

# Nav42

cybernetics - the genius of control

# Positions-Differenz-Vektor Analyse spurgeführter Landfahrzeuge

23<sup>rd</sup> LEIBNIZ CONFERENCE OF ADVANCED SCIENCE

Lokalisierungstechniken für IoT, Telematik und Industrie 4.0

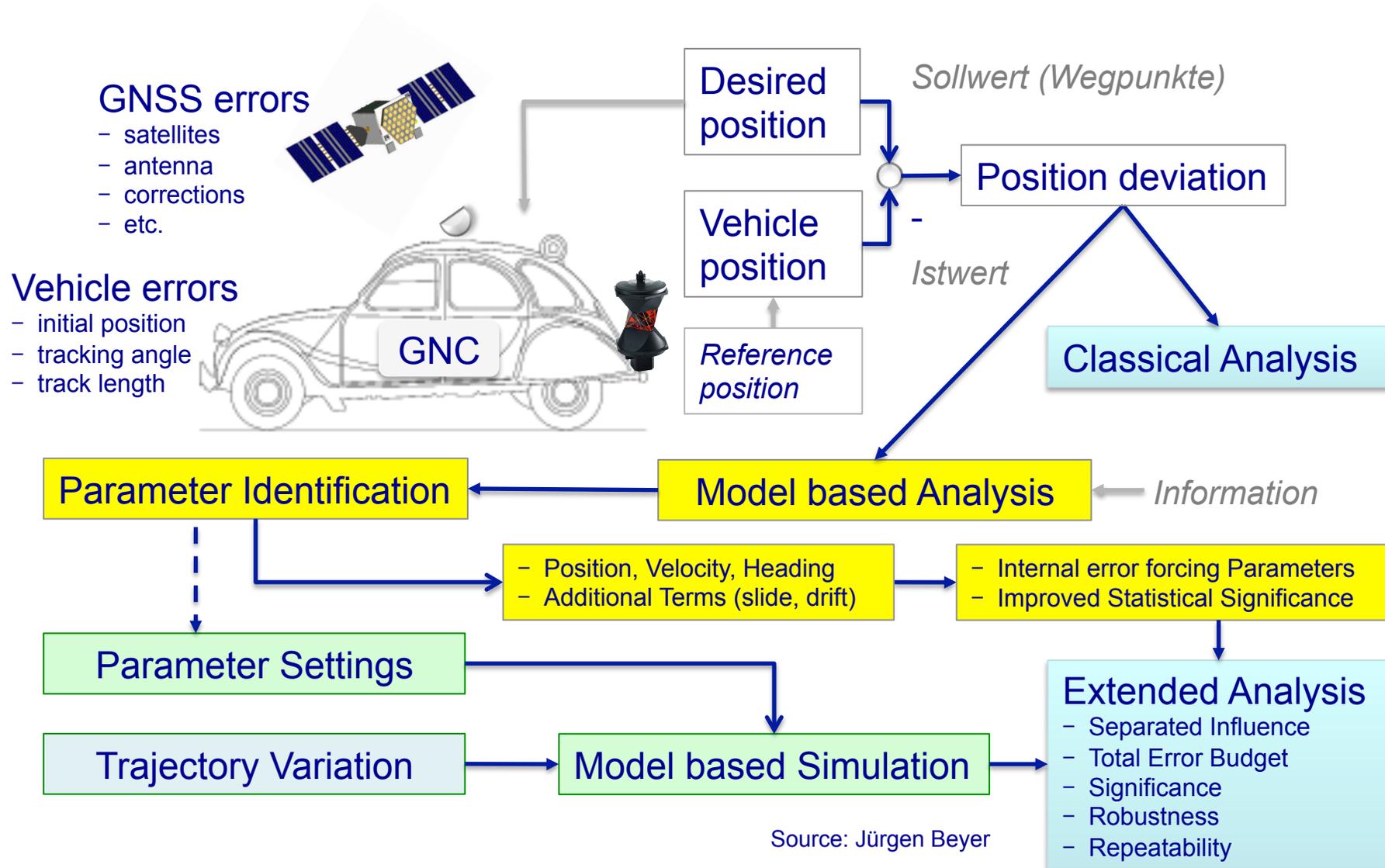
22.-23. November 2018

Lichtenwalde, SN

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyer

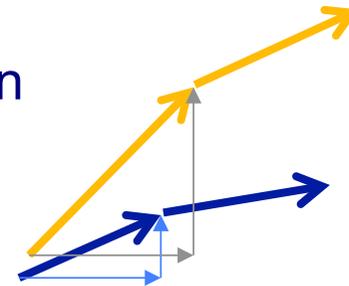
- **Problematik und Zielsetzung**
  - GNC ist Grundbaustein moderner Fahrzeuge & mobiler Roboter
  - Beurteilung der GNC Positionsgenauigkeit („test the system“)
  - Voraussetzung: Hohe Analysequalität („test the test“)
    - Unterstützung der GNC Weiterentwicklung
    - Normkonforme Prüfung und Zulassung
- **Technische Einordnung und Umsetzung**
  - Fokus auf spurgeführten Landfahrzeugen (Koppelgleichungen)
    - Identifikation treibender Fehlerquellen („forcing functions“)
    - Trajektorien-Abhängigkeit der Fehler (Ergodizität?)
  - Stochastisch korrekte Beschreibung relevanter Signale
  - Typischerweise zeit- und ortsdiskreter Messumfang
  - Gewählter Ansatz: „Modellbasierte Analyse“

