: Distanzmessungen im Nahbereich in **zwei Fernrohrlagen.**

Durch fehlerhaft arbeitende Sendedioden werden Strahlen mit inhomogener Phasenlage erzeugt. Das bedeutet, dass Punkte der gleichen Phase zum selben Zeitpunkt unterschiedliche Distanzen zurückgelegt haben.

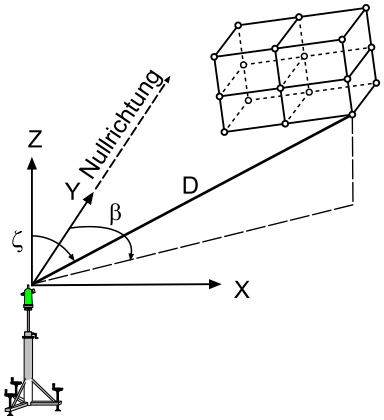
Die Distanzmessung im Nahbereich sollte daher immer am gleichen Zielpunkt am Reflektor erfolgen. Theoretisch muss dieser Zielpunkt aus dem Ergebnis einer Maximumpeilung entstehen

5.5 Industriemesssystem

Bestimmung dreidimensionaler kartesischer Koordinaten

5.5.1 Polarmesssystem

- Totalstation TC 2002
- Industrietachymeter TDM 5005, TDRA 6000
- 3D- Punktbestimmung Horizontalrichtung β, die Zenitrichtung ζ. Raumdistanz D



$$\begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_p \end{pmatrix} = D \cdot \begin{pmatrix} \sin\varsigma \sin\beta \\ \sin\varsigma \cos\beta \\ \cos\varsigma \end{pmatrix}$$

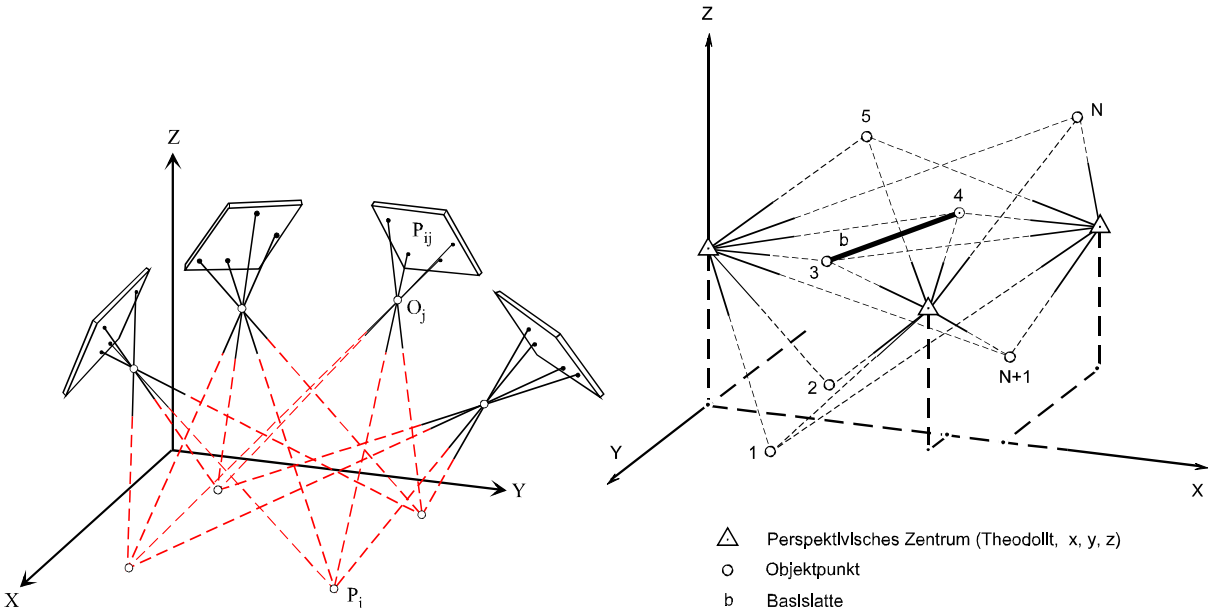
Die Genauigkeit ist (Einfluss der Streckenmessgenauigkeit im Nahbereich) geringer als im Vergleich zur Winkelmessung mit dem TMS[8].

5.5.2 Theodolitmesssystem

Bei Theodolitmesssystemen werden unabhängig vom Messobjekt, die Theodolitstandpunkte und Teilkreisorientierungen zunächst relativ zueinander in einem kartesischen Koordinatensystem bestimmt.

Der Ursprung liegt im Schnittpunkt der Drehachsen eines beliebig gewählten Theodolits; z-Achse in Richtung Zenit; x-Achse weist zum zweiten Theodolit.

[8] GOTTWALD R. (1996): Industriemesssysteme in der 4. Generation – Leica Axyz.



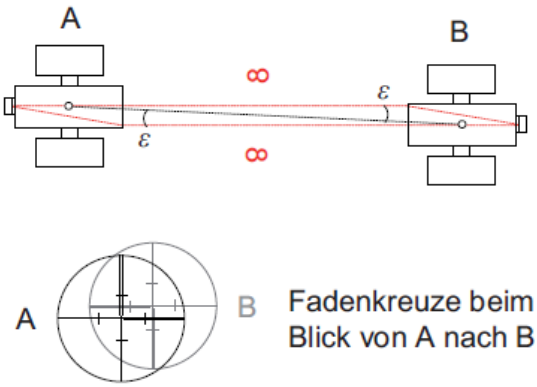
Vergleich Mehr-Bild-Triangulation und Theodolitmesssystem

Um den Maßstab des Systems zu bestimmen sind mindestens zwei Punkte mit bekanntem Abstand anzuzielen: Basislatte oder einen anderen Maßstab als Referenzlänge so in dem Objektraum platzieren, dass die Endpunkte mit beiden Theodoliten angezielt werden können. Bei dieser Orientierungs-, Positions-, und Maßstabsbestimmung (**Orientierung**) gibt es zwei Methoden:

- Verfahren der "Gegenseitigen Anzielung"
- Bündelausgleichung

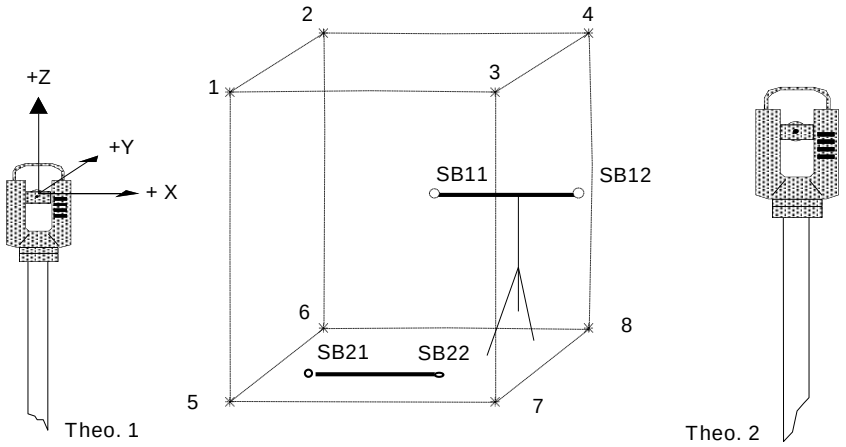
Verfahren der gegenseitigen Anzielung

- Gegenseitiges Anzielen der Theodolite
- am Gegeninstrument befindliche Zielmarke wird zweimal angezielt, wobei das angezielte Instrument zwischen beiden Anzielungen um 200 gon zu drehen ist, um die Exzentrizität der Zielmarke in Bezug zum Schnittpunkt der Theodolitachsen zu eliminieren
- Instrumentenfehler bestimmen und als Korrektionen anbringen



Orientierung ohne gegenseitige Anzielung

- Orientierungsparameter aus der Anzielung von Objektmesspunkten und/oder von ausschließlich für die Orientierung verwendeten Messpunkten und die Endpunkte der Referenzlängen, mindestens fünf Punkte (10 bis 15 Zielpunkte)
- Referenzlänge in unterschiedlicher Ausrichtung an drei bis vier Positionen im Messvolumen aufstellen und bereits einzelne Punkte am Messobjekt anzielen

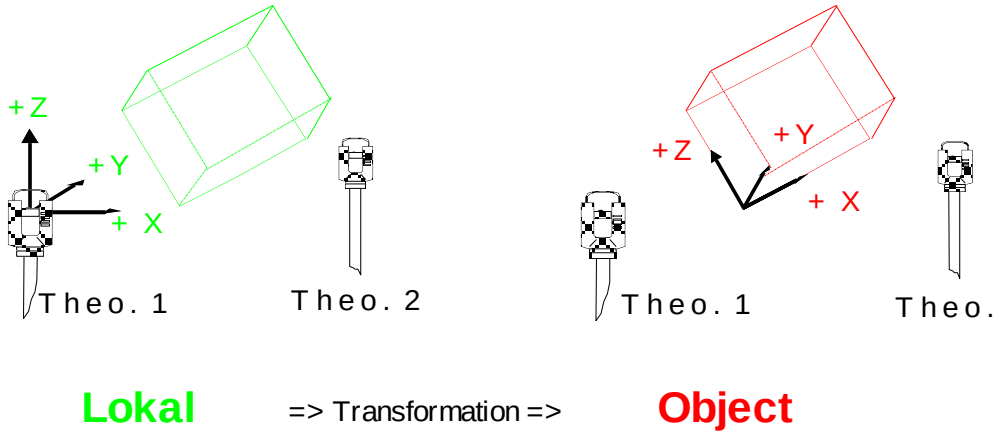


Die Horizontalrichtungen und Vertikalwinkel lassen sich als Strahlenbündel auffassen. In der Bündelausgleichung werden diese Strahlenbündel so gedreht und verschoben, dass sich die jeweils zu einem Zielpunkt verlaufenden Strahlen bestmöglich in einem Punkt treffen, unter der Bedingung, dass die Referenzlängen die kalibrierten Maße einhalten.

Als Ergebnis erhält man die gegenseitige Orientierung der Theodolite und 3D-Koordinaten der Punkte allerdings noch nicht im Objektkoordinatensystem.

Nach der Orientierung werden mit Vorwärtsschnitt Punkte am Messobjekt bestimmt. Die Punktkoordinaten beziehen sich zunächst auf das Koordinatensystem der Orientierungsmessung.

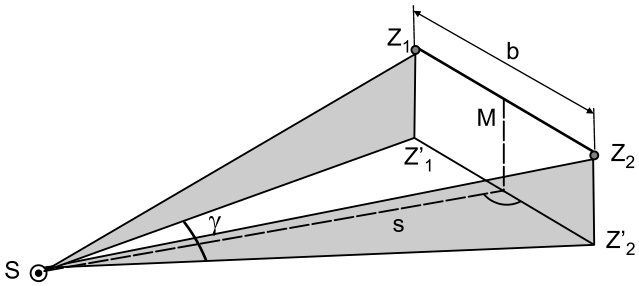
Sind innerhalb dieses Systems ausreichend Punkte gemessen, für die Koordinaten im Objektkoordinatensystem vorgegeben sind, lassen sich die Parameter einer räumlichen Koordinatentransformation berechnen. Mit diesen Parametern wird dann jeder weitere gemessene Punkt sofort ins Objektkoordinatensystem umgerechnet.



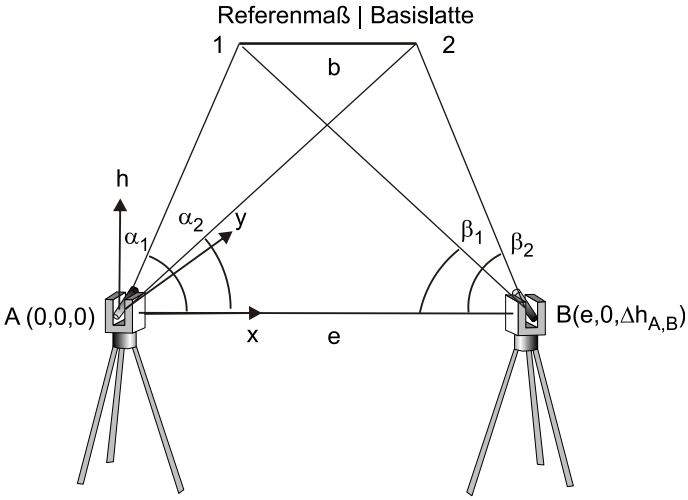
Das lokale Koordinatensystem hat seinen Ursprung im Achsenschnittpunkt des Theodolit 1. Ein Objektkoordinatensystem bezieht sich über Referenzpunkte direkt auf bestehende Objektkoordinaten.

Von den 7 Freiheitsgraden der 3D-Transformation (Maßstab, 3 Verschiebungen und 3 Drehungen) werden meist nur sechs oder vier benötigt, denn

- der Maßstab ist durch die Referenzlänge(n) festgelegt
- bei vielen Aufgabenstellungen soll eine Koordinatenachse lotrecht stehen



Bestimmung der Theodolitstandpunkte



Annahme: Näherungswert $e^0 = 1$

Berechnung: Iteration mit Näherungswert

$$y_i = e^0 \frac{\sin\beta_i \cdot \sin\alpha_i}{\sin(\alpha_i + \beta_i)} \qquad x_i = e^0 \frac{\sin\beta_i \cdot \cos\alpha_i}{\sin(\alpha_i + \beta_i)}$$

$$\Delta h_{AB} = \frac{1}{2} e^0 \left(\frac{\sin\beta_1 \cdot \cot\zeta_{A1} - \sin\alpha_1 \cdot \cot\zeta_{B1}}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} + \frac{\sin\beta_2 \cdot \cot\zeta_{A2} - \sin\alpha_2 \cdot \cot\zeta_{B2}}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)} \right)$$

$$h_i = \frac{1}{2} \left(e^0 \frac{\sin\beta_i \cdot \cot\zeta_{Ai} + \sin\alpha_i \cdot \cot\zeta_{Bi}}{\sin(\alpha_i + \beta_i)} + \Delta h_{AB} \right)$$

Ergebnis: Näherungskoordinaten der Endpunkte 1 [y_1^0, x_1^0, h_1^0] und 2 [y_2^0, x_2^0, h_2^0]

Berechnung: Länge des Referenzmaßstabes aus Näherungskoordinaten

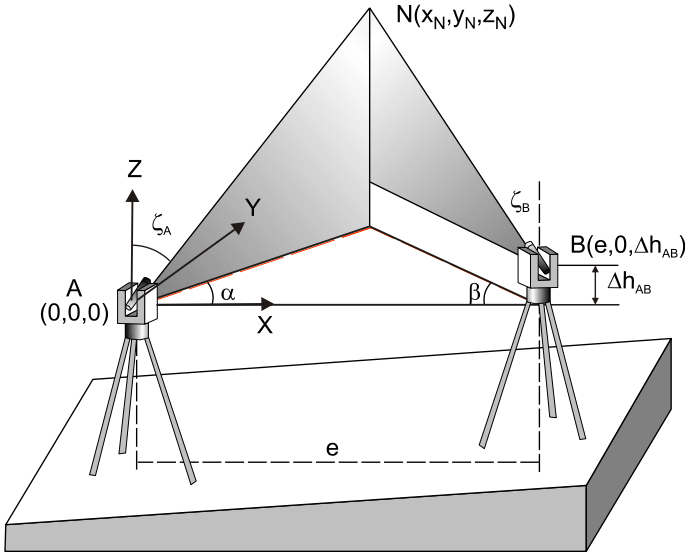
$$b^0 = \sqrt{(y_2^0 - y_1^0)^2 + (x_2^0 - x_1^0)^2 + (h_2^0 - h_1^0)^2}$$

Endgültige Basislänge (Standlinie)

$$e = e^0 \cdot \frac{b}{b^0}$$

Berechnung der Objektpunkte

Verknüpft man die Beobachtungen der Orientierungsmessung mit den Neupunkten, können alle Raumpunkte mit einer vermittelnden Ausgleichung bestimmt werden.



Bei Kenntnis der Orientierungsparameter werden die Objektpunktkoordinaten bezogen auf den Theodolit A als Nullpunkt eines räumlichen Koordinatensystems berechnet.

Die Koordinatenbestimmung der Objektpunkte sollte von der Auswertung der Orientierungsmessung nicht getrennt werden.

Mit jedem neuen Messwert wird eine Neuausgleichung aller Messungen einschließlich der Orientierungsmessungen durchgeführt.

