

Multi-Sensor-Systeme

Grundlagen

Wintersemester 2022/2023

Dr.-Ing. Sören Vogel

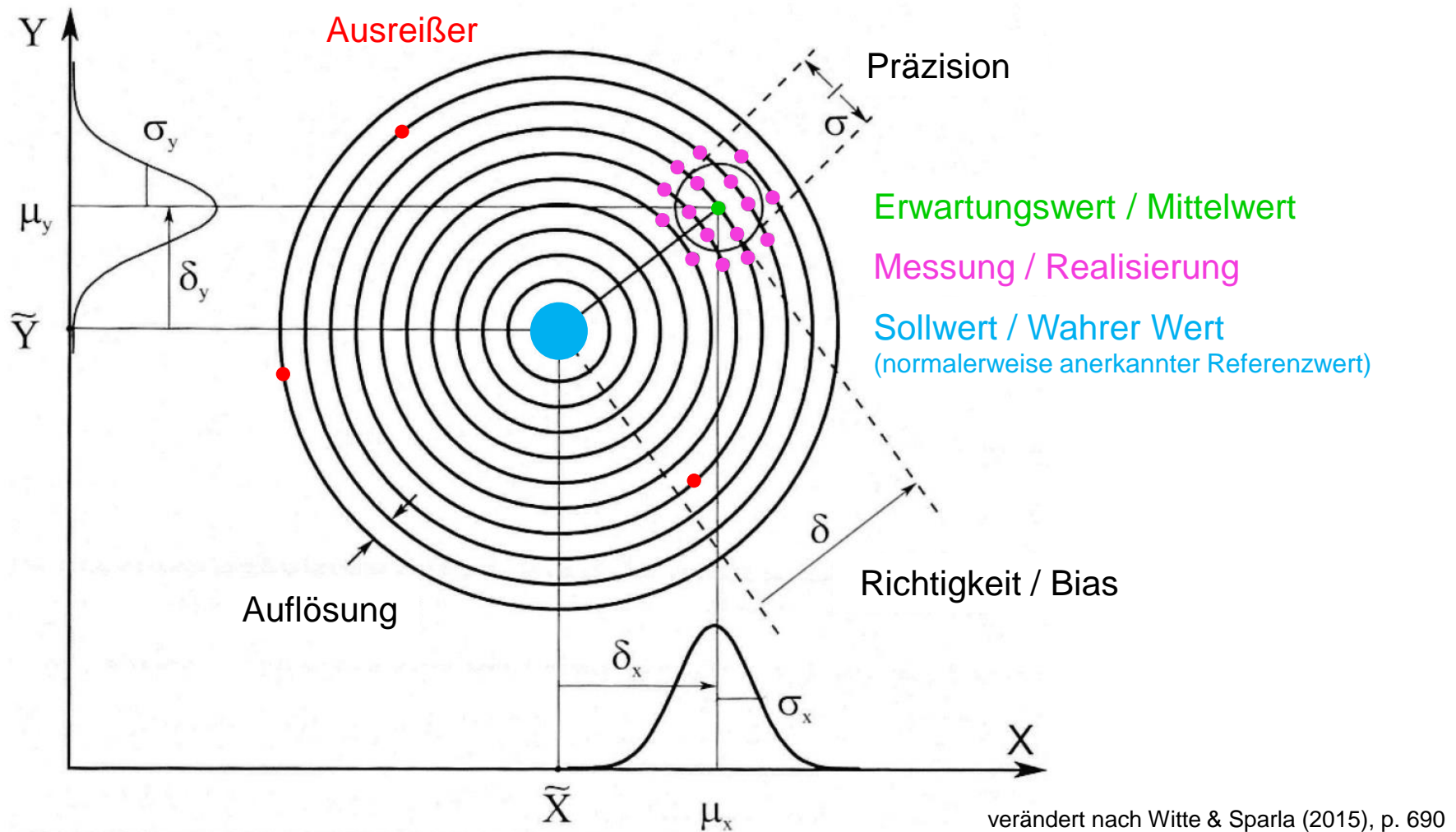
„The measurement uncertainty is a measure of the incompleteness of knowledge of the measurand caused by incomplete information.“ – Weiser (1999)

- Jeder Messwert muss mit einer zugehörigen Messunsicherheit angegeben werden
- Eine zuverlässige und geeignete Quantifizierung des Genauigkeitsmaßes ist insbesondere bei hohen Genauigkeitsanforderungen wie in der industriellen Messtechnik oder bei Kalibrierungen gefordert
- Messunsicherheit ist das Ergebnis der Unvollkommenheit von Messgeräten, Verfahren (und Auswertemethoden)
- Alle Messinstrumente und Erfassungsprozesse sind mit einem gewissen Grad an Ungenauigkeit und Unsicherheit behaftet