## Modellbasierte Analyse

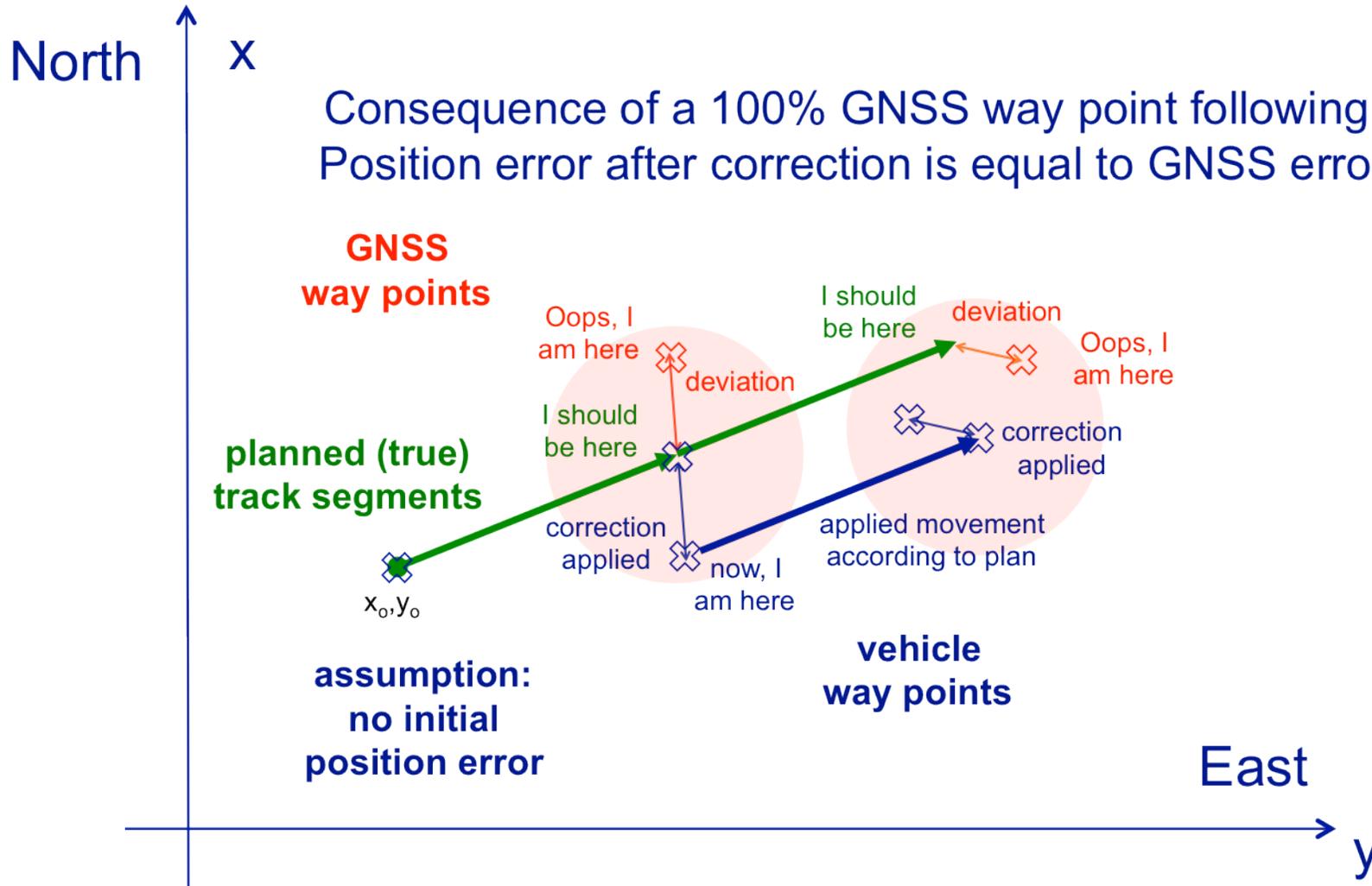


# Vorgehensweise und Schwerpunkte

- Identifikation der dominanten Systemkomponenten
  - Fehlerquellen der Fahrzeuglokalisierung
    - Anfangspositionsfehler (ePos)
    - Skalenfaktorfehler (eSkf)
    - Kurswinkelfehler (eAzi)
  - Einfluss der Fahrzeug-Positionsstützung (hier GNSS)
    - Auswirkung des Positionsrauschens (eAid) auf die Fahrzeugposition
    - Filter- sowie Regelverhalten, Aktuatorik (GNC Mechanisierung)
- Entwicklung eines einfachen stochastischen Fehlermodells (Hybrid)
  - Einfluss der GNSS Rückkopplungs-Verstärkung (Anm.  $g = \text{„gain“}$ )
  - Einfluss von Fahrzeuggeschwindigkeit und Abtastzeit
  - Mittelwert- und Kovarianz-Übertragungsfunktionen
- Analyse der Positions-/Parameterfehler des Hybrides
  - Zeitlicher Verlauf der Mittelwerte und Streuungen
  - Signal-Korrelationen und Verteilungsfunktionen
  - Signifikanz, Robustheit, Wiederholbarkeit
  - Präzision und Sensitivität

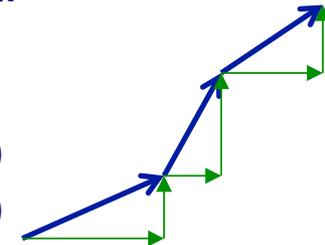


# Korrektur der Wegpunktfehler



# Positions-Differenz-Vektor Analyse

- In der klassischen Analyse werden die Positions-Residuen aus dem Sollwert und dem aktuellen Messwert der Wegpunkte berechnet:
  - $e_x(tk) = x_{soll}(tk) - x_{mess}(tk)$  (Normalverteilung der Messung)
  - $e_y(tk) = y_{soll}(tk) - y_{mess}(tk)$  (Normalverteilung der Messung)
- In der PDVA werden zunächst zwischen zwei Positions-Wegpunkten jeweils die Spur-Längen und die Spur-Winkel berechnet:
  - $\Delta x(tk) = x(tk) - x(tk-1)$  (Normalverteilung)
  - $\Delta y(tk) = y(tk) - y(tk-1)$  (Normalverteilung)
  - $\Delta L(tk) = \text{SQRT}[\Delta x(tk)^2 + \Delta y(tk)^2]$  (unbekannte Verteilung)
  - $\Delta \Phi(tk) = \text{ARCTAN}[\Delta y(tk) / \Delta x(tk)]$  (unbekannte Verteilung)
- Daraus ergeben sich „neue“ Residuen aus den Sollwert-Deltas und den Messwert-Deltas:
  - $e\Delta L(tk) = \Delta L_{soll}(tk) - \Delta L_{mess}(tk)$  (unbekannte Verteilung)
  - $e\Delta \Phi(tk) = \Delta \Phi_{soll}(tk) - \Delta \Phi_{mess}(tk)$  (unbekannte Verteilung)



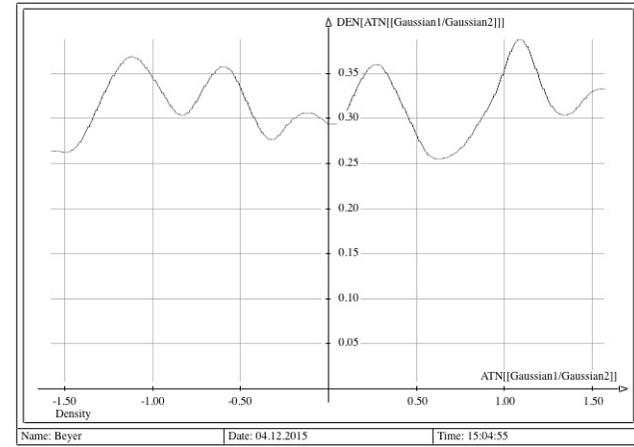
- Die Vorteile der PDVA
  - Enthält die Beschreibung der Fahrzeugdynamik (Koppelnavigation)
  - Offsets werden in jedem Rechenschritt „genullt“ (auch Anfangsbias)
  - Random Walk wird eliminiert (nur reines Wegsegment-Rauschen)
  - Fehlerparameter  $e_{Azi}$  und  $e_{Skf}$  können direkt identifiziert werden
- Ein (tolerierbarer) Nachteil
  - Durch die Subtraktion verdoppelt sich die Positions-Kovarianz des Differenzmess-Signals; die Normalverteilung bleibt aber erhalten
- Herausforderungen
  - Einfluss der Rückkopplung bei der Positionsstützung ( $g = \text{„gain“}$ )
  - Stochastische Verarbeitung der nichtlinearen Gleichungen
    - Form der Verteilung hängt von Wegsegmentlänge  $\Delta L$  und Streuung ab
    - Form der Verteilung variiert (Normalverteilung ist nicht mehr garantiert)
    - Ich verwende Approximationen zur Mischung der Verteilungen

# Fehlerverteilungen der Vektorparameter

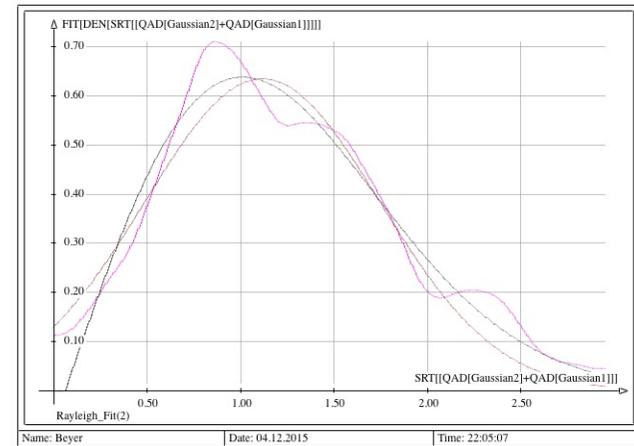
- Kurswinkel Fehler-Statistik eAzi
  - Normal sigma (gültig für  $\Delta L \gg \sigma$ )
    - $\sigma_N [\text{rad}] = \sqrt{2/\Delta L} \sigma$
  - Uniform sigma (gültig für  $\Delta L = 0$ )
    - $\sigma_U [\text{rad}] = \pi/\sqrt{12}$
  - Mixture sigma Approximation
    - $\sigma_M [\text{rad}] \approx \sigma_N + \exp(-1.1/\sigma_N) [\sigma_U - \sigma_N]$
- Skalenfaktor Fehler-Statistik eSkf
  - Normal mean (gültig für  $\Delta L \gg \sigma$ )
    - $\mu_N [\%] = 0$
  - Normal sigma (gültig für  $\Delta L \gg \sigma$ )
    - $\sigma_N [\%] = 100 \sigma_N$
  - Rayleigh mean (gültig für  $\Delta L = 0$ )
    - $\mu_R [\%] = \sigma_{N\%} \text{sqrt} [\pi/2]$
  - Rayleigh sigma (gültig für  $\Delta L = 0$ )
    - $\sigma_R [\%] = \sigma_{N\%} \text{sqrt} [2-\pi/2]$
  - Mixture mean Approximation
    - $\mu_M [\%] \approx \mu_{R\%} [\sigma_N / (2.3+\sigma_N)]$
  - Mixture sigma Approximation
    - $\sigma_M [\%] \approx \sigma_{N\%} [1 - (1-\text{sqrt} [2-\pi/2]) \exp(-0.15/\sigma_N)]$

