

Contents

1 Fehlerfortpflanzung in Lokalisierungssystemen für Schienenfahrzeuge	2
1.1 Methodisches Vorgehen und Fehleranalyse	2
1.2 Zusammenfassung	2
1.3 Inhaltsverzeichnis	2
1.3.1 1. Einleitung und Zielsetzung	2
1.3.2 2. Systemarchitektur und Betriebsprofil	2
1.3.3 3. Informationsverarbeitungspfade	2
1.3.4 4. Fehlermodellierung und -quantifizierung	2
1.3.5 5. Monte-Carlo-Simulationsansatz	3
1.3.6 6. Erwartete Ergebnisse und Bewertungskriterien	3
1.3.7 7. Implementierung und Reproduzierbarkeit	3
1.3.8 8. Zeitplan und Ressourcenbedarf	3
1.4 1. Einleitung und Zielsetzung	3
1.4.1 1.1 Problemstellung und Motivation	3
1.4.2 1.2 Systemkontext und Sicherheitsanforderungen	3
1.4.3 1.3 Methodischer Ansatz	4
1.4.4 1.4 Abgrenzung und Annahmen	4
1.5 2. Systemarchitektur und Betriebsprofil	4
1.5.1 2.1 Hybride Lokalisierungsarchitektur	4
1.5.2 2.2 Sicherer vs. nicht-sicherer Pfad	5
1.5.3 2.3 Betriebsparameter und Einsatzszenarien	5
1.5.4 2.4 Fusionsansatz und Datenverarbeitung	5
1.6 3. Informationsverarbeitungspfade	5
1.6.1 3.1 Balisen-basierte Lokalisierung	5
1.6.2 3.2 Odometrische Positionsbestimmung	6
1.6.3 3.3 Digitale Karten-Referenzierung	7
1.6.4 3.4 GNSS-gestützte Positionierung	7
1.6.5 3.5 IMU-basierte Trägheitsnavigation	7
1.7 4. Fehlermodellierung und -quantifizierung	8
1.7.1 4.1 Systematische Fehleridentifikation	8
1.7.2 4.2 Konsolidierte Fehlerparametertabelle	8
1.7.3 4.3 Korrelationen zwischen Fehlerquellen	9
1.7.4 4.4 Zeitabhängige Fehlerfortpflanzung	10
1.8 5. Unterscheidung: Sicherer und unsicherer Lokalisierungspfad	10
1.8.1 5.1 Sicherer Pfad (SIL1-relevant)	10
1.8.2 5.2 Unsicherer Pfad (Präzisionserweiterung)	10
1.8.3 5.3 Fehlerfortpflanzung im Gesamtsystem	11
1.9 6. Methodische Umsetzung und nächste Schritte	11
1.9.1 6.1 Monte-Carlo-Simulationsansatz	11
1.9.2 6.2 Erwartete Zielmetriken	11
1.9.3 6.3 Implementierung und Reproduzierbarkeit	12
1.9.4 6.4 Erwarteter Berichtumfang	12
1.10 7. Stakeholder-Feedback und Freigabe	12

1 Fehlerfortpflanzung in Lokalisierungssystemen für Schienenfahrzeuge

1.1 Methodisches Vorgehen und Fehleranalyse

Projekt: ErrorPropagation_Localisation

Erstellt: 6. Oktober 2025

Status: Vorläufiger Bericht zur Stakeholder-Abstimmung

Sicherheitskontext: SIL1-relevante Lokalisierung

1.2 Zusammenfassung

Dieser Bericht beschreibt das methodische Vorgehen zur systematischen Analyse der Fehlerfortpflanzung in hybriden Lokalisierungssystemen für Schienenfahrzeuge. Das Ziel ist die quantitative Bewertung der Positionsgenauigkeit unter Berücksichtigung aller relevanten Fehlerquellen und deren Wechselwirkungen mittels Monte-Carlo-Simulation.

Das untersuchte System kombiniert sichere (Balisen, Odometrie, digitale Karte) und nicht-sichere Lokalisierungspfade (GNSS, IMU) zur präzisen Positionsbestimmung im Geschwindigkeitsbereich 0-60 km/h. Die Analyse fokussiert auf longitudinale Positionsgenauigkeit mit der Zielforderung $RMSE < 0.20$ m im nominalen Betrieb.