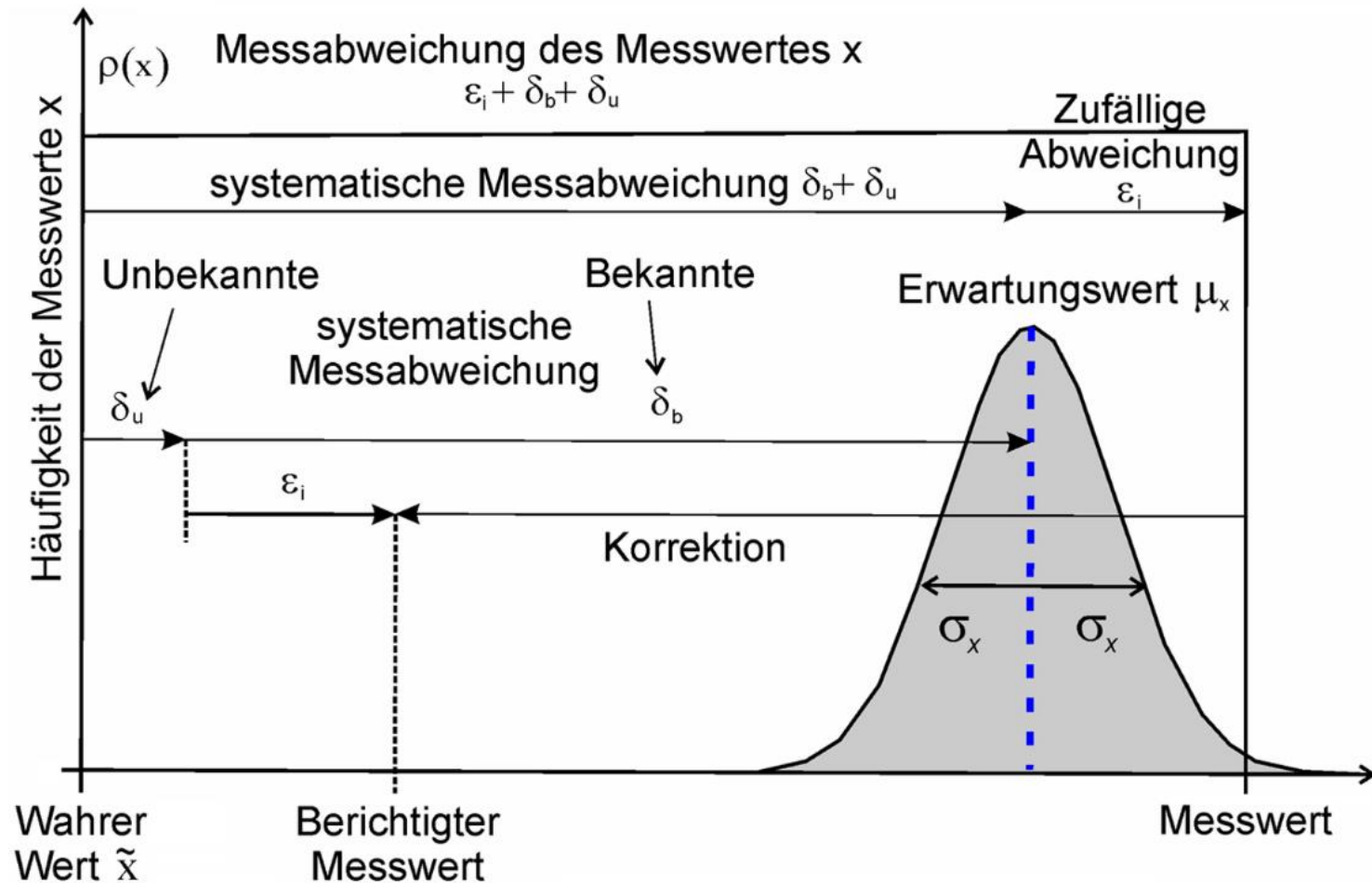


Die **Messunsicherheit** setzt sich zusammen aus

- **Ausreißern** 异常值
 - Grobe Messfehler, die in der Regel nur selten auftreten und einzelne Messungen betreffen
- 仔细的 → Sorgfältige Kontrolle und Plausibilitätsprüfung erforderlich
- **Systematische Abweichungen**
 - Zeigen einen einseitigen Trend
 - 欠缺 → Unzulänglichkeiten, die auf das Verfahren oder das Messsystem zurückzuführen sind
 - Sorgfältige Kalibrierung, anschließende Schätzung/Kompensation, geeignete Messverfahren sind entscheidend
- **Zufällige Abweichungen**
 - Allgemeine Annahme einer Gaußschen Normalverteilung
 - Bedingt durch unkontrollierbare äußere Einflüsse (z.B. Objekt, Umwelt, ...)
 - Realisierung von redundanten Beobachtungsinformationen empfohlen
冗余的



Übersicht zur Wirkung der Unsicherheiten (nach DIN 1319-1):



Neumann & Alkhatib (2022)

- Genauigkeit als Maß für die Übereinstimmung zwischen den einzelnen Messergebnissen und dem Sollwert / wahren Wert der Messgröße
- Um mit zufälligen Abweichungen umzugehen, wird empfohlen, eine große Anzahl n von wiederholten Messungen durchzuführen
$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad n \rightarrow \infty$$
- Im Allgemeinen werden die systematischen Abweichungen so weit minimiert, dass die verbleibenden systematischen Abweichungen als zufällig angesehen und als Messabweichungen insgesamt betrachtet werden
 - Kleine Messabweichungen sind häufiger als große Messabweichungen
- **Maximum Permissible Error (MPE)**
 - Wird neben der Standardabweichung häufig für die Messunsicherheiten von Sensoren (im Maschinenbau) verwendet
 - Beschreibt die maximal zulässige Abweichung vom Sollwert / wahren Wert einer Messung und entspricht einem Konfidenzniveau (Vertrauensniveau) von $\alpha = 0\%$
 - Keine Unterscheidung zwischen zufälligen und systematischen Abweichungen
 - Umrechnung in Standardabweichung nach GUM, wenn
 - die Messabweichungen näherungsweise als zufällig betrachtet werden können, und
 - und eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,3\%$ für den MPE gilt

$$\sigma = \frac{MPE}{\sqrt{3}}$$

(unter der Annahme einer
Gleichverteilung/Rechteckverteilung)

Zielsetzung:

- Ermittlung zuverlässiger Unsicherheitsmaße, bei denen neben zufälligen Abweichungen auch systemische Abweichungen berücksichtigt werden
- International einheitlicher Ansatz für Messunsicherheiten zur besseren Vergleichbarkeit

Der Begriff "Messunsicherheit" ist nach dem GUM wie folgt definiert:

- „*Measurement uncertainty is defined as a non-negative parameter that characterizes the dispersion of those values that are associated with a measured quantity based on the information used.*“ [JCGM (104:2009), p. 12]
- Neben statistisch berechenbaren Informationen werden auch Erfahrungswerte, Herstellerangaben etc. berücksichtigt

Zwei Methoden:

- Typ A: Komponenten, die mit Hilfe statistischer Methoden berechnet werden
- Typ B: Komponenten, die mit Hilfe anderer Quellen bestimmt werden

Anwendung auf die Bestimmung der Messunsicherheit von direkt gemessenen Größen sowie von aus gemessenen Größen abgeleiteten Größen

Zwei Methoden:

- Typ A: z.B. geschätzte (Ko-)Varianzen, ^{经验的} empirische Standardabweichungen, ...
- Typ B: messtechnische oder wissenschaftliche Kenntnisse und Erfahrungen mit dem Messverfahren
 - Beiträge, die nicht als empirische Standardabweichungen bestimmt werden können
 - Annäherungen an die entsprechenden Standardabweichungen

Spezifikation der (aggregierten) Messunsicherheit u_c

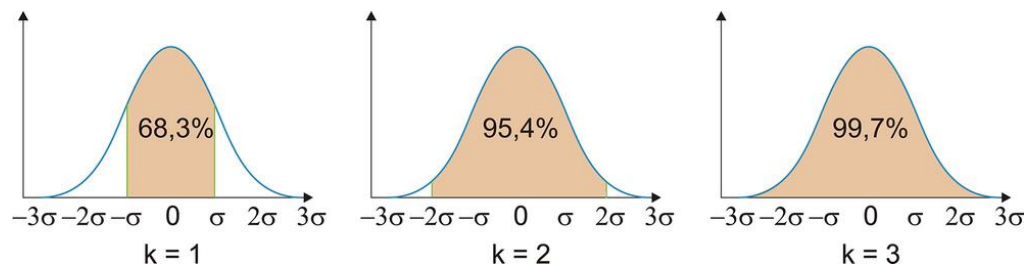
■ beschreibt das Intervall um den Sollwert, in dem alle Werte mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,3% liegen

→ erweiterte Messunsicherheit mit bestimmten Regionen $U = k \cdot u_c$

Erweiterungsfaktor

$$Y = y \pm U$$

Beispiel: Abstand d von zwei Punkten
 $d = (17,282 \pm 0,002)m \ (k = 2)$

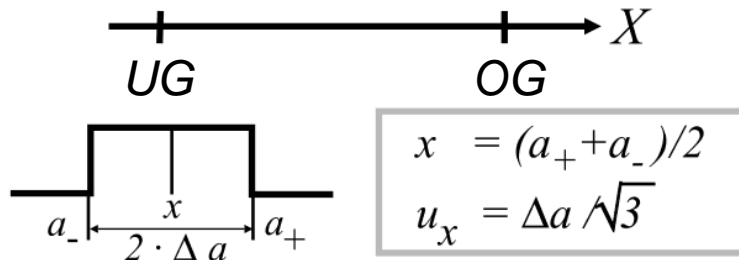


Wissen über Parameter und Einflüsse

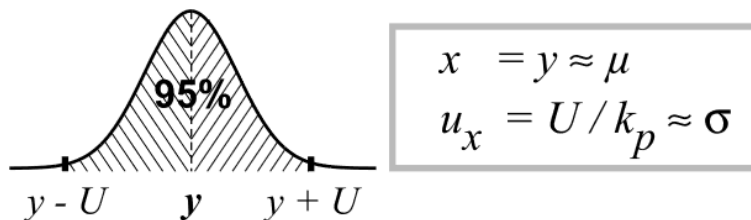
B

Nicht-statistischer Typ

Beispiel: Untere und obere Grenze



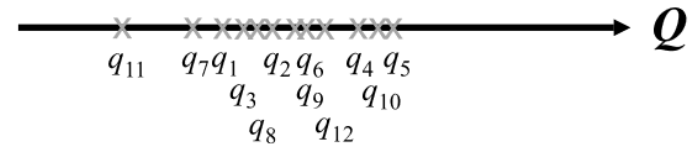
Beispiel: Angaben im Kalibrierungszertifikat