Problem  
des Anhaltens  
 $\Delta L = V_0 \Delta t$

Problem  
des Anhaltens  
 $\Delta L = V_0 \Delta t$

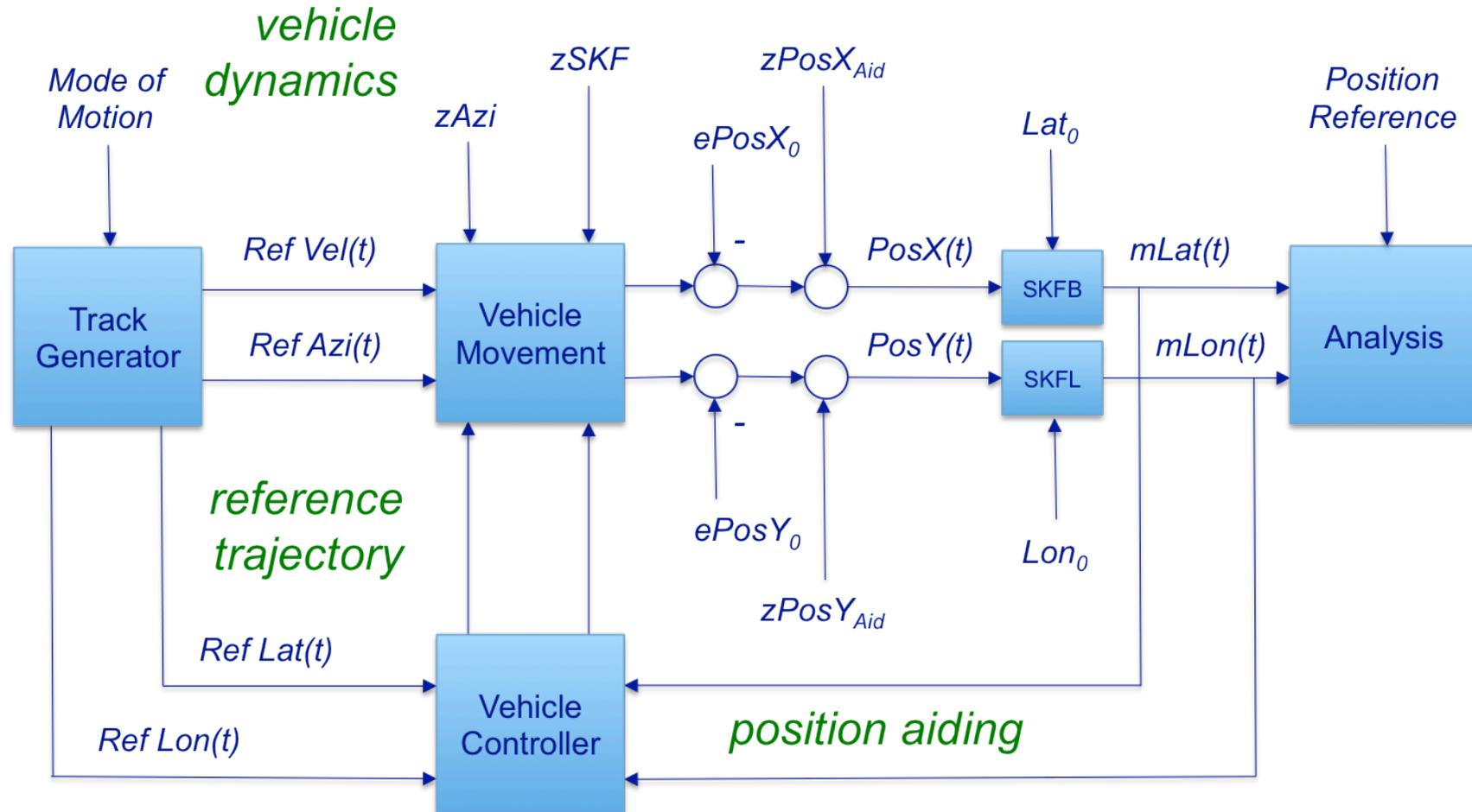


Uniform distribution of vector angle

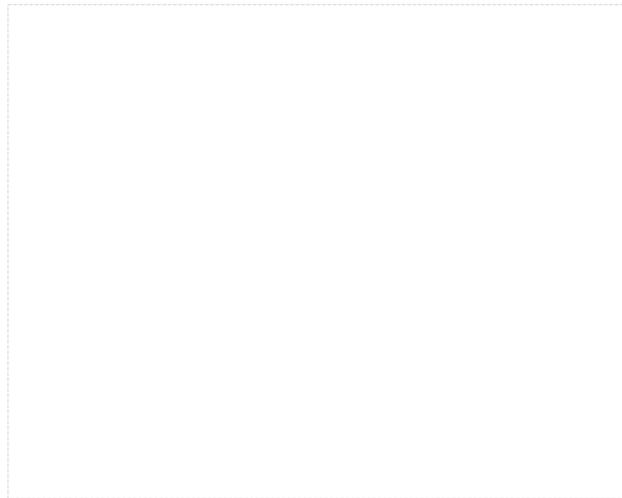


Rayleigh and Normal distribution of vector length

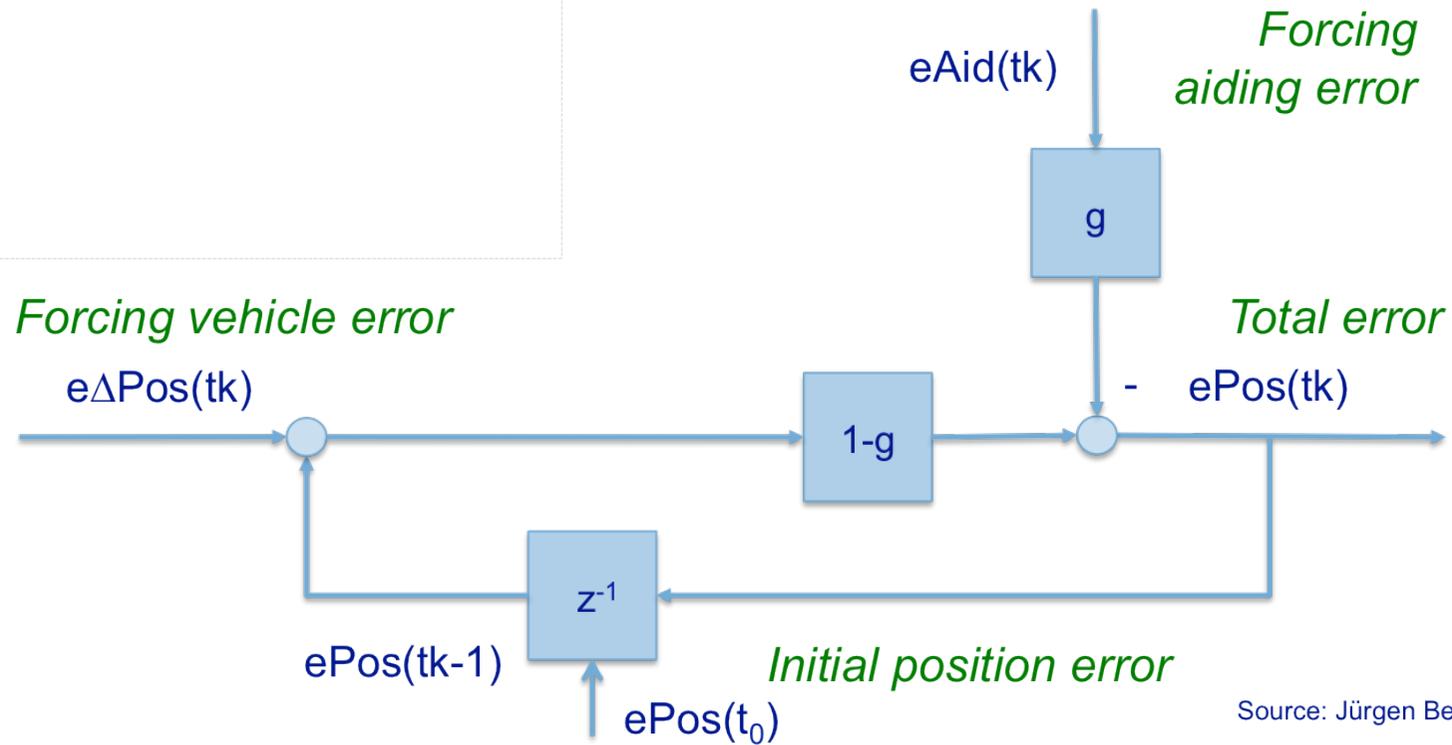
## Strukturmodell der Hybridnavigation



# Stochastisches Hybrid-Fehlermodell



*Hybrid error model block diagram*



Mittelwert-Übertragungsfunktion @  $t_e = N \Delta t$ :

$$\mu_{ePos}(te) = \frac{1-g}{g} \cdot (1 - e^{-g \cdot N}) \cdot \sqrt{\overline{RC}_{eAzi}^2 + \overline{RC}_{eSkf}^2 + \overline{RC}_{eAid}^2} \cdot V_0 \Delta t$$