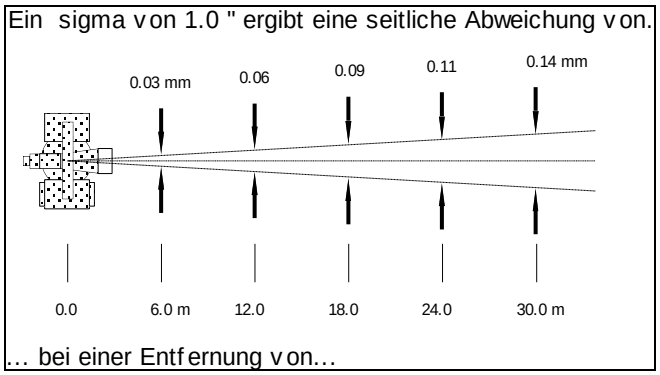
- Berechnung von Ersatzelementen (z.B. Gerade, Kreis, Ebene, Zylinder, Kugel)
- Berechnung datumsunabhängiger Genauigkeitsmaße: Standardabweichungen Winkel und Strecken, senkrechte Abstände zu einer ausgleichenden Geraden.

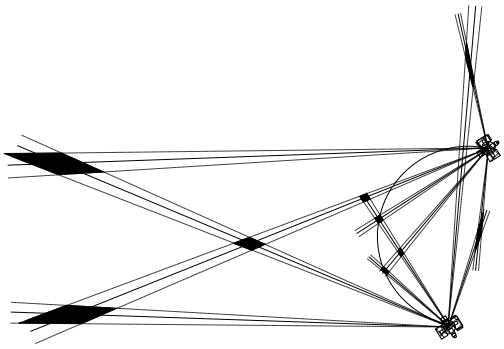
5.5.3 Konfiguration und Systemgenauigkeit

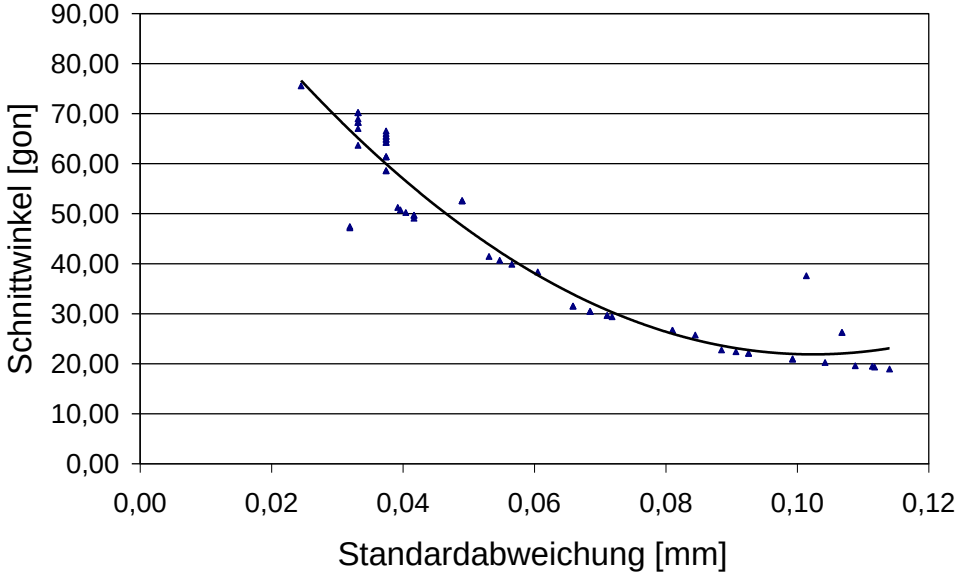
Messunsicherheit:: σ_r = 0,2 bis 0,4 mgon, s = 10 m, q = 0,03 bis 0,06 mm,

σ_p = 0,05 bis 0,1 mm für signalisierte Objektpunkte ist abhängig von:

- der Richtungsmessgenauigkeit und der Entfernung
- der Genauigkeit der Referenzlänge (Kalibrierung)
- Anzielung der signalisierten Punkte
- Schnittwinkel der Zielstrahlen
- Stabilität der Instrumentenaufstellung
- Refraktion und Umfeld (laufende Maschinen?)
- Instrumentparameter (σ_W = 1“) + Anzielunsicherheit = Genauigkeit Beobachtung



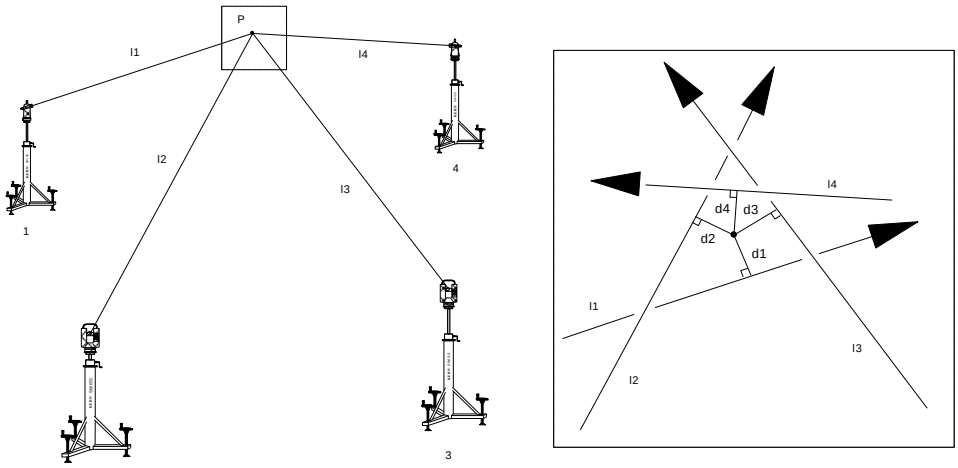




Die zwei oder mehr Zielstrahlen verlaufen im Allgemeinen windschief im Raum. Sie werden sich aufgrund der Messunsicherheit nicht in einem Punkt schneiden.

Als gedachter "Schnittpunkt" wird jener Punkt berechnet, dessen Abstände zu den Zielstrahlen in der Summe am kleinsten sind.

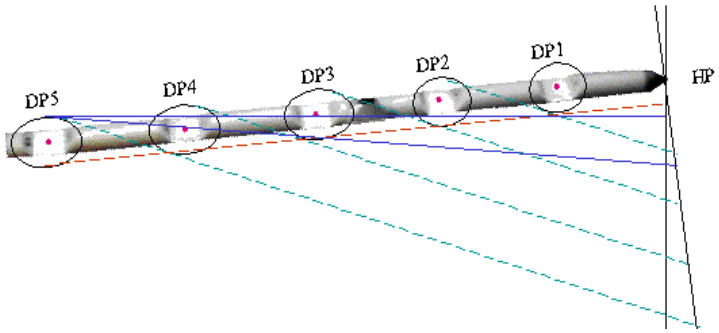
Bei 2 Theodolitstandpunkten kann als wahrscheinlichster Schnittpunkt derjenige angenommen werden, welcher den kürzesten Abstand zwischen den Geraden halbiert.



5.5.4 Messung verdeckter Punkte

Der „**Hidden point Stab**“ ist ein Exzenterstab und dient der Bestimmung von verborgenen Punkten (engl.: Hidden points). Auf dem Stab sind fünf Zielpunktmarkierungen (engl.: Device points) mit bekanntem Abstand (100 mm) zur Spitze angebracht.

Mit dieser exzentrischen Signalisierung können die Koordinaten der verdeckten Objektpunkte indirekt gemessen und berechnet werden. Die Koordinatenberechnung für die Stabspitze ergibt sich aus der Messung zu zwei Device points:



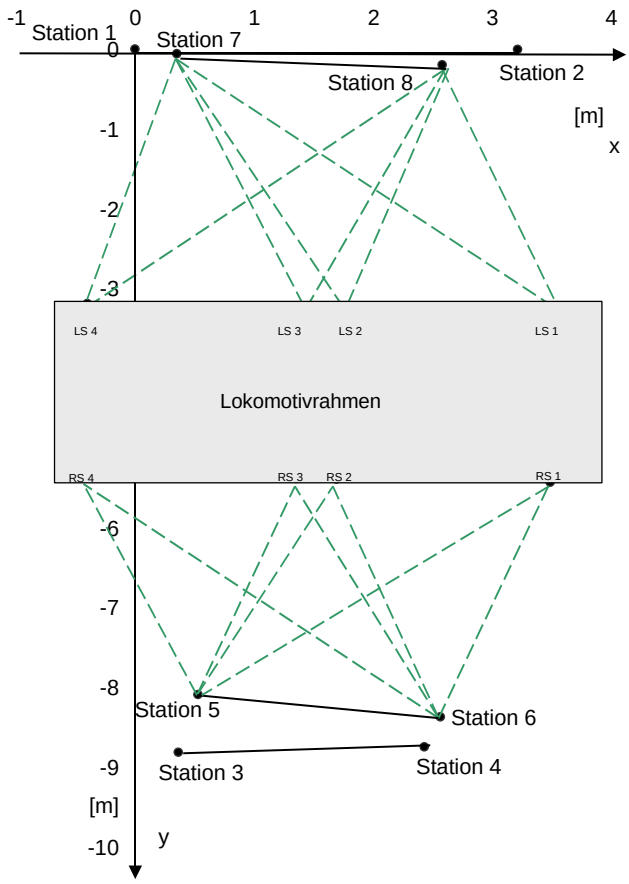
Die Koordinaten der Stabspitze können durch die Geradengleichung zweier Punkte bestimmt werden. Dabei wird der Richtungsvektor aus der Horizontalrichtung t und dem Vertikalwinkel ζ oder aus den Koordinatendifferenzen der beiden Punkte gebildet.

Die Koordinaten des verdeckten Punktes (HP) ergeben bei einem Device point Abstand von 100 mm

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{HP} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{Di} + 100\ mm \begin{pmatrix} \cos\zeta \cdot \cos t \\ \sin\zeta \cdot \cos t \\ \sin\zeta \end{pmatrix}$$

- Teilungsfehler des Stabes
- Exzentrizität der DP gegenüber der Mittellinie
- Aufsetzfehlern der Stabspitze
- Ausrichtung des Stabes gegenüber den Ebenen

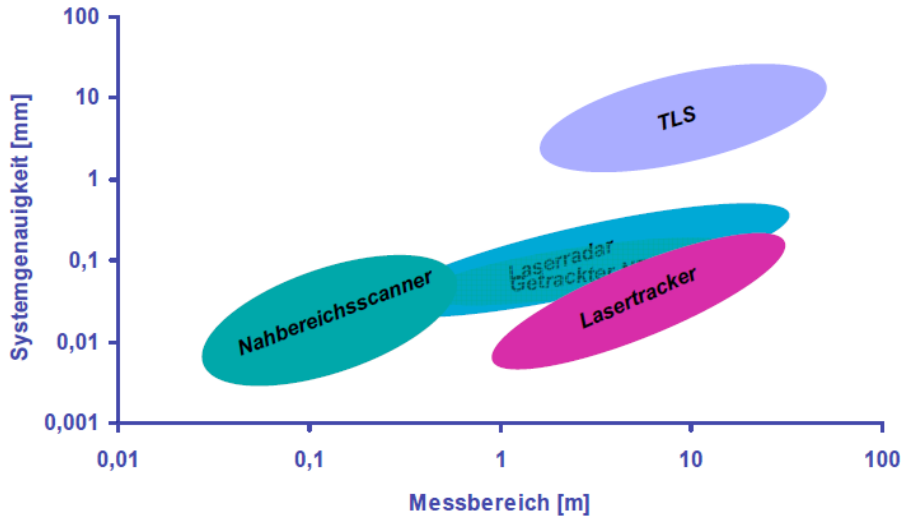
Beispiel: Lokomotivbaugruppe[9]



Punkt	S_x [mm]	S_y [mm]	S_z [mm]	S_p [mm]
LS1	0,06	0,05	0,03	0,08
LS2	0,05	0,04	0,03	0,07
LS3	0,05	0,03	0,03	0,07
LS4	0,07	0,05	0,04	0,09
RS1	0,09	0,05	0,04	0,11
RS2	0,08	0,05	0,02	0,10
RS3	0,08	0,05	0,02	0,10
RS4	0,05	0,05	0,04	0,08

[9] VOLKHOLZ, D. (2000): Industriemesssystem im Schienenfahrzeugbau, Diplomarbeit

6 Lasertracker



[10]

Laser-Tracker-Messsysteme gehören zu den mobilen optischen Koordinatenmesssystemen. Sie arbeiten nach dem Tachymeterprinzip mit einer polaren 3D-Punktbestimmung. Der entscheidende Unterschied zu Tachymetern ist die interferometrische Distanzbestimmung und damit eine wesentlich höhere Streckenmessgenauigkeit[11].

Neben der höheren Messgenauigkeit lässt diese Art der Streckenmessung eine sehr schnelle Zielverfolgung (Tracking) zum bewegten Reflektor zu mit einer gleichzeitigen Koordinatenbestimmung in der Bewegung des Reflektors.

Zu den Messsystemen gehört ein Steuerrechner (Controller) und ein Applikationsrechner mit anwendungsorientierter Auswertesoftware. Die Koordinatenbestimmung erfolgt online und in Echtzeit.

6.1 Messprinzip

Die Funktionsweisen von Laser-Trackern sind von den verschiedenen Anbietern sehr ähnlich. Im Einzelfall weichen die Strahlenverläufe und die Messraten voneinander ab.

Laser-Tracker Faro Leica API

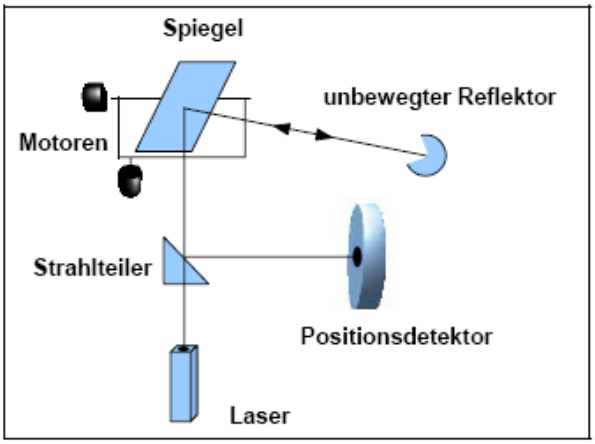
[10] HENNES, M. (2008): Reverse Engineering für Freiformflächen
[11] MÖSER, M. (2012): Handbuch Ingenieurgeodäsie, Band Grundlagen

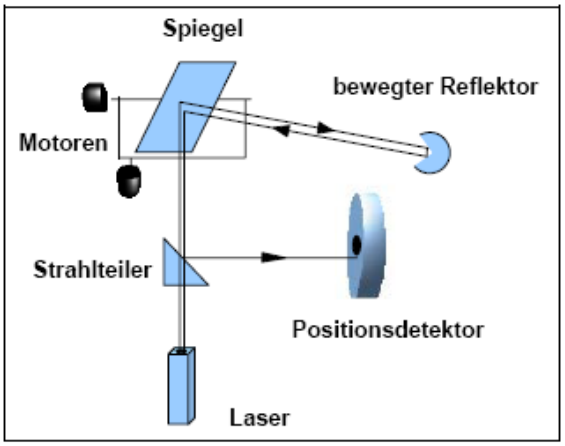
Beim Tracking-Prinzip wird der vom Interferometer ausgesandte Laserstrahl.über einen um zwei Achsen beweglichen und steuerbaren Umlenkspiegel zum Reflektor gesendet[12].

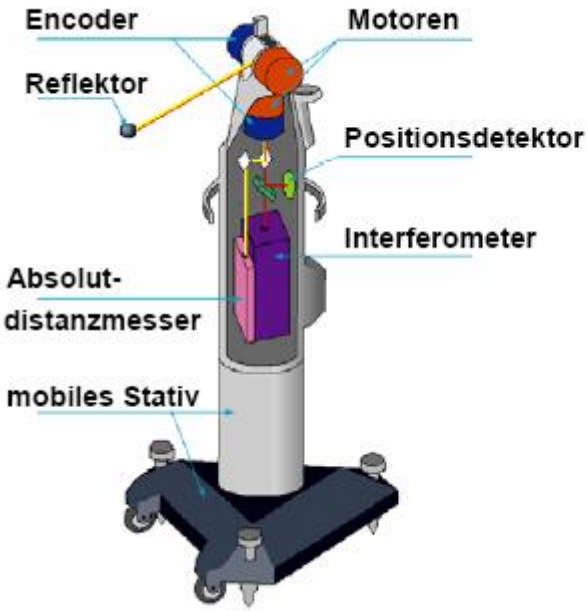
Ein Teil des reflektierten Laserstrahls wird auf den flächenhaften Positionsdetektor geleitet. Bei einem unbewegten Reflektor werden die Steuermotoren des Umlenkspiegels durch den Positionsdetektor in Echtzeit so gesteuert, dass der Zielstrahl ins Zentrum des Reflektors zielt.

Unmittelbar nach der Positionierung erfolgt die Richtungs- und Distanzmessung. Bewegt sich der Reflektor, verlaufen ausgesandter und reflektierter Laserstrahl parallel zueinander.

