

Navigation

Systemauslegung und Parametrierung

Festlegung der Simulationsumgebung und Auswahl des Navigationsverfahrens sowie Definition der Trajektorien.
Diskussion unterschiedlicher Test- und Auswerteverfahren sowie Möglichkeiten der Bewertung eines Navigationssystems

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyer

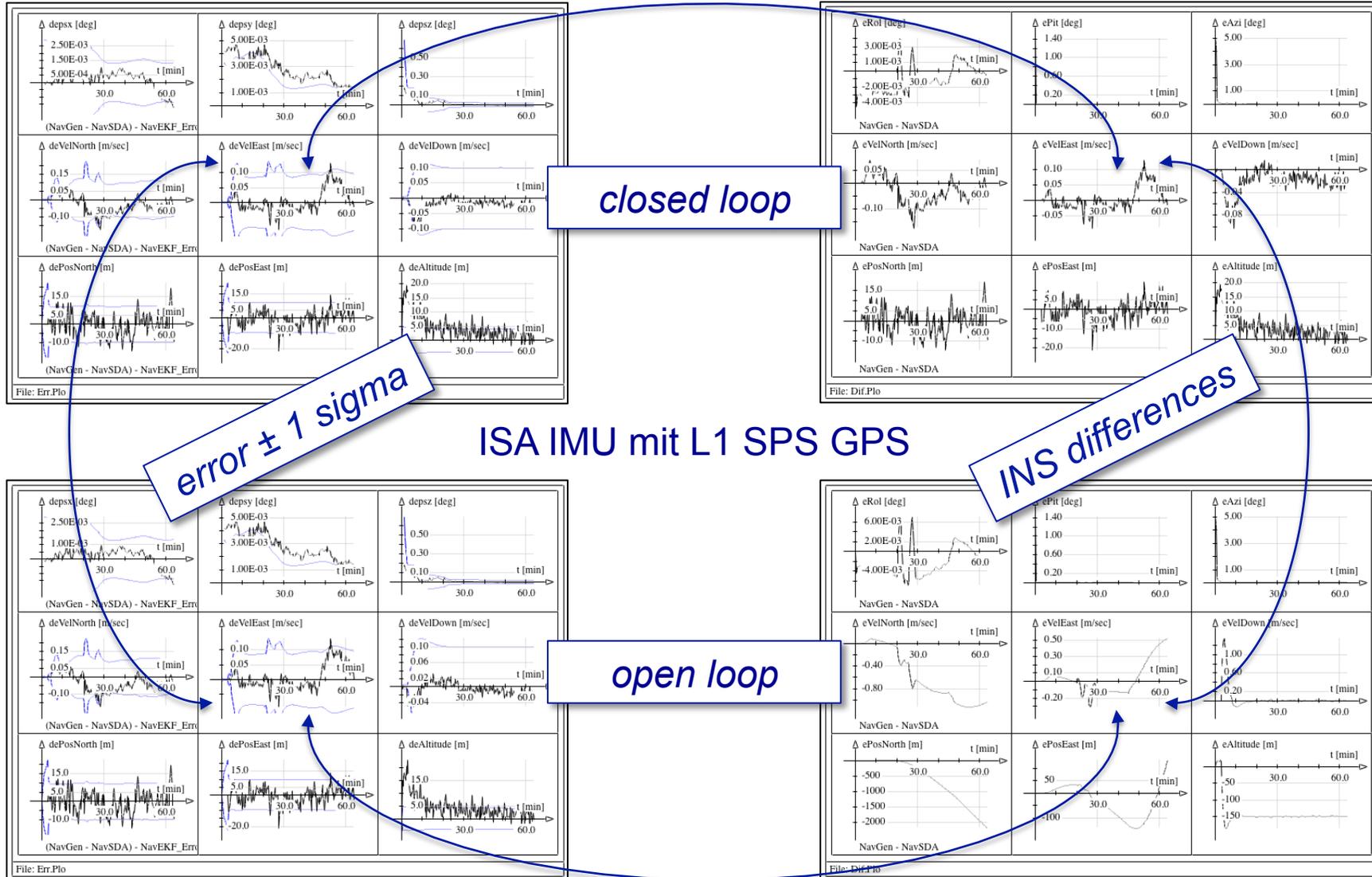
3 Systemauslegung und Parametrierung

- **Simulationsumgebung**
 - Auswahl des Navigationsverfahrens
 - Ausgestaltung der Trajektorie
- **Definition der Trajektorien**
 - Einfluss auf das Fehlerverhalten
 - Abschattung, Mehrwegeausbreitung
 - Nutzung des Bewegungsprofils
- **Test- und Auswerteverfahren**
 - Vergleichbarkeit
 - Validierung
- **Forcing Tape Technik**
 - Konzept und Potential
 - Labor- und Feldversuche
- **Bewertung**
 - Leistungsfähigkeit
 - Kundenakzeptanz
 - Festlegen der Konfiguration

- Auswahl des Navigationsverfahrens
 - Nichtlineare Filtergleichungen und Extended Kalmanfilter
 - Schwierigkeiten bei der Filterauslegung sind nicht ungewöhnlich
 - Kein garantierter Musterlauf – Kovarianzsignal Zusammenhang
 - Das in die Ergebnisse entgegengebrachte Vertrauen ist im Allgemeinen höher als bei rein linearen Ansätzen
 - Empfehlenswert bei hoher Fahrzeugdynamik und bei langen Simulationszeiträumen im 24 Stundenbereich
 - Lineare Fehlermodelle und Kovarianzanalyse
 - Eindeutige Korrelation zwischen Musterlauf und Kovarianzsignal erleichtert die Fehlersuche und die geeignete Filterauslegung
 - Grundsätzlich Gefahr einer zu optimistischen Filterauslegung
 - Gut geeignet für Simulationen im Minuten bis 1-2 Stundenbereich
 - Bewährte Methoden der Regelungstechnik lassen sich problemlos anwenden (bspw. Eigenwerte, SVD, Stabilitätsbestimmung)