1.3 Inhaltsverzeichnis

1.3.1 1. Einleitung und Zielsetzung

- 1.1 Problemstellung und Motivation
- 1.2 Systemkontext und Sicherheitsanforderungen
- 1.3 Methodischer Ansatz
- 1.4 Abgrenzung und Annahmen

1.3.2 2. Systemarchitektur und Betriebsprofil

- 2.1 Hybride Lokisierungsarchitektur
- 2.2 Sicherer vs. nicht-sicherer Pfad
- 2.3 Betriebsparameter und Einsatzszenarien
- 2.4 Fusionsansatz und Datenverarbeitung

1.3.3 3. Informationsverarbeitungspfade

- 3.1 Balisen-basierte Lokalisierung
- 3.2 Odometrische Positionsbestimmung
- 3.3 Digitale Karten-Referenzierung
- 3.4 GNSS-gestützte Positionierung
- 3.5 IMU-basierte Trägheitsnavigation

1.3.4 4. Fehlermodellierung und -quantifizierung

- 4.1 Systematische Fehleridentifikation
- 4.2 Stochastische Fehlermodelle

- 4.3 Korrelationen zwischen Fehlerquellen
- 4.4 Zeitabhängige Fehlerfortpflanzung

1.3.5 5. Monte-Carlo-Simulationsansatz

- 5.1 Simulationsarchitektur
- 5.2 Parametrisierung und Konfiguration
- 5.3 Validierungsstrategien
- 5.4 Sensitivitätsanalyse

1.3.6 6. Erwartete Ergebnisse und Bewertungskriterien

- 6.1 Zielmetriken und Kennzahlen
- 6.2 Statistische Auswertung
- 6.3 Visualisierung und Reporting

1.3.7 7. Implementierung und Reproduzierbarkeit

- 7.1 Software-Architektur
- 7.2 Konfigurationsmanagement
- 7.3 Qualitätssicherung

1.3.8 8. Zeitplan und Ressourcenbedarf

1.4 1. Einleitung und Zielsetzung

1.4.1 1.1 Problemstellung und Motivation

Moderne Schienenfahrzeuge setzen zunehmend auf hybride Lokalisierungssysteme, die multiple Sensor-modalitäten zur präzisen Positionsbestimmung kombinieren. Die Genauigkeit der resultierenden Positionsschätzung hängt dabei von der komplexen Wechselwirkung verschiedener Fehlerquellen ab, deren isolierte Betrachtung nicht ausreicht.

Die systematische Analyse der Fehlerfortpflanzung ist essentiell für: - Nachweis der Erfüllung von Genauigkeitsanforderungen ($RMSE < 0.20$ m longitudinal) - Identifikation kritischer Fehlerquellen und Optimierungspotentiale - Robustheitsbewertung unter verschiedenen Betriebsbedingungen - Validierung von Sicherheitsanforderungen im SIL1-Kontext

1.4.2 1.2 Systemkontext und Sicherheitsanforderungen

Das analysierte Lokalisierungssystem operiert im SIL1-Sicherheitskontext für lokalen Rangier- und Kurzstreckenbetrieb mit folgenden Charakteristika:

Betriebsprofil: - Geschwindigkeitsbereich: 0-60 km/h - Beschleunigungsbereich: $|a| \leq 0.7$ m/s² - Streckenverteilung: 70% offene Strecke, 25% urban, 5% Tunnel - Einsatzdauer: kontinuierlicher Betrieb mit hoher Verfügbarkeit

Sicherheitsrelevante Anforderungen: - Longitudinale Positionsgenauigkeit als primäre Zielmetrik - Fail-safe Verhalten bei Sensorausfällen - Nachweisbare Fehlererkennung und -behandlung - Rückverfolgbare Konfiguration und Parametrierung

1.4.3 1.3 Methodischer Ansatz

Die Fehlerfortpflanzungsanalyse basiert auf einem Monte-Carlo-Simulationsansatz mit folgenden Kernprinzipien:

1. **Systematische Fehlermodellierung:** Jede relevante Fehlerquelle wird durch geeignete statistische Verteilungen charakterisiert
2. **Korrelationsberücksichtigung:** Wechselwirkungen zwischen Fehlerquellen werden über Korrelationsmatrizen modelliert
3. **Zeitdynamische Simulation:** Fehlerfortpflanzung wird über realistische Zeithorizonte simuliert
4. **Statistische Robustheit:** Ausreichend hohe Stichprobenzahlen für stabile Perzentilschätzungen
5. **Sensitivitätsanalyse:** Systematische Variation von Parametern zur Identifikation kritischer Faktoren