Der Positionsdetektor misst den Versatz und korrigiert die gemessenen Horizontal- und Vertikalwinkel und steuert die Motoren des Spiegels so, dass der Laserstrahl dem Reflektor folgt.







[12] Herrmann, J. (2010): Vorlesung Lasertracker und reverse Engineering

Da die hochgenaue interferometrische Streckenmessung nur *Streckendifferenzen* realisieren kann, ist für die Messung von Absolutstrecken das Setzen einer Bezugsstrecke zum Reflektor notwendig. Wird der Laserstrahl während der Messung unterbrochen, ist die Bezugsstrecke wieder notwendig.

Diese Bezugsstrecke wurde an den Laser-Trackern in Form von *homepoints* realisiert (*birdbath* bei Leica).

Da diese Form der Streckeninitialisierung den Messungsablauf bei Unterbrechung des Laserstrahls wesentlich beeinträchtigt, werden zusätzlich zum Interferometer hochgenaue Absolutdistanzmesser in die Messsysteme integriert. Sie ermöglichen einen schnelleren Messungsablauf.
Je nach Ausführung des Messsystems beträgt die maximale Reichweite der Absolutdistanzmesser bis zu 40 m. Dabei betragen die entfernungsabhängigen Koordinatenunsicherheiten ± 10 µm/m (2σ, 95%).

6.2 LTD 840

Der Leica Lasertracker **LTD 840** hat eine Reichweite von 40 m. Das Interferometer basiert auf einem Helium-Neon-Laser mit einer Wellenlänge von 633 nm (Laserschutzklasse 2, Lidschlussreflexklasse.

Die Streckenauflösung beträgt 1,3 µm. Bei einer Messrate von 3.000 Messungen pro Sekunde können maximal 1.000 Messwerte pro Sekunde ausgegeben werden. Zur Initialisierung der interferometrischen Streckenmessung wird ein hochgenauer Absolutdistanzmesser mit Polarisationsmodulation.

Für die Messung der Horizontal- und Vertikalwinkel verfügt der LTD 840 über zwei Präzisionswinkelencoder mit einer Winkelmessunsicherheit von 0,6 mgon (2σ, 95%).

Die Messunsicherheiten von 3D-Koordinaten (2σ, 95%) werden herstellerseitig mit

Uxyz (Interferometer)	± 10 µm/m
Uxyz (ADM)	± 10 µm/m (± 25 µm für < 2,5 m)

Im Messmodus 1 s pro Punkt und stabilen Umgebungsbedingungen angegeben. Bei einer Entfernung von 5 m entspricht dies einer Messunsicherheit von 0,05 mm.

Hierbei wird immer vorausgesetzt, dass die aktuellen atmosphärischen Parameter Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchtigkeit zur internen Berechnung des wirksamen Brechungsindexes bereitstehen. Durch Anschluss einer Meteostation mit entsprechenden Messfühlern werden diese Werte online zur Verfügung gestellt.

Reflektoren

Die Reflektortypen (Genauigkeit: µm) sind aufgrund der Zentrier- und Anzielbedingungen in Kugeln montiert. Die Messwerte und die angegebenen Additionskonstanten der Reflektoren beziehen sich jeweils auf den Kugelmittelpunkt: Reflektoren mit Durchmesser (75 mm, 1,5“ und 0,5“).

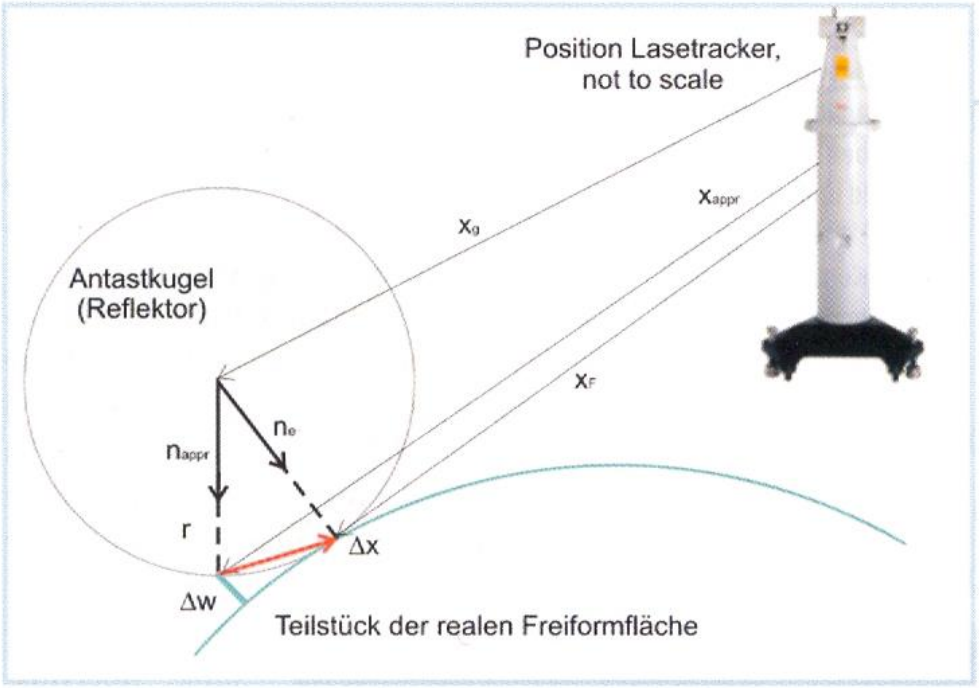
Der Reflektor „Cat Eye“ besteht aus verschieden großen Glaskugeln bzw. Kugelschalen mit speziell berechneten Brechungseigenschaften. Dieser Reflektortyp ist nur in einer 75 mm Kugel erhältlich. Die Ausrichtung zum Messstrahl kann bis zu einem Winkel von ±60 ° von der Normalenrichtung abweichen ohne Distanz- oder Richtungsfehler.

Der zweite Reflektortyp besteht aus drei senkrecht aneinander gekitteten Planspiegeln, einem „Air Pass Corner Cube“. Die Ausrichtung dieses Reflektors zum Messstrahl muss besser als ±25°.

Die kontinuierliche Positionierung des Regelkreises zielt folglich in die erwartete Richtung und verursacht Messfehler, die von der Größe und Ausrichtung des Reflektors abhängen.

Aus diesem Grund werden 0,5“ (12,7 mm) große (Tooling Ball) Reflektoren angeboten, da die normale Ausrichtung (<± 20°) des Reflektors nur bei derartig kleinen Glaskörpern keine Messfehler verursacht.

Neben der von jedem Reflektortyp bekannten Additionskonstante ist die Distanz zum Reflektorhalter (Home Point) eine genauigkeitsrelevante Messgröße.

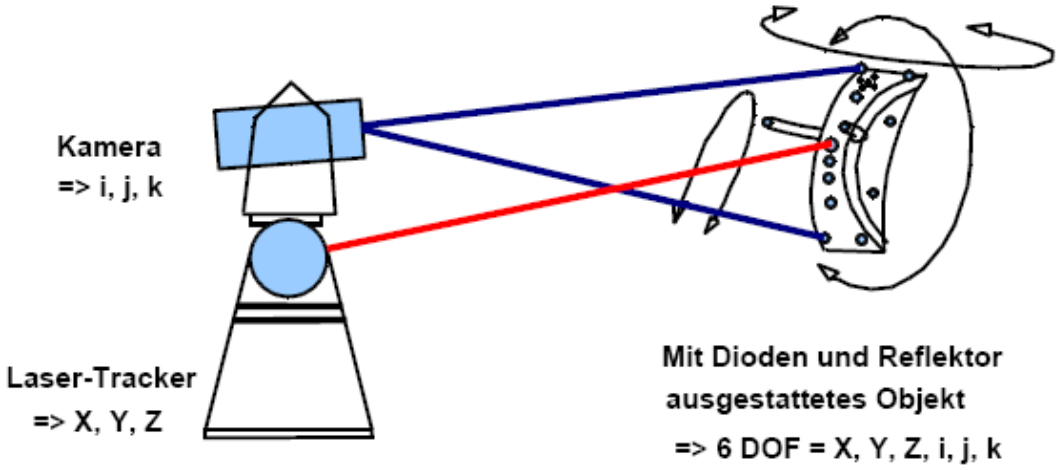


[13]

[13] HENNES, M. (2008): Formabgleich in Wineseile

6.3 Zusatzkomponenten

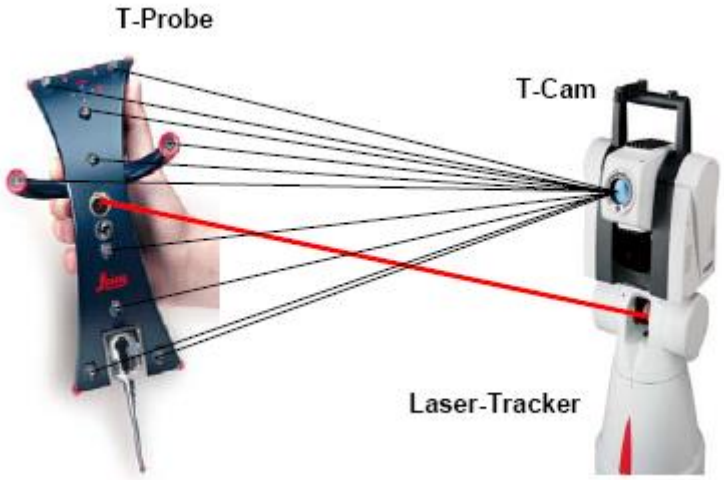
Zusatzkomponenten sind eine spezielle aufsetzbare Hochgeschwindigkeits-Messkamera (T-Cam), die mit einem frei beweglichen Messtaster (T-Probe) oder einem Handscanner (T-Scan) kombiniert werden kann. Die Handgeräte besitzen zentral angeordnete Präzisionsreflektoren und mehrere über das Gerät verteilte Leuchtdioden.



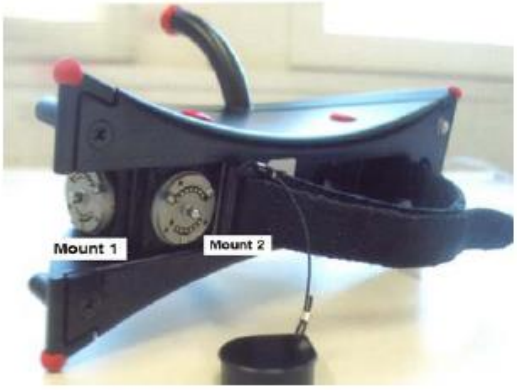
Mit dem Laser-Tracker werden die 3D-Koordinaten (X, Y, Z) des Reflektors der T-Probe oder des T-Scan bestimmt. Die Bestimmung der Lage der Zusatzkomponente im Raum (i, j, k) erfolgt photogrammetrisch mit Hilfe der T-Cam. Diese erfasst die Position der Leuchtdioden. Damit sind die 6 Freiheitsgrade (6 DOF = 6 **D**egree **o**f **F**reedom) bestimmt.

Handtaster T-Probe

Der Handtaster T-Probe wird zur Messung verdeckter Punkte und Geometrien eingesetzt. In das Gehäuse der T-Probe sind 10 räumlich verteilte Leuchtdioden und ein Reflektor integriert.



Zwei Schnellverschlüsse (Mount 1 und 2) an der Unter- und Hinterseite des Messtasters ermöglichen das schnelle Auswechseln unterschiedlicher Taster, ohne eine Neukalibrierung durchführen zu müssen.



Die Kommunikation von der T-Probe zur Basisstation (LTD und T-Cam) wird durch auswertbare Helligkeitsansteuerungen der Diodenpaare erreicht. Die Basisstation übermittelt Daten zur T-Probe durch Aufmodulierung der Information auf den Infrarot-Laserstrahl des Distanzmessers.

Der gegenseitige Datenaustausch ermöglicht die automatische Erkennung der verwendeten T-Probe und der Tastspitze. Messungen können an der T-Probe ausgelöst werden.

Als Taster mit unterschiedlichen Tastspitzen und Verlängerungen kommt ein passives Tastsystem der Firma Renishaw zum Einsatz. Durch unterschiedlich lange Zwischenstücke und eine große Auswahl an Tastspitzen sind breite Kombinationsmöglichkeiten gegeben.

Wird der Taster erstmalig zusammengestellt, ist eine Kalibrierung (Compensation) notwendig. Dabei wird der exakte Abstand zwischen Reflektormittelpunkt und Zentrum der Tasterspitze bestimmt. Dieser Kalibrierprozess ist einmalig notwendig, solange der Taster unverändert bleibt. Die Kalibrierung benötigt etwa 10 min Zeit.

3D-Koordinaten mit T-Probe, Messunsicherheiten (2σ, 95%):

	Laser Tracker	**T-Probe mit 110 mm Taster**
	Raumlängen bis 6 m	
3D-Punkte	$U_{ADM} = 8\mu m + 14\mu m / m$	$U = 70\mu m + 10\mu m / m$
Raumlängen	$U_{IFM} = \pm 4\mu m + 14\mu m / m$ $U_{ADM} = \pm 10\mu m + 14\mu m / m$	$U \pm 55\mu m + 10\mu m / m$

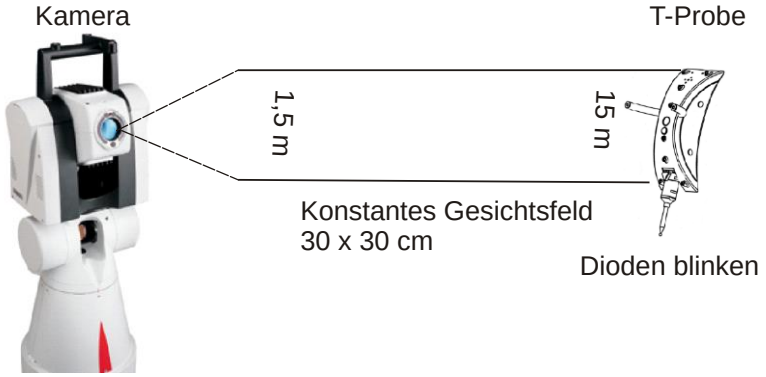
Kamera T-Cam

Die **T-Cam** ist eine Hochgeschwindigkeits-Kamera, die mit sichtbarem Licht und Nahinfrarot-Strahlung (IR) arbeitet. Auf dem Lasertracker folgt die T-Cam de T-Probe oder T-Scan und erfasst die Bilder der Leuchtdioden.

Sechs Parameter beschreiben das Zielgerät in Bezug auf den Lasertracker vollständig. Mit einer Strecke und zwei Winkeln werden die Position (X, Y, Z) des Spiegelreflektors, der T-Probe oder des T-Scan und mit drei Orientierungsparametern (Nick-, Roll- und Gierwinkel) ihre Lage im Raum (i, j, k) photogrammetrisch mit der T-Cam festgelegt (6 DOF).

Die Kamera verfügt über ein Vario-Objektiv, das für Entfernungen zwischen 1,50 m und 15 m ein konstantes objektseitiges Sichtfeld von 30 cm × 30 cm realisiert. Der Vorteil des konstanten Sichtfelds liegt in der nahezu entfernungsunabhängigen Genauigkeit der Orientierungswinkel (i, j, k).

Voraussetzung für hohe Genauigkeiten ist die präzise und stabile Fertigung der mechanischen Bauteile der Kamera sowie deren Temperaturstabilität. Die Tracking-Geschwindigkeit des Lasertrackers mit T-Cam liegt bei > 1 m/s und Beschleunigungen von 1 g (mittlere Erdbeschleunigung) in alle Richtungen.



Handscannner T-Scan

Der **T-Scan** ist ein handgeführter Hochgeschwindigkeits-Scanner, der auf dem Prinzip des Triangulationsscanners basiert. Der Laserstrahl wird über einen rotierenden Spiegel auf die Oberfläche projiziert. Dabei ist die Position des reflektierten Laserstrahls auf dem CCD-Feld abhängig von der Distanz. Der T-Scan projiziert jeden einzelnen Punkt auf die zu scannende Oberfläche.