A

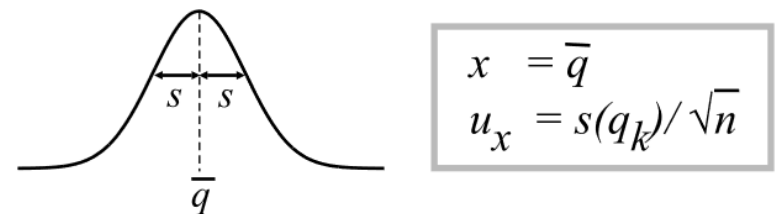
Statistischer Typ

Beispiel: Beobachtungsreihen



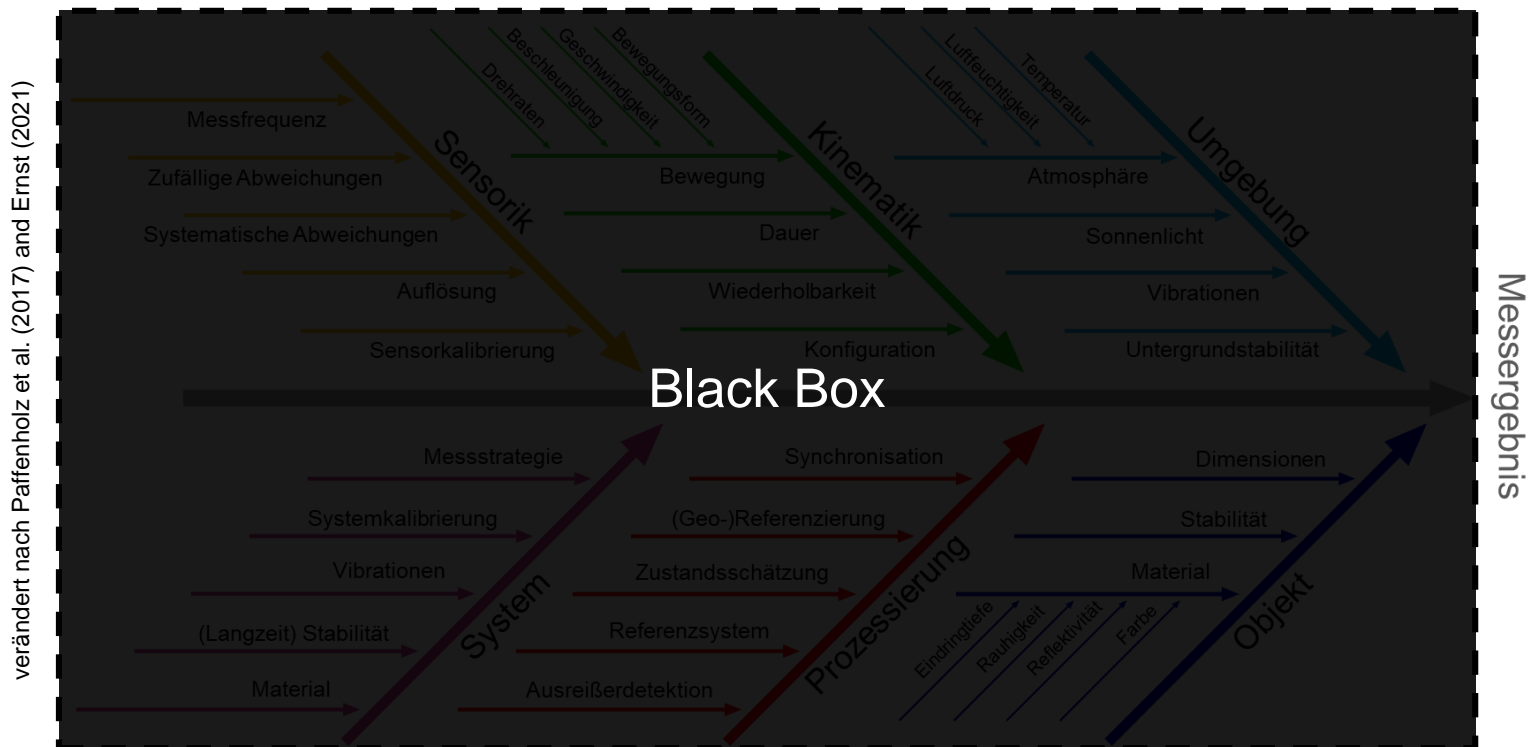
Methode: statistische Auswertung

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (q_k - \bar{q})^2}$$

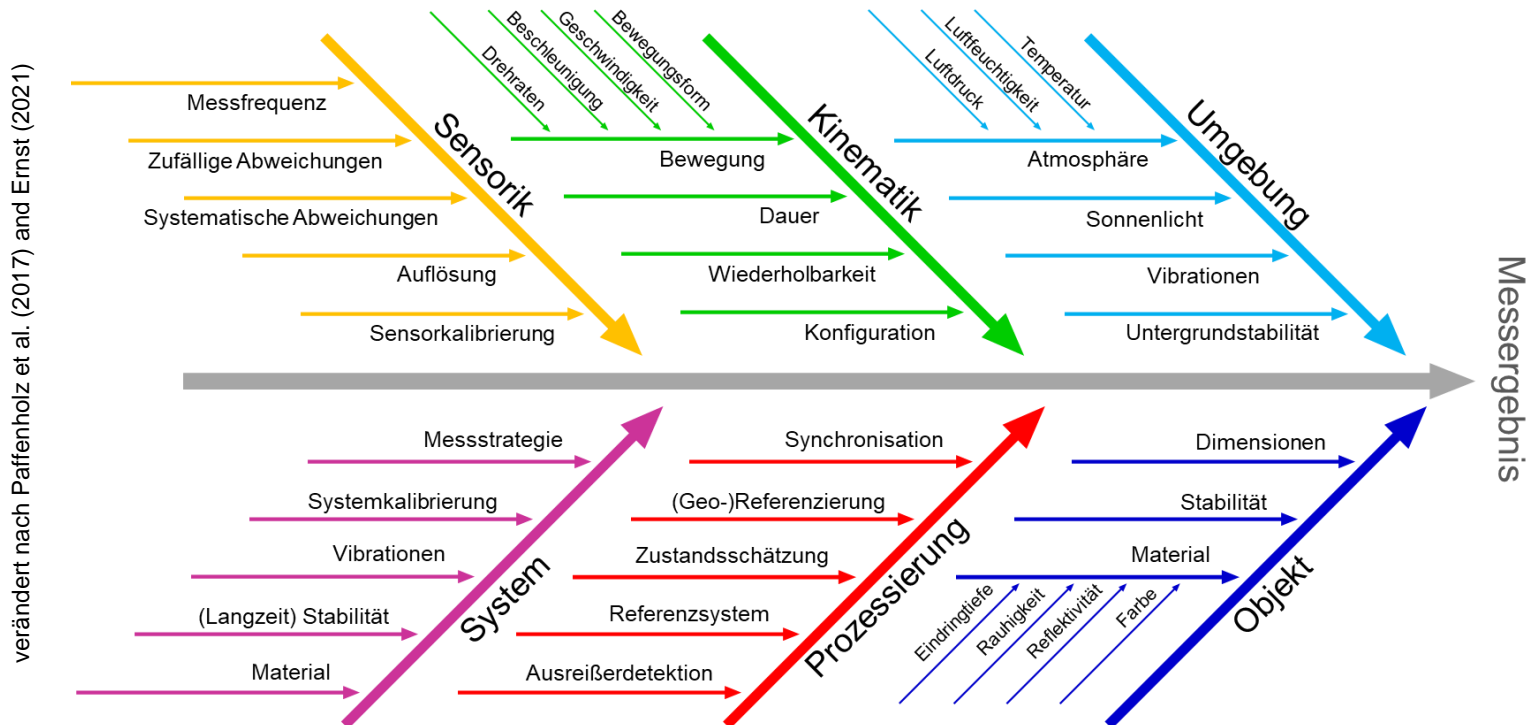


verändert nach Sommer & Siebert (2004)