- Auswahl Open Loop oder Closed Loop Konzept
 - Open Loop Ansatz bei Schwerpunktsetzung Fehlertoleranz
 - Benötigt wird eine genügend genaue Referenztrajektorie
 - Üblicherweise wird die Lösung eines INS verwendet
 - Ansatz setzt eine präzise Anfangsausrichtung voraus
 - Lösung liegt zwangsläufig im höheren Preissegment
 - Closed Loop Ansatz zur Verbesserung der Genauigkeit
 - Geeigneter Ansatz für „low cost“ Navigationssysteme
 - Linearisierung erfolgt um die mitgeschätzte Trajektorie
 - Anfangsausrichtung ist entscheidend und problematisch
 - Voraussetzung ist hohe Verfügbarkeit von Stützsensoren
 - Die Zeitdauer einer rein inertialen Navigation ist limitiert
 - Die Güte der Kalibration hängt von der Trajektorie ab
 - Anfällig für nicht oder zu spät erkannte Sensorfehler

Open Loop - Closed Loop Vergleich



- **Ausgestaltung der Trajektorie**
 - Event-Terminator Generator-Konzept
 - Auslösen einer Aktion
 - Definition einer Aktion
 - Beendigung einer Aktion
 - Drehungen in unterschiedlichen Räumen
 - Änderung der Eulerwinkel
 - Körperfeste Drehraten
 - Navigations-Drehraten
 - Vorgabe von Zielzuständen
 - Sollwert Breite/Länge @ Zeitpunkt)
 - Vorgabe der Höhe über Ellipsoid @ Zeitpunkt
 - Grosskreisflug (Transportdrehrate in ω -Body(z) aufheben)

- NavLab Parser

- Verwendung einer Textdatei
- Zeilenweise Abarbeitung
- Jede Zeile wird grundsätzlich als Kommentar eingestuft
- Das erste Zeichen „>“ definiert eine Befehlszeile
- Zur Dekodierung werden nur Integer Zahlen verwendet
- Zeichen nach Integer Zahl gelten alle als Kommentar
- Zeichen „=“ führt zum Einlesen einer Zahl (Real, Integer)
- Zeichen „:“ führt zum Einlesen eines Vektors

Taxiway

Definiere Aktion:

> 010 at Time [sec] = 180.0

Beschleunigung:

> 350 a-Body [m/sec²] : 1.0 0.0 0.0

> 020 Dauer [sec] = 10.0

> 350 a-Body [m/sec²] : 0.0

Heading Änderung:

> 310 w-Euler [deg/sec] : 0.0 0.0 -1.0

> 020 Dauer [sec] = 10.0

> 310 w-Euler [deg/sec] : 0.0

Konstante Fahrt:

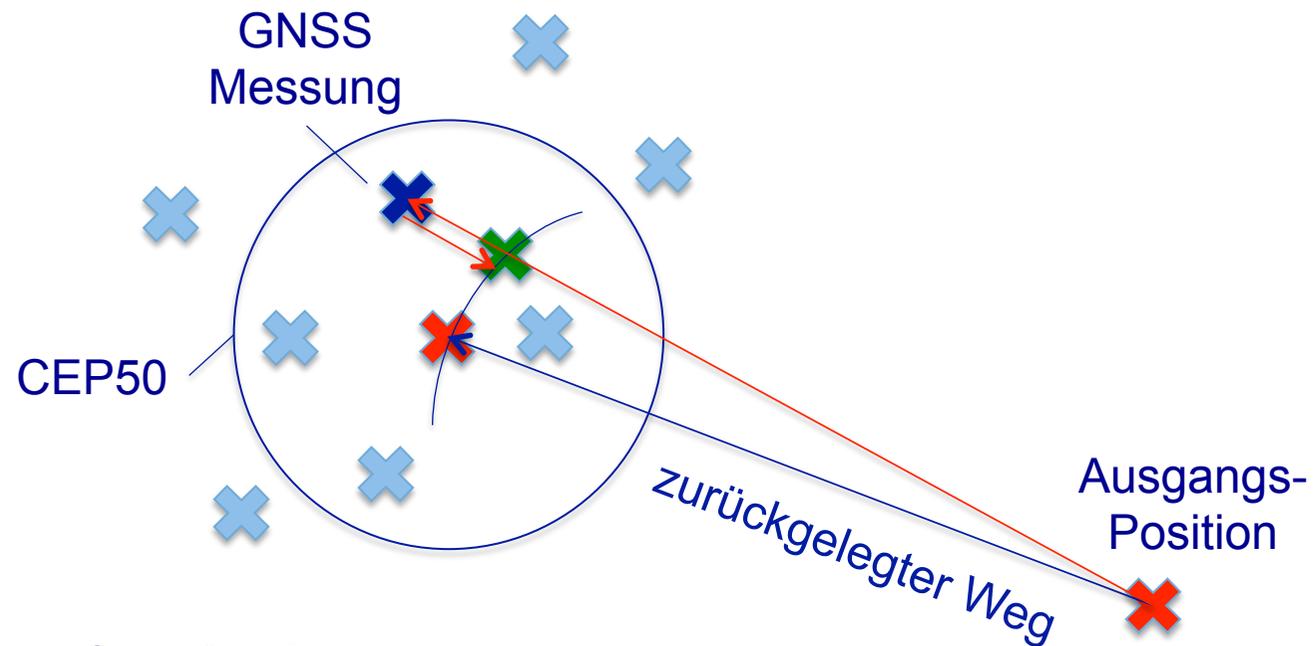
> 020 Dauer [sec] = 20.0

! 022 Dauer [step] = x

- Einfluss auf das Fehlerverhalten
 - Agilität und Fahrzeugdynamik
 - Liefert Stimulation unterschiedlicher Sensorfehlerquellen
 - Anregungen in den Eigenfrequenzen potenzieren die Fehler
 - Fahrzeuge mit hoher Masse sind besser für den Einsatz von Verfahren der analytischen Redundanz geeignet
 - Variation der Trajektorie (z.B. Windböen)
 - Beobachtbarkeit der Sensorfehler
- Abschattung, Mehrwegeausbreitung
 - Verfügbarkeit von Signalen für die geplante Mission abschätzen
 - Variation der GNSS Dilution of Precision (DoP) festlegen
 - Position und Reichweite von Funkfeuern berücksichtigen
 - GNSS Mehrwegeausbreitung liefert Fehler im 10 - 100 m Bereich und das mit hoher Wiederholbarkeit