1.4.4 1.4 Abgrenzung und Annahmen

Berücksichtigte Aspekte: - Quantifizierbare technische Fehlerquellen mit messbarer Positionswirkung - Normale Betriebsbedingungen und definierte Degradationsmodi - Sensorausfälle mit statistisch belegbaren Ausfallraten - Umgebungseinflüsse mit parametrisierbaren Modellen

Nicht berücksichtigt: - Extreme Wetterereignisse ohne quantifizierte Datenbasis - Organisatorische und administrative Aspekte - Seltene Systemfehler ohne statistische Relevanz - Cyber-Security-Aspekte und Manipulationsszenarien

1.5 2. Systemarchitektur und Betriebsprofil

1.5.1 2.1 Hybride Lokalisierungsarchitektur

Das Lokalisierungssystem implementiert eine hybride Architektur mit redundanten Informationsquellen zur robusten Positionsbestimmung:

Sicherer Pfad	Erweiterer Pfad
<ul style="list-style-type: none">• Balisen• Odometrie• Digitale Karte	<ul style="list-style-type: none">• GNSS• IMU• Fusion-Proxy

Zentrale Fusion
(EKF-basiert)

Positionsausgang
(x, y, , t)

1.5.2 2.2 Sicherer vs. nicht-sicherer Pfad

Sicherer Pfad (SIL1-relevant): - **Balisen (BRV4):** Ereignis-getriggte absolute Positionsanker mit Referenz zur digitalen Karte - **Odometrie:** Zwei-Achsen-System an nicht-angetriebener, nicht-gebremster Achse zur Schlupfminimierung - **Digitale Karte:** Präzise Gleisgeometrie und Referenzpunkte als Projektionsbasis

Nicht-sicherer Pfad (Präzisionserweiterung): - **GNSS:** Satellitennavigation mit umgebungsabhängiger Verfügbarkeit - **IMU:** Trägheitssensoren zur Überbrückung von Sensorausfällen - **Fusions-Proxy:** Vereinfachter EKF zur Sensordatenkombination

1.5.3 2.3 Betriebsparameter und Einsatzszenarien

Die Lokalisierungsgenauigkeit variiert signifikant mit den Betriebsbedingungen:

Umgebung	Anteil	GNSS-Verfügbarkeit	Balisen-Dichte	Charakteristische Herausforderungen
Open	70%	Hoch (~99%)	Standard	Minimale Abschattung, optimale Sensorperformance
Urban	25%	Reduziert (~95%)	Erhöht	Multipath, elektromagnetische Störungen
Tunnel	5%	Nicht verfügbar	Maximal	GNSS-Ausfall, reduzierte Kommunikation

1.5.4 2.4 Fusionsansatz und Datenverarbeitung

Die zentrale Fusion implementiert einen vereinfachten Extended Kalman Filter (EKF) mit folgenden Eigenschaften:

- **Zustandsvektor:** Position (x,y), Geschwindigkeit (vx,vy), Beschleunigung (ax,ay)
- **Prädiktionsmodell:** Konstante Beschleunigung mit additiven Prozessfehlern
- **Messmodelle:** Individuelle Beobachtungsgleichungen pro Sensormodalität
- **Latenzbehandlung:** Zeitstempel-Synchronisation und Verzögerungskompensation

1.6 3. Informationsverarbeitungspfade

1.6.1 3.1 Balisen-basierte Lokalisierung

1.6.1.1 3.1.1 Funktionale Beschreibung Das Balisensystem (BRV4) stellt absolute Positionsreferenzen über elektromagnetische Kopplung bereit. Der Verarbeitungspfad umfasst:

1. **Signaldetektion:** Fahrzeugantenne detektiert Balisensignal beim Überfahren
2. **Telegramm-Dekodierung:** Extraktion der Balisen-ID und Zusatzdaten
3. **Zeitstempel-Erfassung:** Präzise Zeitmessung des Detektionsereignisses
4. **Kartenabgleich:** Zuordnung Balisen-ID → Karten-Referenzposition
5. **Latenzkorrektur:** Kompensation von Verarbeitungs- und Kommunikationsverzögerungen

1.6.1.2 3.1.2 Mathematisches Fehlermodell Die Balisen-Positionsschätzung wird durch folgende Fehlerkomponenten beeinflusst:

Longitudinaler Positionsfehler:

$$\text{_balise_längs} = v_{\text{fzg}} \cdot t_{\text{latenz}} + \text{_antenne_längs} + \text{_signal} + \text{_karte_längs}$$

Wobei:

- v_{fzg} : Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]
- $t_{\text{latenz}} \sim N(10\text{ms}, 2\text{ms}) \text{ trunc}[6\text{ms}, 14\text{ms}]$: Verarbeitungslatenz
- $\text{_antenne_längs} \sim N(0, 0.02\text{m})$: Antennenpositionsoffset
- _signal : Signalqualitäts- und Umgebungseffekte (siehe Tabelle 4.1)
- $\text{_karte_längs} \sim N(0, 0.019\text{m})$: Kartenreferenzfehler

Lateraler Positionsfehler:

$$\text{_balise_quer} = \text{_antenne_quer} + \text{_signal_quer} + \text{_karte_quer}$$

Mit vereinfachtem Signalmodell (ohne Latenzterm):

- $\text{_antenne_quer} \sim N(0, 0.02\text{m})$
- _signal_quer : Reduzierte Signaleffekte
- $\text{_karte_quer} \sim N(0, 0.014\text{m})$

1.6.1.3 3.1.3 Ausfallmodellierung Balisen-Ausfälle werden über ein Zwei-Zustand Markov-Modell beschrieben:

- **OK-Zustand:** $p_{\text{detect}} = 0.99995$ (sporadische Ausfälle $p_{\text{miss}} = 5 \times 10^{-5}$)
- **DEGRADED-Zustand:** $p_{\text{detect}} = 0.95$ (systematische Störungen)
- **Übergangswahrscheinlichkeiten:** $p(\text{OK} \rightarrow \text{DEG}) = 10^{-5}$, $p(\text{DEG} \rightarrow \text{OK}) = 0.01$

1.6.2 3.2 Odometrische Positionsbestimmung

1.6.2.1 3.2.1 Funktionale Beschreibung Das Odometriesystem ermittelt relative Positionsänderungen über Radimpulszählung:

1. **Impulzzählung:** Encoder erfasst Radumrandungen (typisch 100 Impulse/Umdrehung)
2. **Quantisierung:** Diskretisierung auf Impulsbasis ($\Delta s = 13.4\text{mm}$ bei 1.34m Radumfang)
3. **Skalierungskorrektur:** Adaptive Umfangsanpassung basierend auf Balisenabständen
4. **Integration:** Kumulation der Wegstrecke zwischen Balisen-Ankern
5. **Rückstellung:** Nullstellung des akkumulierten Fehlers bei jeder Balisen-Detektion

1.6.2.2 3.2.2 Mathematisches Fehlermodell Segmentfehler zwischen Balisen:

$$\text{_odo_segment} = \Sigma(\text{_quant_i}) + \text{_drift_segment} + \text{_umfang_residual}$$

Komponenten:

- $\text{_quant_i} \sim U(-\Delta s/2, \Delta s/2)$: Quantisierungsfehler pro Increment
- $\text{_drift_segment} \sim N(0, (0.010 \text{ m/km}) \cdot d_{\text{segment}})$: Systematischer Drift
- $\text{_umfang_residual} \sim U(-0.03\text{m}, 0.03\text{m})$: Verbleibender Umfangsfehler nach Kalibrierung

RMS-Fehler für 1km Segment: - Quantisierung: $\sim 4.5\text{mm}$ (dominante Varianzquelle $\sim 65\%$) - Drift: $\sim 10\text{mm}$ vor Kalibrierung - Residual-Umfang: $\sim 17\text{mm}$ ($\pm 30\text{mm}$ Bereich)

Zeitliche Fehlerentwicklung: Der Odometriefehler wächst kontinuierlich zwischen Balisen und wird bei jeder Balisen-Detektion zurückgesetzt, wodurch unbegrenzte Fehlerakkumulation verhindert wird.

1.6.3 3.3 Digitale Karten-Referenzierung

1.6.3.1 3.3.1 Funktionale Beschreibung Die digitale Karte stellt die geometrische Reference für alle Lokalisierungskomponenten bereit:

1. **Gleisgeometrie:** Präzise 3D-Modellierung der Schienenverläufe
2. **Referenzpunkte:** Definierte Koordinaten für Balisen und kritische Infrastruktur
3. **Interpolation:** Berechnung von Zwischenpositionen zwischen Stützpunkten
4. **Projektion:** Abbildung aller Sensormessungen auf das Gleiskoordinatensystem

1.6.3.2 3.3.2 Mathematisches Fehlermodell Geometrische Basisfehler:

`_karte_basis_längs ~ N(0, 0.020m): Vermessungsungenauigkeit Gleisachse`
`_karte_basis_quer ~ N(0, 0.015m): Kombiniertes Höhen-/Querverfahren`

Interpolationsfehler:

`_interpolation ~ Exp(=0.02) trunc[0, 0.05m]: Fehler zwischen Stützpunkten`
Gewichtung: `w_interp = 0.3` (30% Anteil am Gesamtfehler)

Skalierungsfehler:

`_skalierung = _skala * d_strecke`
`_skala ~ N(0, 6*10^-6): Proportionaler Skalierungsfehler (0.06%)`
Relevanz: Nur bei Strecken > 2km signifikant

Räumliche Korrelation: Kartenfehler weisen exponentielle Korrelation auf: $\text{Cov}(r_1, r_2) = \sigma^2 \cdot \exp(-|r_1 - r_2|/r_c)$ mit $r_c = 75\text{m}$

1.6.4 3.4 GNSS-gestützte Positionierung

1.6.4.1 3.4.1 Funktionale Beschreibung Das GNSS-System liefert absolute Positionsinformation mit umgebungsabhängiger Verfügbarkeit und Genauigkeit:

1. **Signalempfang:** Multi-Satelliten-Signalverarbeitung
2. **Positionsberechnung:** Trilateration mit Uhrenkorrektur
3. **Qualitätsbewertung:** DOP-Analyse und Signalstärkeüberwachung
4. **Projektion:** Transformation in Gleiskoordinatensystem

1.6.4.2 3.4.2 Umgebungsabhängige Fehlermodelle

Umgebung	Bias <code>_bias [m]</code>	Messrauschen <code>_noise [m]</code>	Ausfallrate <code>p_outage</code>	Multipath-Zusatz
Open	0.25	0.30	0.01	—
Urban	0.50	0.80	0.05	$\text{Exp}(\lambda=2, \text{cap}=3\text{m}, w=0.1)$
Tunnel	n/a	n/a	1.0	—

1.6.5 3.5 IMU-basierte Trägheitsnavigation

1.6.5.1 3.5.1 Funktionale Beschreibung Das IMU-System stellt hochfrequente Bewegungsinformation zur Überbrückung von Sensorausfällen bereit:

1. **Beschleunigungsmessung:** 3-Achsen Accelerometer

2. Drehratenmessung: 3-Achsen Gyroskop

3. Strapdown-Integration: Numerische Integration zu Geschwindigkeit und Position

4. Bias-Korrektur: Adaptive Schätzung und Kompensation von Sensorfehlern

1.6.5.2 3.5.2 Mathematisches Fehlermodell Accelerometer-Modell:

$$a_{\text{mess}} = a_{\text{wahr}} + b_{\text{accel}} + n_{\text{accel}} + w_{\text{accel}}$$

$b_{\text{accel}} \sim N(0, 0.005 \text{ m/s}^2)$: Konstanter Bias

n_{accel} : Weißrauschen, $\text{PSD} = 0.05 \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$

w_{accel} : Bias Random Walk, $\tau = 900\text{s}$

Gyroskop-Modell:

$$\omega_{\text{mess}} = \omega_{\text{wahr}} + b_{\text{gyro}} + n_{\text{gyro}} + w_{\text{gyro}}$$

$b_{\text{gyro}} \sim N(0, 0.02 \text{ }^\circ/\text{s})$: Konstanter Bias

n_{gyro} : Weißrauschen, $\text{PSD} = 0.01 \text{ }^\circ/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$

w_{gyro} : Bias Random Walk, $\tau = 900\text{s}$

1.7 4. Fehlermodellierung und -quantifizierung

1.7.1 4.1 Systematische Fehleridentifikation

Die Fehlerquellen werden nach folgender Systematik klassifiziert und priorisiert:

Klassifikation nach Wirkungsgrad: - **HOCH:** Dominante Beiträge zur Gesamtvarianz (>10% Varianzanteil) - **MITTEL:** Signifikante Beiträge (1-10% Varianzanteil)

- **NIEDRIG:** Minimale Beiträge (<1% Varianzanteil, aber sicherheitsrelevant)

Klassifikation nach Zeitverhalten: - **Systematisch:** Konstante oder langsam veränderliche Offsets - **Zufällig:** Weißes oder korreliertes Rauschen - **Episodisch:** Seltene, aber signifikante Ereignisse (Ausfälle, Störungen)

