

# Modell- und Sensorintegration zum integrierten 3D Geomonitoring in moderner Datenkommunikationsstruktur mit Anwendung auf den Stuttgarter Fernsehturm

Prof. Dr.-Ing. Reiner Jäger<sup>1)</sup>, M.Sc. Naznin Akter<sup>1)</sup>, Dipl.-Ing. Lyudmila Gorokhova<sup>1)</sup>,

B.-Eng. Erisalda Mehmeti<sup>1)</sup> und Dipl.-Ing. Eberhard Messmer<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Karlsruhe University of Applied Sciences, <sup>2)</sup> Vermessungsbüro Dipl.-Ing. E. Messmer, Schwaikheim

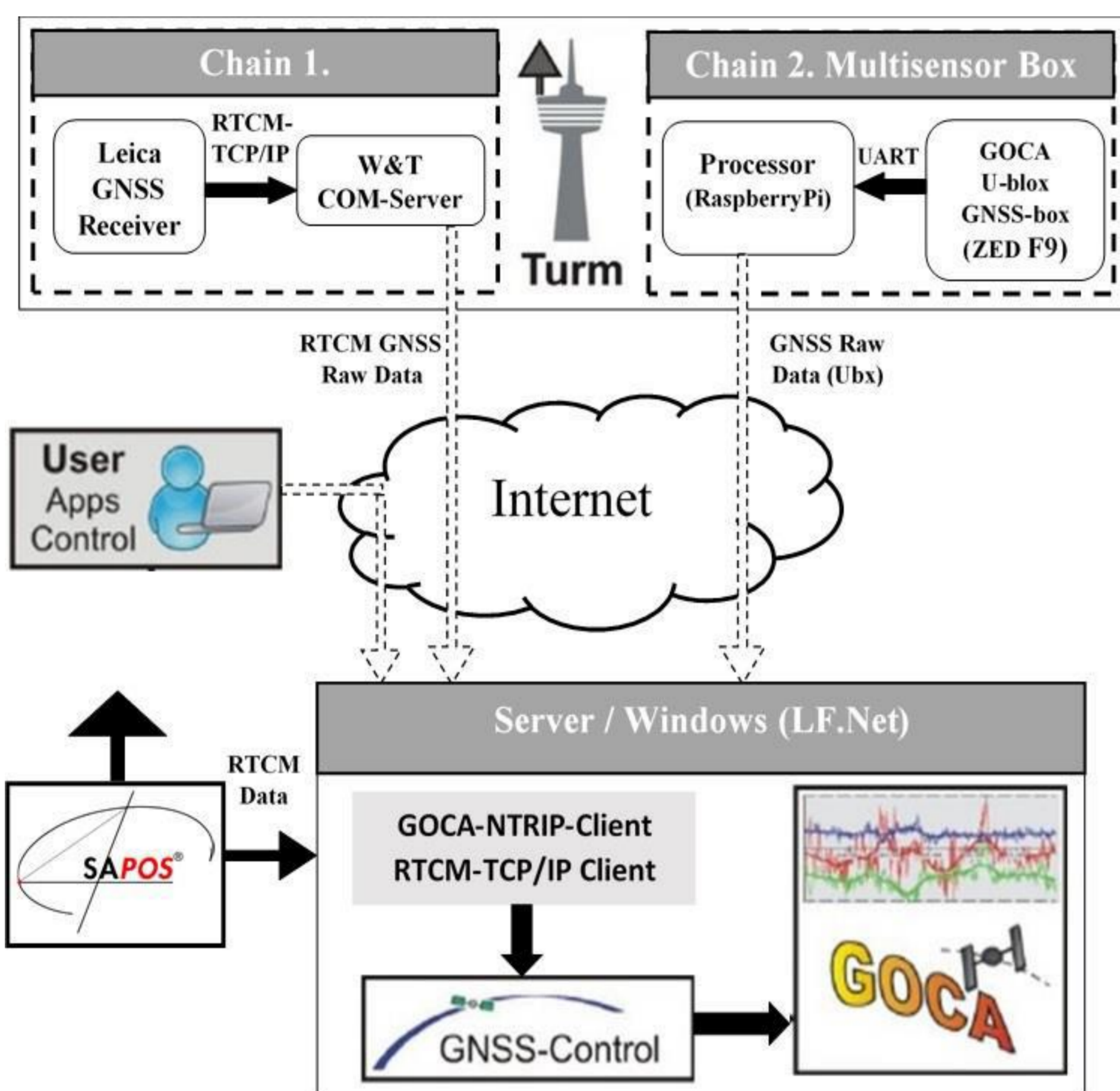
## Motivation

Mit dem Begriff Geomonitoring verbinden sich vielfältige Aufgaben in Geoforschung, Frühwarnung bei Naturkatastrophen sowie der Überwachung baulicher Anlagen. Die im Geomonitoring FuE-Projekt GOCA ([www.goca.info](http://www.goca.info)) erfolgten Entwicklungen neuer mathematischer Modelle, Multisensorsysteme und Kommunikationsstrukturen werden entlang der Geomonitoringkette (Datenerfassung, Modellierung, Reporting und Alarmmanagement) vorgestellt. Einen ersten Schwerpunkt bilden die mathematischen Modelle der integrierten sowie der quasi-integrierten 3D-Ausgleichung, welche mit der gemeinsamen Parametrisierung von Sensordaten im Geometrie- und Schwererum im Gauß-Markov-Modell (GMM) einhergehen. Integrierte und quasi-integrierte 3D-Ausgleichung erweisen sich als Schlüsselmodelle zur parametrischen Integration aller Sensordatentypen im Geometrie- und Schwererum (Gravimetrie, GNSS, Totalstationen, Nivellement, Laserscanner, algorithmisch angepasste Navigationssensoren, optische Sensordaten bis hin zu SAR/INSAR). Die Beobachtungsgleichungen für aktuelle Sensoren werden behandelt. Im Abschnitt integriertes 3D Geomonitoring (auch „Systemanalyse“, „Structural Health Monitoring (SHM)“) liegt der Fokus