

Konzept einer Multi-MEMS für die Bauwerksüberwachung

Concept of a Multi-MEMS for Structural Monitoring

Thomas Willemsen, Michael Engenhorst, Andreas Schmitz, Uwe Dankmeyer

Der Einsatz von Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) ist auf dem Consumer-Markt weit verbreitet. In jedem Smartphone befinden sich Orientierungssensoren, wie Beschleunigungssensoren, die oftmals in Verbindung mit Gyroskopen als Motion Processing Unit (MPU) eingebunden sind. Der Einsatz in der Ingenieurvermessung wird immer vielfältiger, sodass diverse Anwendungsszenarien möglich sind. Die Vorteile liegen auf der Hand: günstig und eine einfache Handhabung. Allerdings erfordern das wenige Vorwissen zur Zuverlässigkeit und die niedrigen Messgenauigkeiten aufwendige Untersuchungen. In diesem Beitrag wird der konzeptionelle Aufbau eines MEMS-Multi-Sensor-Systems (Multi-MEMS) für die Bauwerksüberwachung anhand des Praxisbeispiels Hochstraße Benediktusstraße in Düsseldorf beschrieben. Es werden Untersuchungsansätze zur Überwachung präsentiert und Vorschläge für eine Sensorkonfiguration vorgestellt. Die Multi-MEMS basiert auf einem Mikrocontroller ESP32, mehreren Motion Processing Units sowie einigen Sensoren zur Sicherstellung typischer Merkmale von Monitoringsystemen. Zur Anwendung kommen identische Sensormodelle, wie sie in Smartphones verbaut sind. Im Vordergrund stehen die 3-Achsen-Beschleunigungssensoren, die als Neigungssensoren Einsatz finden. Für einen Praxiseinsatz sind diese Sensoren auf unterschiedlichste Einflüsse hin zu untersuchen. Diese Arbeit diskutiert die Vorgehensweise der Entwicklung, um die Sensoren für den praktischen Einsatz vorzubereiten.

Schlüsselwörter: MEMS, Monitoring, Neigungssensor, Multi-Sensor-System, Bauwerksüberwachung, Low Cost

The use of microelectromechanical systems (MEMS) is widespread in the consumer market. Every smartphone contains orientation sensors, such as acceleration sensors, which are often integrated in conjunction with gyroscopes as a motion processing unit (MPU). The use in engineering surveying is becoming more and more diverse, so that various application scenarios are possible. The advantages are obvious: low cost and easy handling. However, the little prior knowledge on reliability and the low measurement accuracies requires elaborate investigations. This paper describes the conceptual design of a MEMS multi sensor system (Multi-MEMS) for bridge monitoring based on the practical example of Hochstraße Benediktusstraße in Düsseldorf. Research approaches for monitoring are described and suggestions for sensor configuration are presented. The Multi-MEMS is based on a microcontroller ESP32, several motion processing units and some sensors to ensure typical features of monitoring systems. Identical sensor models as installed in smartphones are used. In the foreground are the 3-axis acceleration sensors, which are used as tilt sensors. For a practical application, these sensors have to be examined with regard to various influences. This paper discusses the development procedure to prepare the sensors for practical use.

Keywords: MEMS, structural monitoring, inclination sensor, multi sensor system, low cost

1 EINFÜHRUNG

1.1 Motivation zum Einsatz von Low-Cost-Sensoren

Der Zustand vieler Infrastrukturbauwerke in Deutschland ist ungenügend. Ein Großteil der Brücken, die einen besonderen Fokus im Rahmen der kritischen Infrastruktur innehaben, ist marode und erreicht in wenigen Jahren das prognostizierte Lebenszeitende. Im Rahmen der Neubewertung und Überprüfung der Statik sind Vermessungen als dauerhaftes Monitoring üblich. Besonders notwendig wird dies, wenn das Lebenszeitende erreicht wird und noch keine Konzepte für den Neubau oder die Instandsetzung vorliegen. In solchen Fällen wird das Monitoring in der Regel mit einer Alarmierung versehen. Vetter (2021) und Faz.net (2021a) sind zwei Beispiele für Veröffentlichungen in der deutschen Medienlandschaft, die Bezug nehmen auf den schlechten Zustand deutscher Verkehrsinfrastruktur. Besonders die Kondition von über 3000 Autobahnbrücken ist kritisch zu bewerten, da diese in der Verkehrsinfrastruktur eine besonders hohe Bedeutung haben. Zu der steigenden Anzahl notwendig zu prüfender Brücken im schlechten Zustand kommt der sich weiter negativ entwickelnde Fachkräftemangel. Es fehlen bereits heute Kompetenzen in der Planung, Konstruktion und Bewertung von Infrastrukturen.