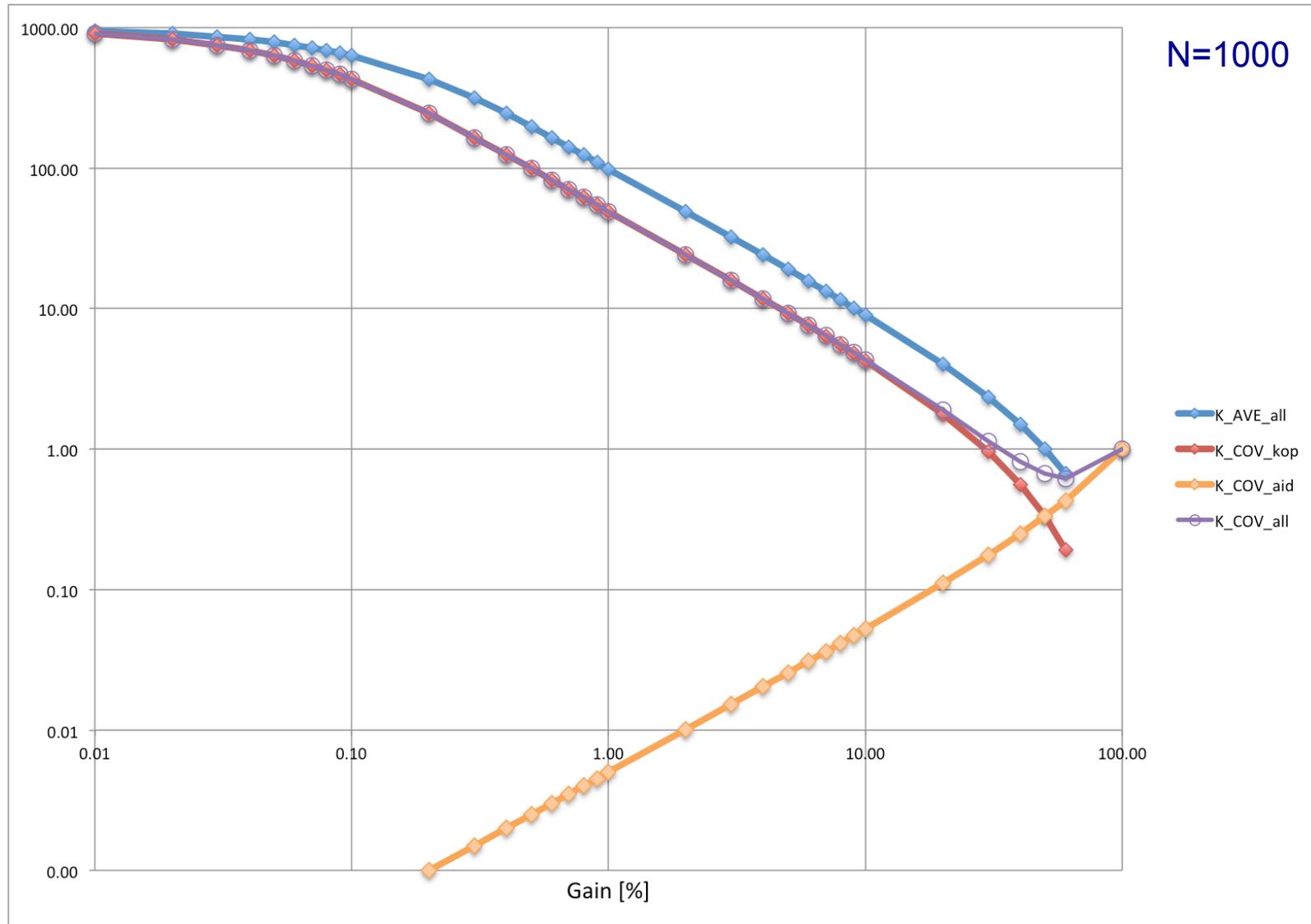
mit  $\overline{RC}_{eAid} \approx \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \tilde{\sigma}_{eAid} \cdot \frac{\tilde{\sigma}_{eAid}}{2.3 + \tilde{\sigma}_{eAid}}$  und  $\tilde{\sigma}_{eAid} = \sigma_{eAid} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot g}{V_0 \Delta t}$

Kovarianz-Übertragungsfunktion @  $t_e = N \Delta t$ :

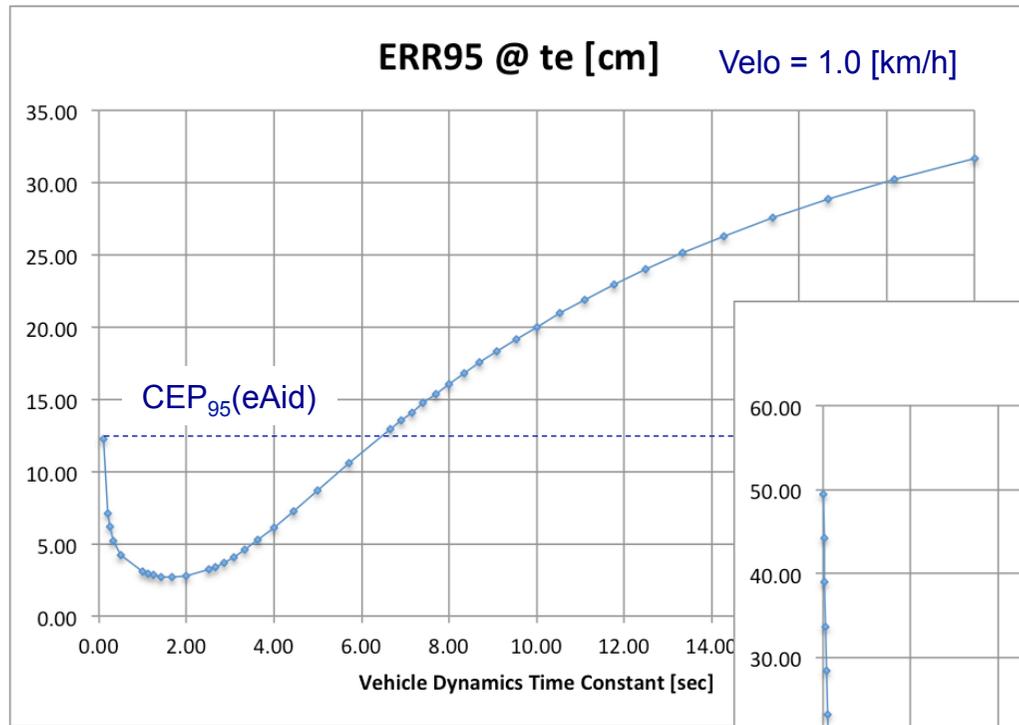
$$P_{ePos}(te) = \frac{(1-g)^2}{(2-g) \cdot g} \cdot (1 - e^{-g \cdot (2-g) \cdot N}) \cdot (\sigma_{eAzi}^2 + \sigma_{eSkf}^2) \cdot (V_0 \Delta t)^2 + \frac{g^2}{(2-g) \cdot g} \cdot \sigma_{eAid}^2$$

Source: Jürgen Beyer

## Hybrid-Fehlermodell Analyse

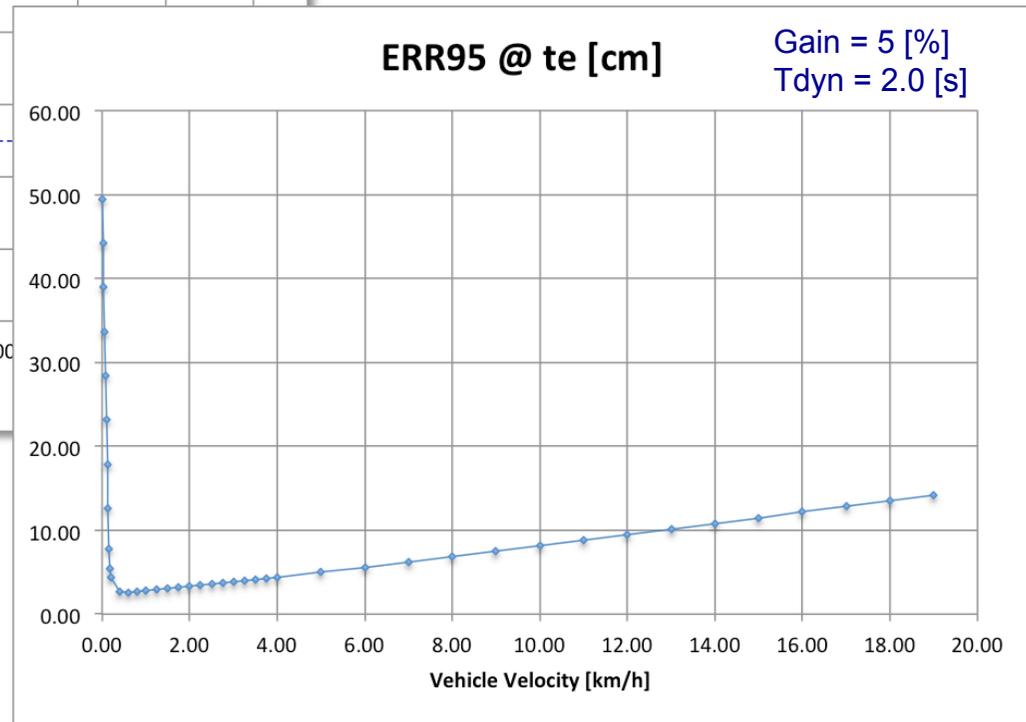


## Hybrid-Fehlermodell Analyse



dt = 0.1 [sec]  
te = 10 [sec]  
N = 100

ePos(to) = 0.5 [m]  
Ave(eAzi) = 0.5 [°]  
Ave(eSkf) = 0.5 [%]  
Sig(eAzi) = 0.5 [°]  
Sig(eSkf) = 0.5 [%]  
Sig(eAid) = 0.05 [m]