auf Finite-Elemente-Modelle (FEM) zur gemeinsamen Parametrisierung physikalischer und geometrischer Parameter. FEM sind der Schlüssel zur Beantwortung der Frage, ob sich ein Monitoringobjekt in einem „gesunden“ oder einem als Gefährdung einzustufenden physikalischen Zustand befindet. Für Bauwerksschwingungen (Brücken, Türme) führen sie auf inverse Eigenwert-/Vektor-Probleme, d.h. die Aufgabe, von den Änderungen der spektralen Eigenschaften des allgemeinen Eigenwertproblems auf Änderungen im physikalischen Zustand zu schließen.

Der Fernsehturm Stuttgart wird als Referenzobjekt für die o.g. innovativen Methoden zur Früherkennung von Gefährdungspotenzialen von Strukturen (SHM) durch neue Algorithmen, Sensorsysteme und Informationstechnologien vorgestellt. Zu letzterem zählt das hier vorzustellende allg. Internet-basierte Server-Client zum integrierten Geomonitoring von Objekten.

## Fernsehturm Stuttgart als Referenzobjekt für SHM

Nach den o.g. erfolgreichen Tests startete in 2017 das FuE-Projekt „Der Stuttgarter Fernsehturm als Referenzobjekt für FuE und Erprobung innovativer Sensor-systeme, mathematischer Modelle, Algorithmen, Software und IT zur Früherkennung von Schäden und Gefährdungspotenzialen baulicher Anlagen (SHM)“ mit neuer IT-Infrastruktur. Hochschulseitig werden die FuE im Rahmen der Projekte GOCA und NAVKA des Labors für GNSS & Navigation der HS Karlsruhe wahrgenommen. Neben dem Ingenieurbüro für Angewandte Geodäsie, Photogrammetrie und Geoinformatik E. Messmer, Schwaikheim sind weitere Partner des FuE Konsortiums der SWR B.W. als Eigentümer des Fernsehturms, das Landesamt für Geobasisinformation und Landentwicklung (LGL) Karlsruhe als Dienstleister zum Raumbezug über SAPOS GNSS-Korrekturen sowie der B.W. IT-Dienstleister LF.NET.