Ein konkretes Beispiel ist die Salzachtalbrücke bei Wiesbaden. Die Brücke aus den 1960er-Jahren durchlief mehrere bauliche Anpassungen und Instandsetzungen. Nachdem sich größere Schäden durch ein Herabsinken von Brückenteilen zeigten, wurden zunächst über einen langen Zeitraum Bereiche der Brücke und darunter gesperrt /Averesch 2021/. Am 6.11.2021 wurde die Brücke gesprengt /Faz.net 2021b/. Auch der rund 350 Brückenbauwerke umfassende Bauwerksbestand der Landeshauptstadt Düsseldorf weist eine Altersstruktur der Bauwerke auf, nach der sich ein Großteil der Bauwerksflächen nunmehr im letzten Drittel der theoretischen Nutzungsdauer befindet. Das Durchschnittsalter der Bauwerke beträgt hierbei rund 54 Jahre. Hierzu korrespondierend weist der aktuelle Bauwerkszustand für einen Großteil der Bauwerksflächen einen kurzfristigen oder umgehenden Instandsetzungsbedarf gemäß den Richtlinien zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-Prüf) aus. Die darüber hinaus mittlerweile vorhandene faktische Nutzungsänderung der Bauwerke aufgrund des erhöhten Verkehrsaufkommens und der überproportionalen Zunahme des Schwerverkehrs erfordert einen erweiterten Handlungsbedarf gegenüber der bisherigen konventionellen Bauwerksunterhaltung. Anhand des Masterplans „Ingenieurbauwerke im Bestand“ wird dem in finanzieller als auch personeller Hinsicht zukünftig Rechnung getragen. Bis zur Umsetzung von Ertüchtigungsmaßnahmen und Ersatzneubauten müssen die Bauwerke gleichwohl stand- und verkehrssicher bei weitgehendem Erhalt der verkehrlichen Nutzung aufrechterhalten werden. Die hier gegenständliche Hochstraße Benediktusstraße (Benediktusbrücke, siehe Abschnitt 1.2), die im Zuge der Bundesstraße B7 als Haupteinfahrtstrecke aus dem westlichen Vorland in den Stadtkern führt, ist eines der prioritär zum Neubau anstehenden Brückenbauwerke der Landeshauptstadt Düsseldorf. Das vermessungstechnische Moni-

toring hilft den zuständigen Bauingenieuren, jederzeit den aktuellen Zustand zu erfassen. Hierzu bedarf es schneller, einfach zu installierender und wirtschaftlicher Systeme, welche zuverlässig arbeiten, robust und gleichzeitig auch wirtschaftlich einsetzbar sind.

Der Einsatz von Low-Cost-Technologien hat sich bereits im Rahmen einer Reihe von Forschungsvorhaben bewährt. Den Einsatz von Low-Cost-Beschleunigungssensoren zeigt das Projekt „Spatio-temporal monitoring of bridge structures using low cost sensors“ der Leibniz Universität Hannover. In dieser Arbeit wurden die Beschleunigungsmessungen für die Schwingungsanalyse ausgewertet /Omidiazarandi et al. 2019/. Ein weiteres in der Praxis realisiertes System ist das Gap-Filler-Monitoring mithilfe einer Low-Cost-Plattform und Ultraschallabstandssensoren (vom Typ HRC-04). In diesem Projekt wurden einfahrende Züge an 26 Messstellen durch Ultraschallabstandsmessungen überwacht. Letztendlich wurden die kürzesten Distanzen zu einfahrenden Zügen am Bahnsteig genutzt, um die Lücken zwischen Bahnsteig und Zug für den barrierefreien Ausbau zu schließen /Jensen et al. 2018/. Diese beiden Beispiele zeigen exemplarisch auf, dass sowohl kurzzeitige vergleichsweise präzise, aber auch langfristige Einsätze mit Low-Cost-Lösungen realisierbar sind.

In diesem Beitrag wird ein Konzept für ein Low-Cost-System vorgestellt, welches einen Beitrag zur kostengünstigen Überwachung von Ingenieurbauwerken in großer Anzahl erlauben könnte. Derartige Systeme könnten zudem genutzt werden, um vor einer (öffentlichen) Ausschreibung die für ein Monitoringsystem relevanten weitgehend unbekanntenen Kenngrößen zu ermitteln. Dies erlaubt eine effektivere Ausschreibung aufwendiger Monitoring-Konzepte. Nachfolgend wird der Aufbau eines Low-Cost-Neigungsmessers vorgestellt, der auf einem 3-Achsen-MEMS-Beschleunigungssensor basiert. Zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten dieser Eigenentwicklung für das geodätische Bauwerksmonitoring sind Voruntersuchungen notwendig, die die erreichbare Messgenauigkeit der Sensoren auch langzeitstabil unter realen Bedingungen abschätzen lassen.