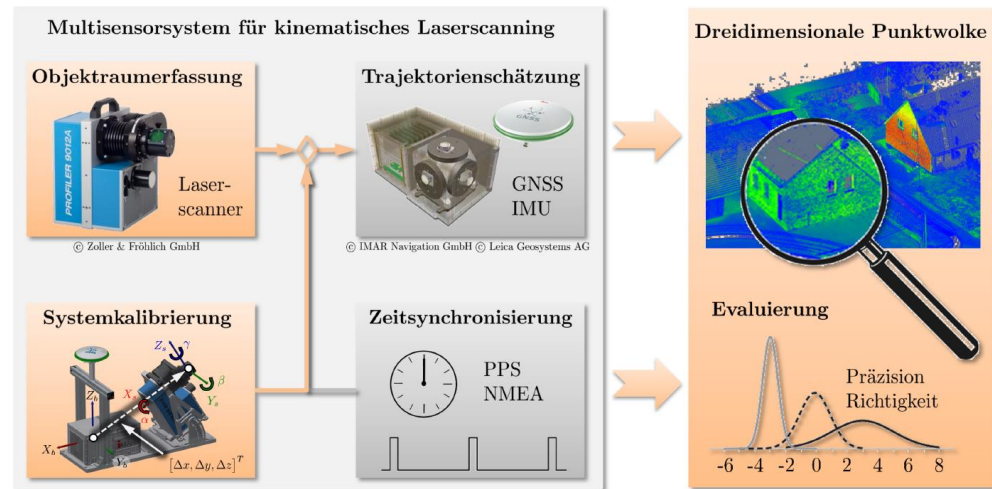
- Einfluss vieler verschiedener (*teilweise voneinander abhängiger*) Effekte/Einflüsse auf die Qualität der Messergebnisse
- Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflussgrößen als große Herausforderung



- Einfluss vieler verschiedener (*teilweise voneinander abhängiger*) Effekte/Einflüsse auf die Qualität der Messergebnisse
- Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflussgrößen als große Herausforderung



- **Qualität** beinhaltet viele Aspekte:
 - Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision), Zuverlässigkeit, Integrität, Vollständigkeit, Pünktlichkeit, Empfindlichkeit, **Robustheit**, usw. 稳固性
- Komplexe und ineinandergreifende Prozesskette beim Betrieb eines kinematischen MSS stellt hohe Anforderungen an die Qualitätsanalyse
- **Möglichkeiten und Verfahren** zur Erreichung einer hohen Qualität:
 - Kalibrieren der Sensoren
 - Mathematische **Kompensation** 补偿 von systematischen Abweichungen
 - Auswahl geeigneter Messverfahren je nach Umgebung, Bewegung, Abmessungen usw.
 - Verhalten der Bewegung (Form, Geschwindigkeit usw.)
 - Art der (Geo-)Referenzierung
 - ...

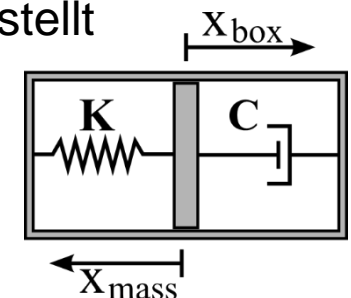


Heinz (2021)

- Definition von *Kinematik*: Beschreibung
 - des **aktuellen Zustands** und der **Bewegung** von Punkten oder **Körpern** ohne Berücksichtigung ihrer
 - physikalischen Eigenschaften oder der Kräfte, die die Bewegung verursachen

 - Übliche Messungen:
 - Winkel
 - Strecke (bestimmbar durch Zeitmessung),
 - Zeit (bei kinematischen Anwendungen zusätzlich zu den drei Positionskoordinaten),
 - Geschwindigkeit (Drehrate) und
 - Beschleunigung
- } 3D Koordinaten

- Geschwindigkeit:
 - entweder aus Entfernungs- und Zeitmessungen ermittelt $\vec{v} = \frac{\vec{x}}{t}$
 - oder direkt mit Geschwindigkeitssensoren $\vec{v} = \vec{v}_0 + \int_0^t \vec{a} dt$
- Beschleunigung:
 - das Messprinzip basiert auf dem Newton'schen Gesetz $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$
 - Kraftmessung
 - absolut bestimmt im Inertialraum (unbeschleunigt und kräftefrei)
 - da ein erdfestes System kein Inertialsystem ist
 - werden immer zusätzliche Beschleunigungen festgestellt (Schwerkraft)



- Die Beschreibung der Position eines Punktes im Raum erfolgt in einem Koordinatensystem mit Hilfe von Vektoren
- Der Vektor vom Ursprung des Koordinatensystems zum Punkt \vec{r} wird als Positionsvektor bezeichnet

$$\vec{r} = [x \quad y \quad z]^T$$

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \int_0^t \vec{v} dt = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 \cdot t + \iint_0^t \vec{a} dt dt$$

- Beschreibung einer Punktbewegung
 - den Positionsvektor $\vec{r}(t)$ zu jeder Zeit t zu bestimmen

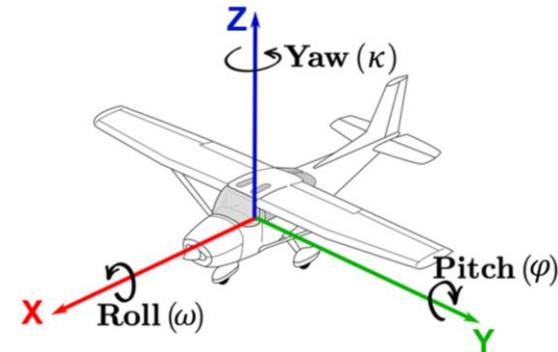
- Geschwindigkeitsvektor:
 - Erste Ableitung des Positionsvektors nach der Zeit
 - Drückt die Geschwindigkeit des Punktes an der Position $\vec{r}(t)$ im Moment t in Richtung und Betrag aus:

$$\vec{v} = [v_x \quad v_y \quad v_z]^T \qquad \vec{v}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t)}{\Delta t}$$

- Beschleunigungsvektor:
 - Erste Ableitung des Geschwindigkeitsvektors nach der Zeit
 - Drückt die Beschleunigung des Punktes an der Position $\vec{r}(t)$ im Moment t in Richtung und Betrag aus:

$$\vec{a} = [a_x \quad a_y \quad a_z]^T \qquad \vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{v}(t + \Delta t) - \vec{v}(t)}{\Delta t}$$

Translation & Rotation

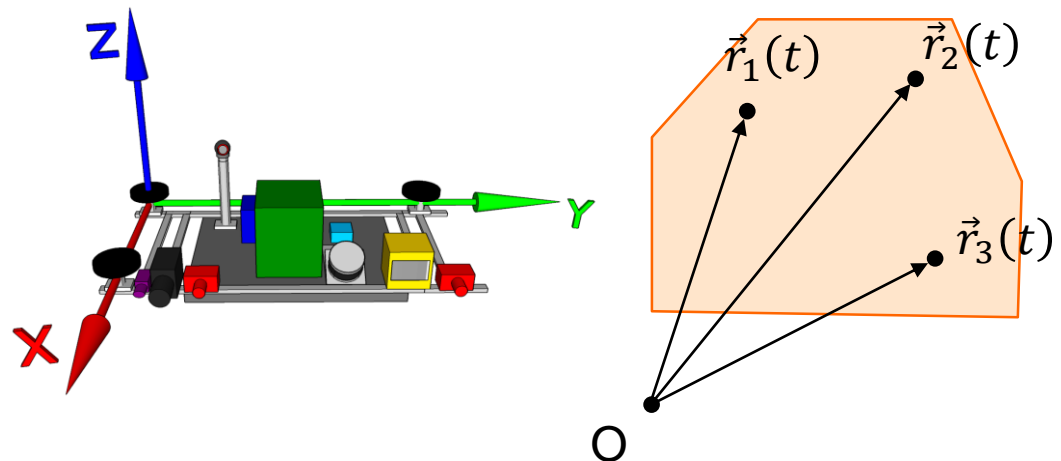


verändert nach
Degond et al. (2021)