Oben: Stuttgarter Fernsehturm, Gesamthöhe ca. 217 m.  
Links: IT-Struktur zum serverbasierten SH-Monitoring mit GNSS- und MEMS-Sensorik

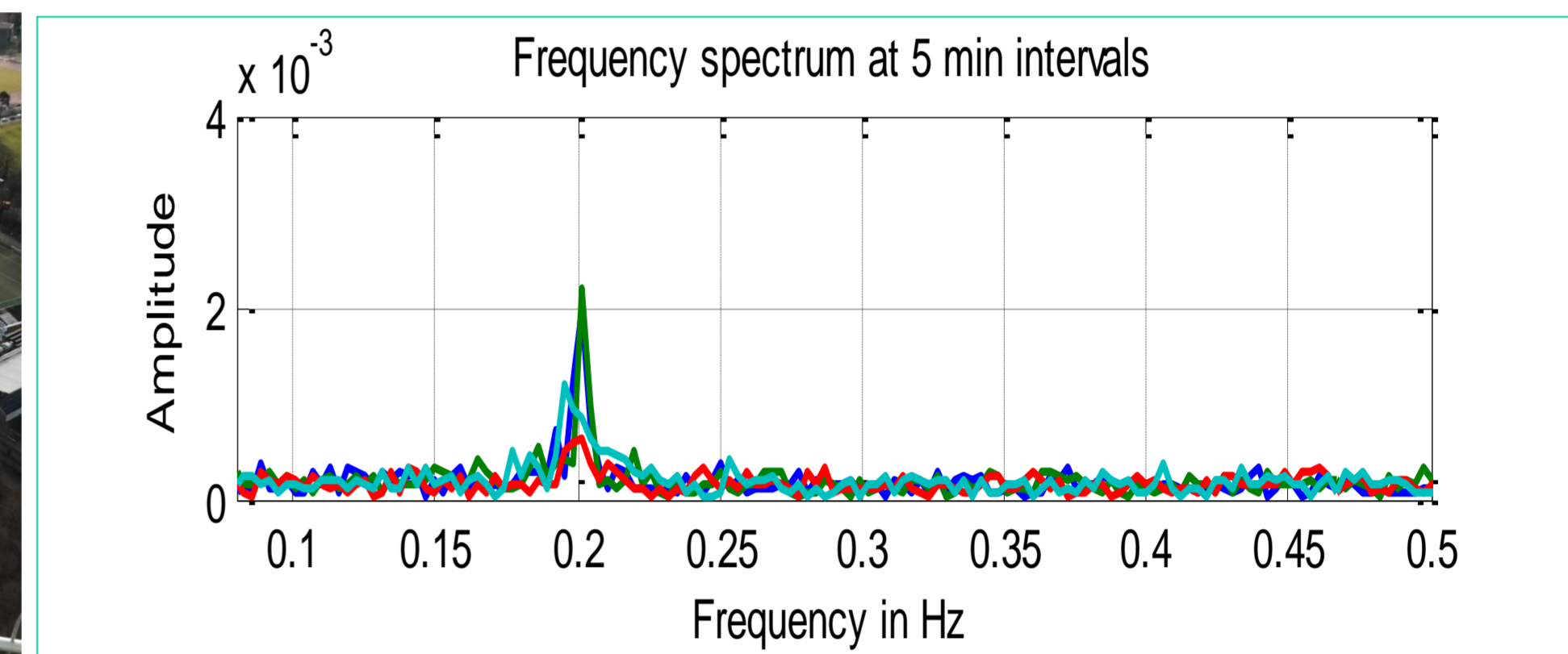
$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t) \\ \ddot{\mathbf{u}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{I} \cdot [\Delta t] & \mathbf{I} \cdot \left[ \frac{1}{2} \Delta t^2 \right] \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{I} \cdot [\Delta t] \\ \mathbf{0} & [-\mathbf{M}(\mathbf{p}_M)^{-1} \cdot \mathbf{K}(\mathbf{p}_K) \cdot \Delta t] & [\mathbf{I} - \mathbf{M}(\mathbf{p}_M)^{-1} \cdot \mathbf{C}(\mathbf{p}_C) \cdot \Delta t] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t - \Delta t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t - \Delta t) \\ \ddot{\mathbf{u}}(t - \Delta t) \end{bmatrix}$$

zwischen den Verschiebungen  $\mathbf{u}_0(t)$  und deren zeitlichen Ableitungen und den parametrisierten Matrizen ( $\mathbf{K}, \mathbf{C}, \mathbf{M}$ ) als Ausgangsbeziehung der Zustandsschätzung. Im spektralen Bereich erhalten wir unter Parametrisierung von Änderungen in den physikalischen Parametern in Funktion von Änderungen in der Spektral- und Modalmatrix im Fall einer (ungedämpften) strukturellen Eigenschwingung

$$\Delta \omega_i^2(\Delta \mathbf{p}_K, \Delta \mathbf{p}_M) = \mathbf{u}_i^T \cdot [\mathbf{dK}(\Delta \mathbf{p}_K) - \omega_i^2 \cdot \mathbf{dM}(\Delta \mathbf{p}_M)] \cdot \mathbf{u}_i$$