Source: Jürgen Beyer

## Hybrid-Fehlermodell Analyse

dt [sec]	te [sec]
0.10	10.00
100.00	1.253314
Velo (0-5) [m/s]	Gain (0-100) [%]
0.278	5.00
0.027778	0.050000
19.000000	0.097500
ErrPos(to) [m]	T_Dyn [sec]
0.50	2.00
Ave(Azi) [°]	Ave(eSkf) [%]
0.50	0.50
0.008727	0.005000
0.010058	18.871979
Sig(eAzi) [°]	Sig(eSkf) [%]
0.50	0.50
0.008727	0.005000
0.000101	0.902447
Sig(eAid) [m]	CEP95 Aid [cm]
0.05	12.254
0.008365	0.002500
0.002500	0.013081

Error budget calculation @ te = 10 [sec]

Error Source	ERR95 [cm]	Share
ErrPos(to)	0.281	9.68%
Ave(eAzi)	0.435	9.98%
Sig(eAzi)	0.181	0.57%
Ave(eSkf)	0.249	3.28%
Sig(eSkf)	0.104	0.19%
Ave(eAid)	0.417	9.17%
Sig(eAid)	1.962	67.15%
Sum	2.906	100.00%

Error budget calculation @ te = 30 [sec]

Error Source	ERR95 [cm]	Share
ErrPos(to)	0.000	0.00%
Ave(eAzi)	0.438	11.10%
Sig(eAzi)	0.181	0.63%
Ave(eSkf)	0.251	3.64%
Sig(eSkf)	0.104	0.21%
Ave(eAid)	0.419	10.20%
Sig(eAid)	1.962	74.22%
Sum	2.629	100.00%

Source: Jürgen Beyer

# Hybrid-Fehlermodell Analyse

## Position errors and influence of the dominant error sources

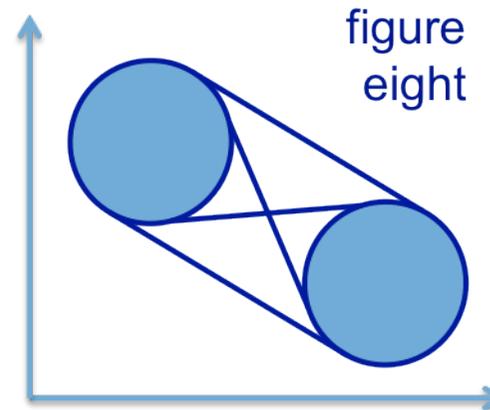
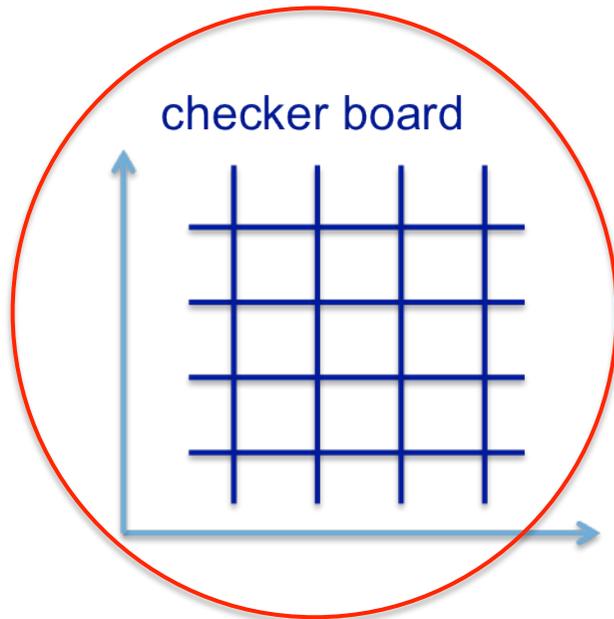
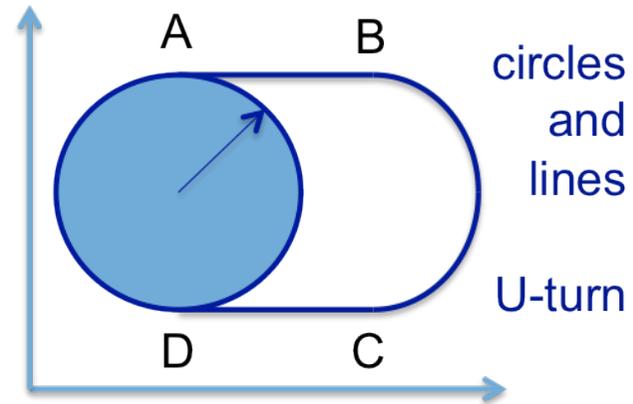
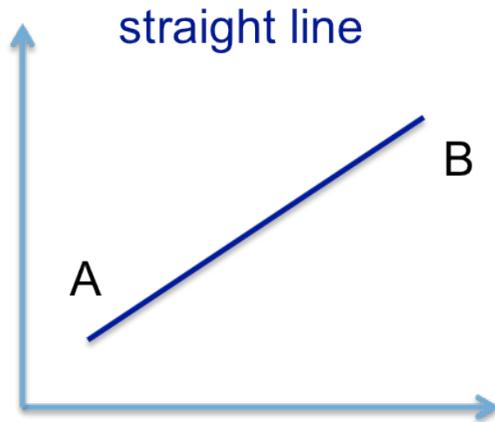
	Measurement duration	short 5 [sec]	medium 10 [sec]	long ≥ 20 [sec]
Vehicle velocity	ultra low speed 1 [km/h]	6.2 [cm] (95%)	2.91 [cm] (95%)	2.63 [cm] (95%)
		Q1 59% Q2 6% Q3 35%	Q1 10% Q2 14% Q3 76%	Q1 0% Q2 16% Q3 84%
	low speed 5 [km/h]	8.2 [cm] (95%)	5 [cm] (95%)	4.75 [cm] (95%)
		Q1 45% Q2 35% Q3 20%	Q1 6% Q2 59% Q3 35%	Q1 0% Q2 64% Q3 36%
	medium speed 10 [km/h]	11.14 [cm] (95%)	8.15 [cm] (95%)	7.9 [cm] (95%)
		Q1 33% Q2 55% Q3 12%	Q1 3% Q2 80% Q3 17%	Q1 0% Q2 83% Q3 17%
	high speed 15 [km/h]	14.28 [cm] (95%)	11.48 [cm] (95%)	11.26 [cm] (95%)
		Q1 26% Q2 67% Q3 7%	Q1 3% Q2 88% Q3 9%	Q1 0% Q2 91% Q3 9%

Q1: Portion initial position error (re-start deviation)

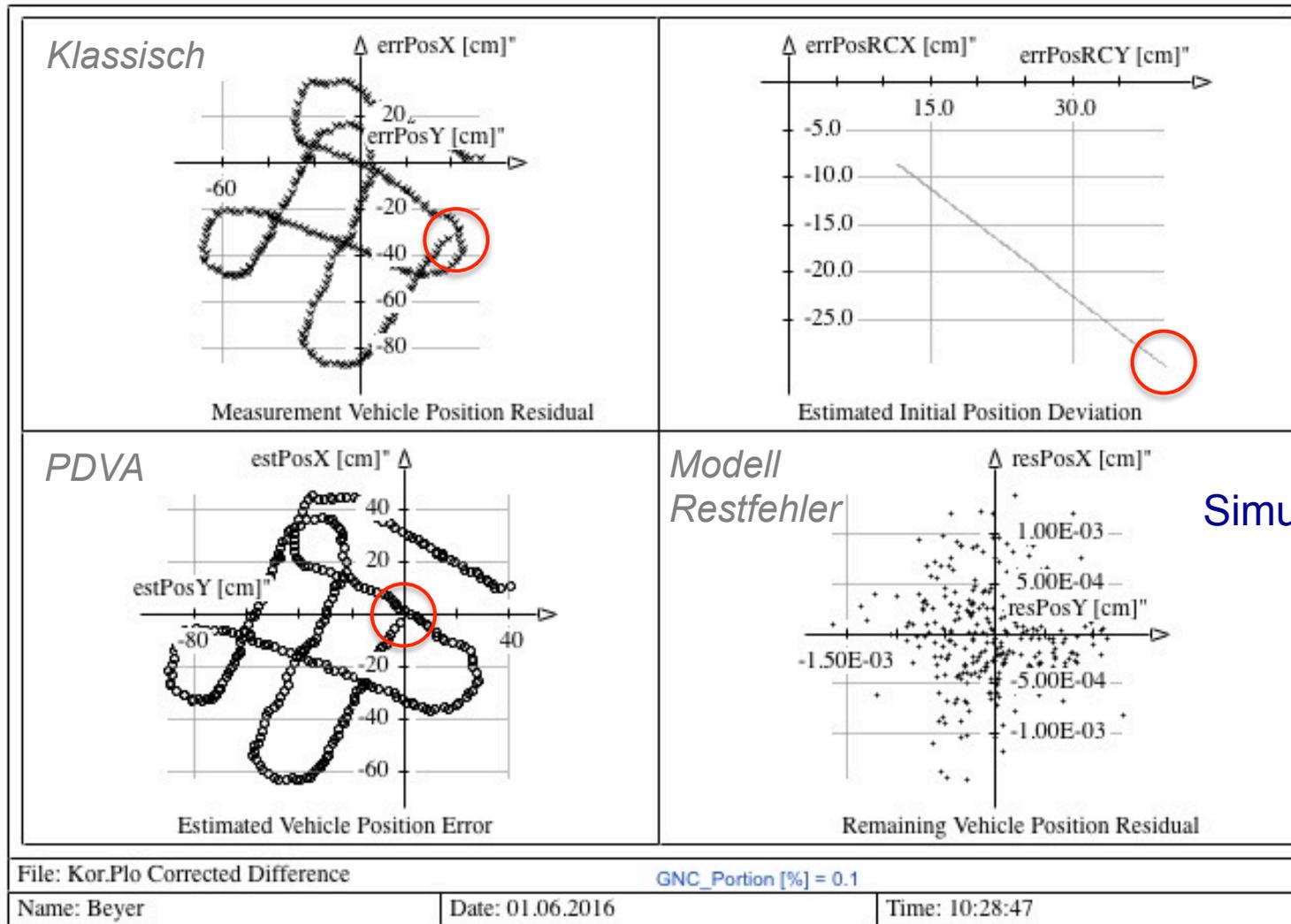
Q2: Portion vehicle error (slippage, direction)