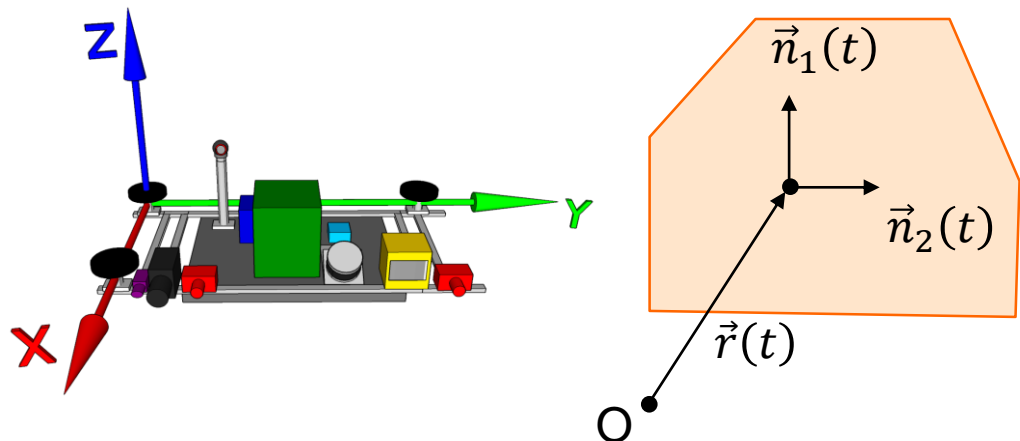
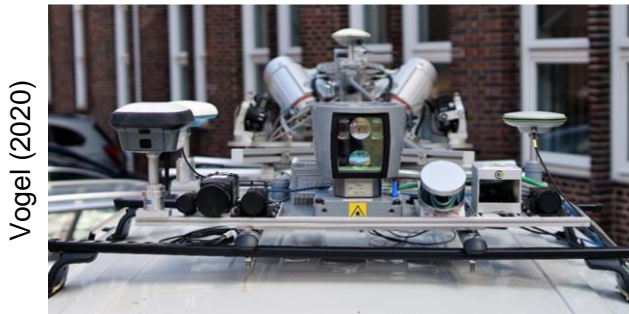
- Position und Orientierung können auch durch die Verwendung der drei Positionsvektoren $\vec{r}_1(t)$, $\vec{r}_2(t)$ und $\vec{r}_3(t)$ angegeben werden, die nicht auf einer geraden Linie des Körper liegen



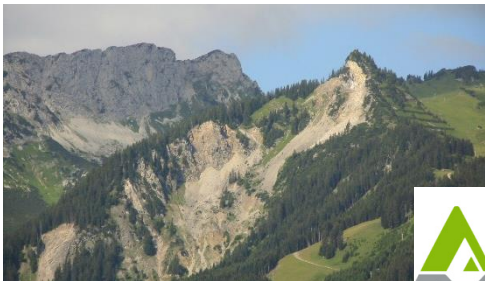
Vogel (2020)



- Gibt die **Position** eines starren Körpers an, wobei der Positionsvektor $\vec{r}(t)$ eines repräsentativen Punktes des Körpers bestimmt wird
- Angabe der **Ausrichtung** des Körpers:
 - Definition von zwei repräsentativen Richtungen des Körpers $\vec{n}_1(t)$ und $\vec{n}_2(t)$ und Bestimmung dieser beiden Vektoren



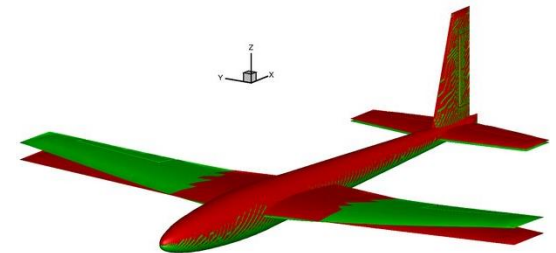
- Neben der Position und Orientierung ist die Beschreibung der zeitlichen Verformung des Körpers erforderlich
- Systeme mit vielen Freiheitsgraden:
 - zum Beispiel kontinuierlich verformbare Objekte wie ein Gletscher oder Hangrutschgebiet
 - Erfordert die Angabe eines Ortsvektors $\vec{r}_1(t, \vec{r}'(t_0))$ für jede Position auf dem Körper zu jedem Zeitpunkt t
- \vec{r} ist der Positionsvektor zu dem Punkt, der zu der Zeit t_0 die Position $\vec{r}'(t_0)$ hatte



Heunecke et al. (2011)

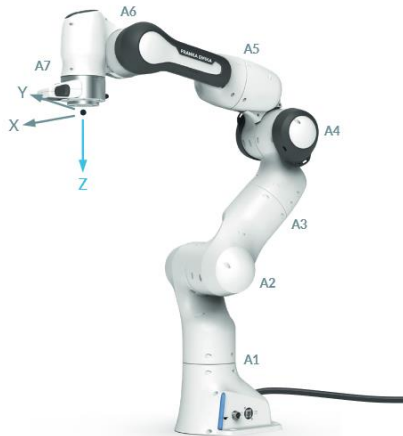


gl-verleih.de

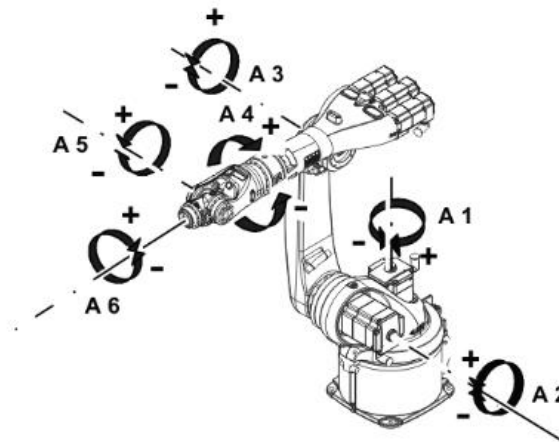


Ritter & Dillinger (2011)

- Systeme mit wenigen Freiheitsgraden, z.B. Roboterarm, die Schaufel eines Baggers, etc.
- Nicht nur die Position und Ausrichtung des Roboterarms / Baggers ist von Interesse, sondern auch die Position des/r Flansch / Schaufel relativ zum Arm / Bagger



franka.de



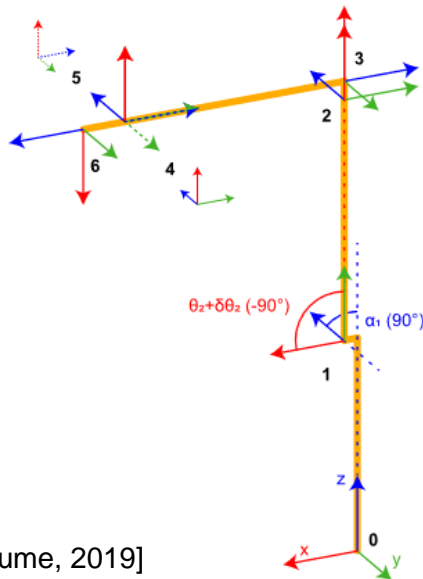
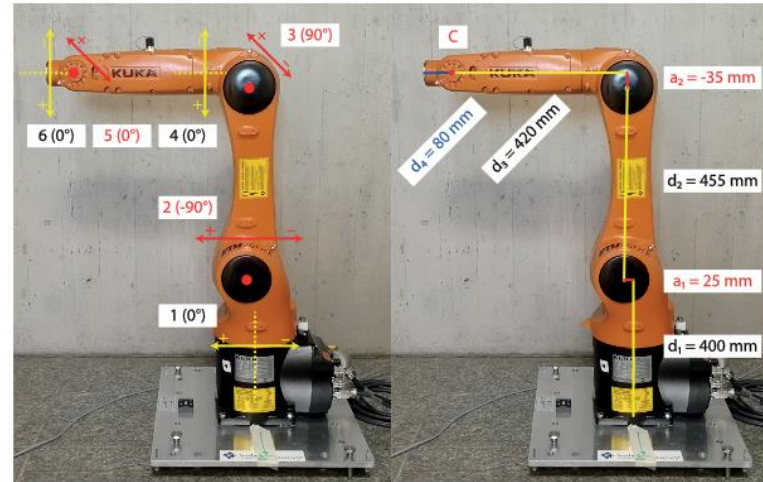
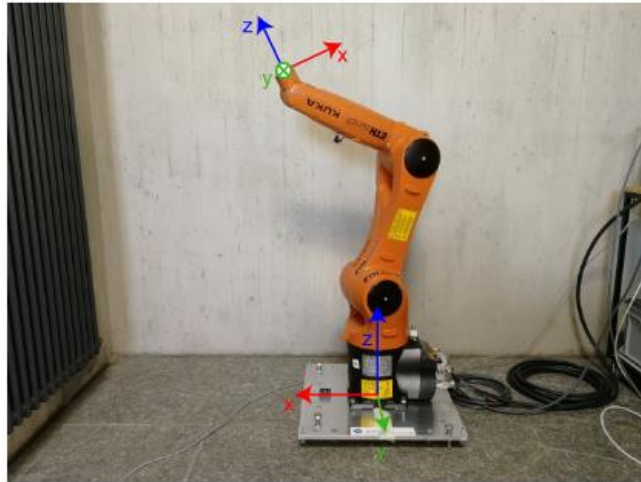
Ulrich & Irgenfried 2014