1.2 Beispiel- und Testobjekt Benediktusbrücke

Die Hochstraße Benediktusstraße, im Folgenden als Benediktusbrücke bezeichnet, ist ein ca. 311 m langes, im Grundriss leicht gekrümmtes Brückenbauwerk, welches 1959 in Spannbetonbauweise errichtet wurde. Die Benediktusbrücke führt die Bundesstraße B7 direkt zur Rheinbrücke Theodor-Heuss-Brücke und ist damit verkehrstechnisch für die Rheinquerung von hoher Bedeutung. In den 1970er-Jahren wurde die Brücke verbreitert und in den 1990er-Jahren wurden bauliche Maßnahmen zur Verstärkung durchgeführt. Die Nutzungsdauer für solche Brückenbauwerke beträgt üblicherweise 70 Jahre, allerdings wurden bei diesen Berechnungen zur Nutzungsdauer die heutigen Verkehrslasten nicht einkalkuliert.

Das Bauwerk besteht aus zwei Teilbauwerken, A und B, die jeweils die Nordseite und Südseite der Brücke darstellen. *Abb. 1* zeigt die Benediktusbrücke unterhalb der Fahrbahn. In *Abb. 1*

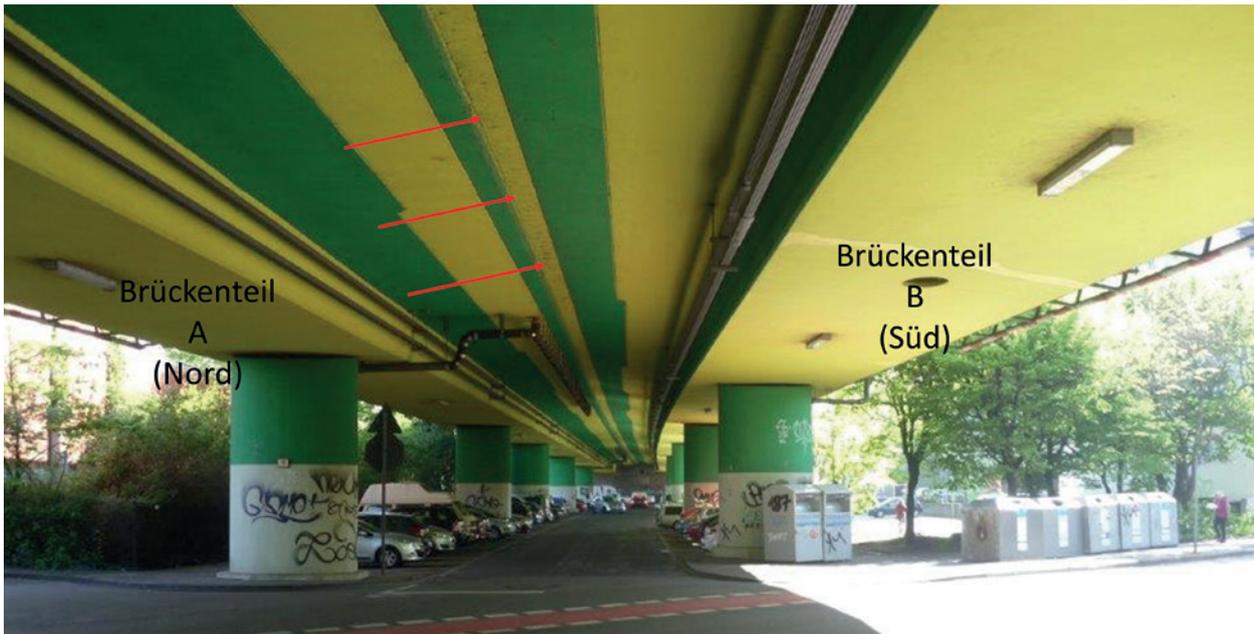


Abb. 1 | Unterseite der Benediktusbrücke (© Landeshauptstadt Düsseldorf)

im mittleren Bereich (rote Pfeilspitzen) befindet sich eine Dehnungsfuge, an der die zwei Brückenteile getrennt sind. Die als Kragarme bezeichneten Erweiterungen sind jeweils am Brückenhohlkasten (tragender Längsträger) befestigt und ragen an beiden Seiten der Brücke heraus. Sie bilden jeweils die äußeren und inneren Fahrspuren. In Abb. 2 wird die Brücke im Querschnitt gezeigt. In Abb. 2 unten ist die Verbreiterungsmaßnahme von 1973 zu sehen. Die Kragarme sind dort als die seitlich leicht abgeschrägten Anbauten zu