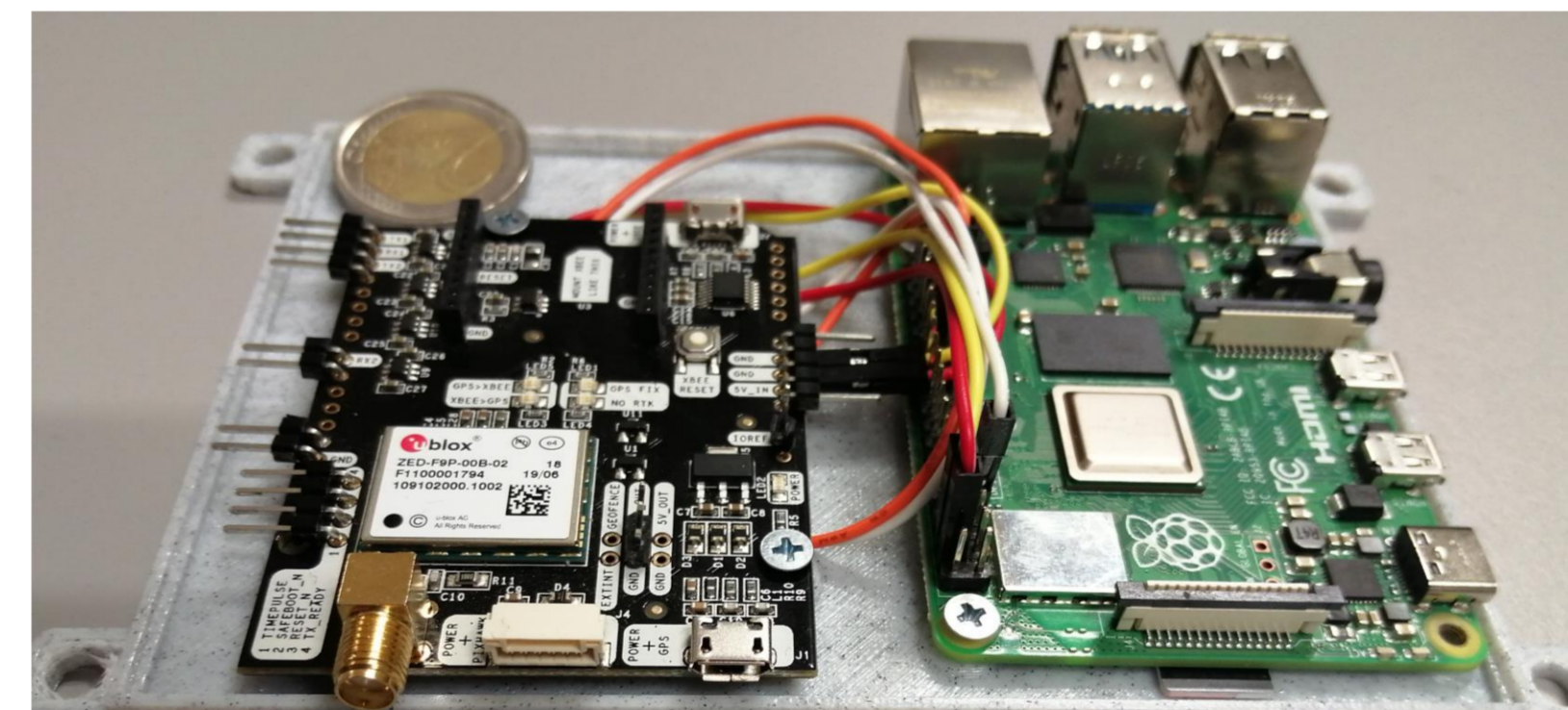
$$\Delta \mathbf{u}_i(\Delta \mathbf{p}_K, \Delta \mathbf{p}_M) = - \frac{\mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{dM}(\Delta \mathbf{p}_M) \cdot \mathbf{u}_i}{2} \cdot \mathbf{u}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \left[ \frac{1}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \mathbf{u}_j^T \cdot [\mathbf{dK}(\Delta \mathbf{p}_K) - \mathbf{dM}(\Delta \mathbf{p}_M)] \cdot \mathbf{u}_j \right] \cdot \mathbf{u}_j$$

als Ausgangsbeziehungen zur Lösung des betreffenden sog. inversen Eigenwertproblems, d.h. dem Schluß von den Änderungen in den o.g. Eigenschwingungscharakterista (Spektral- und Modalmatrix) auf die Änderungen des physikalischen Structural Health Zustands beim Geomonitoring (SHM).