verändert nach deere.ca

- Kann durch die Kombination der Winkel / Gelenke beschrieben werden

Industrieroboter KUKA AGILUS KR 6 R900 sixx



[Willi & Guillaume, 2019]



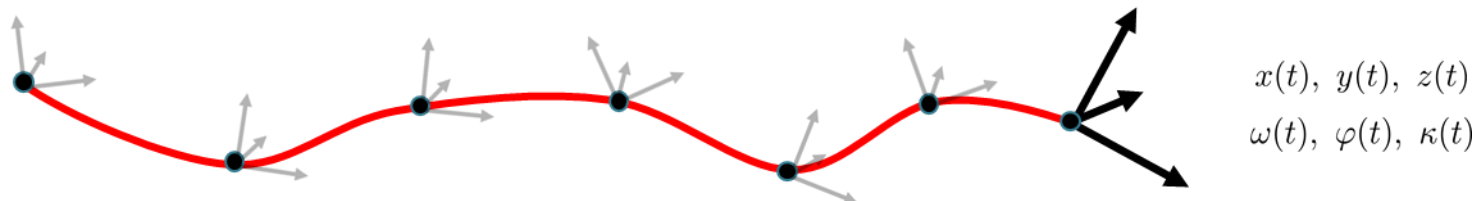
- Kinematische Messtechniken:
 - liefern kinematische Beobachtungen $\mathbf{l}(t)$ oder Beobachtungen in Bezug auf sich bewegendende Punkte oder Objekte, von denen aus die Bewegung hinreichend genau beschrieben werden kann
- Aus den Beobachtungen
 - jederzeit den aktuellen Bewegungsstatus ableiten
- Die Beschreibung der Bewegung erfolgt durch einen zeitvariablen Positionsvektor, dessen Komponenten in einem geeigneten Koordinatensystem bestimmt werden:

$$\vec{r}(t) = [x(t) \quad y(t) \quad z(t)]^T$$

- Im Allgemeinen:

$$x(t) = \varphi_1(\mathbf{l}(t)), \quad y(t) = \varphi_2(\mathbf{l}(t)), \quad z(t) = \varphi_3(\mathbf{l}(t))$$

- Wenn die Beschreibung des Bewegungsablaufs (des Positionsvektors) als Funktion der Beobachtungen gelingt, dann können
 - durch Differenzierung nach der Zeit auch Beziehungen zur Geschwindigkeit und Beschleunigung hergestellt werden
- Direkte Beobachtung von $\vec{v}(t)$ und $\vec{a}(t)$
 - Der Positionsvektor muss durch Bilden und Lösen von Differentialgleichungen bestimmt werden
- Kinematische Beobachtungen sind nicht kontinuierlich
 - $\vec{r}(t)$ und seine Ableitungen können nicht kontinuierlich gebildet werden



Beispiel für eine kinematische Vermessungsaufgabe: Automatisch nachführende Totalstation (1)

- Eine Punktbewegung wird im Beobachtungsintervall $[t_0; t_n]$ mit einer automatisch verfolgenden Totalstation beobachtet
- Die Totalstation liefert zu jedem Zeitpunkt die Rohmesswerte $\alpha(t_i)$, $\xi(t_i)$ und $S(t_i)$
- Der Positionsvektor zum Zeitpunkt t_i ist gegeben durch:

$$\vec{r}(t_i) = \begin{cases} x(t_i) = S(t_i) \cdot \sin(\xi(t_i)) \cdot \cos(\alpha(t_i)) \\ y(t_i) = S(t_i) \cdot \sin(\xi(t_i)) \cdot \sin(\alpha(t_i)) \\ z(t_i) = S(t_i) \cdot \cos(\xi(t_i)) \end{cases}$$

- und ist im Koordinatensystem des Instruments definiert



leica-geosystems.com

- Die Gleichung der Geschwindigkeit folgt aus denen des Positionsvektors:

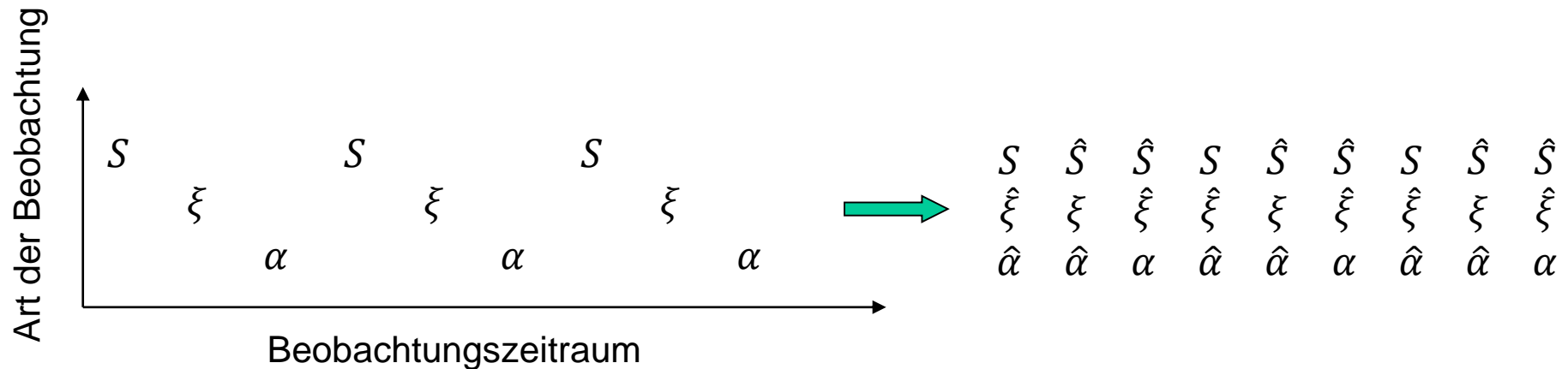
$$\vec{v}(t_i) = \vec{r}'(t_i) = \frac{\partial \vec{r}}{\partial S} \cdot \dot{S} + \frac{\partial \vec{r}}{\partial \alpha} \cdot \dot{\alpha} + \frac{\partial \vec{r}}{\partial \xi} \cdot \dot{\xi}$$

- wobei die Differentialgleichungen sich auf die Messungen an dem Punkt t_i beziehen
- Die Verwendung des Mittelwertsatzes führt zu:

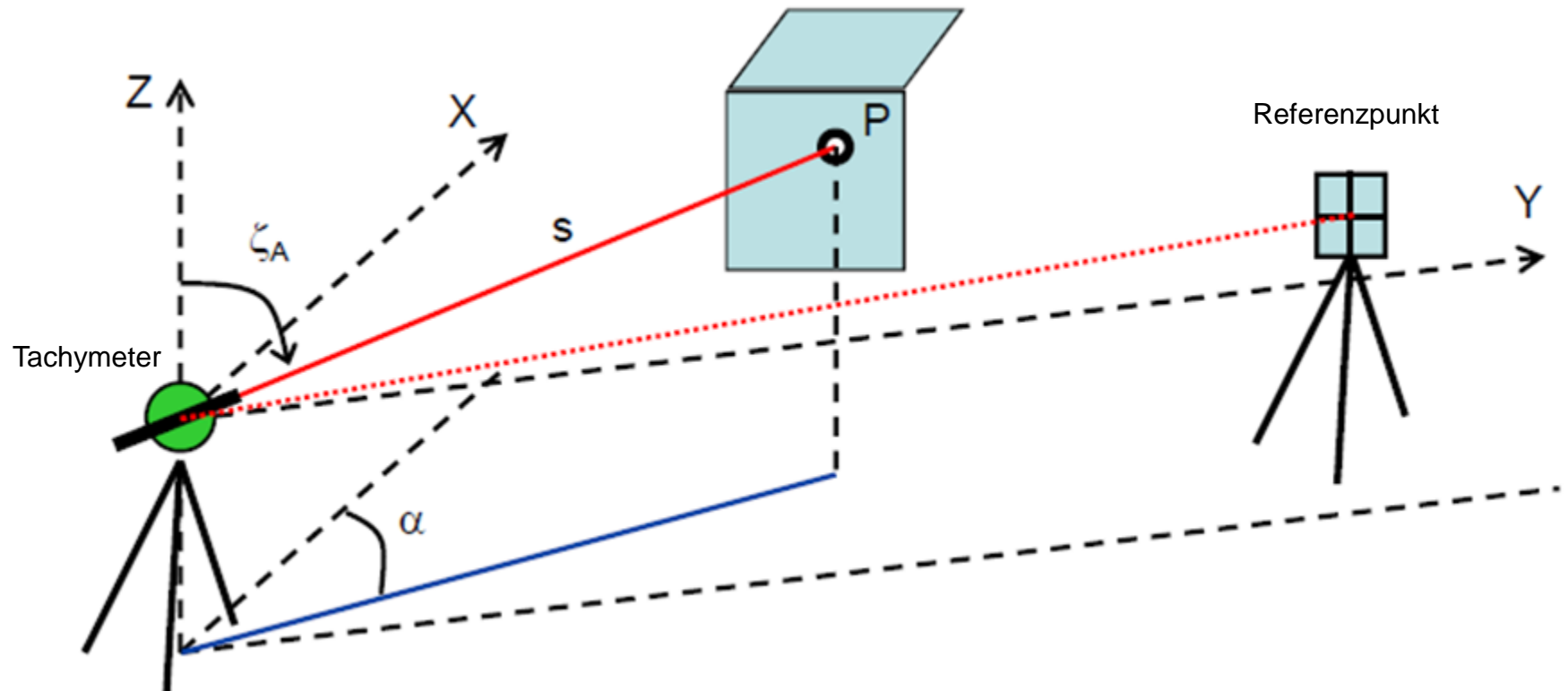
$$\vec{l}'(t_i) = \frac{\vec{l}(t_{i+1}) - \vec{l}(t_i)}{t_{i+1} - t_i}$$

- Analyse des Ansatzes:
 - zu jedem Beobachtungszeitpunkt t_i , muss der Beobachtungsvektor vollständig bestimmt werden
 - zufällige Messfehler werden nicht berücksichtigt
- Die Bedingung der Gleichzeitigkeit der Messelemente ist oft technisch nicht realisierbar
 - Geeignete Evaluationstechniken verwenden

- Mögliche Lösungen:
 - hohe Messfrequenz, so dass ein gemeinsames Beobachtungsintervall abgedeckt wird
 - Schätzung der gemeinsamen Beobachtungselemente aus den resultierenden Zeitreihen



- Einsatz geeigneter Auswertetechniken, z.B. geeigneter mathematischer Filter



- Beobachtungen:
 - Schrägdistanz S
 - Horizontalwinkel α (bezogen auf die Orientierungsmessungen)
 - Vertikalwinkel ξ
- Lokales Koordinatensystem
 - Mittelpunkt des Koordinatensystems im Instrument (0,0,0)
 - y-Achse in Richtung des Referenzpunktes
- Herstellung einer Verbindung zu einem Referenzkoordinatensystem durch Ähnlichkeitstransformation
- Keine Redundanz → Überprüfung (Zuverlässigkeit) bei einer Messung nicht möglich

- Instrument mit elektronischen und motorisierten Messungen
- Beispiel: Leica TS16, TS60, MS60
- Reichweite: 1,5 m bis zu 3500 m
- Messfrequenz im Trackingmodus: < 20 Hz



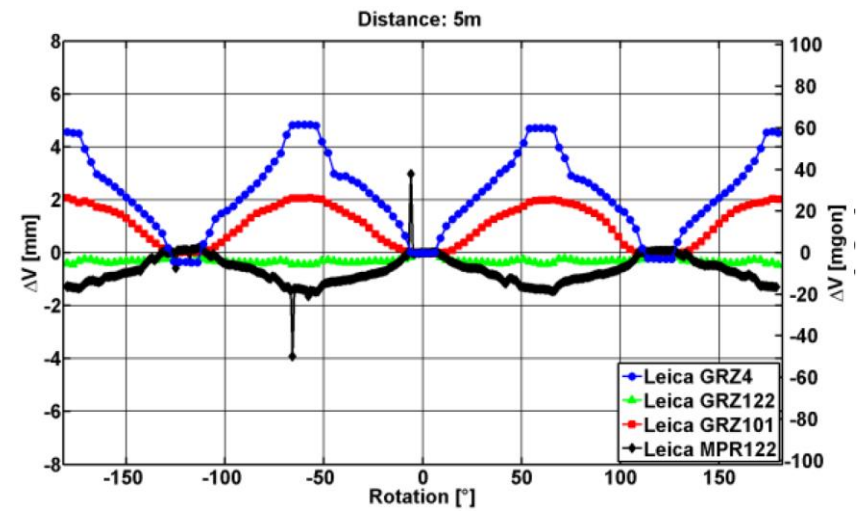
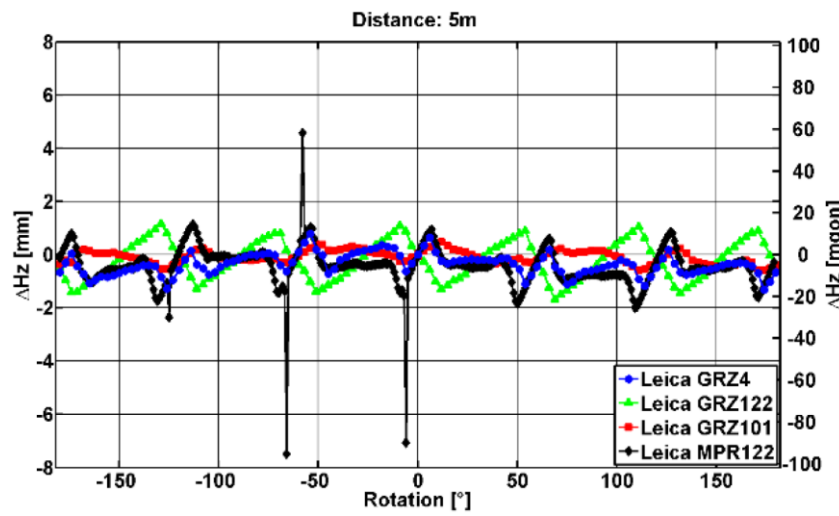
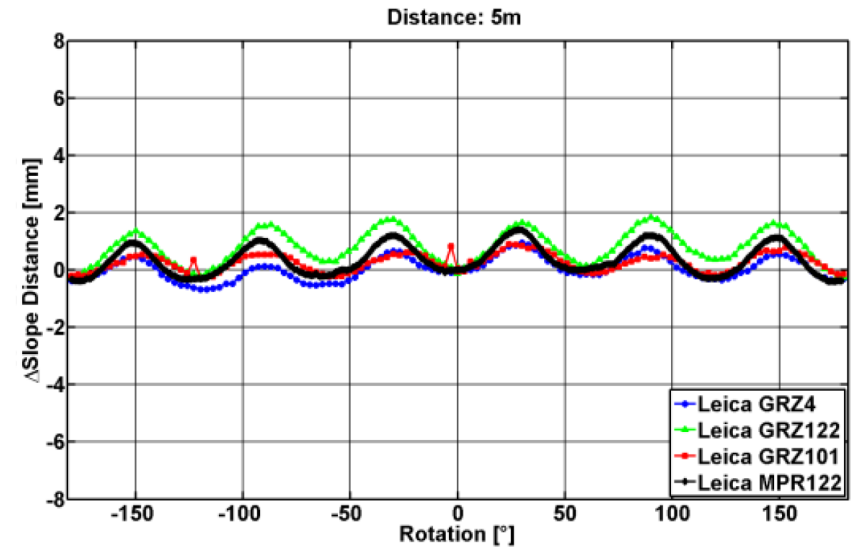
Typische Unsicherheiten