- Nutzung des Bewegungsprofils
 - Trajektorie bei Beobachtbarkeit von Sensorfehlern zur on-line Kalibration nutzen. Geschwindigkeitsvariationen separieren Bias und Skalenfaktorfehler. Rotationen regen die Kreiselfehler an. Geflogene S-Kurven unterstützen das in-flight Alignment. Höhenwechsel befördern die Kalibrationsgüte im Vertikalkanal
 - Land- und besonders Schienenfahrzeuge haben eingeschränkte Bewegungsmöglichkeiten, die genutzt werden können
 - Track Snapping zur Positionszuweisung bei Landfahrzeugen, die sich auf kartierter Infrastruktur bewegen (Lot der Position auf die Strasse). Reduziert die Anforderungen an Rotationssensoren, da nur definierbare Drehungen vorkommen können. Gleiches gilt für die Höhenseparation bspw. in Parkhäusern
 - Zuverlässige Stillstanderkennung (z.B. Hodometer) ermöglicht die Stützung eines INS durch Zero Velocity Update „ZUPT“

- Beispiel: GNSS-Verbesserung bei Landfahrzeugen
 - Der zurückgelegte Weg ab einer Ausgangsposition sei bekannt
 - Eine GNSS Messung wird auf diese Entfernung normiert

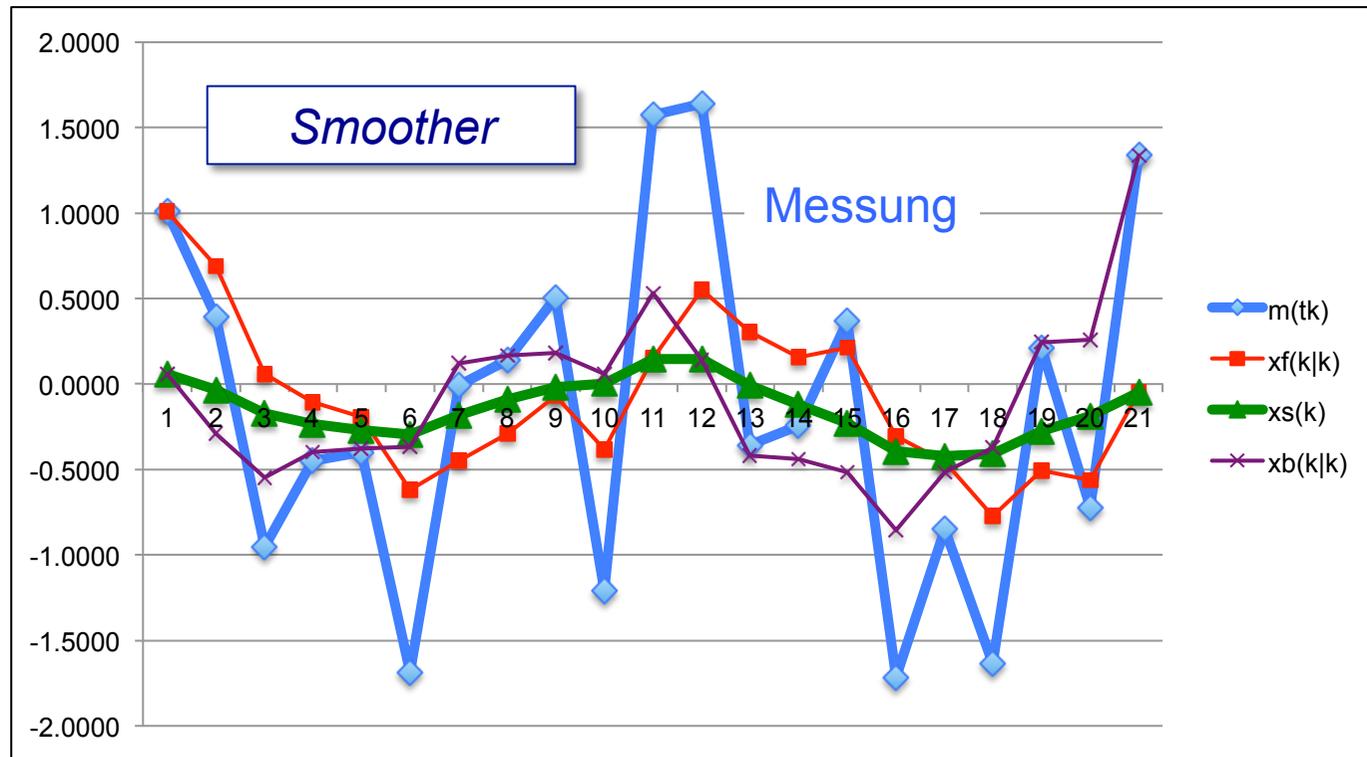


- Vergleichbarkeit - Methodik
 - Heutzutage sind zahlreiche Methoden der Fehlerberechnung und diverse statistische Beschreibungen im Gebrauch
 - Verwendung standardisierter Auswerteverfahren
 - Grundlage STANAG 4278 (Edition 3)
 - RMS, D2RMS, 2DRMS, D3RMS
 - LEP, CEP, SEP
 - Robustheit der getroffenen Aussage
 - Annahme einer Normalverteilung
 - Endlicher Stichprobenumfang
 - Ergodenhypothese
 - Statistische Information aus einer Ensemble-Mittelung ist identisch mit der Zeit-Mittelung einer einzigen Musterfunktion
 - Der Fehler von n parallel ausgewerteten Navigationssystemen verhält sich wie der Fehler eines einzigen Navigationssystems über der Zeit

- Vergleichbarkeit – Methodik
 - Der Test und die Bewertung von Navigationssystemen ist anspruchsvoll, komplex und zeitaufwendig
 - Insbesondere die Fehlersuche sowie die Validierung der Parametereinstellungen gestaltet sich häufig sehr schwierig
 - Die stochastische Natur der Signale erschwert einerseits die eindeutige Auswertung, andererseits verschleiert sie vorhandene determinierte Fehlerquellen, bspw. Programmierfehler
 - Messfahrten liefern keine wiederholbaren Vergleichswerte. Die Wirksamkeit von Parameteränderung ist so kaum überprüfbar
 - Eine Simulation, die alle benötigten Referenzwerte besitzt, ist bei der Fehlersuche und bei der Parameteroptimierung Messfahrten vorzuziehen. Messfahrten dienen zur Bestätigung der Simulation
 - Ohne Referenz kann kein Test und keine Auswertung erfolgen