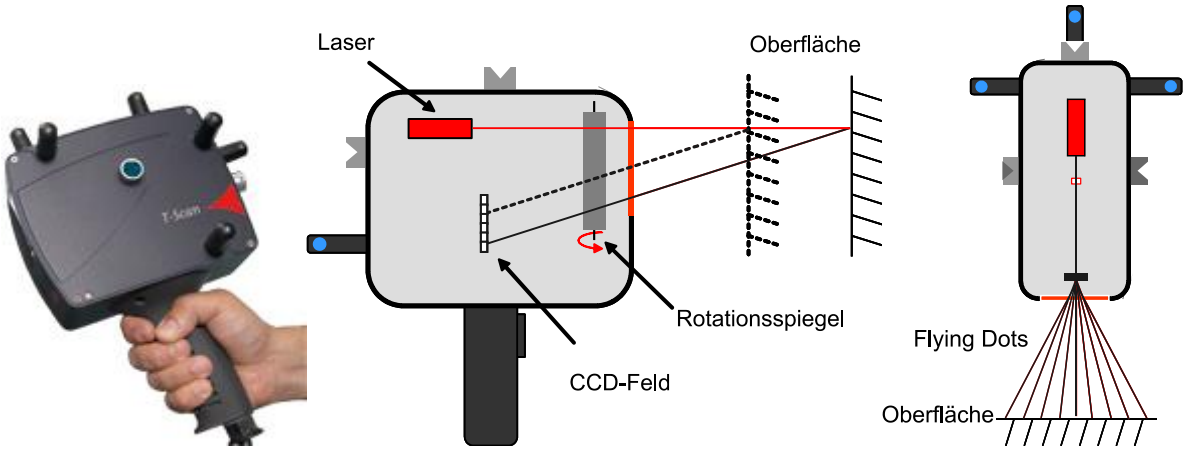
Die Bestimmung der Lage im Raum erfolgt beim T-Scan in gleicher Weise wie bei der T-Probe. In das Gehäuse des T-Scan sind an vier Seiten je ein Reflektor und räumlich verteilte Leuchtdioden integriert.

Die Bestimmung der sechs Freiheitsgrade erfolgt durch die tachymetrische Messung des Reflektors sowie die photogrammetrische Messung der Leuchtdioden.

Der Arbeitsbereich des T-Scan beträgt 90 mm ±25 mm, bei einem minimalen Abstand zur Oberfläche von 41 mm und einer maximalen Arbeitsdistanz von 119 mm.

Der Vorteil der „flying dot“ liegt darin, dass unabhängig von der Beschaffenheit der

Oberfläche eine optimale Signalauswertung erfolgt. Dies wird durch eine Intensitätsanpassung für jeden einzelnen Laserpunkt in Abhängigkeit von der Oberfläche ermöglicht.



Dabei kann die entstehende Linie als „flying dot“ betrachtet werden, wobei unabhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche eine optimale Signalauswertung erfolgt. Dies wird durch eine Intensitätsanpassung für jeden einzelnen Laserpunkt in Abhängigkeit von der Oberfläche ermöglicht.

Leica Absolute Tracker

Der Leica Absolute Tracker AT 401 ist der erste Tracker, der für Außenanwendungen zertifiziert wurde. Die ADM-Auflösung beträgt 0,1 µm bei einer maximalen Unsicherheit von 10 µm in einem Radialvolumen von 160 m.

Die Auflösung der Winkelmessung beträgt 0,07″, die absolute Winkelgenauigkeit 15 µm + 6 µm/m.

Mit der ATR ist eine konstante Zielverfolgung und Feinpositionierung mit unterschiedlichen Reflektortypen innerhalb eines Radialvolumens von 320 m möglich.

Mit der Technologie „PowerLock System“ kann ein Reflektor erkannt werden, und es wird mit dem Laserstrahl automatisch die Verbindung hergestellt, selbst wenn sich das Ziel bewegt. Der Laserstrahl bewegt sich zum Anwender und nicht umgekehrt.

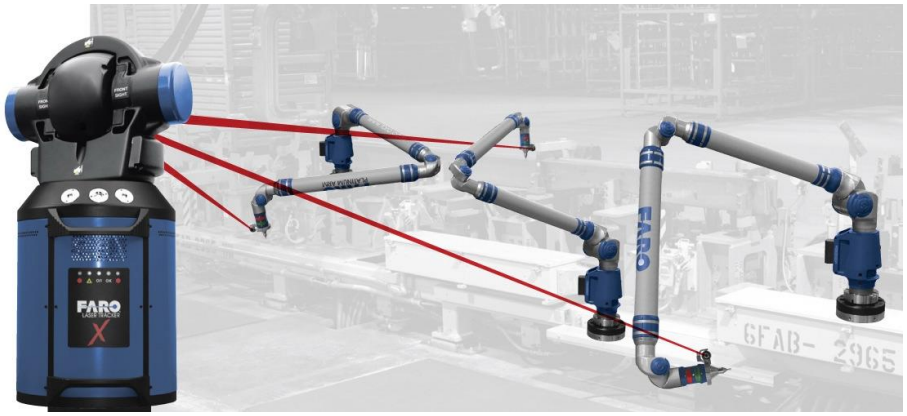
Im AT401 sind integriertes Live-Video, Horizontierung, Umweltüberwachung und eine IR-Fernbedienung enthalten. Mit einem eingebauten WLAN-Kommunikationsmodul kann der Sensor kabellos eingesetzt werden[14].

6.4 Messarm

Gelenkmessarme sind in der Ursprungsidee dem menschlichen Arm nachempfunden, der in seinem Bewegungsraum praktisch jeden Punkt erreichen kann.

Sie werden auch als portable KMG bezeichnet und eignen sich insbesondere für die Inspektion von Bauteilen, die aufgrund ihrer Größe oder ihres Gewichtes nicht mit einem stationären Koordinatenmessgerät geprüft werden können.

Messarm von Romer (Hexagon Metrology GmbH)[15]



Für einen großen Messbereich und verdeckte Punkte wird von der Firma Faro die Kopplung von Messgelenkarm und Laser-Tracker empfohlen. Damit erfolgt die Verknüpfung mehrerer Standpunkte des Armes über identische Punkte.

Der Messarm kann frei positioniert werden. Über eine integrierte Wireless LAN Kommunikation ist die Aufstellung unabhängig vom PC-Standort. Für gleichmäßige Messergebnisse sorgen Winkeldrehgeber.

Die Kohlefaserkonstruktion (Wiederholgenauigkeit) ist mit einem Längenausdehnungskoeffizient von 0,25µ/°C/m temperaturunabhängiger als Aluminium oder Stahl.

---

[14] http://metrology.leica-geosystems.com
[15] http://de.romer.com

Während der Messung können die Taster ohne Werkzeug, Neukalibrierung und Messprogrammunterbrechung gewechselt werden.

Die Taster werden automatisch erkannt. Als Taster dienen passive oder schaltende Tastköpfe sowie optisch schaltende und scannende Sensoren.

Messdurchmesser:	bis 3600 mm
Messunsicherheit Einzelpunkt mit Kugel:	0,051 mm
Längenmessunsicherheit:	0,075 mm

6.5 Laser Radar und Laser Tracer

Laser Radar

- optisches 3D-Koordinatenmesssystem zur berührungslosen Messung von Punkten
- polares Messsystem zum Scannen von Objekten
- ähnlich einem reflektorlosen Tachymeter
- schnelle (2 ms) und hochgenaue (25 µm, 2σ) Distanzmessung
- Technologie des Coherent Laser Radar (CLR): frequenzmodulierten Infrarotlaser mit einer Trägerwellenlänge von 1550 nm
- Distanz: $2 \cdot D = c \cdot \Delta t$
- Zeit wird nicht direkt gemessen
- Frequenzdifferenz zwischen Sende- und Empfangssignal
- präzisen Winkelencoder ergeben 3D-Koordinaten
- Messvolumen: 24 m
- 3D-Messunsicherheit von 240 µm bei 24 m (bis 1 000 Punkte/sek.)[16]

LaserTracer

Von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig für die Kalibrierung und Überwachung von Mess- und Fertigungsmaschinen entwickelt (Afm Technology).

- räumliche Distanzmessungen 0,2 µm + 0,3 µm/m
- selbstnachführendes Laserinterferometer
- hochgenaue, feststehende Reflektorkugel mit einer Formabweichung kleiner 50 nm, die als Referenzspiegel für das Interferometer dient

[16] http://www.nikonmetrology.com

- mechanisch und thermisch von dem Nachführmechanismus entkoppelt und bleibt so auch bei dessen Bewegung im Sub-Mikrometerbereich stabil
- Führungsfehler der Dreh- und Schwenkachsen werden auf diese Weise vollständig eliminiert, Stabilität des Drehpunkts von < 0,3 µm
- Interferometer: Auflösung von 1 nm bei einer Messlänge von 15 m
- Temperatur- und Druckfühler (Umgebungsbedingungen)

7 Kalibrierung und Rückführung[17]

Bei jedem Messgerät treten systematische Unterschiede zwischen der Anzeige und dem wahren Wert auf. Der „richtige Wert“ der Messgröße wird durch ein Normal gegeben, womit das zu kalibrierende Gerät verglichen wird. Dies ist zunächst ein **Gebrauchsnormal**, das mit einem **Bezugsnormal** verglichen wird.

Dieses Bezugsnormal ist wiederum an eine Messeinrichtung angeschlossen, mit der die jeweilige Maßeinheit gemäß der Definition im Internationalen Einheitensystem (SI) mit der kleinstmöglichen Messunsicherheit realisiert ist.

Wie viele Zwischenstufen bei den Normalen möglich sind, hängt von der Messunsicherheit ab. Dieser gesamte Vorgang wird als **Rückführung** bezeichnet[18].

7.1 Kalibrierung

DIN 1319: Überprüfen von Messgeräten und die Bestimmung der Abweichungen vom Sollwert bzw. die Einhaltung von Fehlergrenzen.

Die **Kalibrierung** umfasst Maßnahmen, die eine Beziehung zwischen den ausgegebenen Werten (Ablesung) eines Messmittels oder Messsystems und den entsprechenden Größen (bekannte Werte der Messgröße unter bekannten Bedingungen) des Messstandards herstellen.

Bekannte Soll-Werte erhält man aus einem **Normal höherer Ordnung** oder aus geometrischen Restriktionen. Beim Kalibrieren erfolgen keine Veränderungen am Messgerät, jedoch besteht die Möglichkeit, durch Anbringen von Korrekturwerten die Abweichungen zu eliminieren.

Das Ziel einer Kalibrierung ist ein Genauigkeitsnachweis.

Kalibrierkonzepte

Bei der „klassischen“ *Komponentenkalibrierung* werden einzelne Sensoren (z. B. Distanzmessteil, Kompensator, GNSS-Antenne) untersucht. Voraussetzung dafür ist, dass die Komponenten unabhängig voneinander arbeiten.

---

[17] MÖSER, M. et al. (2015): Messunsicherheit, Instrumententests und Kalibrierung.

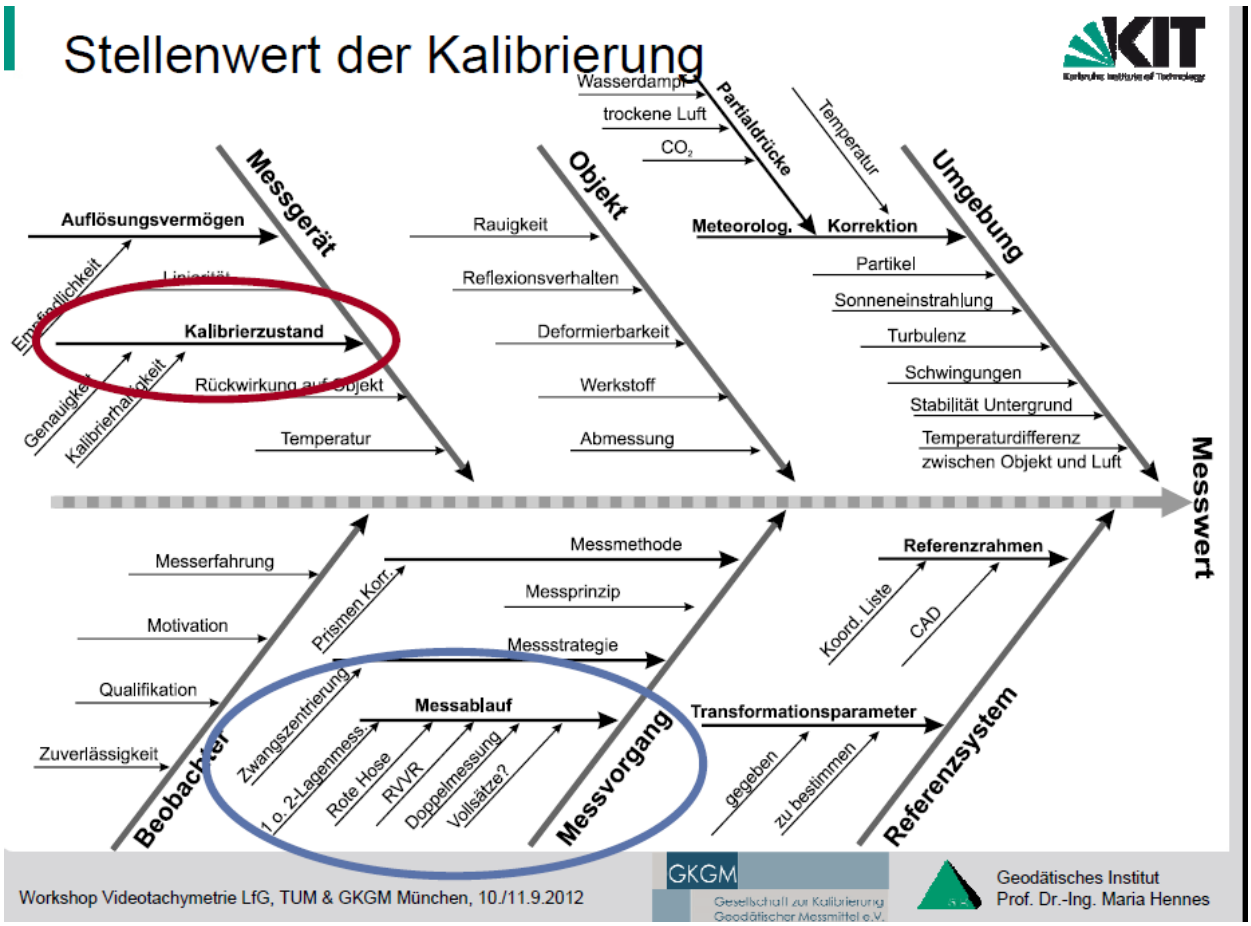
[18] FAY, E. (2001): Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien.

Im Gegensatz dazu wird bei der *Systemkalibrierung* das gesamte Messsystem (Tachymeter und Reflektor , Nivellierausrüstung) inklusive aller meteorologischer Sensoren betrachtet und das Ergebnis mit bekannten Sollgrößen (Koordinaten) verglichen. Dabei sind Kenntnisse über die gegenseitigen Abhängigkeiten im Messprozess notwendig.

Nach /Hennes, 2010/ wird bei der elektrooptischen Distanzmessung nicht das Messmittel „EDM“ kalibriert, sondern der gesamte Messprozess kann Komponenten- und Systemkalibrierungen enthalten, was letztendlich zu einer *Prozesskalibrierung* führt.

Bei geodätischen Messgeräten wird häufig auch eine *Selbstkalibrierung* (2 Fernrohrlagen) ohne Referenz und Kalibriervorrichtung durchgeführt.

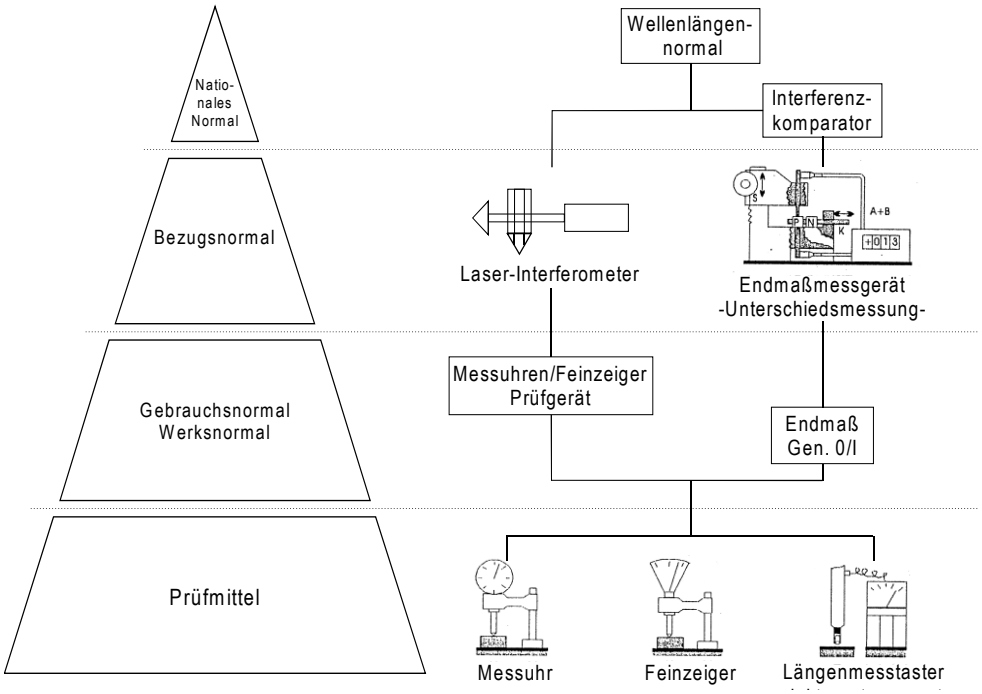
Das Ziel einer *Simultankalibrierung* ist die Untersuchung von mindestens zwei Systemen gleichzeitig, meistens ohne Referenz (Kammer- und Testfeldkalibrierung mit Bündelblockausgleichung).