Links oben: GNSS Neuinstallation einer Multi-GNSS-Multi-Frequenz NavXperience-Antenne. Oben rechts: „Peak“ im Frequenzspektrum bei 0.2 Hz, der Grundschiwingung (Umlaufdauer T= 5 sec). Die Amplitude der Grundschiwingung liegt bei mittlerer Windstärke bei 6 cm

## GNSS – SHM Monitoring- und Kommunikationsbox



Die GOCA GNSS-Monitoringbox (Abb., links) umfasst als erste Hardware-Komponente und als GPIO mit IP-Adresse ein Raspberry Pi 4, Modell B (1,5 GHz 64-bit quadcore ARM Cortex-A72 CPU, Onboard-Wireless-LAN, Dual-Band 802.11 b/g/n/ac) mit Power-Over-Ethernet. Die zweite Hardwarekomponente, das ublox ZED F9 GNSS Empfängerboard, ist über die UART-Schnittstelle mit dem Raspberry Pi verbunden. Die gesamte GNSS-Box wird mit 15 Watt bei 3A versorgt. Das GNSS Empfängerboard ist für einen GNSS Rohdatenexport offen konfigurierbar.

Oben: GOCA GNSS Geomonitoring Box. Blick in die geöffnete Box. Links: GNSS ublox ZED F9 Empfänger Board. Rechts: Raspberry Pi 4, Modell B Computer als GPIO.

Die GNSS-Rohdaten (GPS-L1,-L2C,GALILEO-E1,-E5b) werden über die Software Str2Str seitens des Raspberry Pi bezogen und über den TCP-Port via Internet zum LF.NET Server (Abb., links) zur Prozessierung mit GOCA-GNSS-Control transportiert. In der aktuellen Testphase sind beide GNSS-Empfänger (Leica SR530, GOCA Multi-GNSS-Multi-Frequenz GNSS Geomonitoringbox) per Signalsplitter mit der NavXperience-Antenne (siehe oben) verbunden. Per IP-Adressierung von GOCA\_GNSS-Control Software aus erfolgt die Übertragung der GNSS-Rohdatenströme an den LF.NET Server mit den weiteren GOCA-Softwarekomponenten (Abb., links). Als dritter Datenstrom werden serverseitig über NTRIP die RTCM Korrekturdaten des SAPOS-Dienstes des LGL B.W. adressiert (Abb., links). Als GNSS-Processing-Engine wird in GOCA\_GNSS-Control die OS-Software RTKLIB verwendet. Die im ETRF89 in GOCA\_GNSS-Control berechneten VRS Baselines werden per GKA-Schnittstelle ([www.goca.info](http://www.goca.info)) zur Weiterverarbeitung für die Netzausgleichungsbasierte GOCA-Deformationsanalyse-Software bereit- gestellt. Im Ergebnis der Echtzeit-Berechnungen der GOCA-Deformationsanalyse resultieren mit Zeitstempel die im Datum der Referenzpunkte ermittelten Objektzeitreihen (Leica SR50, GOCA GNSS Geomonitoring-Box). Diese werden als allgemeine Schnittstelle für weitere Verarbeitungsstufen, wie Zeitreihen- Analyse, FEM-SHM, Visualisierung, den in der GOCA-Deformationsanalyse-Software implementierten Zustandsschätzungen sowie der nachfolgenden App als sog. FIN-Dateien (fortlaufend beschriebene sowie lesbare) Tagesdateien im ASCII-Format bereitgestellt.