- Vergleichbarkeit – Erzeugen einer Referenz (1)
 - Bereitstellung künstlich erzeugter Referenz- und Sensorsignale
 - Simulation der Systemanregung und Berechnung der Trajektorie
 - Referenzgenerator liefert die Sollwerte für alle internen Zustände
 - Fehlergenerator liefert „dazu passende“ determinierte und stochastische Signale, die additiv überlagert werden
 - Determinierte Fehler sind bspw. Bias, Skalenfaktorfehler und Fehlausrichtungen der Sensoren (Misalignment)
 - Anforderungen an einen Rauschgenerator
 - Möglichst geringer Rechenaufwand (rekursiv, Integer)
 - Rechnerunabhängige und wiederholbare Rauschsequenzen
 - Diverse Verteilungen müssen genau und schnell erreicht werden
 - Gesicherte Stabilität von Mittelwert und Streuung
 - Option für korreliertes Rauschen

- Vergleichbarkeit – Erzeugen einer Referenz (2)
 - Offline Auswertung aller vorhandenen Messdaten (Smoother)
 - Mix von Vorwärts- und Rückwärtsfilterung (nicht-kausales Filter)



- Vergleichbarkeit – Erzeugen einer Referenz (3)
 - Stimulation des Systems mit bekannten Eingangsdaten
 - Anregung eines INS im Stand mit Gravitation und Erdrotation
 - Vermessung einer IMU auf dem Dreiachs-Drehtisch
 - Vermessung einer rotierenden GNSS Antenne
 - Stimulation unter Einhaltung definierter Randbedingungen
 - Bewegung auf einem genau vermessenen Schienenweg
 - Bewegung entlang bekannter Referenzpunkte (Strasse)
 - Mehrfaches Abfahren eines Autobahnkreuzes
 - Bewertung des beschriebenen Verfahrens
 - Wiederholbarkeit der Tests ist sichergestellt
 - Navigationssysteme sind „im Ganzen“ gut prüfbar
 - Möglichkeiten der tieferen Analyse sind eingeschränkt

- Vergleichbarkeit – Begriffsdefinition

- $RMS = \text{SQRT}(\sigma^2 + \mu^2)$

$$R\hat{M}S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

- $D2RMS = \text{SQRT}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)$

für $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$
und $\mu_x = \mu_y = 0$

- $2DRMS = 2 * D2RMS$

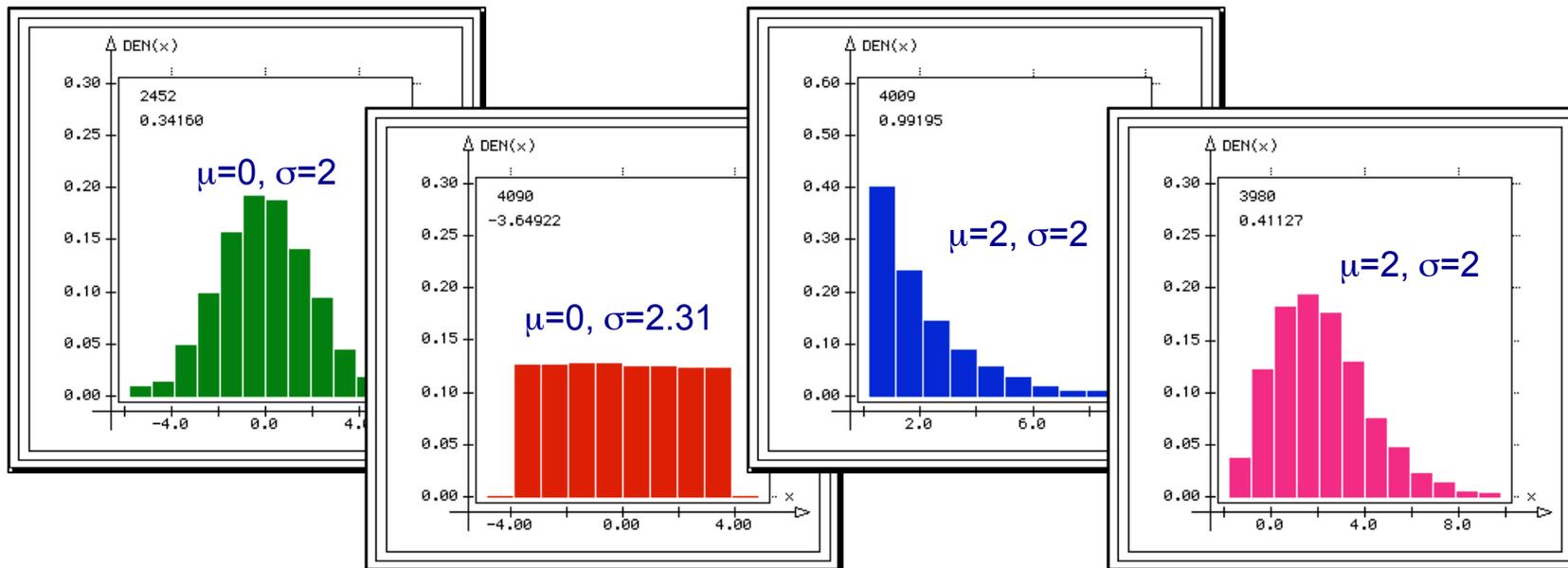
P [%] = 95.4 - 98.2
für $0 < \sigma_{\min}/\sigma_{\max} < 1$

- $D3RMS = \text{SQRT}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)$

für $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma$
und $\mu_x = \mu_y = \mu_z = 0$

Vergleichs- und Umrechnungstabellen

Intervall-Grenze	Normal-Verteilung	Gleich-Verteilung	Exponential-Verteilung	Rayleigh-Verteilung
$\mu \pm 1 \sigma$	68.27%	57.74%	86.47%	67.43%
$\mu \pm 2 \sigma$	95.45%	100%	95.02%	96.26%
$\mu \pm 3 \sigma$	99.73%	100%	98.17%	99.42%