7.2 Rückführung

Bei der Kalibrierung des Arbeitsnormals wird das Messergebnis oder der Wert des Normals durch eine „ununterbrochene Kette“ von Vergleichsmessungen mit angegebenen Messunsicherheiten auf internationale oder nationale Normale bezogen (**rückgeführt**).

Beispiel: Der Anschluss an das metrische Längennormal wird durch Messung zu Sollstrecken und der daraus berechneten Nullpunktkorrektion hergestellt. Diese Sollstrecken sind mit einem sehr genauen Referenz-EDM gemessen, das mit einem interferometrischen Längenmesssystem bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig kalibriert wurde.

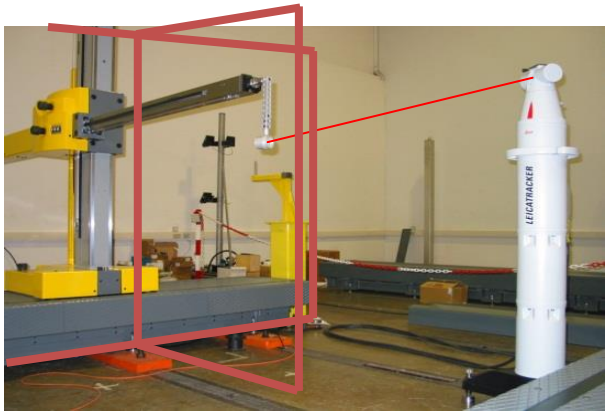


Kalibrierung im Maschinenbau

Werkzeugmaschinen werden grundsätzlich mit Laserinterferometern und Koordinatenmessgeräten (KMG) mit geometrischen Normalen kalibriert. Bei der Kalibrierung von KMG kommen präzise gefertigte Probekörper, z. B. Kugeln, zum Einsatz, die durch Verbindungselemente aus kohlenstofffaserverstäktem Kunststoff zu einem Stab verbunden werden. Diese Kugelstäbe werden auf dem KMG aufgestellt und die Position der Kugeln durch einen Taster gemessen /Schmitt, Jatzkowski, Schwenke 2008/.

Ein neues Verfahren basiert auf dem Einsatz eines LaserTracers und einem Laserinterferometer, das einem maschinengeführten Reflektor folgt. Der LaserTracer unterscheidet sich vom Lasertracker durch ein hochpräzises optisches Zentrum mit einer Positionsunsicherheit < 0,3 μm. Im Gegensatz zum Lasertracker (Koordinatenmessung) wird nur eine Längenänderung gemessen /Schmitt, Jatzkowski, Schwenke 2009/.

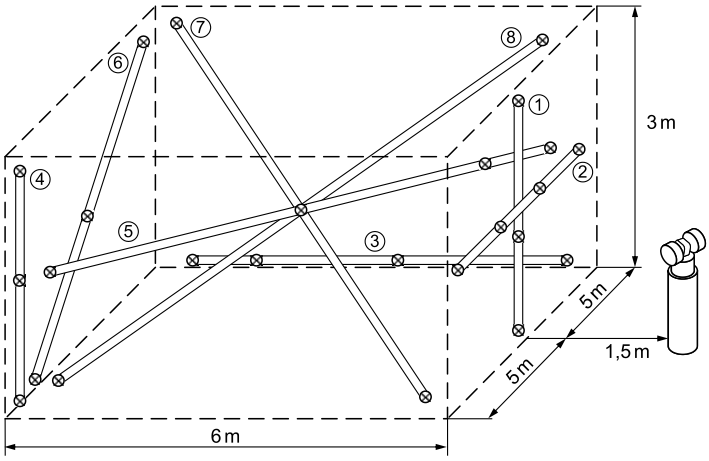
Lasertracker werden als Mess- und Prüfgeräte eingesetzt. In der Richtlinie VDI/VDE 2617 (2011) sind Kenngrößen für die Genauigkeit von KMG festgelegt und Verfahren zur Prüfung beschrieben.



Kalibrierung großer KMG mit Lasertracker

Bei dem in der Industrie geforderten Qualitätsstandard muss der Bediener sicher sein, dass der Lasertracker die maximal zulässige Messabweichung garantiert. Dies kann nur durch vergleichbare Annahmekriterien und eine regelmäßige Überwachung gewährleistet werden.

Die Richtlinie enthält neben Annahme- und Überwachungsverfahren zur Beurteilung von Lasertrackern auch die Anforderungen an die Prüfkörper (Kugeln aus Keramik oder Stahl) und Prüfmittel (Referenzlängen). Es werden u.a. die Kenngrößen Antastabweichung und Längenmessabweichung definiert, deren Grenzwerte die Annahme eines Lasertrackers vom Hersteller und die Überwachung vom Nutzer festlegen.



Messlinien zur Kalibrierung von Lasertrackern

Für die Kalibrierung wird ein Messvolumen von 10 000 mm × 6 000 mm × 3 000 mm (Länge, Breite, Höhe) für Messlinien mit einem Standpunkt empfohlen (*Abb. 10*). Die Ermittlung der Längenmessabweichung erfolgt stichprobenartig entlang acht unterschiedlicher Messlinien. In jeder Messlinie sind mindestens drei unterschiedliche Prüflängen zu messen.

Kalibrierung Lasertracker

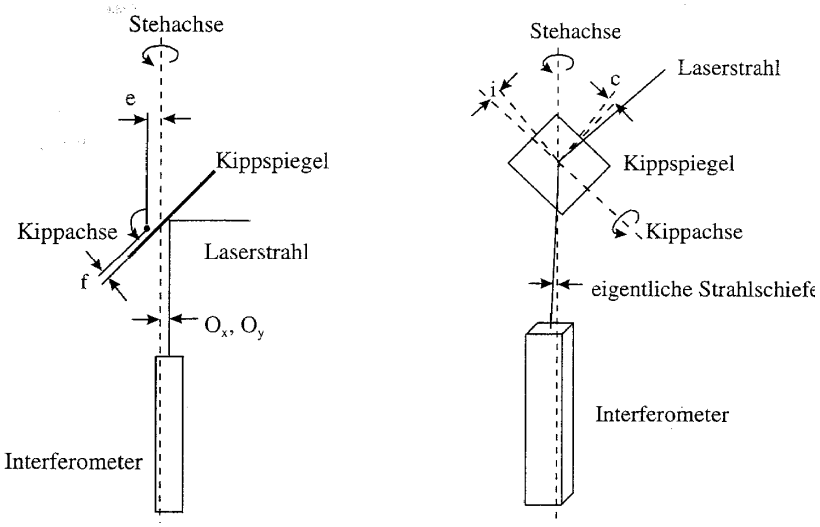
Das Lasertracker-System erfordert eine sehr gewissenhafte Montage und Justierung der Einzelkomponenten. Resteinstellungen werden bei der Messwertbestimmung mithilfe der Berechnungssoftware korrigiert.

Ein Teil dieser Parameter wird durch spezielle Messabläufe einmalig beim Hersteller bestimmt, z. B. die Maßstabswerte des Positionsdetektors in beiden Richtungen.

Für eine zweite Gruppe von Parametern, die größtenteils auf geometrischen Einflüssen beruhen, existiert ein spezieller Kalibrierungsablauf.

Die Kalibrierungsmessungen sollten drei- bis viermal pro Jahr wiederholen, um eine Kontrolle und Sicherheit bezüglich der Systemstabilität zu erhalten.

Ein weiterer wichtiger Indikator für die Durchführung einer Systemkalibrierung ergibt sich für den Benutzer aus wesentlich veränderten Umgebungsbedingungen oder Erschütterungen beim Transport.



Es kann dann zu folgenden Abweichungen kommen:

- ein systematischer Offset für Längen vom Tracker zum Reflektor
- zufällige, längenabhängige Abweichungen interferometrisch gemessener Längen
- systematische Abweichung der Rechtwinkligkeit der Achsen
- Nullpunktabweichung des Vertikalwinkels
- Messabweichung der horizontalen und vertikalen Richtungen (Wiederholgenauigkeit der Winkelmessung).

Bei dem in der Industrie geforderten Qualitätsstandard muss der Betreiber sicher sein, dass der Lasertracker die maximal zulässige Messabweichung garantiert.

Die Richtlinie VDI/VDE 2617, Blatt 10 (2011) enthält neben Annahme- und Überwachungsverfahren zur Beurteilung von Lasertrackern auch die Anforderungen an die Prüfkörper und Prüfmittel.

Es werden die Kenngrößen

- Antastabweichung
- Längenmessabweichung

definiert, deren Grenzwerte die Annahme eines Lasertrackers vom Hersteller und die Überwachung vom Betreiber festlegen.

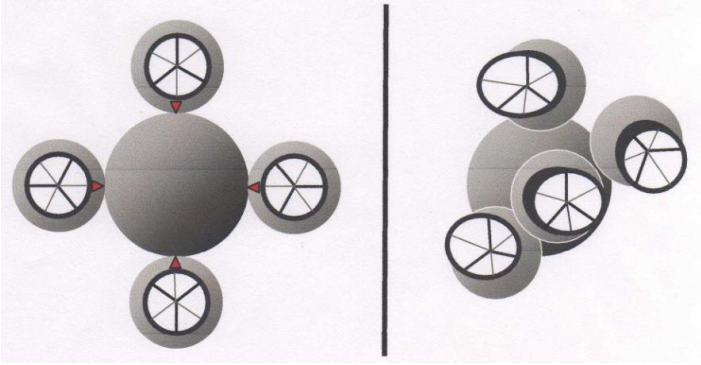
Antastabweichung

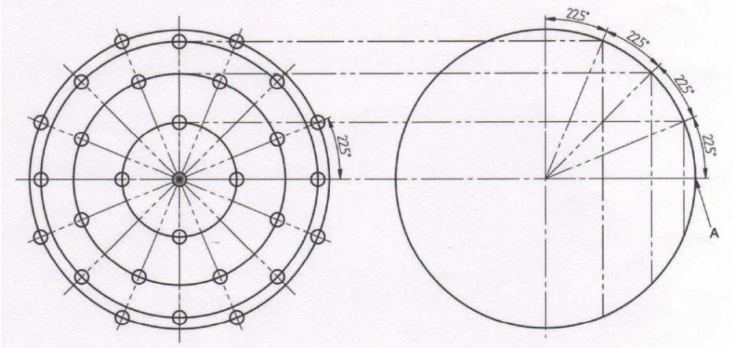
Abweichungsverhalten eines Lasertrackers in einem sehr kleinen Teil des Messvolumens. Man unterscheidet zwischen den Antastabweichungen Form, Maß und Ort. Als Prüfkörper dienen Kugeln aus Keramik oder Stahl zwischen 30 mm und 50 mm.

→Prüfkugel an mindestens 3 beliebigen Positionen im Messvolumen messen

→ kürzeste Messentfernung rund 2 m

→ längste Messentfernung ca. 2/3 der Raumdiagonale





a) Antastabweichung Form (PF)

Spanne der radialen Abstände der Messpunkte von einer berechneten Ausgleichskugel

$$PF = R_{\max} - R_{\min}$$

b) Antastabweichung Maß (PS)

Differenz der Durchmesser von Ausgleichskugel (a) und kalibrierter Prüfkugel (r)

$$PS = D_a - D_r$$

c) Antastabweichung Ort (PL)

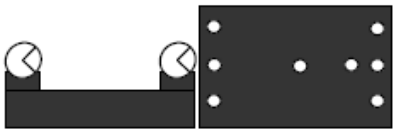
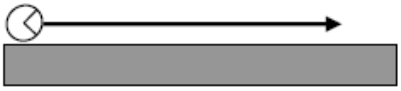
maximaler Abstand zweier, durch Ausgleich ermittelter Mittelpunktskoordinaten einer ortsfesten Prüfkugel, deren Position mit unterschiedlichen Reflektoren ermittelt wurde

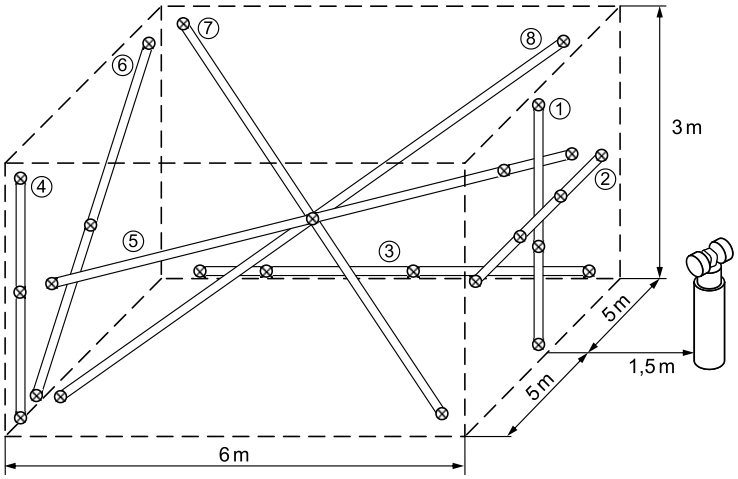
Längenmessabweichung

Abweichung, mit der die Länge einer Maßverkörperung mit dem Lasertracker bestimmt werden kann, wenn die Messung durch bidirektionale Antastung von zwei gegenüberliegenden Punkten aus entgegengesetzten Richtungen an nominell parallelen Flächen durchgeführt wird.

Abstand zwischen den Punkten ist die Prüflänge DIN EN ISO 10360

Prüfmittel: → Prüfkörper
→ Referenzlängen
→ Längenkomparatoren

Prüfkörper/-mittel	**Schematische Darstellung**	**Berechnung der Längenmessabweichung *E*** (siehe auch Abschnitt 4.2.4)
Parallel- oder Stufenendmaß • bidirektionale Antastung zweier Einzelpunkte • keine Mittelbildung		$E = L_a - L_r \cdot (+E_{ki})$ $E_{ki} \neq 0$, falls $\alpha < 2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$
Kugelstab/Kugelleiste • Mehrfachantastung der Kugeln • dadurch Mittelbildung und • Elimination von systematischen Fehlern	 	$E = SD + PS + (\mathrm{sgn}(SD + PS)) \cdot PF + E_{ki}$ $E_{ki} \neq 0$, falls $\alpha < 2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$
Zerlegbarer Kugelstab • Mehrfachantastung der Kugeln • dadurch Mittelbildung und • Elimination von systematischen Fehlern • nur Teillängen sind kalibriert		$E = \sum SD_i + PS + (\mathrm{sgn}(SD + PS)) \cdot PF + E_{ki}$ $E_{ki} \neq 0$, falls $\alpha < 2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$
Wand mit Referenzlängen/Leiste mit Kugelnestern • einseitige Antastung der Prüflänge, dadurch • Elimination von systematischen Fehlern, aber • keine Mittelbildung		$E = L_a - L_r + PS \cdot (+E_{ki})$ $E_{ki} \neq 0$, falls $\alpha < 2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$
Längenkomparator • einseitige Antastung der Prüflänge, • dadurch Elimination von systematischen Fehlern, aber • keine Mittelbildung		$E = L_a - L_r + PS \cdot (+E_{ki})$ $E_{ki} \neq 0$, falls $\alpha < 2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$



Nach VDI/VDE 2617 wird ein Messvolumen von 10 000 mm × 6 000 mm × 3 000 mm (Länge, Breite, Höhe) für Messlinien mit einem Standpunkt empfohlen.

Der Lasertracker wird mittig vor der längsten Seite des Messvolumens im Abstand von 1,5 m aufgestellt. Der Messkopf befindet sich annähernd im gleichen Abstand zum oberen und unteren Rand des Messvolumens.

Die Ermittlung der Längenmessabweichung erfolgt stichprobenartig entlang acht unterschiedlicher Messlinien. In jeder Messlinie sind mindestens drei unterschiedliche Prüflängen zu messen.

Verwendung von Referenzlängen

$$E = L_a - L_r + PS + E_{ki}$$

Bestimmung einer synthetischen Prüflänge

Korrekturwerte E_{ki} bei Verwendung von Prüflängen aus einem Material mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten kleiner 2 * 10^{-6}/K

1) Prüflänge L brechzahlkompensiert mit einem Interferometer messen
2) Synthetische Prüflänge $L_S = L \cdot [1 - 11{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 20°C)]$
3) Prüflänge L_a mit Lasertracker messen
4) Synthetische Längenmessabweichung $E_S = L_a - L_s$
5) Korrekturwert $E_{ki} = \frac{L_r \cdot E_{SM}}{L_S}$ mit $E_{SM} = \frac{(E_{S1} + E_{S2} + E_{S3})}{3}$

Die Längenmessabweichung *E* sollte bei einem kalibrierten Lasertracker ±100 *µ*m betragen und der Grenzwert bei ±120 *µ*m liegen.