erkennen, beispielhaft ist ein Kragarm in Abb. 2 oben grün eingefärbt. Die Schwäche dieser Konstruktion ist die einseitige Aufhängung am Brückenhohlkasten bzw. an dem alten Kragarmende. Im Zuge der weiteren Arbeiten an der Benediktusbrücke ist ein Gutachten /Thomas & Bökamp 2019/ zum Bauwerkszustand mit kurzfristigen Handlungsempfehlungen entstanden, auf das folgend Bezug genommen wird.

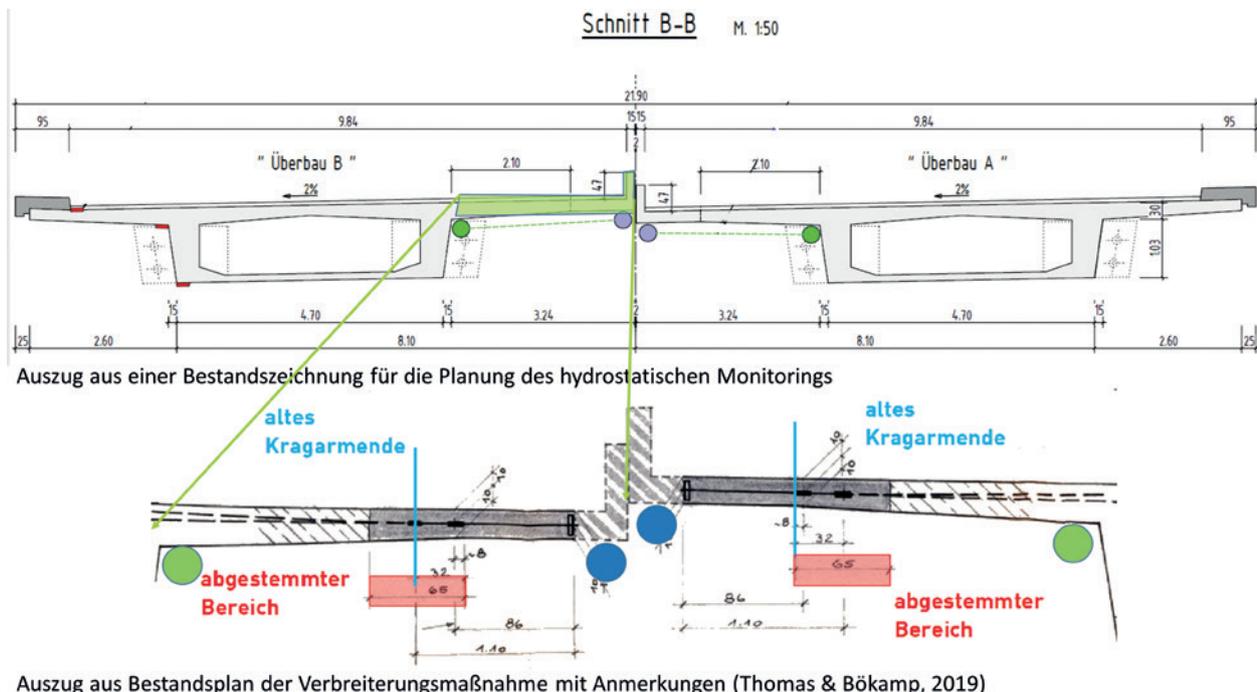


Abb. 2 | Querschnitt der Benediktusstraße, nicht maßstäblich, zur Visualisierung des erwarteten Bewegungsverhaltens der Kragarme /Thomas & Bökamp 2019/. Blau eingezeichnet sind die Messpositionen der Druckschlauchwaage zu sehen. Die grünen Kreise repräsentieren ebenfalls Messpositionen der Druckschlauchwaage, allerdings nur an ausgewählten Positionen.