Vergleichs- und Umrechnungstabellen

P [%]		σ	CEP ₅₀	D2RMS	CEP ₉₀	CEP ₉₅
39.4	σ	1	0.8493	0.7071	0.4660	0.4086
50.0	CEP ₅₀	1.1774	1	0.8326	0.5487	0.4810
63.2-68.2	D2RMS	1.4142	1.2001	1	0.6590	0.5778
90.0	CEP ₉₀	2.1460	1.8227	1.5175	1	0.8767
95.0	CEP ₉₅	2.4478	2.0789	1.7308	1.1406	1

P [%]		σ	SEP ₅₀	D3RMS	SEP ₉₅	
19.9	σ	1	0.6501	0.5774	0.3577	
50.0	SEP ₅₀	1.5382	1	0.8881	0.5503	
60.8	D3RMS	1.7321	1.1260	1	0.6197	
95.0	SEP ₉₅	2.7955	1.8173	1.6136	1	

- Validierung – Softwareentwicklung und Softwareeinsatz
 - Überzeichnung physikalischer Effekte bei der SW-Entwicklung
 - Tangentialfläche liefert Navigation auf „der flachen Erde“
 - Verwendung einer drastisch überhöhten Erddrehrate
 - Verwendung unterschiedlicher Betriebssysteme
 - Parameter-Initialisierung der Compiler („Köhler-Konstante“)
 - Vorteile bei Verwendung linearer Ansätze ausnutzen
 - In diesem Fall sind systemanalytische Verfahren anwendbar
 - Numerische Linearisierung und Eigenwert-Berechnung
 - Eigenwert-Vorgabe bspw. im Vertikalkanal eines INS
 - Schätzung künstlich aufgebracht Sensorfehler
 - IMU-Fehler sind sehr empfindlich gegenüber Implementations-Defiziten. Eine korrekte Schätzung bestätigt das ganze System
 - Variationen stochastischer Parameter dienen zur Bestätigung der Robustheit, bspw. auch Testläufe ohne aufgebrachtes Rauschen

- Linearisierung und Eigenwerte

Breitenabhängigkeit
der Erdschwere

```
>A-Matrix <9*9> 'Linearisierung der Nav-DGL von Hand' (NavLab);          vgl. File 'INS9.Sps'
0.0000e+0  -5.5861e-5  0.0000e+0  | 0.0000e+0  -1.5691e-7  0.0000e+0  | 5.5861e-5  0.0000e+0  0.0000e+0
5.5861e-5  0.0000e+0  4.6873e-5  | 1.5691e-7  0.0000e+0  0.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0
0.0000e+0  -4.6873e-5  0.0000e+0  | 0.0000e+0  1.8700e-7  0.0000e+0  | 4.6873e-5  0.0000e+0  0.0000e+0
0.0000e+0  -9.8104e+0  0.0000e+0  | 0.0000e+0  -1.1172e-4  0.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0
9.8104e+0  0.0000e+0  0.0000e+0  | 1.1172e-4  0.0000e+0  9.3746e-5  | 0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0
0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0  | 0.0000e+0  -9.3746e-5  0.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  -3.0787e-6
0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0  | 1.5691e-7  0.0000e+0  0.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0
0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0  | 0.0000e+0  2.4411e-7  0.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0
0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  -1.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0
```

```
>A-Matrix <9*9> 'Numerische Linearisierung des SDA' (Kroton);          vgl. File 'SDA9.Sps'
0.0000e+0  -5.5861e-5  0.0000e+0  | 0.0000e+0  -1.5585e-7  0.0000e+0  | 5.5860e-5  0.0000e+0  0.0000e+0
5.5861e-5  0.0000e+0  4.6873e-5  | 1.5691e-7  0.0000e+0  0.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0
0.0000e+0  -4.6873e-5  0.0000e+0  | 0.0000e+0  1.8974e-7  0.0000e+0  | 4.6872e-5  0.0000e+0  0.0000e+0
0.0000e+0  -9.8104e+0  0.0000e+0  | 0.0000e+0  -1.1172e-4  0.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0
9.8104e+0  0.0000e+0  0.0000e+0  | 1.1172e-4  0.0000e+0  9.3746e-5  | 0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0
0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0  | 0.0000e+0  -9.3675e-5  0.0000e+0  | 5.1105e-2  0.0000e+0  -3.0823e-6
0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0  | 1.5691e-7  0.0000e+0  0.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0
0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0  | 0.0000e+0  2.4343e-7  0.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0
0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  -1.0000e+0  | 0.0000e+0  0.0000e+0  0.0000e+0
```

```
>Nav-Eigenwerte 'Linearisierung von Hand'
-1.7530e-0  0.0000e+0
0.0000e+0  1.1867e-3  T [min] = 88.24
0.0000e+0  -1.1867e-3  T [min] = 88.24
0.0000e+0  0.0000e+0
0.0000e+0  7.2921e-5  T [std] = 23.93
0.0000e+0  -7.2921e-5  T [std] = 23.93
0.0000e+0  1.2985e-3  T [min] = 80.65
0.0000e+0  -1.2985e-3  T [min] = 80.65
1.7530e-3  0.0000e+0
```

```
>Nav-Eigenwerte 'Numerische Linearisierung'
-1.7540e-3  0.0000e+0
0.0000e+0  1.1849e-3  T [min] = 88.38
0.0000e+0  -1.1849e-3  T [min] = 88.38
0.0000e+0  0.0000e+0
0.0000e+0  7.3378e-5  T [std] = 23.78
0.0000e+0  -7.3378e-5  T [std] = 23.78
0.0000e+0  1.2960e-3  T [min] = 81.87
0.0000e+0  -1.2960e-3  T [min] = 81.87
1.7540e-3  0.0000e+0
```

*Forcing Tape liegt methodisch
zwischen SiL und HiL*

Bei der Methode **Software in the Loop (SiL)** wird im Gegensatz zum HiL keine besondere Hardware eingesetzt. Das Modell der Software wird lediglich in den für die Zielhardware verständlichen Code umgewandelt. Dieser Code wird auf dem Entwicklungsrechner zusammen mit dem simulierten Modell ausgeführt, anstatt wie bei HiL auf der Zielhardware zu laufen. Es handelt sich dabei also um eine Methode, die vor dem HiL anzuwenden ist.