Zusammenfassung

- VDI/VDE 2617 bietet schnelle und aussagekräftige Möglichkeit, dass Messverhalten eines Lasertrackers in einem Messvolumen zu bestimmen
- einheitliches Prüfverfahren → Vergleichbarkeit der Ergebnisse und der verschiedenen Instrumente
- Erfassung aller gerätespezifischer Fehlereinflüsse mit geringem Aufwand an Zeit, Kosten und Personal
- einheitliche und einfach zu interpretierende Kennzahlen als Qualitäts-merkmal
- Anwender und Dienstleister haben die Möglichkeit ihre Lasertracker unabhängig vom Hersteller regelmäßig zu kontrollieren

8 Baumaschinensteuerung

8.1 Dynamisches Modell

Seit 1990 werden kinematische Messtechniken für die Positions- und Orientierungsbestimmung eines bewegten Objekts mit zielverfolgenden Tachymetern[19], GNSS-Empfängern und Zweiachsneigungssensoren eingesetzt[20]:

- Steuerung von Tunnelvortriebsmaschinen
- Bahnbestimmung von Robotern
- Monitoring bei Deformationsprozessen
- Baumaschinenführung: Asphaltfertiger für die feste Fahrbahn
- Kinematische **dynamische** Absteckung

Mit Sensoren kann der Zustand dynamischer Systeme (Fahrzeug, Schiff, Flugzeug) zur Messzeit abgeleitet werden, wobei die Datenverfügbarkeit sehr unterschiedlich ist:

- GPS 1 bis 20 Hz
- Inertialsysteme 100 Hz
- Radumdrehungssensoren 64 Hz
- Tachymeter mit ATR 100 Hz

Soll nun ein ausgeglichener Zustand 30mal/Sekunde berechnet werden, liegen nicht von allen Sensoren (Neigung, Winkel, Distanz) zeitgleich Daten vor. Es kommt zu Unterbestimmungen oder Singularitäten im NGL-System.

Das zeitliche Verhalten dynamischer Systeme wird mit **Differenzialgleichungen** beschrieben. Mit Anfangsbedingungen und Eingangsgrößen (Messwerte) kann der Systemzustand zu jedem Zeitpunkt berechnet werden.

Beispiel: Zustandsparameter für eine bewegte Plattform (Schiff, Flugzeug, KFZ): Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung

$$\begin{vmatrix} x_{k+1} \\ \dot{x}_{k+1} \\ \ddot{x}_{k+1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta t & 1/2\Delta t^2 \\ \mathbf{0} & 1 & \Delta t \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{vmatrix}$$

8.2 Prinzip KALMAN-Filter

Das Prinzip des KALMAN-Filters besteht in der Verknüpfung von Informationen über das Systemverhalten und Störeinflüssen mit verrauschten Messinformationen.

Es führt zu einer optimalen Schätzung mit minimaler Varianz der in einem Zustandsvektor **x** gesuchten Parameter (Position, Geschwindigkeit). Die Berechnung ist rekursiv, zu jeder Messepoche erfolgt eine Schätzung in Echtzeit als zeitdiskrete Darstellung (skalare Größen) mit *w* als Messabweichungen (Vorepoche t = k | Messepoche t + Δt = k+1)

$$l(k+1) = A(k+1) \cdot x(k+1) + w(k+1)$$

[19] Siehe VL Kinematische Vermessung, Bsc. 6. Sem. (FREVERT, V.)
[20] www.trimble.com, www.hexagon.se, www.topconpositioning.com

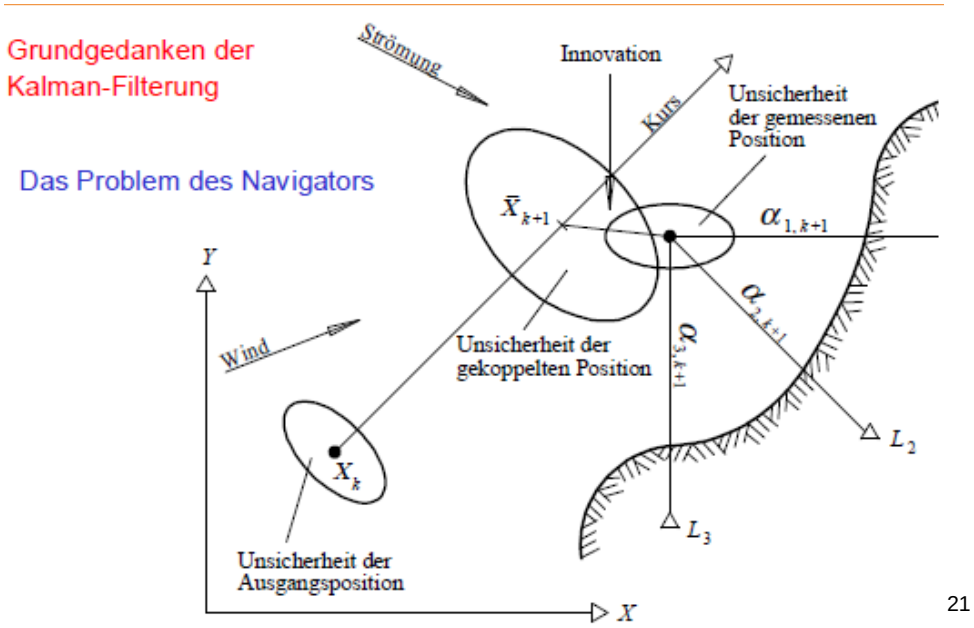
Das Problem des Navigators

Zum Zeitpunkt t_k ist die Position X_k des Schiffes bekannt. Das Schiff bewege sich nun mit bekanntem Kurs und bekannter Geschwindigkeit.

Mit diesen Informationen über Kurs und Fahrt (**Systemgleichung**) ist es dem Navigator möglich, die Position von Zeitpunkt t_k auf einen Zeitpunkt t_{k+1} fortzuschreiben.

In der Nautik heißt dieser Vorgang „Koppeln“, in der KALMAN-Filtertheorie **Prädiktion**.

In Abhängigkeit von Wind, Strömung und Unzulänglichkeiten bei der Einhaltung der Fahrt des Schiffes und dem Zeitintervall □t wird die gekoppelte Position X_{k+1} in Relation zur Ausgangsposition zunehmend ungenauer.



[21]

Der Navigator wird bestrebt sein, seinen gekoppelten („prädizierten“) Ort durch eine Positionsbestimmung zum Zeitpunkt t_{k+1} durch Messungen der Azimute zu den Festpunkten L_1, L_2 und L_3 zu bestätigen.

Der gemessene Standort wäre bei drei Standlinien geometrisch überbestimmt, und der Navigator kann seine Positionsbestimmungen (**Messgleichung**) kontrollieren.

Fallen gekoppelter und gemessener Ort mit der erwarteten Genauigkeit zusammen, wird der Navigator seine Annahmen über Kurs, Fahrt und die Einschätzung von Versatz durch Strömung, Abdrift durch Wind bestätigt sehen.

Weichen beide Orte voneinander ab, so ist die Differenz zwischen dem gemessenen und dem vorausberechneten Ort die **Innovation**.

Vertraut der Navigator seiner gemessenen Position, wird er seine Einschätzungen über den Einfluss von Strömung und Wind revidieren müssen. Mit diesen revidierten Annahmen (verbesserte **Systemgleichung**) wird er dann versuchen, seine Vorausberechnung für den nächsten Ort zu verbessern.

Das Problem des Navigators ist rekursiv, ein sich ständig wiederholender Vorgang von Prädiktion, Vergleich mit Messungen, Bewertung der Innovation und verbesserter Prädiktion.

---

[21] HEUNECKE, O.; u.a. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie, Auswertung Überwachungsmessungen

Da sich das Schiff bewegt, interessiert den Navigator weniger, wo er zum Zeitpunkt der Standortbestimmung ist, als vielmehr, wo sich das Schiff in den nächsten Minuten befindet (neue Einflüsse). Der Navigator muss die „Trägheit“ seines Systems vorausschauen.

Der Rückschluss von einer signifikanten Innovation auf ihre Ursachen ist ein inverses Problem. Der Navigator muss wissen, welche Einflussgrößen (Wind, Strömung) maßgeblich sind.

Systemzustand

- Informationen über das dynamische Systems (Differenzialgleichungen)
- Anfangswerte und Eingangsgrößen
- statistische Kenngrößen der System- und Messunsicherheiten

Filterung

Aus allen bis zum Zeitpunkt t_k vorliegenden Eingangsdaten (Messwerte) ist der plausibelste Wert des Unbekanntenvektors x_k zu berechnen.

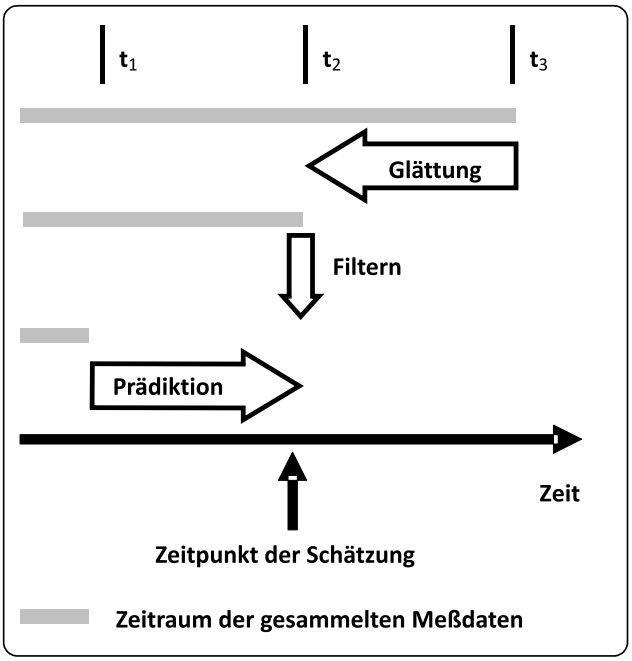
Die Eingangsdaten sind direkte Messdaten (zeitabhängige Beobachtungen) oder indirekte Messwerte (Koordinaten).

Glättung

Aus den gegenwärtigen Messwerten und den bis zu einem bestimmten zurückliegenden Zeitpunkt erfassten Informationen ist der mittlere („geglättete“) Verlauf in diesem Zeitintervall zu bestimmen.

Prädiktion

Aus den aktuellen Eingangsdaten zum Zeitpunkt t_k und der bis dahin gesammelten Information über das Systemverhalten ist der mutmaßliche weitere Verlauf für einen Zeitpunkt t_{k+1} zu prognostizieren.



Rekursiver KALMAN-Filter

Beispiel: Mittelwert aus verrauschten Messungen und einer Schätzung, die mit jeder neuen Messung korrigiert wird.

Erste Messung z_1 : Speicherung von z_1 und Schätzung des Mittelwertes $\hat{m}_1 = z_1$

Zweite Messung z_2 : Speicherung von z_2 und z_1 $\hat{m}_2 = \frac{z_1 + z_2}{2}$

Dieser Algorithmus benötigt sehr viel Speicherplatz und die Anzahl der arithmetischen Operationen steigt. Jede neue Schätzung ist eine Verschmelzung aus alter Schätzung und aktueller Messung:

Erste Messung z_1 : Berechnung der Schätzung zu $\hat{m}_1 = z_1$

Speicherung von $\hat{m}_1$; z_1 wird verworfen.

Zweite Messung z_2 : Berechnung der Schätzung aus der gewichteten Summe der vorhergehenden Schätzung $\hat{m}_1$ und des aktuellen Messwertes z_2 :

$$\hat{m}_2 = \tfrac{1}{2}\hat{m}_1 + \tfrac{1}{2} z_2$$

Speicherung von $\hat{m}_2$; z_2 und $\hat{m}_1$ werden verworfen.

Dritte Messung z_3 : Berechnung der Schätzung aus der gewichteten Summe der vorhergehenden Schätzung und des aktuellen Messwertes z_3 :

$$\hat{m}_3 = \tfrac{2}{3}\hat{m}_2 + \tfrac{1}{3} z_3$$

Speicherung von $\hat{m}_3$; z_3 und $\hat{m}_2$ werden verworfen.

n-te Messung gewichtete Summe $\hat{m}_n = \left(\frac{n-1}{n}\right)\hat{m}_{n-1} + \left(\frac{1}{n}\right) z_n$

8.3 Algorithmus

Zustandsparameter für bewegte Objekte: Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung

Lineares dynamisches System

Systemgleichung für den ungestörten Systemübergang von einer Epoche zur nächsten

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{T}_k \hat{\mathbf{x}}_k$$

mit $\mathbf{x}_{k+1}$ Vektor der unbekannten Zustandsgrößen | Zeitpunkt k + 1

$\hat{\mathbf{x}}_k$ Vektor der Zustandsgrößen zur vorangegangenen Epoche k

$\mathbf{T}_k$ Transitionsmatrix | Übergangsmatrix von einer Epoche zur anderen

Systemrauschen überlagert das deterministische Systemmodell mit der Störgrößenmatrix (stochastisches Modell)

$$\bar{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{T}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{S}_k \mathbf{w}_k$$

mit $\mathbf{S}_k$ Störgrößenmatrix | auf die zeitlichen Änderungen

$\mathbf{w}_k$ Vektor der Systemstörungen | Rauschen | Abweichungen von der Realität

Eingriffe auf das dynamische System (Beschleunigen, Bremsen, Lenken) mit Stellgrößen

$$\bar{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{T}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{S}_k \mathbf{w}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k$$

mit $\mathbf{B}_k$ Stellgrößenmatrix

$\mathbf{u}_k$ Stellgrößenvektor

Messgleichung

Die Systemgleichung ist durch die Messgleichung zu ergänzen. Mit ihr wird die direkte oder indirekte Beobachtung der Zustandsparameter mit dem System verknüpft:

$$\mathbf{l}_{k+1} = \mathbf{A}_{k+1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1} - \mathbf{v}_{k+1}$$

Vorläufiger bzw. prädizierter Zustandsvektor

$$\bar{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1} - \mathbf{v}_{\bar{x},k+1}$$

Kombination beider Gleichungen mit dem funktionalen und stochastischen Modell

$$\begin{vmatrix} \bar{\mathbf{x}}_{k+1} \\ \mathbf{l}_{k+1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{A}_{k+1} \end{vmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k+1} - \begin{vmatrix} \mathbf{v}_{\bar{x},k+1} \\ \mathbf{v}_{i,k+1} \end{vmatrix} \qquad \mathbf{\Sigma}_{k+1} := \begin{vmatrix} \mathbf{\Sigma}_{\bar{x}\bar{x},k+1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{\Sigma}_{ll,\mathbf{k}+1} \end{vmatrix} = \sigma_0^2 \begin{vmatrix} \mathbf{Q}_{\bar{x}\bar{x},k+1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{ll,\mathbf{k}+1} \end{vmatrix}$$

Innovation

Unterschied zwischen den durch die Systemgleichung fortgeschriebenen und den beobachteten geometrischen Größen und Kofaktormatrix

$$\mathbf{d}_{k+1} = \mathbf{l}_{k+1} - \mathbf{A}_{k+1} \bar{\mathbf{x}}_{k+1}$$

$$\mathbf{D}_{k+1} = \mathbf{Q}_{ll,k+1} + \mathbf{A}_{k+1} \mathbf{Q}_{\bar{x}\bar{x},k+1} \mathbf{A}_{k+1}^T$$

Verstärkungsmatrix

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{Q}_{\bar{x}\bar{x},k+1} \mathbf{A}_{k+1}^T \mathbf{D}_{k+1}^{-1}$$

Aufdatierung des Zustandsvektors, der die neuen Verhältnisse beschreibt:

Ausgeglichener Zustand und Kofaktormatrix

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \bar{\mathbf{x}}_{k+1} + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{d}_{k+1} \text{ und } \mathbf{Q}_{\mathrm{xx},k+1} = \mathbf{Q}_{\bar{x}\bar{x},k+1} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{D}_{k+1} \mathbf{K}_{k+1}^T$$

Varianz der Gewichtseinheit

$$s_0^2 = \frac{\mathbf{d}_{k+1}^T \mathbf{D}_{k+1}^{-1} \mathbf{d}_{k+1}}{f_{k+1}}$$

8.4 Zielverfolgung

Motorisierte Achsantriebe mit Schritt- oder Servomotoren (Auflösung 0,3 mgon) ersetzen die klassische Funktionseinheit „Klemme und Feintrieb“. Zur manuellen Anzielung dient ein Endlosfeintrieb, der über ein einstufiges Getriebe bedient wird.