Im Laufe der Jahre nach den Verbreiterungsmaßnahmen traten wiederholt Koppelfugenrisse an beiden Teilbauwerken auf. Bei einer Überprüfung des Erhaltungszustands im Jahr 1990 konnte eine Gefährdung der Koppelfugen (Spannstahlermüdung) rechnerisch bestätigt werden. Daraufhin wurden 1998 beide Teilbauwerke mit einer externen Vorspannung versehen. Die externe Vorspannung wird über Verankerungskörper, die über Quervorspannung an die Stege des Überbaus nahe der Widerlager angebracht wurden, in den jeweiligen Überbau der Teilbauwerke A und B eingeleitet /Thomas & Bökamp 2019/. Im Fall einer Überlastung vor allem im Bereich des kritischen Steganschnitts ist mit Verformungen des Kragarms zu rechnen. Im Gutachten /Thomas & Bökamp 2019/ wird dafür ein duktiler Biegeversagen definiert, welches in diesem Fall eine messbare Verformung im Dezimeterbereich vorhersagt, bevor es zum Versagen der Konstruktion kommt.

Bis ein neues Konzept zur Instandsetzung oder eines Neubaus vorliegt und umgesetzt werden kann, muss die Brücke die wesentliche Verkehrslast stemmen. Aufgrund der hohen Verkehrslast und des aktuellen Brückenzustands wurden daher folgende Maßnahmen ergriffen: Der gesamte Schwerlastverkehr über 30 t wird umgeleitet. Zudem dürfen in beiden Fahrtrichtungen nur die linken und mittleren Fahrspuren für Kfz bis 3,5 t genutzt werden. Die jeweils rechte Fahrspur erlaubt Lastverkehr, allerdings mit jeweils 50 m Mindestabstand. Dies führt an dieser Stelle des Rheins dazu, dass der Schwerlastverkehr über 30 t die anschließende Rheinbrücke nicht zur Rheinquerung nutzen kann /Paulat 2020/. Neben diesen beschriebenen Maßnahmen wurde ein Monitoringsystem auf Basis eines Druckschlauchwaagenmesssystems installiert. Verwendet wird das Messsystem iGM.NET. Die Sensoren der genutzten Schlauchwaage sind vom Typ PC-HSA4-500 und werden von der Firma Position Control vertrieben. Der Messbereich wird mit 0–500 mm angegeben, die Höhengenaugigkeit beträgt laut Datenblatt $\pm 0,09\%$ FS (MPE) /Techn. Daten Position Control PC-HSA4-500/. Da die Brücke über die Länge von 311 m eine Höhenänderung von ca. 4 m erfährt, musste das Schlauchwaagen-system mit mehreren geschlossenen Kreisläufen realisiert werden. Der Höhenbezugspunkt ist am Widerlager an der Brückenseite West befestigt.

Die Zielgenauigkeit, definiert als Toleranz, für die zu messenden Höhenänderungen wurde vom Auftraggeber mit 2 mm festgelegt. So sollen die äußeren Einflüsse, wie Aufwärmeeffekte, z. B. durch direkte Sonneneinstrahlung, auf das Bauwerk aufgedeckt werden können. Die Alarmierungsgrenze wurde auf 20 mm festgesetzt, da laut Gutachten /Thomas & Bökamp 2019/ die Einflüsse von Verkehr und Aufwärmeeffekten in Summe bis zu 17,7 mm Höhenänderungen an den Kragarmenden hervorrufen können. Die Benediktusbrücke wird ganzheitlich an den inneren Kragarmenden mittels hydrostatischem Monitoringsystem überwacht (Abb. 2 unten, blaue Kreise). Diese Messpositionen werden entlang der Brücke jeweils in einem Abstand von 12,5 m realisiert. Dazu werden an ausgewählten Positionen Messpositionen an den Steganschnitten zum Brückenhohlkörper ausgewählt (Abb. 2 unten, grüne Kreise). Es werden die Höhenunterschiede zum Bezugspunkt am Widerlager West dokumentiert.