Vorteil von SiL ist, dass die Zielhardware noch nicht feststehen muss, und dass die Kosten aufgrund der fehlenden Simulationsumgebung weitaus geringer ausfallen.

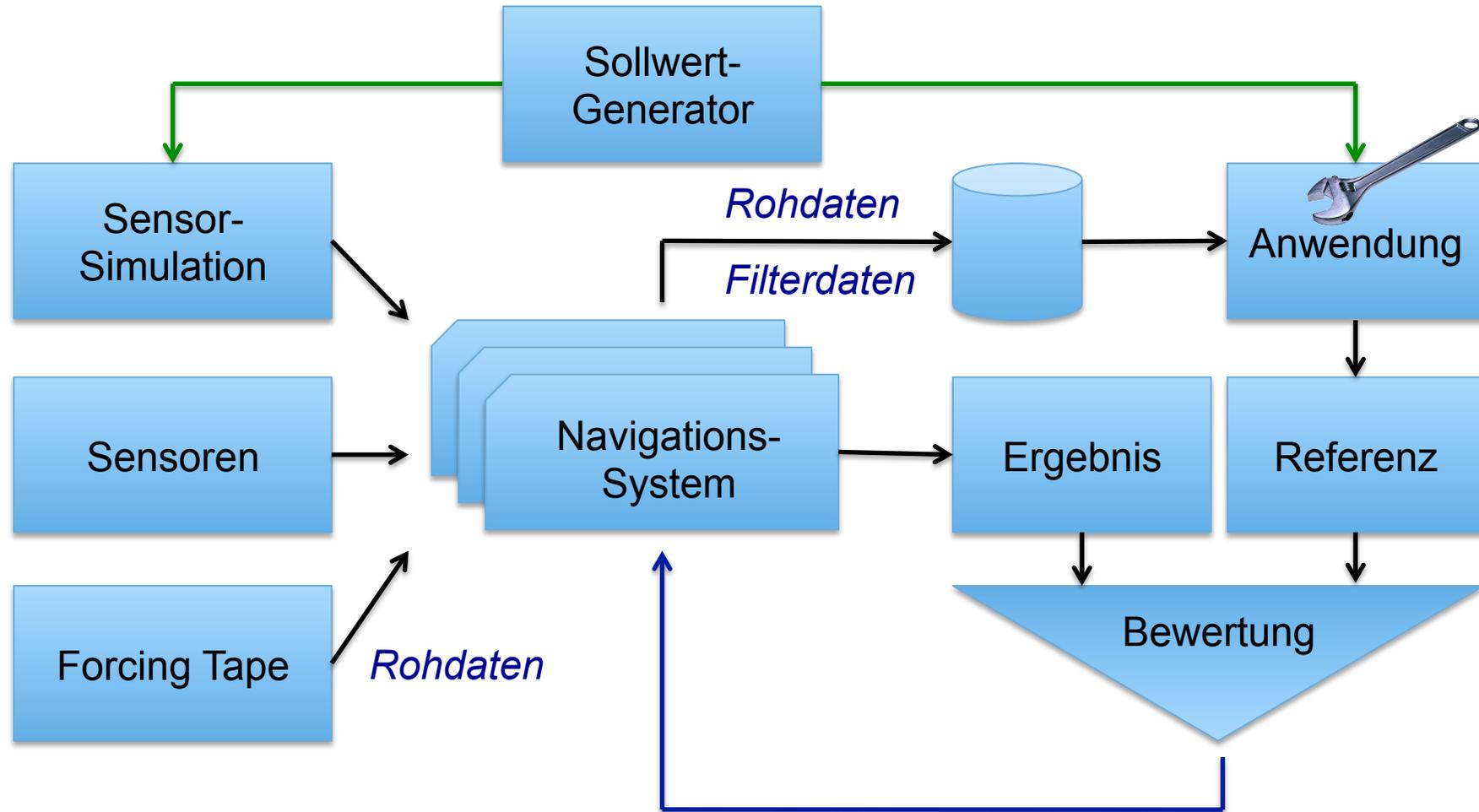
Hardware in the Loop (HiL) bezeichnet ein Verfahren, bei dem ein eingebettetes System (z. B. ein reales elektronisches Steuergerät oder eine reale mechatronische Komponente) über seine Ein- und Ausgänge an ein angepasstes Gegenstück, das im Allgemeinen HiL-Simulator genannt wird und als Nachbildung der realen Umgebung des Systems dient, angeschlossen wird. HiL ist eine Methode zum Testen und Absichern von eingebetteten Systemen, zur Unterstützung während der Entwicklung sowie zur vorzeitigen Inbetriebnahme von Maschinen und Anlagen.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Hardware_in_the_Loop

- Zuerst werden für eine definierte Trajektorie mit einem Sollwert-Generator künstliche Sensordaten im Labor erzeugt
- Prozessiert man diese Daten mit dem entwickelten Navigations-Algorithmus, so müssen die Ergebnisse mit den Sollwerten der zuvor definierten Ur-Trajektorie übereinstimmen
- Hierüber kann der programmierte Quellcode analysiert und systematische Fehler eliminiert werden
- Anschließend wird die Software mit realen Sensordaten im Labor getestet, um realistische Leistungsdaten der entworfenen Navigationseinheit zu erzeugen

- Während der Feldversuche werden alle verfügbaren Sensordaten als Rohsignale in Echtzeit gespeichert
- Parallel wird eine Filterlösung, die mit ausgewählten Sensordaten gespeist wird, ebenfalls abgespeichert
- Für die Bewertung des durchgeführten Feldversuchs ist zunächst die „wahre“ Trajektorie zu bestimmen, bzw. ein bestmöglicher Schätzwert dafür zu berechnen
- Diese Referenz-Trajektorie wird typischerweise aus den Daten einer hochwertigen inertialen Navigations-Plattform (INU) in Kombination mit einem Zwei-Frequenz GNSS im „Post Processing“ bestimmt
- Smoother Verfahren (nicht kausal) sind hierfür geeignet