- Direktantriebe MagDrive™-Servotechnologie von Trimble mit einer maximalen Drehgeschwindigkeit von 128 gon/s
- Piezo-Technologie von Leica Geosystems mit 200 gon/s und einem hochfrequenten vierfachen Richtungsabgriff.

Für Richtungsmessungen (0,15 mgon) sind die Drehmomente zu minimieren, die bei der Rotation des Instruments sowie beim Auslösen einer Messung mittels Tastendruck auftreten.

Trimble S8 (2007)

TS 30 (Leica Geosystems 2010)

MS60 (2015)

Zum Auffinden der Zielpunkte sind „Zielmarken“ erforderlich, die (kooperativ) codiert oder reflektierend sind, selbst Signale aussenden können oder mit positionsempfindlichen Sensoren ausgerüstet sind.

Aktive Reflektoren senden ein Suchsignal aus oder empfangen Signale vom Tachymeter. Die 360°-Reflektoren (**passiv**) sind aus mehreren Tripelprismen aufgebaut und haben den Vorteil, dass sie unabhängig von der horizontalen Orientierung verwendet werden können.

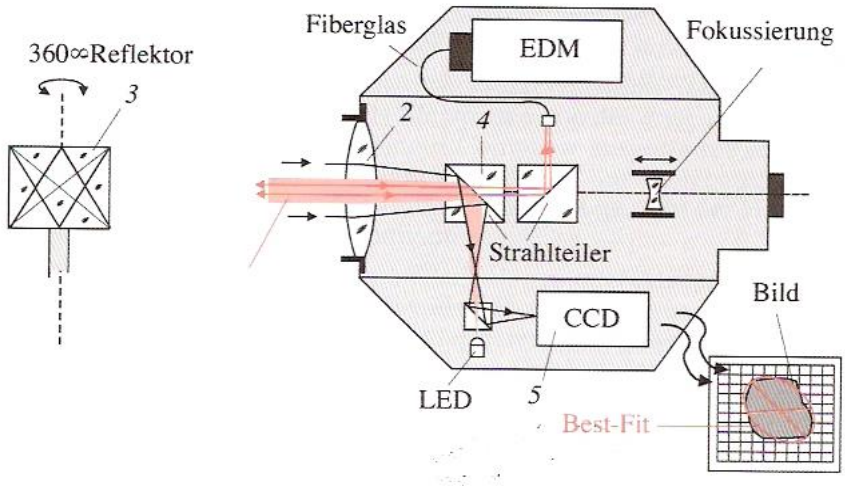
Aktiver Reflektor RMT 606

360° Prisma

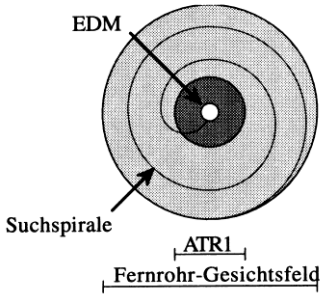
Zielerfassung

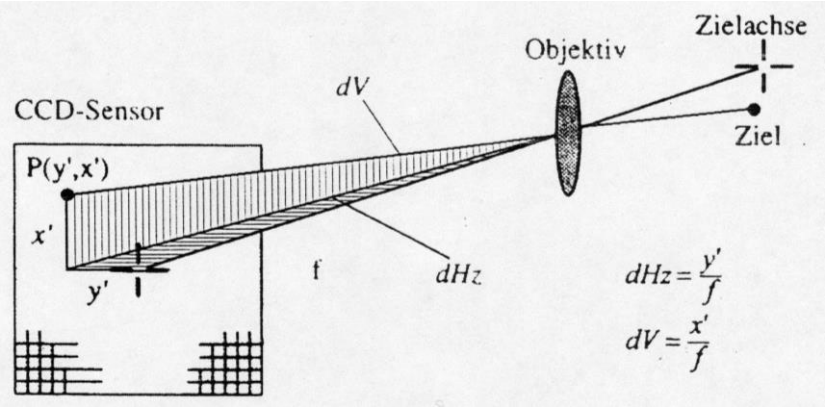
- ATR: Automatic Target Recognition: Fernrohr wird vorpositioniert
- horizontales und vertikales Schwenken, bis das ausgesandte Signal vom Prisma reflektiert wird und im Tachymeter auf einen Flächensensor (Vier-Quadranten-Photodiode, CCD-Array) trifft
- aktiver Reflektor: Verschwenkungstopp, wenn das ausgesandte Suchsignal empfangen wird.

- Durch einen vordefinierten Suchbereich lässt sich die Zielerkennung beschleunigen



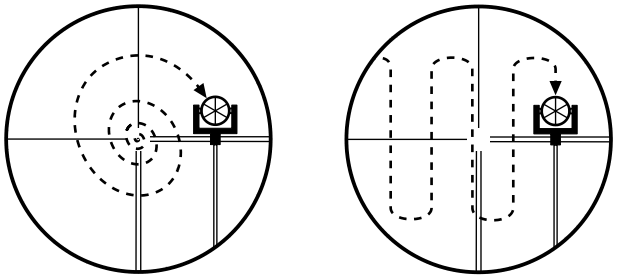
Leica TCA 2003





Feinanzielung

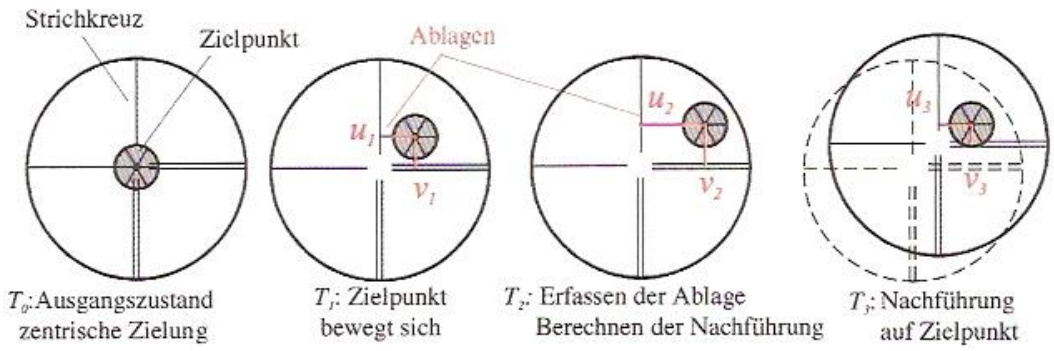
- Prisma im Sichtfeld des Tachymeters bestmöglich angezielt
- Fernrohr mit dem Zielstrahl spiralförmig oder mäanderförmig bewegt, bis der Zielstrahl auf den Reflektor trifft.
- Lage des vom Prisma reflektierten Lichtbündels auf die CCD-Kamera wird ausgewertet und die Ablage vom Zentrum in horizontaler und vertikaler Richtung ermittelt.
- Ablagewerte vom Zentrum der CCD-Kamera sind ein Maß für die Steuerbefehle an die Motoren, um das Fadenkreuz in die Nähe der Prismenmitte zu bewegen oder ein sich bewegendes Prisma zu verfolgen.



Um die Messzeiten zu optimieren, wird das Fadenkreuz nicht exakt in die Prismenmitte gefahren. Die Ablage kann bis zu 5 mm betragen. Die Horizontal- und Vertikalwinkel werden dann um die Ablage zwischen Fadenkreuz und Prismenmitte verbessert.

Damit beziehen sich die Winkel auf die Prismenmitte, unabhängig ob das Fadenkreuz genau in der Mitte des Prismas steht.

Zielverfolgung: Es wird automatisch ein Reflektor verfolgt, um beim nächsten Punkt die Grobsuche zu vermeiden. Mit den gemessenen Ablagen u und v des Prismas, bezogen auf das Achssystem des Tachymeters, wird das Fernrohr dem sich bewegenden Reflektor nachgeführt.



8.5 Absteckung mit Baumaschinen

Beim Verkehrswegebau kommen für den Aushub, bei der Planierung und dem Einbau von Straßenbelägen Baumaschinen wie Motorgrader, Raupen, Fräsen, Bagger und Asphalt- und Gleitschalungsfertiger zum Einsatz.

Die Positionierung der Maschinen in Lage und Höhe erfolgt bei flächenhaften Objekten meist mit Rotationslaser und bei linienförmigen Objekten durch mechanische Abtastung an einem Leitdraht oder mithilfe von Ultraschallsensoren.[22]

Baumaschinenführung

Maschinenführer erhält visuelle Informationen zur manuellen Führung der Maschine bzw. des Werkzeugs (Baggerlöffel)

Baumaschinensteuerung (engl.: *maschine guidance*)

automatische 3D-Steuerung, Maschinenführer regelt die Geschwindigkeit.[23]

---

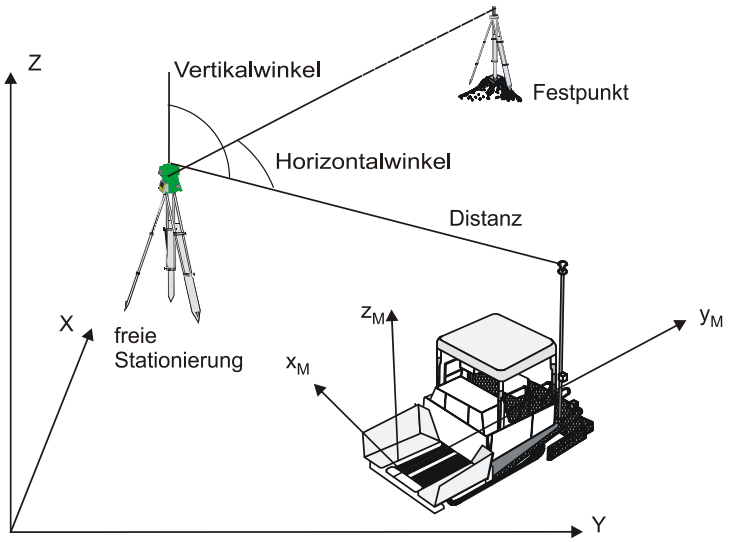
[22] MÖSER, M. (2012): Handbuch Ingenieurgeodäsie, Grundlagen

[23] STEMPFHUBER & INGENSAND (2008):: Baumaschinenführung und -Steuerung – Von der statischen zur kinematischen Absteckung. In: zfv, 133 (1), S. 36-44.

Maschine	Höhe	Position	Geschwindigkeit
Motorgrader	10 – 20 mm	20 – 30 mm	bis 35 km/h
Raupe	20 – 30 mm	20 – 50 mm	bis 12 km/h
Bagger	20 – 30 mm	20 – 50 mm	–
Asphaltfertiger	5 mm	5 mm	bis 10 m/min
Betonfertiger	5 mm	5 mm	bis 3 m/min

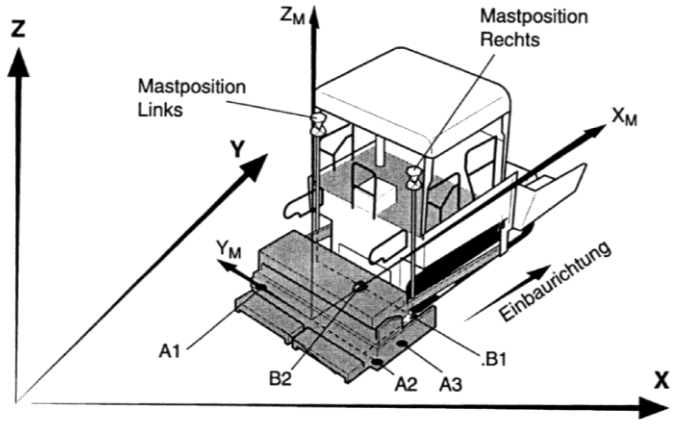
Bezugssystem

- Festpunktfeld Baulagenetz, trassennaher Polygonzug
- 1D-, 2D-, 3D-Projektkoordinaten (PKS) nach Transformation aus CAD
- Trassenstreifen in beiden Richtungen bis 200 m



Einmessung der Maschine

- Freie Stationierung: Orientierung im PKS
- Kalibrierung Neigungssensor: 3 Punkte (z. B. A1 bis A3) mit Tachymeter im PKS
- Helmerttransformation: MKS (x_M, y_M, z_M).



X, Y, Z ..... Projekt-Koordinatensystem
X_M, Y_M, Z_M ..... lokales Maschinen-Koordinatensystem

A1, ... linker Bohlenpunkt (Abstreifkante)
A2 ..... rechter Bohlenpunkt (Abstreifkante)
A3, ev. A4 ..... weitere Punkte auf der Bohle
.B1 ..... Fahrprisma
B2 ..... Regelungspunkt

- Baumaschine mit 360°-Prisma auf 3 bis 4 m Mast
- Fahrprisma im PKS mit Helmerttransformation ins MKS (x_M, y_M, z_M)
- Berechnungen zur Regelung der Baumaschine: Regelungspunkt (B2)
- Regelungspunkt: fiktiver Punkt, der mit dem Schwerpunkt des Werkzeugs (Fertigerbohle, Graderschar) identisch sein sollte
- Software Maschine: Sollachse bzw. Projekt, Einbautiefe

Messwerte

- Abtastfrequenz 10 bis 20 Hz, Richtungs- und Distanzmessungen
- Vertikal- und Horizontalwinkel (1 FRL)
- Korrekturen in Echtzeit: Zweiachsneigungsmesser, Instrumentenparameter
- Funkmodem: Koordinaten des Prismas im PKS an Systemrechner
- Polarkoordinaten → kartesische Koordinaten | Zeitstempel

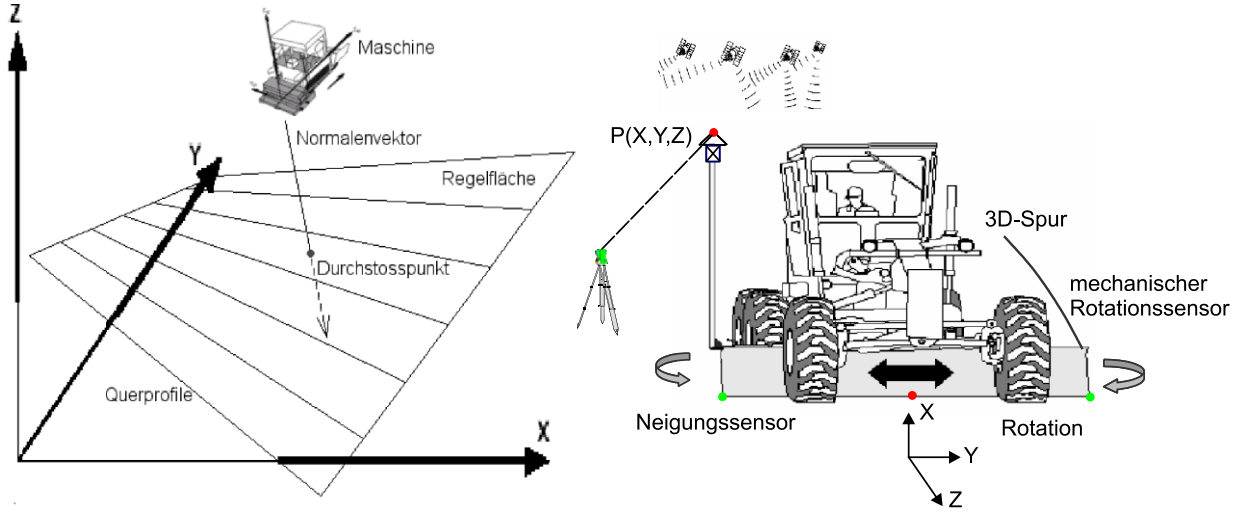
[Datum]	[Zeit]	[Hz]	[V]	[D]	[X]	[Y]	[Z][24]
30.06.1999,	13:29:53.730,	136.74957,	95.16122,	40.3976,	618.8888,	188.7223,	103.0789
30.06.1999,	13:29:53.790,	136.74332,	95.16041,	40.3960,	618.8896,	188.7266,	103.0793

Ist-Koordinaten Maschinenposition im PKS

- Lage der Maschine im Raum: Koordinaten des Regelungspunktes X_0, Y_0, Z_0 (PKS), Rotationsmatrix ω, ϕ, κ
- Längs- und Querneigungssensoren L, Q gegenüber X-Y Ebene (PKS)
- Neigung R gegenüber Z-Achse aus der Orientierung der Maschine
- Gleichungssystem (6 Unbekannte) X_0, Y_0, Z_0, ω, ϕ, κ
- Ergebnis: Koordinaten des Regelungspunktes im PKS

Soll-Koordinaten Regelungspunkt im MKS

- Ist-Position des Regelungspunktes (Maschine) ist Flächenelement des Projektes
- Flächenelemente: Regelflächen im Raum als Geradenschar beim Übergang von einem Querprofil