1.7.2 4.2 Konsolidierte Fehlerparametertabelle

Fehlerquelle	Longitudinal	Lateral	Zeitverhalten	Modell	Parameter	Relevanz	Bemerkung
Balisen							
Latenz	$v \cdot t_{\text{latenz}}$	—	Systematisch	$N(10\text{ms}, 2\text{ms})$ $\text{trunc}[6, 14]\text{ms}$	$\pm 10\text{ms}$ $\pm 2\text{ms}$	HOCH	Geschwindigkeitsabhängig
Antennenoffset	$N(0, \sigma)$	$N(0, \sigma)$	Systematisch	Normal	$\pm 0.02\text{m}$	MITTEL	Montageungenauigkeit
EM-Störung	Rayleigh	Rayleigh	Zufällig	Rayleigh	$\pm 0.012\text{m}$	NIEDRIG	Umgebungsabhängig
Multipath	Exp trunc	—	Episodisch	Exp cap $\pm 0.05\text{m}$ $\pm 0.08\text{m}$	$\pm 0.15\text{m}$	MITTEL	Heavy-tail Komponente
Witterung	Uniform	Uniform	Zufällig	Uniform	$\pm 0.015\text{m}$	NIEDRIG	Temperatur/Feuchte
Ausfall	—	—	Episodisch	Markov	$p_{\text{miss}} = 1 \times 10^{-10}$	MITTEL	Sicherheitsrelevant
Odometrie							
Quantisierung	Uniform	—	Deterministisch	Uniform	$\pm 6.7\text{mm}$ $(\Delta s/2)$	MITTEL	Encoder-Auflösung

Fehlerquelle	Longitudinal	Lateral	Zeitverhalten	Modell	Parameter	Relevanz	Bemerkung
Drift	Normal	—	Systematisch	$N(0, \sigma_{\text{drift}} \cdot d)$	$\sigma_{\text{drift}}=0.01\text{m/m}$	MITTEL	Kalibrierungsfehler
Umfang residual	Uniform	—	Systematisch	Uniform	$\pm 0.03\text{m}$ ($\pm 0.10\text{m}$ Stress)	MITTEL	Nach Korrektur
Digitale Karte							
Geometrie basis	$N(0, \sigma)$	$N(0, \sigma)$	Systematisch	Normal	$\sigma_{\text{längs}}=0.01\text{m}$ $\sigma_{\text{quer}}=0.014\text{m}$	MITTEL	Vermessungsgenauigkeit
Interpolation	Exp trunc	—	Systematisch	$\text{Exp}(\sigma=0.02\text{m})$	$\sigma=0.3$	NIEDRIG	Zwischen Stützpunkten
Skalierung	$\sigma \cdot d$	—	Systematisch	$N(0, 6 \times 10^{-6} d)$	nur für $d > 2\text{km}$	NIEDRIG	Proportional
GNSS							
Bias (Open)	$N(0, \sigma)$	$N(0, \sigma)$	Systematisch	Normal	$\sigma=0.25\text{m}$	HOCH	Atmosphäre/Uhr
Noise (Open)	$N(0, \sigma)$	$N(0, \sigma)$	Zufällig	Normal	$\sigma=0.30\text{m}$	HOCH	Empfängerfehler
Bias (Urban)	$N(0, \sigma)$	$N(0, \sigma)$	Systematisch	Normal	$\sigma=0.50\text{m}$	HOCH	Multipath verstärkt
Noise (Urban)	$N(0, \sigma)$	$N(0, \sigma)$	Zufällig	Normal	$\sigma=0.80\text{m}$	HOCH	Signaldegradation
Multipath (Urban)	Exp trunc	Exp trunc	Episodisch	$\text{Exp}(\sigma=2\text{m})$	$\sigma=0.1$	MITTEL	Heavy-tail
Outage	—	—	Episodisch	Bernoulli	$p_{\text{open}}=0.01$ $p_{\text{urban}}=0.05$	HOCH	Verfügbarkeit
IMU							
Accel Bias	Integration	Integration	Systematisch	$N(0, 0.005\text{m/s}^2 \cdot t)$	$t=900\text{s}$	MITTEL	Temperaturabhängig
Gyro Bias	Integration	Integration	Systematisch	$N(0, 0.02^\circ/\text{s} \cdot t)$	$t=900\text{s}$	MITTEL	Langzeitdrift
Accel Noise	Integration	Integration	Zufällig	Weißrauschen	$0.05\text{m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$	NIEDRIG	Hochfrequent
Gyro Noise	Integration	Integration	Zufällig	Weißrauschen	$0.01^\circ/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$	NIEDRIG	Hochfrequent
Fusion							
Latenz	$v \cdot \Delta t$	—	Systematisch	$N(20\text{ms}, 5\text{ms})$	Gain-trunc	MITTEL	Verarbeitungszeit
Jitter	—	—	Zufällig	In Latenz absorbiert	—	NIEDRIG	Zeitstempel