2 BEWERTUNG ZUR EINSETZBARKEIT EINER LOW-COST-MEMS: ANFORDERUNGEN UND SENSORIK

Neben dem hydrostatischen Verfahren zur Bauwerksüberwachung existiert eine Reihe weiterer Verfahren, die sich je nach Anwendungsfall gut für den Einsatz im Monitoring eignen. Die bekanntesten für den Monitoringeneinsatz infrage kommenden Technologien sind motorisierte Totalstationen sowie Digitalnivelliere, GNSS, Extensometer und Alignements. Während motorisierte Totalstationen üblicherweise in einer festen Konstruktion installiert werden und Beobachtungen zu Festpunkten sowie den Objektpunkten automatisiert durchführen, bilden Extensometer eine feste Verbindung zwischen dem sich bewegendem Brückenbauwerk und der stabilen Umgebung. Die Achse eines Alignements muss orthogonal zur Bauwerksbewegung ausgerichtet sein, um Bewegungen sichtbar zu machen. Dabei bilden Anfangs- und Endpunkt der definierten Achse die Referenzlinie. GNSS benötigen eine feste Verbindung mit dem sich bewegenden Bauwerksteil und zudem eine freie Sicht zu den Satelliten. Für weitere detaillierte Informationen zu den Verfahren wird auf die einschlägige Literatur verwiesen, u. a. /Möser et al. 2012/ und /Witte et al. 2020/. Die genannten Messverfahren und -systeme wurden vorab in einem Gutachten /Thomas & Bökamp 2019/ als nicht praktikabel für den Einsatz eingeschätzt. Begründet wurde dies mit der besonderen Form der Brücke, welche zudem in einem dicht besiedelten Bereich liegt. Die 311 m lange Brücke verläuft nicht geradlinig und hat einen Höhenunterschied von 4 m über die gesamte Länge. Oberhalb der Brücke liegt die Fahrbahn, sodass oberhalb keine Installationen vorgenommen werden konnten und beispielsweise GNSS als Alternative zum hydrostatischen System keine Berücksichtigung fand. Aufgrund der dichten Bebauung, Vegetation und eines hohen Personenaufkommens unterhalb der Brücke fanden die weiteren Technologien, wie Extensometer und Totalstation, ebenfalls keine Berücksichtigung. Als eine weitere Option können Neigungssensoren zum Einsatz kommen. Allerdings können Höhenänderungen aus Neigungsänderungen nur indirekt zu einem jeweiligen Bezugspunkt berechnet werden. Daher ist das Bauwerk entlang der erwarteten Verformungslinie mit zusätzlichen Neigungssensoren zu beobachten. So ist es mit den Neigungssensoren gezielt möglich, die Höhenänderungen zwischen Brückenhohlkörper und Kragarmenden am jeweiligen Querprofil der Brücke zu bestimmen. Der Aufwand und die Kosten steigen durch die erhöhte Anzahl an notwendigen Sensoren.

Mit MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) steht seit einigen Jahren eine äußerst kostengünstige Technologie zur Verfügung, die zunehmend auch für Messaufgaben diskutiert wird (u. a. /Wild-Pfeiffer & Schäfer 2011/, /Sternberg et al. 2015/, /Willemsen et al. 2017/). MEMS-Sensoren bestehen je nach Sensordesign aus mechanischen, elektrischen, optischen und chemischen Elementen. Es können folgende Eigenschaften MEMS zugeordnet werden: sehr geringe Größe (Sensorkomponenten liegen im Submillimeterbereich), kompakte Bauweise, beispielsweise die favorisierte MEMS MPU-9250: $3 \times 3 \times 1$ mm³, geringer Leistungsbedarf (MPU-9250: 3,4 mA), kostengünstige Massenproduktion, hohe Ausfallsicherheit und geringes Gewicht.

Mit den kostengünstigen MEMS-Sensoren ließe sich somit eine flächendeckende Überwachung eines Bauwerks ökonomisch

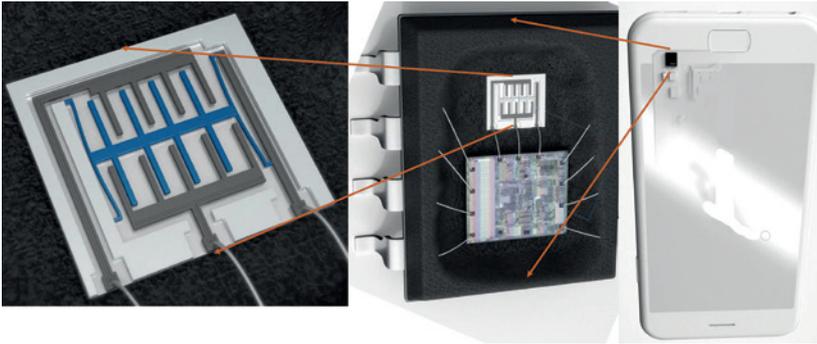


Abb. 3 | Ansicht auf eine Messeinheit einer Achse eines MEMS-Beschleunigungssensors (links) integriert im Smartphone (rechts). Kapazitive Messung der Beschleunigung. Die Abbildungen entstammen einem Video zur Erläuterung des Funktionsprinzips von MEMS-Beschleunigungssensoren /Bosch Mobility Solutions 2022/