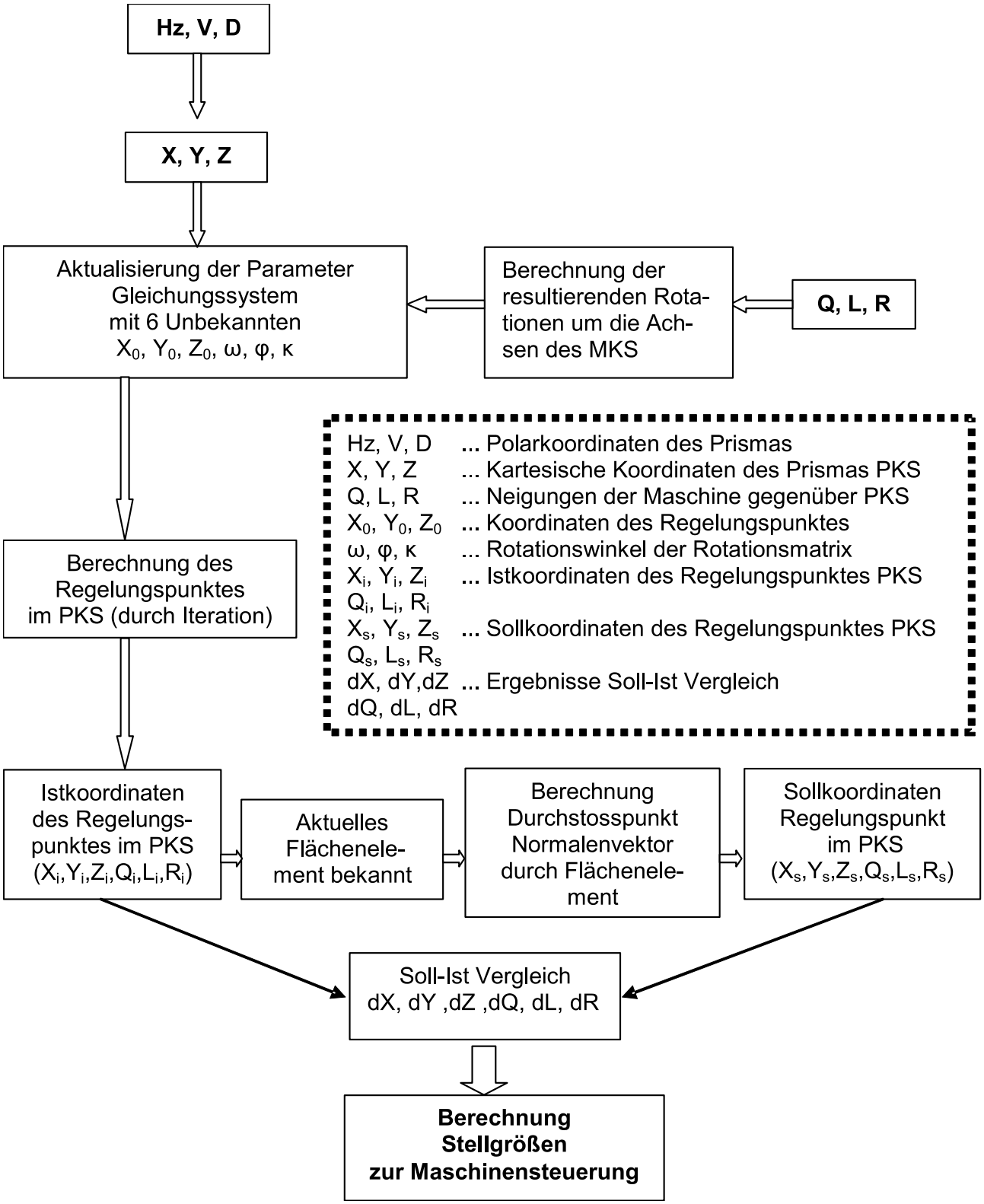


[24] KNECHT, P. (2000): Kinematische Vermessung und Messdatenverarbeitung mit einem zielverfolgenden Tachymeter, Diplomarbeit

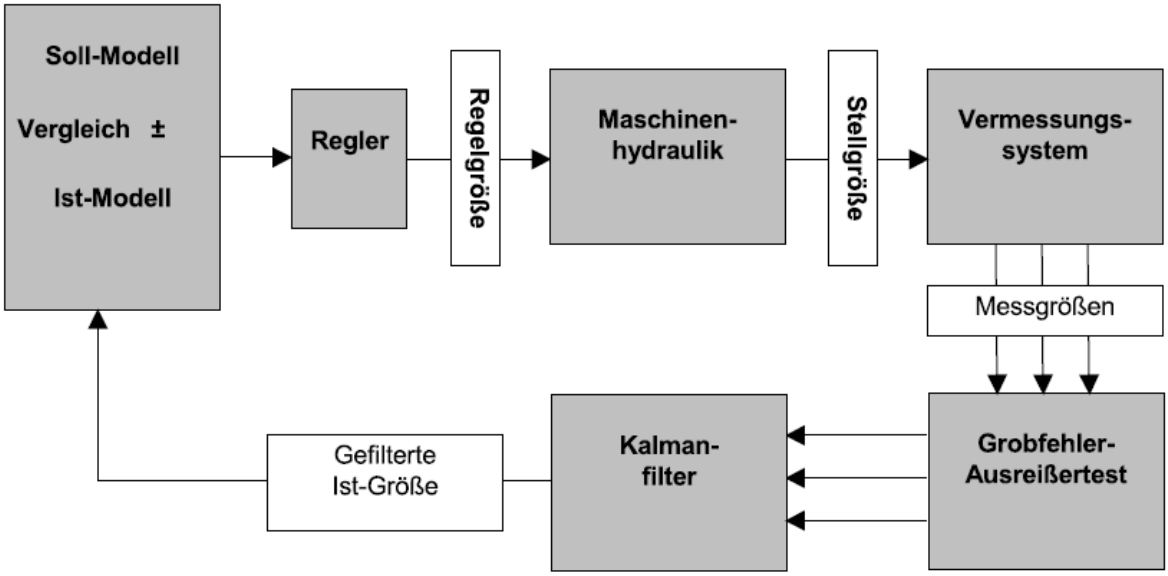
- Bestimmung Soll-Position der Maschine im PKS („Einrichtung” der Freiheitsgrade)
- Maschinen regeln in der Höhe
- X_m-Y_m Ebene des MKS legt Normalenvektor mit dem Regelungspunkt fest
- Achsrotationen des MKS ω (X_m-Achse) und φ (Y_m-Achse)
- Maschine wird entlang des Normalenvektors (Z_0) in das Flächenelement verschoben
- Aus dem Schnitt des Normalenvektors mit dem Flächenelement erfolgt die Berechnung der Sollkoordinaten des Regelungspunktes im PKS
- Soll-Längs- und Querneigungen im Schnittpunkt von Vektor und Flächenelement
- Orientierung der Maschine aus den Projektdaten
- Sollkoordinaten des Regelungspunktes im PKS
- Sollposition und Längs- und Querneigungen der Maschine im PKS

Vergleich Soll-Ist | Projekt (DGM) – Position

- Abweichungen: Stellgrößen für Positionierung der Maschine im Flächenelement des Projektes
- Mit den Rotations-, Querneigungs- und Drahtgebersensoren an den Werkzeugen erfolgt eine räumliche Bestimmung und die Ansteuerung der Hydraulik


Hz, V, D
X, Y, Z
Aktualisierung der Parameter Gleichungssystem mit 6 Unbekannten X_0, Y_0, Z_0, ω, φ, κ
Berechnung der resultierenden Rotationen um die Achsen des MKS
Q, L, R
Hz, V, D ... Polarkoordinaten des Prismas
X, Y, Z ... Kartesische Koordinaten des Prismas PKS
Q, L, R ... Neigungen der Maschine gegenüber PKS
X_0, Y_0, Z_0 ... Koordinaten des Regelungspunktes
ω, φ, κ ... Rotationswinkel der Rotationsmatrix
X_i, Y_i, Z_i Q_i, L_i, R_i ... Istkoordinaten des Regelungspunktes PKS
X_s, Y_s, Z_s Q_s, L_s, R_s ... Sollkoordinaten des Regelungspunktes PKS
dX, dY,dZ dQ, dL, dR ... Ergebnisse Soll-Ist Vergleich
Berechnung des Regelungspunktes im PKS (durch Iteration)
Istkoordinaten des Regelungspunktes im PKS (X_i,Y_i,Z_i,Q_i,L_i,R_i)
Aktuelles Flächenelement bekannt
Berechnung Durchstosspunkt Normalenvektor durch Flächenelement
Sollkoordinaten Regelungspunkt im PKS (X_s,Y_s,Z_s,Q_s,L_s,R_s)
Soll-Ist Vergleich dX, dY ,dZ ,dQ, dL, dR
Berechnung Stellgrößen zur Maschinensteuerung

Regelkreis | KALMAN-Filter



Berechnung der Stellgrößen mit folgendem Regelkreis und den sechs Freiheitsgraden, 3D-Koordinaten, Längs- und Querneigung des Werkzeugs, Maschinenorientierung:

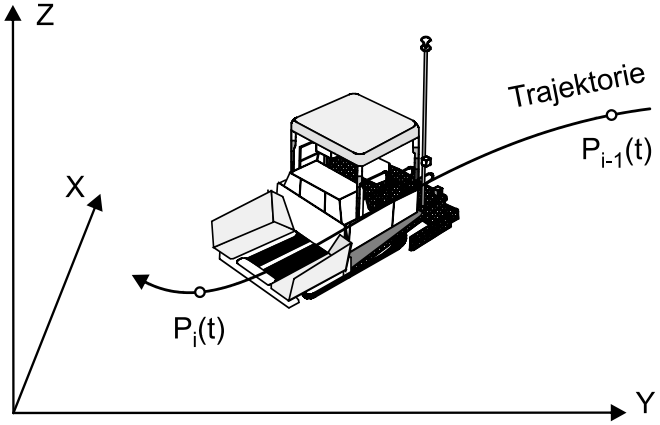
1) 3D-Position mit zielverfolgendem Tachymeter (10 bis 20 Hz) oder GNSS
2) Berechnung der absoluten Maschinenorientierung im Projekt
3) Reduktion der Längs- und Querneigung bzgl. eines mittleren Rechenpunkts
4) Extrapolation der Steuerpunkte (li, re. Unterkante) aus einer lokalen Maschineneinmessung
5) Transformation der beiden Absolutpositionen in das Projektkoordinatensystem DGM
6) Bestimmung der li. Und re. Höhenabweichung
7) Datenfilterung und Berücksichtigung der Hydraulikparameter
8) Transformation der Ablagen in Steuerwerte
9) Senden der Regelparameter an die Hydraulik
10) Reaktion Werkzeug | Maschine[25]

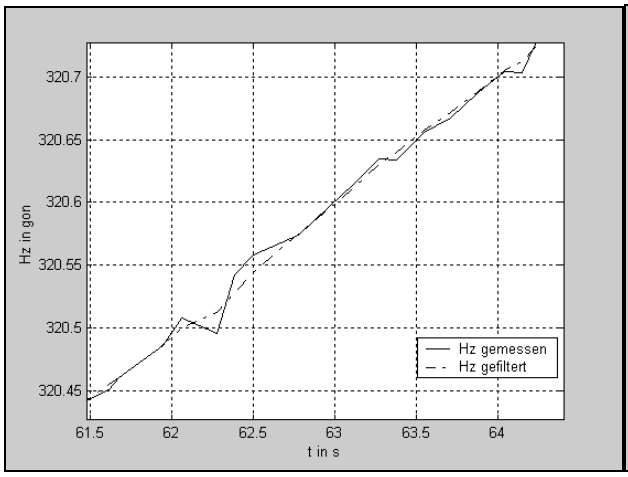
Kinematischen Mess- und Auswerteverfahren

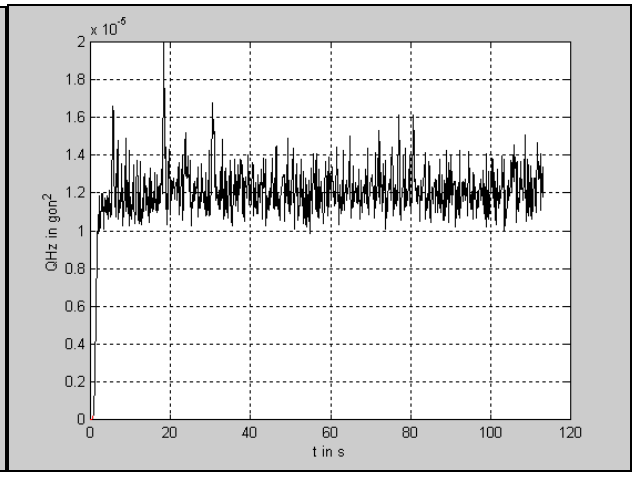
- Bewegung eines Objekts: Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit
- Messungen: Trajektorie (Bahn- bzw. Raumkurve) berechnen
- zeitabhängige Positionsinformationen P_i [x_i (t), y_i (t), z_i (t)]
- vierdimensionale Werte: Bewegungsspur des Fahrzeugs, Geschwindigkeit und Be-

[25] STEMPFHUBER, W. (2009): GNSS-Einsatz bei der Maschinensteuerung und Führung. In: GNSS 2009. Schriftenreihe des DVW

schleunigung, Verzögerung des Punktes zu jeder Messepoche t_i





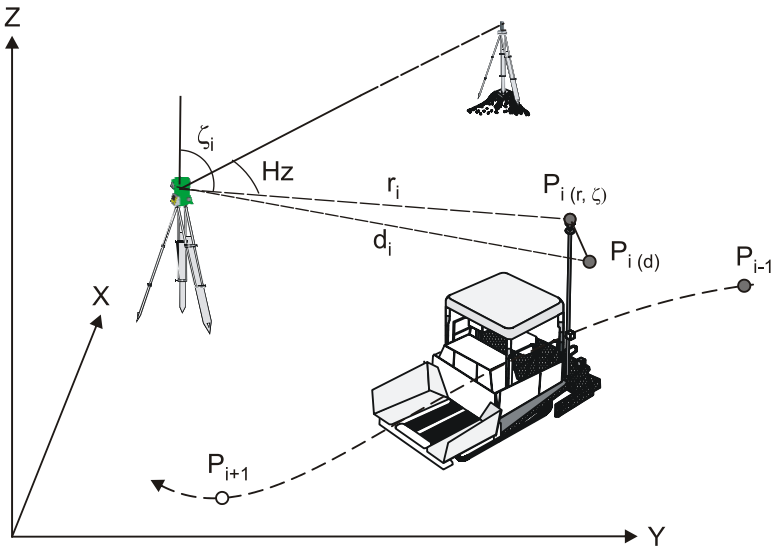


Synchronisation

- Bestimmung der polaren Messelemente, parallele Zielverfolgung
- Bezug zwischen Messzeitpunkt und Messwert herstellen
- Synchronisierungsgenauigkeit und Echtzeit:

Datenverarbeitung im Sensor und Datenübertragung, Steuerung und Bewegung der Baumaschine in einer vorgegebenen Zeit vollständige Synchronisation der Sensoren nicht möglich: Zeitoffset Δt.

- Frequenzen: Neigung 5 Hz, Winkel 20 Hz, ATR 100 Hz
- Referenzzeit für die Einzelmessung: Zeitpunkt der EDM-Messung



Latenzzeit und Totzeit

- Gerätetyp und Messmodus: mehr als 300 ms zwischen den Zeitpunkten der Richtungs- und Distanzmessung
- Abgriffe der Richtungs- und Vertikalwinkelmessung schneller als Distanzmessung

Latenzzeit (auch Delayzeit): unzureichende Synchronisation[26]

$$\Delta t_{d,r} = t_d - t_r$$

- Tracking-Modus (6 Hz bis 7 Hz) Distanzmessung 0,1 ms, Messwert Mittel aus 1 000 Einzelmessungen in 100 ms
- Mittel aus Reflektorpositionen, systematische Verfälschung der Trajektorie
- Betrag und Richtung der fehlerhaften Trajektorie: abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit und -richtung des Reflektors und des Instrumentenstandpunkts
- Latenzzeit und Bewegungsgeschwindigkeit, mittlerer Positionsfehler

$$\delta s = \Delta t_{d,r} \cdot v$$

- Latenzzeit Δt = 0,18 s, Geschwindigkeit 4 m/s (Grader ca. 15 km/h) ergibt eine Ablage in der Position von 0,7 m
- Kalibrierung für den jeweiligen Messmodus mit einer Solltrajektorie oder durch Hin- und Rückfahrt mit gleicher Geschwindigkeit

Totzeit: Differenz zwischen dem Messzeitpunkt (Messsignalverarbeitung, Berechnung, Speicherung) und dem Zeitpunkt der Verfügbarkeit der Messwerte im PC bzw. Steuersystem (Übertragung an die Maschine)

---

[26] STEMPFHUBER, W. (2004): Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen. DGK, Reihe C, 576. München.