1.7.3 4.3 Korrelationen zwischen Fehlerquellen

Die Korrelationsstruktur berücksichtigt gemeinsame Referenzen und physikalische Kopplungen:

Korrelationspaar			Begründung
Karte	GNSS	0.80	Gemeinsame Projektions- und Map-Matching-Referenz
Karte	Balise	0.65	Balisen-Referenzpositionen aus Kartendatenbasis
Balise	Odometrie	0.80	Odometrie-Nullstellung bei Balisen-Events
Odometrie	GNSS	0.25	Schwache Kopplung über Bewegungsdynamik
GNSS	Balise	0.30	Gemeinsame Kartenoffsets
IMU	Odometrie	0.40	Gemeinsame Fahrzeugdynamik
IMU	GNSS	0.20	Bewegungsdynamik, verschiedene Fehlerarten

Validierungskriterium: $|_sample - _target| \leq 0.05$

1.7.4 4.4 Zeitabhängige Fehlerfortpflanzung

Kurzzeit-Dynamik (< 1 Sekunde): - GNSS/IMU: Hochfrequente Messungen mit Rauschkorrelation - Balise: Ereignis-getriggerte Korrekturen - Odometrie: Kontinuierliche Integration mit Quantisierungsrauschen

Mittelzeit-Dynamik (1 Sekunde - 1 Minute): - IMU-Bias-Drift wird dominant - GNSS-Ausfälle in Urban/Tunnel-Umgebung - Odometrie-Drift zwischen Balisen akkumuliert

Langzeit-Dynamik (> 1 Minute): - Balisen-Reset verhindert unbegrenzte Fehlerakkumulation - GNSS-Bias-Variation über Satellitenkonstellation - Temperaturbedingte Sensorparameter-Drift

1.8 5. Unterscheidung: Sicherer und unsicherer Lokalisierungspfad

1.8.1 5.1 Sicherer Pfad (SIL1-relevant)

Architekturprinzip: Der sichere Pfad implementiert das Fail-Safe-Prinzip durch redundante, unabhängige Sensoren mit deterministischen Ausfallmodi.

Komponenten: - **Balisen:** Passive Transponder mit elektromagnetischer Kopplung - **Odometrie:** Mechanische Wegmessung an nicht-angetriebener Achse
- **Digitale Karte:** Statische Referenzdatenbank

Fehlercharakteristika sicherer Pfad: - Deterministische oder gut charakterisierte stochastische Fehler - Begrenzte Fehlerakkumulation durch periodische Referenzierung - Ausfälle erkennbar und handhabbar - Konservative Fehlermodellierung

Typische Fehlergrößen (95%-Perzentil): - Balise longitudinal: ~18cm (inkl. Latenz bei 60 km/h) - Odometrie pro Segment: ~13cm RMS - Karte Referenz: ~4cm (geometrische Basis)

1.8.2 5.2 Unsicherer Pfad (Präzisionserweiterung)

Architekturprinzip: Der unsichere Pfad zielt auf höchste Präzision unter optimalen Bedingungen, mit Degradation bei ungünstigen Umgebungen.

Komponenten: - **GNSS:** Satellitennavigation mit Umgebungsabhängigkeit - **IMU:** Trägheitssensoren für hochfrequente Bewegungsschätzung - **Fusion-Algorithmus:** Probabilistische Sensorkombination

Fehlercharakteristika unsicherer Pfad: - Stark umgebungsabhängige Fehlerverteilungen - Potentielle Heavy-Tail-Verteilungen (Multipath, Interferenz) - Unvorhersagbare Ausfallmuster - Optimistische Fehlermodellierung möglich

Typische Fehlergrößen (95%-Perzentil): - GNSS Open: ~1.2m (kombiniert Bias+Noise) - GNSS Urban: ~3.2m (mit Multipath-Tail) - IMU (20s Integration): ~5-50cm je nach Trajectory

1.8.3 5.3 Fehlerfortpflanzung im Gesamtsystem

Fusionsstrategie: Die Kombination beider Pfade erfolgt über gewichtete Mittelung mit varianz-inversen Gewichten:

$$w_{\text{sicher}} = \sigma_{\text{unsicher}}^2 / (\sigma_{\text{sicher}}^2 + \sigma_{\text{unsicher}}^2)$$

$$w_{\text{unsicher}} = \sigma_{\text{sicher}}^2 / (\sigma_{\text{sicher}}^2 + \sigma_{\text{unsicher}}^2)$$

$$x_{\text{fused}} = w_{\text{sicher}} \cdot x_{\text{sicher}} + w_{\text{unsicher}} \cdot x_{\text{unsicher}}$$

$$\sigma_{\text{fused}}^2 = (\sigma_{\text{sicher}}^2 \cdot \sigma_{\text{unsicher}}^2) / (\sigma_{\text{sicher}}^2 + \sigma_{\text{unsicher}}^2)$$