- Mit Hilfe der „forcing tape“ Technik wird nun überprüft, ob aufgezeichnete Echtzeitergebnisse für eine bestimmte Sensorkonfiguration im Labor wieder exakt reproduziert werden können
- Auf dieser Basis lassen sich dann im Labor beliebige Variationen bezüglich Sensorauswahl, Filter-Algorithmus und Modellen vornehmen. Die Ergebnisse besitzen die Qualität und Aussagekraft eines realen Feldversuchs
- In dieser Umgebung können unterschiedliche Systeme optimal entwickelt und individuell angepasst werden
- Über existierende Schnittstellen lassen sich auch weitere Sensoren oder neue Technologien integrieren



Quelle: Jürgen Beyer

- **Leistungsfähigkeit**
 - Nutzen hängt von der Sensor und System Performance ab
 - Bewertung durch Analyse von Kosten vs. Performance
- **Bestimmung der Performance**
 - Fehlerbudget eines Sensors (Sensorpakets)
 - Klasseneinteilung erfolgt über die Kenngrößen
 - Random Constant, Random Walk, Skalenfaktorfehler
 - Beispiel: Q-Faktor = $\text{SQRT}(RW^2 + RC^2 * \text{time})$
 - Fehlerbeschreibung eines Systems (ist unterschiedlich)
 - Freie Inertialnavigation verwendet CEP [nm] @ 1 [hour]
 - Hodometer gestützte Inertialnavigation CEP of DT [%]
- **Paradoxon**
 - Summe Sensorpreis ist höher als der Systempreis

Rotationssensoren (1 σ -Werte)

<i>Sensor Typ</i>	<i>Abhängigkeit</i>	RC [°]	Noise [°]	SKFe [%]	
Lenkwinkel	Fahrzeug	5 - 10	< 1	1 - 10	1 T€
Kompass	Umgebung	1 - 5	1 - 2	0	500 €

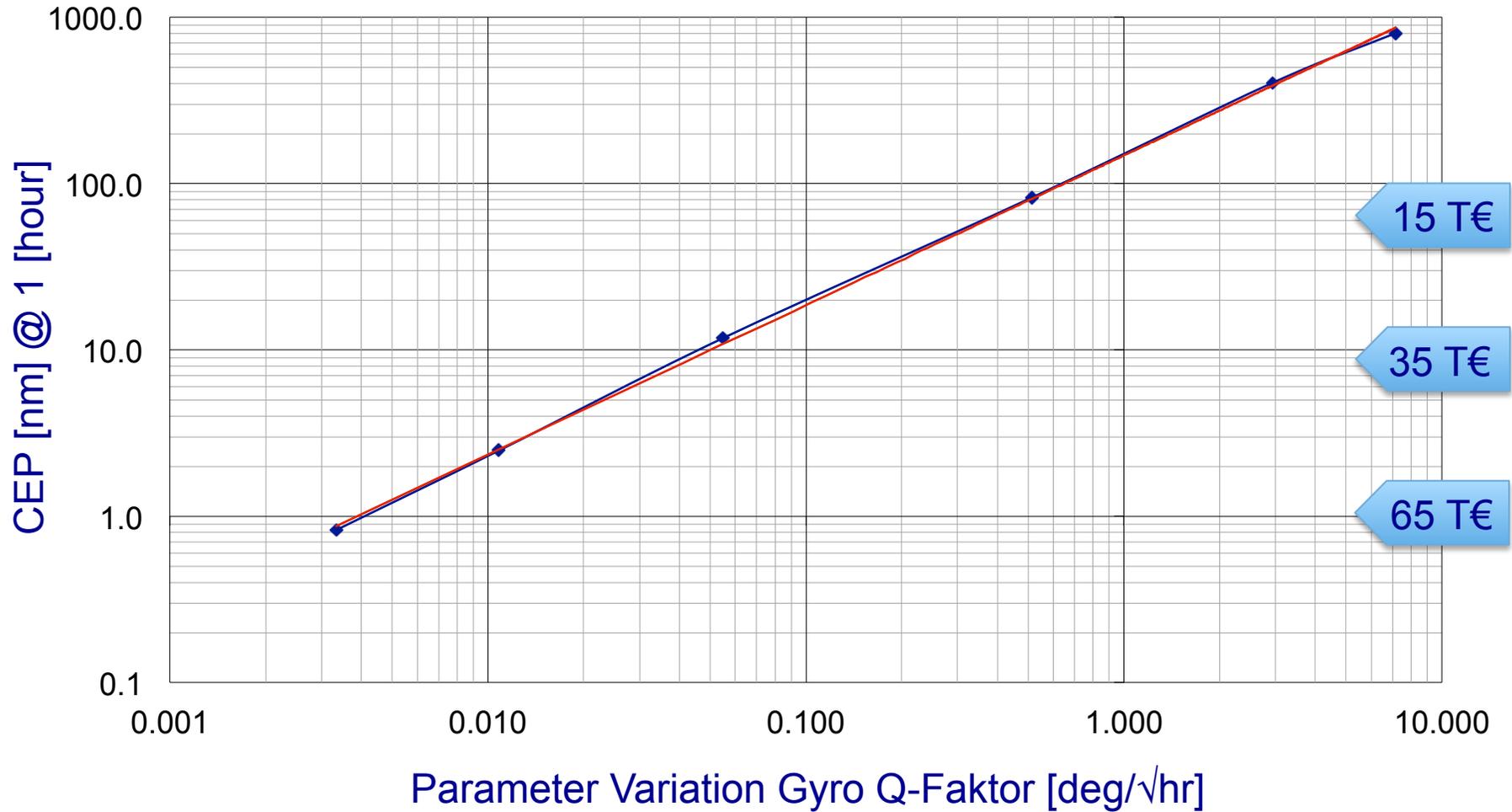
<i>Kreisel Typ</i>	<i>Klasse</i>	RC [°/hour]	RW [°/√hour]	SKFe [%]	
RLG (FOG)	Inertial	0.001 - 0.01	0.001 - 0.01	0.001 - 0.02	16 T€
RLG, FOG	Tactical	0.01 - 5	0.01 - 0.5	0.02 - 0.1	6 T€
DTG, MMG	Rate Control	5 - 100	0.5 - 10	0.1 - 5	1 T€
MMG	Automotive	> 100	> 10	> 5	