- | | |
|--|-------------------|
| ■ Standardabweichung des Winkels : | 0,15 mgon (Hz, V) |
| ■ Typische Distanzgenauigkeit für reflektorloses Messen: | 0,5 mm (bis 20 m) |
| für Reflektor: | 0,2 mm (bis 20 m) |
| ■ Zielpunktgeschwindigkeit (quer in 10 m Entfernung): | 3 m/s |
| (längs): | 4 m/s |

Einflüsse durch 360°-Prismen beim Totalstation-Tracking (1)



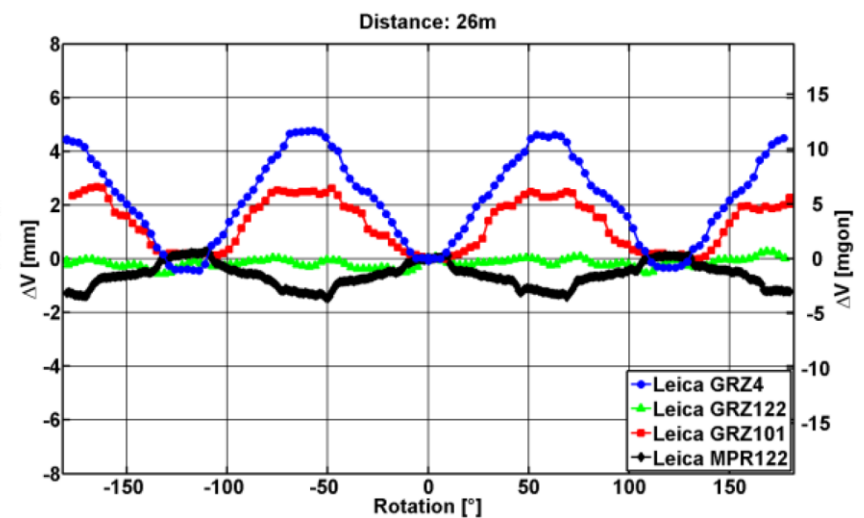
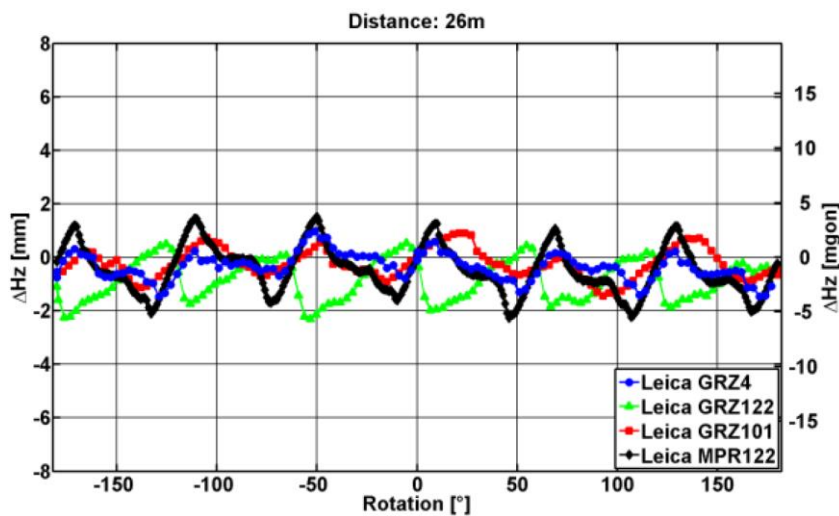
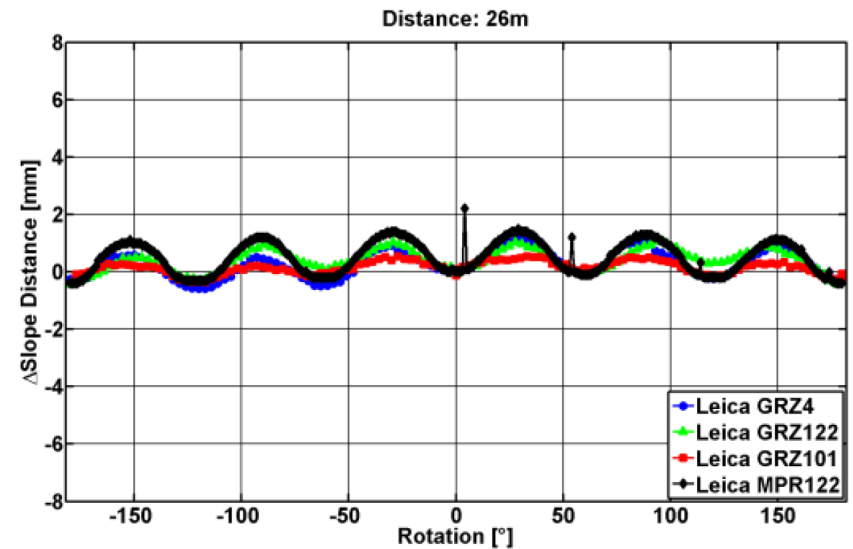
verändert nach Lackner & Lienhart (2016)



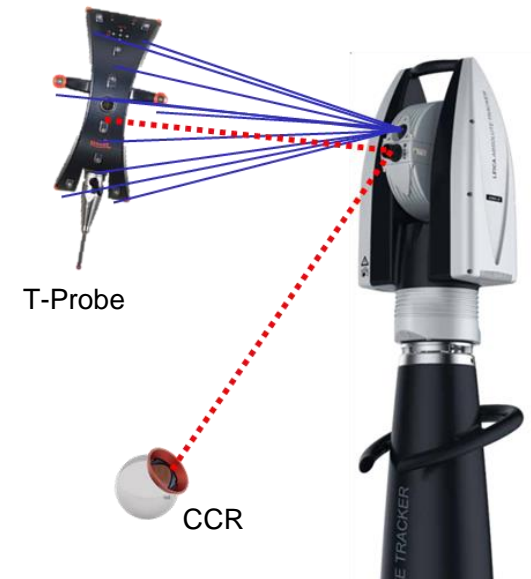
Einflüsse durch 360°-Prismen beim Totalstation-Tracking (2)



modified according to Lackner & Lienhart (2016)



- Grundprinzip: Kinematische polare Punktbestimmung auf CCR
- Distanzmessung
 - Absolute Distanzmessung (ADM)
 - Hochpräzises interferometrisches Messen von
Entfernungsunterschieden
- Winkelwerte über Encoder an Dreh-Kippspiegel
- Messfrequenz von bis zu 1000 Hz
- Messvolumen von 160 m im Durchmesser
- Genauigkeit (MPE): $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ (RRR)
 $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ (T-Probe)



leica-geosystems.com