## SHM – Konzept und Systementwicklungen

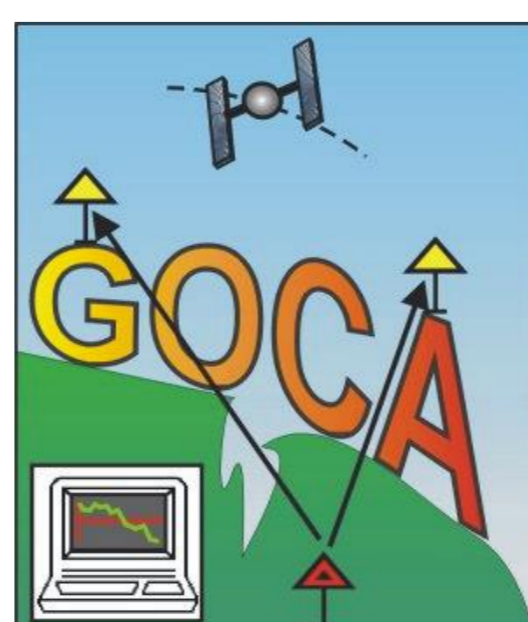
Bei der Integration von GNSS-Daten mit den Daten von MEMS- sowie optischen Sensoren (Beschleunigungsmesser, Gyroskope, Kameras) sind wie - in der Multisensornavigation auch im Geomonitoring insgesamt 15 (bzw. bei verteilten Sensoren in der Navigation 18) Zustandsparameter  $\mathbf{y}(t)$  bei der Zustandsschätzung zu modellieren. Es gilt:

$$\mathbf{y}(t) = [x^e \ y^e \ z^e \ | \ v_x^e \ v_y^e \ v_z^e \ | \ r^e \ p^e \ y^e \ | \ \ddot{x}^e \ \ddot{y}^e \ \ddot{z}^e \ | \ \omega_{eb,x}^b \ \omega_{eb,y}^b \ \omega_{eb,z}^b]^T$$

Allerdings kann im Gegensatz zur Navigation in diesem Fall - über die Einführung von Ungleichungen zum Zustandsraum  $\mathbf{y}(t)$  - mit einer zugleich robusten SIMPLEX-basierten L1-Norm Parameter-schätzung die Datenfusion essentiell stabilisiert werden. Bei der sensorischen Abtastung von Objekten in dynamischer Zustandsform liefern die FEM-basierten Schwinggleichungen mit

$$\mathbf{K}(\mathbf{p}_K) \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{C}(\mathbf{p}_C) \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{M}(\mathbf{p}_M) \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{f}(t) \quad \mathbf{u}(\mathbf{p}_K) \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{C}(\mathbf{p}_C) \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{M}(\mathbf{p}_M) \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{0}$$

beim Structural Health Monitoring (SHM) über o.a. FEM-basierte Schwinggleichungen (links, erzwungene gedämpfte Schwingung mit Anregung  $\mathbf{f}(t)$ , rechts gedämpfte freie Eigenschwingung) prinzipiell die Möglichkeit der Parametrisierung aller physikalischen Kenngrößen (Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}$ , Dämpfungsmatrix  $\mathbf{C}$  und Massenmatrix  $\mathbf{M}$ ), während bei statischen SHM neben dem Knotenkraftvektor  $\mathbf{f}(t)$  nur die Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}$  einer Parametrisierung zugänglich ist. Im Fall der o.a. Eigenschwingung erhalten wir so im Zeitbereich den Zusammenhang



Prof. Dr. Ing. Reiner Jäger – Projektleitung FuE Projekt GOCA

Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft (HSKA)  
University of Applied Sciences - Institut für Angewandte Forschung (IAF)  
Moltkestr. 30, D-76133 Karlsruhe  
Tel.: ++ 49 721 925 2620; -2592; Fax: ++ 49 721 925 2597  
Email: [reiner.jaeger@web.de](mailto:reiner.jaeger@web.de)

## App-Entwicklung und Ergebnisse mit GNSS SHM-Box



Die Monitoring-App SHM Stuttgarter Fernsehturm wurde unter Android mit Schnittstelle zu den GOCA-Zeitreihen (FIN-Dateien) entwickelt. Zur Visualisierung der Turmbewegungen greift die App über TCP/IP-Kommunikation auf die serverseitigen GOCA-Deformationsanalyse-Software Objektzeitreihen (FIN-Dateien) zu. Auch Touristen, die die App Ort herunterladen, können so auf ihrem Android-Smartphone den aktuellen Bewegungsverlauf des Turms betrachten (links). Die App ist derzeit zweisprachig (Englisch, Deutsch).

Links oben: Android App mit Visualisierungen zur Turmbewegung, basierend auf GOCA FIN-Dateien. Rechts oben: GOCA-Objektzeitreihen der App auf Basis der FIN-Dateien

Die obigen FuE wurden vom **Verband der Stifter der Hochschule Karlsruhe** finanziert. Die weiteren FuE sind mit GNSS/MEMS-Boards zur Erfassung hochfrequenter Bewegungen und SHM von Strukturen befasst.

**GOCA Homepage: <http://www.goca.info>**