Betriebsmodi: 1. **Normal:** Beide Pfade verfügbar → optimale Präzision 2. **GNSS-Degraded:** Urban/Tunnel → sicherer Pfad dominant 3. **Balise-Sparse:** Große Balisenabstände → unsicherer Pfad überbrückt 4. **Backup:** Nur sicherer Pfad → garantierte Mindestgenauigkeit

Kritische Übergangsszenarien: - Open→Tunnel Transition: GNSS-Ausfall erfordert IMU-Überbrückung - Balise-Ausfall bei gleichzeitigem GNSS-Problem: Reine Odometrie-Navigation - Urban Heavy Multipath: Temporäre Verschlechterung beider Pfade

1.9 6. Methodische Umsetzung und nächste Schritte

1.9.1 6.1 Monte-Carlo-Simulationsansatz

Simulationsparameter: - Stichprobengröße: $N = 10.000$ Runs (Stabilität P99-Schätzung) - Zeithorizont: 3600s (1 Stunde kontinuierlicher Betrieb) - Zeitschrittweite: $dt = 0.1s$ (ausreichend für 60 km/h Dynamik) - Bootstrap-Samples: $B = 500$ (Konfidenzintervall-Schätzung)

Validierungsstrategie: - Korrelationsvalidierung: Sample-Korrelationen vs. Zielwerte (Toleranz ± 0.05) - Plausibilitätschecks: Monotonie-Tests für Parameter-Sensitivity - Referenzvalidierung: Vergleich mit verfügbaren Realdatensätzen (falls vorhanden)

1.9.2 6.2 Erwartete Zielmetriken

Primäre Kennzahlen: - RMSE longitudinal $< 0.20m$ (Zielforderung) - Perzentile: P50, P90, P95, P99 (longitudinal/lateral/2D) - Verfügbarkeit: Anteil verfügbarer Positionsschätzungen - Konfidenzintervalle: Bootstrap-basierte 95%-CIs

Sensitivitätsanalyse: - One-at-a-Time (OAT): $\pm 10\%$ Variation aller Modellparameter - Ranking: Relative RMSE-Änderung pro Parametervariante - Optional: Sobol-Indizes für Haupteffekte und Wechselwirkungen

1.9.3 6.3 Implementierung und Reproduzierbarkeit

Software-Architektur: - Python 3.11 mit numpy/scipy/pandas/matplotlib - Modulare Struktur: config.py, sensors.py, fusion.py, metrics.py - CLI-Interface: `python run_sim.py --config model.yml --output results/`

Konfigurationsmanagement: - YAML-basierte Parametrierung mit Versionierung - Seed-basierte Reproduzierbarkeit - Automatisierte Test-Suite für Regressionsschutz

1.9.4 6.4 Erwarteter Berichtumfang

Finale Deliverables: - Methodenbericht (10-15 Seiten) mit vollständiger Dokumentation - Kennzahlen-Tabellen mit Konfidenzintervallen - Visualisierungen: PDF/CDF, Zeitreihen, Sensitivitäts-Rankings - Konfigurationsdateien und reproduzierbarer Quellcode - Executive Summary für Management-Ebene

1.10 7. Stakeholder-Feedback und Freigabe

Erforderliche Bestätigungen: 1. Vollständigkeit der berücksichtigten Fehlerquellen 2. Plausibilität der Fehlerparameter und -modelle 3. Angemessenheit der Korrelationsannahmen 4. Akzeptanz der Simulationsparameter (N, dt, Zeithorizont) 5. Zustimmung zu den Zielmetriken und Bewertungskriterien

Offene Abstimmungspunkte: - Gewichtung Heavy-Tail vs. Nominal-Szenarien bei Balisen - Stress-Test-Parameter für Extrembedingungen - Validierungsdatensätze: Verfügbarkeit und Zugriff - Zeitplan und Ressourcenallokation für Implementierung

Bitte um Rückmeldung bis: [Datum einfügen]

Dieser Bericht dient der methodischen Abstimmung und enthält keine Vorabergebnisse. Die quantitative Analyse erfolgt nach Freigabe der Parameter und Modelle durch die Stakeholder.