Q3: Portion aiding error (DGPS position)

# Test Trajektorie

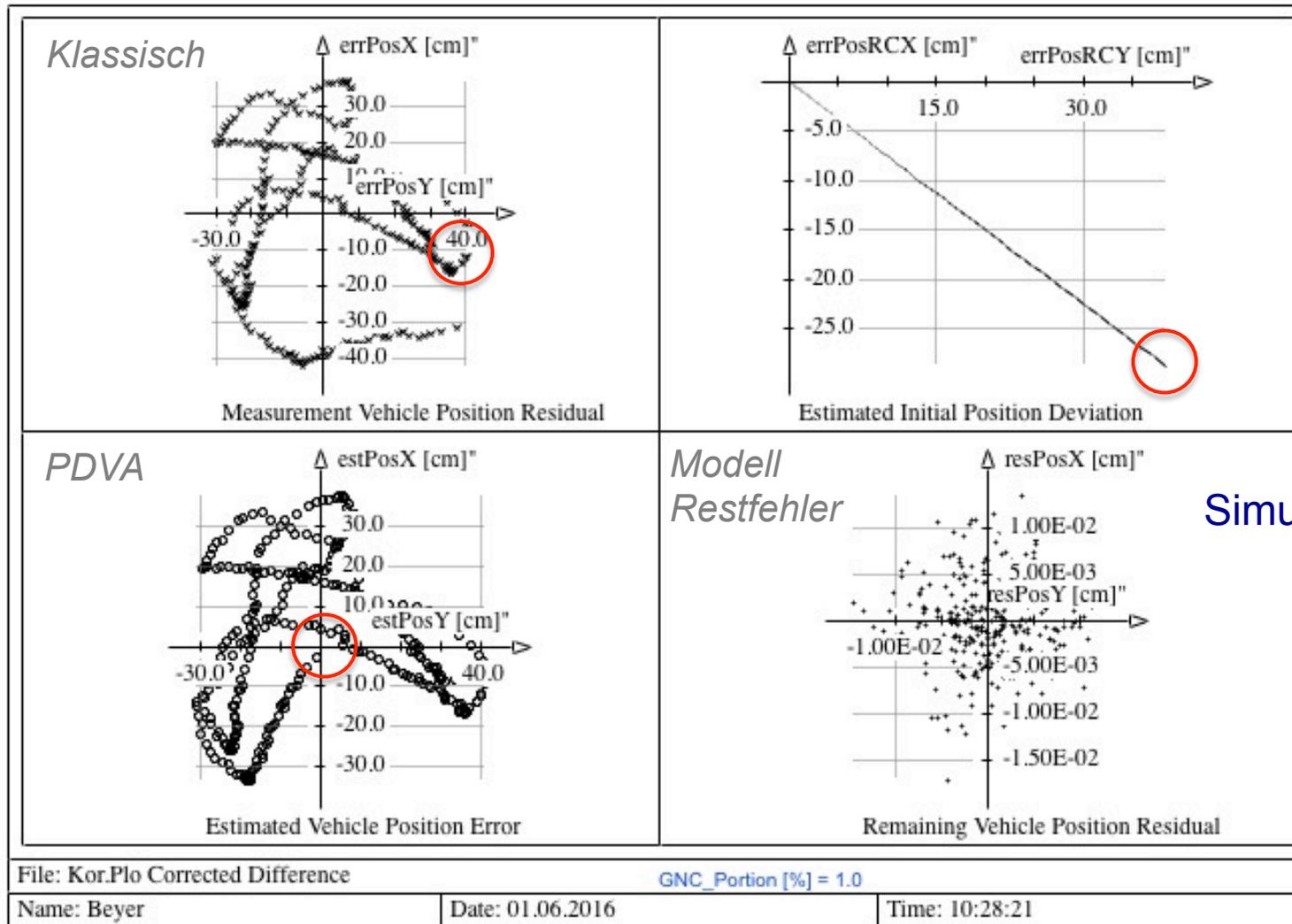


# GNC Portion 0.1 [%] (fast ungestützt)



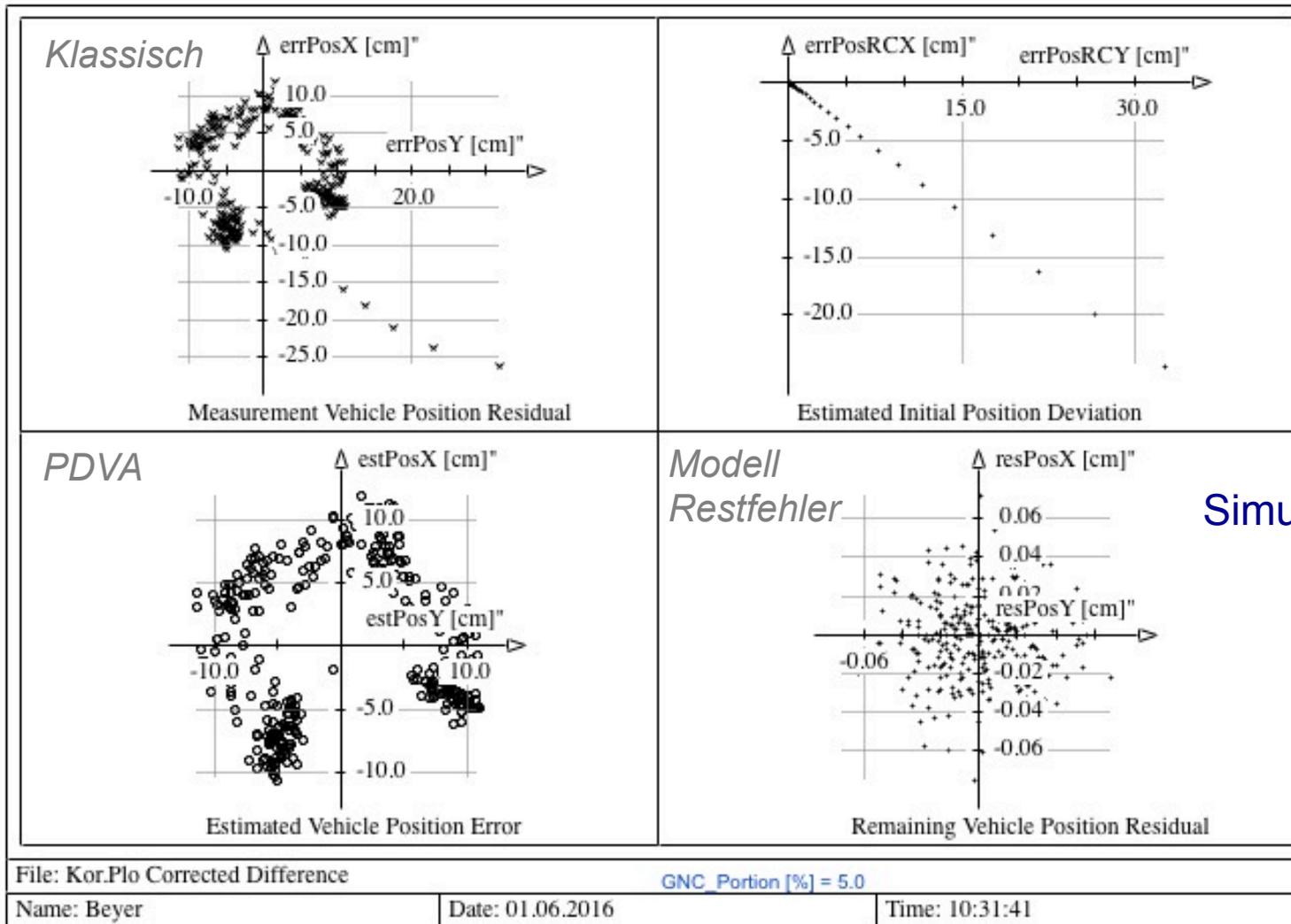
Simulation

# GNC Portion 1.0 [%] (minimal gestützt)



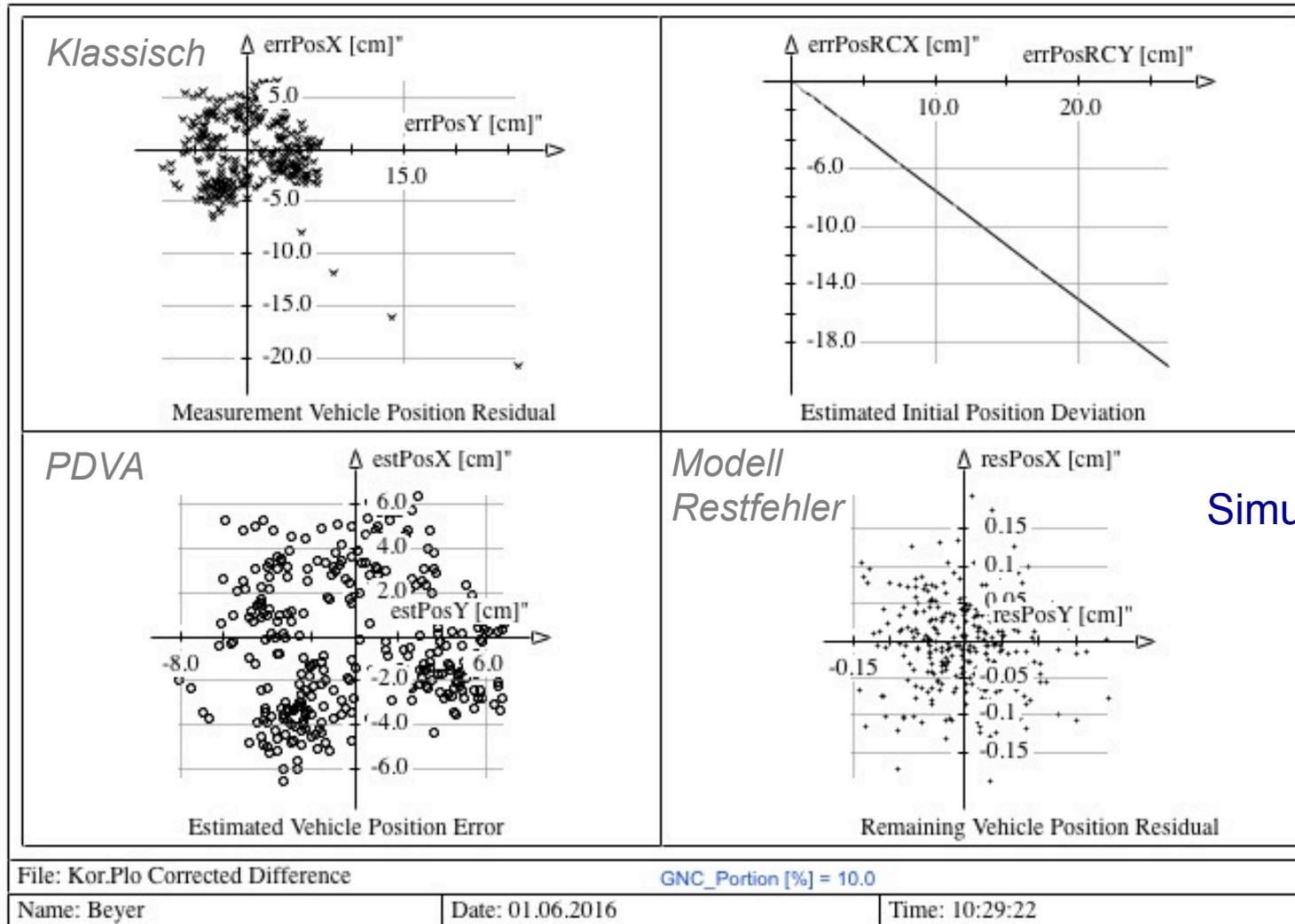
Simulation

# GNC Portion 5.0 [%] (gering gestützt)



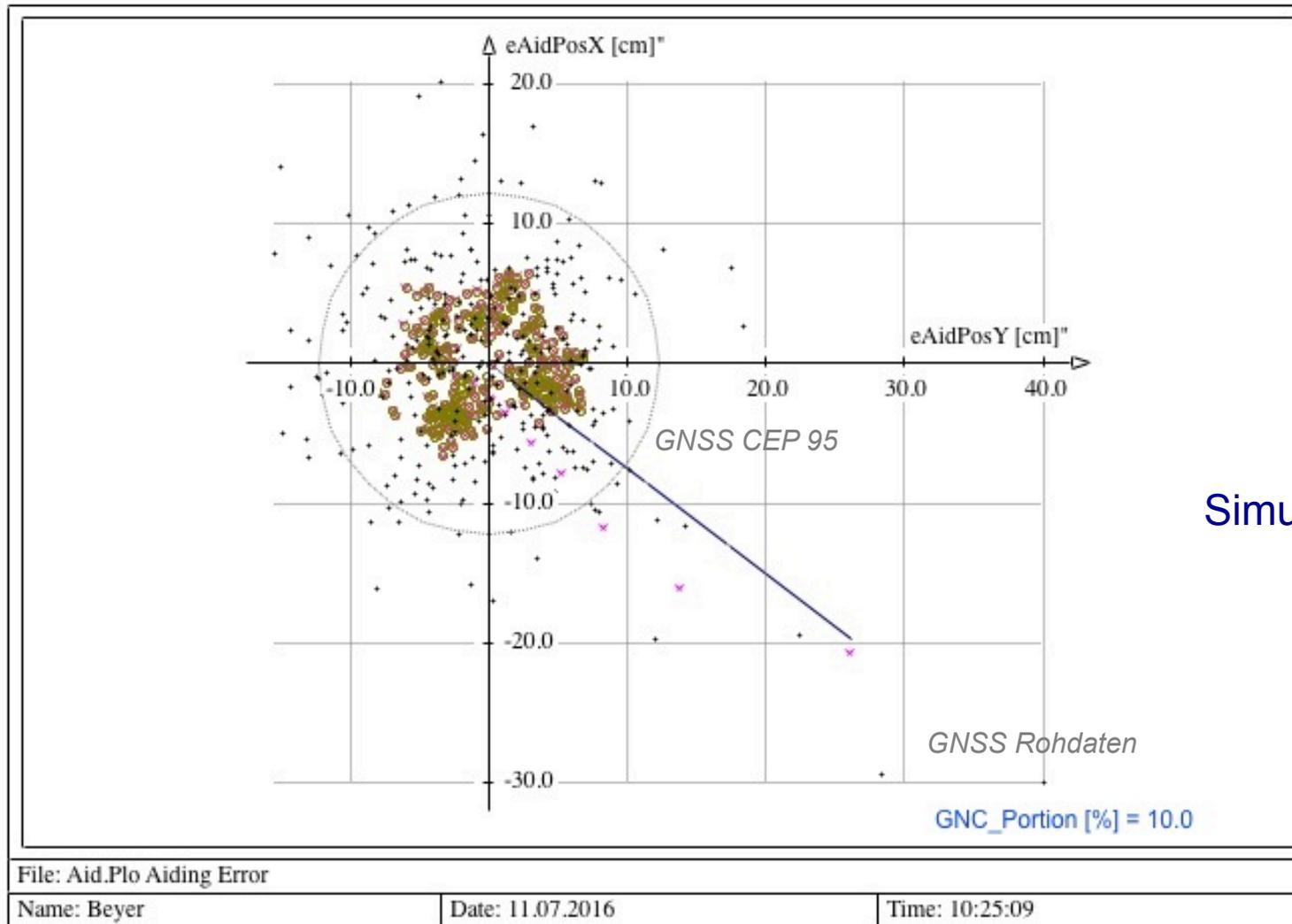
Simulation

# GNC Portion 10.0 [%] (typischer Wert)



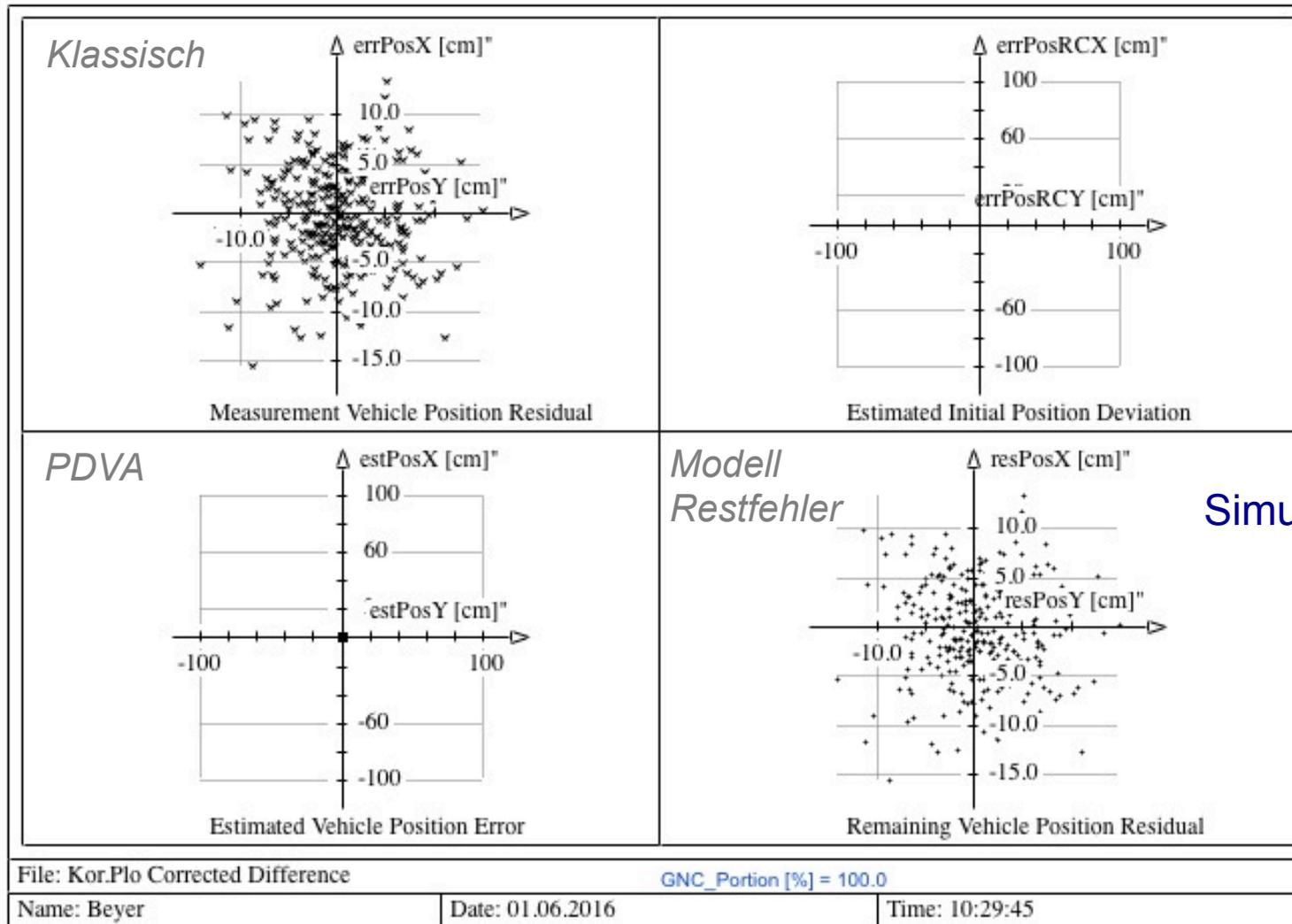
Simulation

# GNC Portion 10.0 [%] (typischer Wert)



Simulation

# GNC Portion 100.0 [%] (theoretisch)



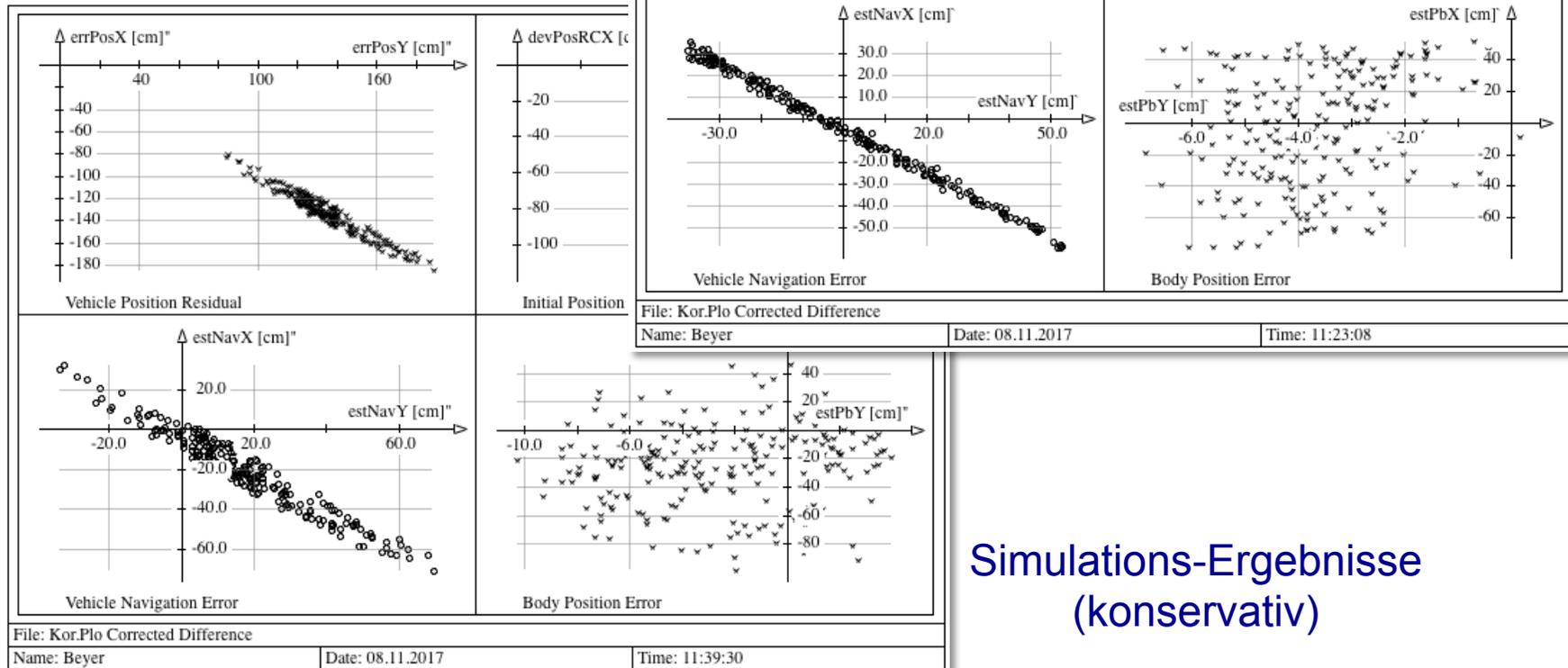
Simulation

# Vergleich von Messung und Simulation

## Mess-Ergebnisse

filed test run 'AB DLG 2013 No1.Pos'

## Trajektorie: A-B Linie



Simulations-Ergebnisse  
