

# Sensorfusion IMU/GNSS

## Portierung und Validierung eines Kalmanfilters auf ein Embedded System in C

Diplomand



Markus Mittag

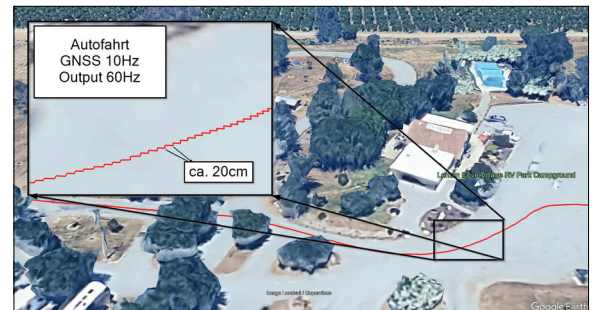
**Einleitung:** Inertiale Navigationssysteme werden eingesetzt, wenn eine autonome Bestimmung von Position und Orientierung erforderlich ist, unabhängig von externer Infrastruktur. Aufgrund deterministischer und stochastischer Messfehler sowie akkumulierten numerischen Rechenfehlern unterliegen diese Systeme einem Drift, sodass Position und Orientierung nur über begrenzte Zeiträume ohne Korrektur gehalten werden können. Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) liefern demgegenüber absolute Positionsdaten, die jedoch mit einer relativ hohen Streuung behaftet sind. Durch Sensorfusion lassen sich die Vorteile beider Ansätze kombinieren.

**Ziel der Arbeit:** Konkret umfasst die Arbeit die Portierung und Validierung eines Closed-Loop ESSKF (Error Space State Kalman Filter) von MATLAB nach C auf einen STM32H7-Mikrocontroller, die Entwicklung eines nicht blockierenden GNSS-Treibers für die I<sup>2</sup>C-Kommunikation sowie die CANopen-Integration. Zusätzlich wurde das Gesamtsystem mit Strapdown-Navigation, Sensordatenverarbeitung, Interrupts und Service-Routinen vollständig implementiert.

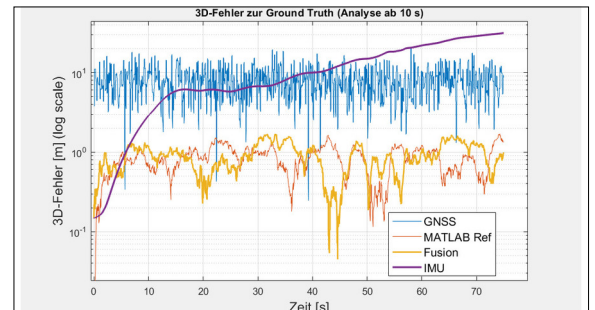
**Ergebnis:** Die Validierung erfolgte anhand von simulierten verrauschten Sensordaten, die über CANopen auf dem STM32H7 verarbeitet und mit der MATLAB-Referenz sowie den Sollwerten verglichen wurden. Auf einem komplexen Simulationspfad (vgl. Abbildung 2,3) betrug der RMS-Fehler der Sensorfusion auf dem Embedded-System 0.95 m gegenüber 0.89 m in MATLAB. Die Abweichung von 0.06 m zwischen Embedded-System und MATLAB-Referenz liegt in der erwarteten Toleranz und bestätigt die korrekte Portierung der Algorithmen. Ein Echtzeitversuch mit realen Sensordaten (10 Hz

GNSS, 60 Hz Navigationsausgabe über CANopen-PDOs) zeigte ebenfalls eine stabile Pfadrekonstruktion. Die beobachtete Schrittweite von etwa 20 cm zwischen aufeinanderfolgenden 60 Hz-Ausgaben weist auf eine Auflösung im Submeterbereich hin und bestätigt die Eignung des Systems für den Einsatz (Abbildung 1).

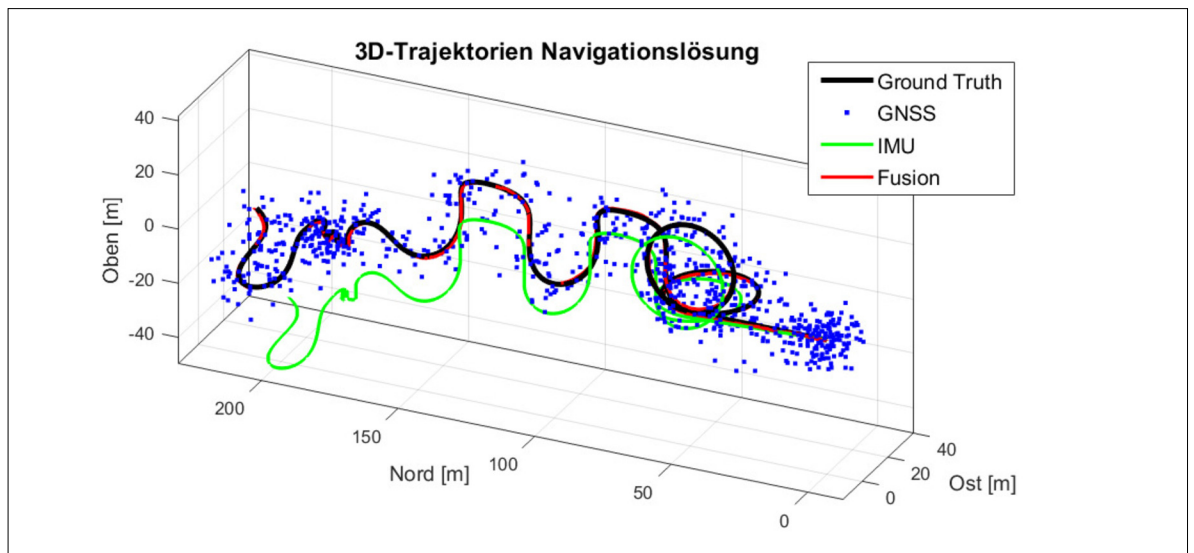
**Abbildung 1: Navigationslösung über Teststrecke im Auto**  
©2025 Airbus, ©Landsat/Copernicus, ©2025 Google



**Abbildung 2: logarithmischer Fehler über Zeit der Navigationslösung**  
Eigene Darstellung



**Abbildung 3: 3D-Trajektorien der Navigationslösung**  
Eigene Darstellung



Referent

Prof. Guido Piai

Korreferent

Prof. Dr. Martin Weisenhorn

Themengebiet

Informations- und Kommunikationssysteme, Elektronik

Projektpartner

KELAG Künzli Elektronik AG, Schwerzenbach, Zürich