darstellen. Eine vielversprechende Entwicklung stellen in diesem Zusammenhang Motion Processing Units (MPU) dar. MPU ist die Bezeichnung für eine Kombination mehrerer MEMS, mindestens 3-Achsen-Gyroskop und 3-Achsen-Beschleunigungssensor. Der MPU-9250 ist eine Sensorentwicklung von TDK-InvenSense und enthält zusätzlich noch einen 3-Achsen-Magnetfeldsensor /Techn. Daten TDK-InvenSense MPU-9250 2016/. Aus dem integrierten 3-Achsen-Beschleunigungssensor lassen sich Neigungen berechnen. Die Sensoren sind üblicherweise in Smartphones oder UAV im Einsatz und kosten wenige Euro. Das Funktionsprinzip einer Achse des 3-Achsen-MEMS-Beschleunigungssensors zeigt Abb. 3. Die Beschleunigung wird kapazitiv detektiert. Durch die Abstandsänderungen zwischen den ineinandergreifenden Kammstrukturen, hervorgerufen durch Beschleunigungskräfte, entstehen Kapazitätsänderungen, die letztendlich in Beschleunigungswerte umgerechnet werden können. Diese Kammstrukturen werden für die drei Achsen des Beschleunigungssensors realisiert. Für weitere und grundlegende Informationen zu MEMS werden /Aggarwal et al. 2010/ sowie /Wild-Pfeiffer & Schäfer 2011/ empfohlen.

Aus den Beschleunigungswerten der drei Achsen des Beschleunigungssensors lassen sich dann die Neigungen für die x - und y -Achse berechnen, siehe Gl. (1) und Gl. (2):

$$r_x = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{a_z} \right), \quad (1)$$

$$r_y = \tan^{-1} \left(\frac{a_x}{a_z} \right). \quad (2)$$

Anhand der Benediktusbrücke kann gezeigt werden, dass die Auswahl eines Monitoring-systems nicht nur durch Preis und Genauigkeit bestimmt wird, sondern in erster Linie durch die grundsätzliche Machbarkeit. MEMS-Entwicklungen können hier vorteilhaft sein, da sie weitestgehend unabhängig voneinander montiert werden können, geringe Sensorkosten haben und in großer Stückzahl verfügbar sind sowie einen niedrigen Energiebedarf haben. Allerdings gibt es nur wenige Untersuchungen, die praxisnah aufzeigen, dass sich diese Sen-

soren für typische Aufgaben in der Bauwerksüberwachung eignet.

Für die Aufdeckung der äußeren Einflüsse, wie Verkehr und direkte Sonneneinstrahlung, wird für die Überwachungsaufgabe an der Benediktusbrücke eine Toleranz $T = 2 \text{ mm}$ vorgegeben. Somit muss das Höhenmesssystem nach dem bekannten Zusammenhang zwischen Toleranz und Standardabweichung (vgl. u. a. /Witte et al. 2020/) angenähert in der Lage sein, eine Höhenänderung mit einer Standardabweichung von $T/5 = 0,4 \text{ mm}$ zu bestimmen. Für die Alarmierungsgrenze von 20 mm ist eine Standardabweichung von $T/5 = 4,0 \text{ mm}$ notwendig. Für den Einsatz

eines MEMS-Beschleunigungssensors als Neigungssensor auf Basis des MPU-9250 sind die einzuhaltenden Standardabweichungen der Höhenänderung in Neigungsänderungen umzurechnen: $0,4 \text{ mm/m}$ entspricht $0,023^\circ$ und $4,0 \text{ mm/m}$ entspricht $0,230^\circ$. Je nach Objektgröße sind die notwendigen Neigungsgenauigkeiten zu skalieren. Für die Neigungsänderungen der Kragarme mit einer Länge von $l = 3,24 \text{ m}$ zum Brückenhohlkörper bedeutet dies: $0,4 \text{ mm}/3,24 \text{ m} = 0,12 \text{ mm/m}$ ($0,007^\circ$) bzw. $4,0 \text{ mm}/3,24 \text{ m} = 1,23 \text{ mm/m}$ ($0,071^\circ$).

3 MACHBARKEITSUNTERSUCHUNGEN IM LABOR

Für einen ersten Eindruck der aus Beschleunigungen berechneten Neigungen wurde in /Willemsen et al. 2017/ ein Vorgängermodell des MPU-9250, der MPU-6050 (integriert im Google Smartphone Nexus 4 von 2014), auf einem Libellenprüftisch untersucht. Für diese Untersuchung wurde der Libellenprüftisch mit dem Neigungssensor Leica Nivel 210 (Standardabweichung laut Datenblatt von $0,005 \text{ mrad}$) bestückt und direkt daneben der MEMS-Sensor MPU-6050 positioniert. Das Leica Nivel 210 ist ein auf einer Flüssigkeit basierender 2-Achsen-Neigungssensor. Die Flüssigkeitsoberfläche