(konservativ)

- Aufgabe: Beurteilung der GNC Systemqualität durch eine modellbasierte PDV-Analyse (hier für Landfahrzeuge)
- Fortschritt und Nutzen
  - Elimination von Offset und Random Walk in den Residuen
  - Zerlegung der Residuen und Isolation spezifizierter Fehler
  - Höhere Signifikanz und Robustheit der Fehlerschätzungen
  - Verknüpfbarkeit simulierter (fiktiver) und realer Messsignale
    - Validierung der Testanalyse („test the test“) mit Qualitätsmaß
    - Kostengünstige Erweiterung des Testverfahrens (Variationen)
    - Auswertung und Beurteilung auch nicht-normalverteilter Fehler
- Wichtige Erkenntnisse
  - Fahrzeugpositionsfehler sind nicht identisch mit GNSS Fehlern
  - Normalverteilung der Fehlersignale ist nicht garantiert (→ Statistik)
  - Einfluss der Fahrzeugparameter auf Trajektorien (Fehler-Plot)
  - Problem des Anhaltens ist ungelöst (Regelung, Stochastik)

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyer  
control engineering  
navigation, mobility  
principal Nav42

Bahnhofstrasse 67  
D-64653 Lorsch  
Mobil: 0178-633 4891

[beyer.kroton42@t-online.de](mailto:beyer.kroton42@t-online.de)  
[beyer@fsr.tu-darmstadt.de](mailto:beyer@fsr.tu-darmstadt.de)  
[juergen.beyer@kit.edu](mailto:juergen.beyer@kit.edu)

Text, images, graphics, and all code in this presentation are protected by International Copyright Laws, and may not be copied, reprinted, published, translated, hosted, or otherwise distributed by any means without explicit written permission of the author