Translationssensoren (1 σ -Werte)

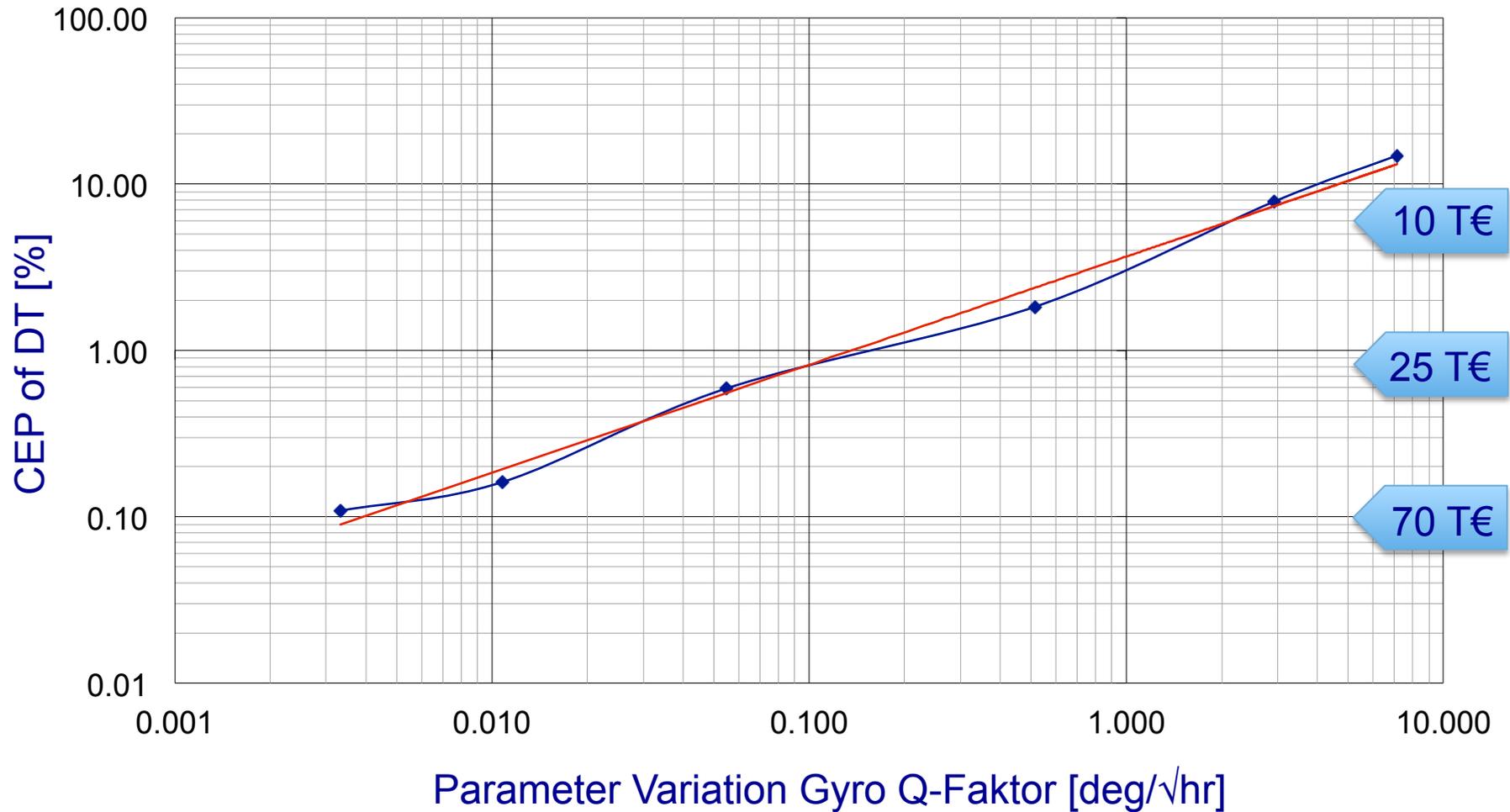
<i>B-Messer Typ</i>	<i>Klasse</i>	RC [mg]	RW [m/s/ $\sqrt{\text{hour}}$]	SKFe [%]	
Pendel	Inertial	0.01 - 0.1	0.001 - 0.01	0.01 - 0.02	5 T€
Schwingbalken	Tactical	0.1 - 10	0.01 - 0.1	0.02 - 0.1	3 T€
MMA	Accl Control	10 - 50	0.1 - 1	0.1 - 1	500 €
Kapazitiv	Automotive	> 50	> 1	> 1	

<i>Sensor Typ</i>	MisAlgn. [°]	RC [m/s]	Noise [m/s]	SKFe [%]	
Tacho/Hodo	0.1 - 5	0	0.01 - 0.05	0.1 - 5	1 T€
Staudruck	0.1 - 1	1 - 3	< 1.5	< 3	
Doppler	0.1 - 1	0.1 - 2.5	0.1	0.1 - 0.5	5 T€
GPS-Velo	0	0	0.25	0	

Fehlerabschätzung in der freien Inertialnavigation Gyro Compass Alignment bei Breite 50[°]



Fehlerabschätzung hodometergestützte Inertialnavigation Hodometer Skalenfaktorfehler 1[%]



- Kundenakzeptanz
 - Anforderungen und Ausloten der technischen Möglichkeiten (Preis, Zeitaufwand, Risiko) erfolgen im engen Dialog
 - Teure Navigation immer in hochpreisigen Fahrzeugen testen
- Festlegen der Konfiguration
 - Auswahl des Filterverfahrens und der eingesetzten Sensoren
 - Schienenverkehr basiert auf guten Geschwindigkeitssensoren
 - Kurswinkel ist kritische Grösse für Landfahrzeuge in der Ebene
 - Ohne Nickwinkel macht Beschleunigungsmessung keinen Sinn
- Demonstration der Vorgehensweise am Beispiel
 - Schienenverkehrsmanagement
 - Vehicle Location System VLS