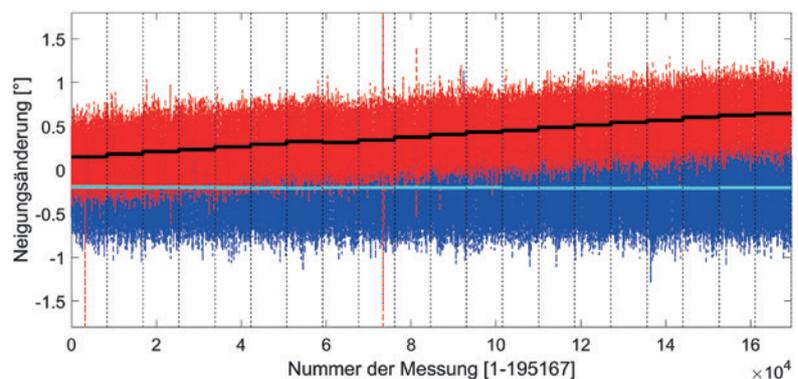


Abb. 4 | Es werden x - und y -Neigungsänderungen angezeigt. Es sind Ergebnisse einer Messung auf einem Libellenprüftisch mit einem 3-Achsen-Beschleunigungssensor des MPU-6050 zu sehen. Rot und blau sind die jeweiligen Neigungsachsen um die x - und um die y -Achse. Messdatenerhebung für 60 s pro Neigungsstellung. Der Libellenprüftisch wurde um eine Achse geneigt (abgeleitet nach /Willemsen et al. 2017/)

definiert dabei den Bezugshorizont. Eine Lichtquelle trifft im Sensor auf den Bezugshorizont, wird dort reflektiert und trifft auf einen flächenhaften Detektor. Die Neigungen in zwei Achsen zum Bezugshorizont können anschließend bestimmt werden. Am Libellenprüftisch wurden Neigungsänderungen mit Winkelschritten von $0,029^\circ$ vorgenommen. 60 Sekunden wurden die Daten für jede Neigung des Beschleunigungssensors aufgezeichnet. Da der MEMS-Sensor mit ungefähr 140 Hz betrieben werden konnte, wurden für jede Neigung 8 600 Einzelmessungen gespeichert. *Abb. 4* zeigt die berechneten Neigungen r_x und r_y zur horizontalen Ebene an. Das vergleichsweise große Rauschen (rot, blau) gibt lediglich eine Tendenz an, die eine systematische Veränderung der Neigung vermuten lässt. Die Mittelbildung dieser 60-s-Bereiche wird durch die beiden mittleren Linien (Schwarz für Rot und Cyan für Blau) mittig im Messrauschen sichtbar. Der Anteil des normalverteilten Rauschens konnte durch die Mehrfachmessung und Mittelung signifikant reduziert werden, sodass die Neigungsänderungen ($0,029^\circ$ zur nächsten Messstelle) deutlich sichtbar werden. Die Standardabweichung einer Einzelmessung liegt bei $3,50 \text{ mm/m}$ ($0,2^\circ$). Für die Neigungsänderung konnte aus den Differenzen der Mittelwerte der 8 600 Einzelmessungen in jeder Position in Bezug zu den Leica Nivel 210 Neigungen eine Standardabweichung von $0,1 \text{ mm/m}$ ($0,006^\circ$) berechnet werden.

Der unter Laborbedingungen durchgeführte Versuch ergab eine Standardabweichung für eine Neigungsänderung von $3,50 \text{ mm/m}$ ($0,2^\circ$). Mit Bezug zum Testobjekt Benediktusbrücke müsste bereits jetzt die Einsatzmöglichkeit auch für die Alarmierungsfunktion infrage gestellt werden, zumal externe Einflüsse (z.B. Temperatur) noch nicht bei diesen Ergebnissen berücksichtigt worden sind. Betrachtet man jedoch das 60-s-Mittel, wurde in diesem Einzelversuch unter Laborbedingung eine Standardabweichung von $0,1 \text{ mm/m}$ ($0,006^\circ$) erreicht. Mit dem MPU-9250 wurde dieser Versuch nun erneut durchgeführt. Es konnte mit dem neuen Sensor die Standardabweichung der Neigungsänderung von $0,006^\circ$ bestätigt werden. Dass hier keine höhere Genauigkeit erreicht wurde, ist nicht verwunderlich, da die Entwicklung neuer MEMS-Sensoren nicht maßgeblich zum Ziel hat, die Genauigkeitssteigerung zu erreichen. Vielmehr sind Performance, Temperaturstabilität und weitere technische Parameter von Bedeutung, die der besseren Integration in anderen Consumer-Elektronikgeräten dient.

Die vorherige Untersuchung zeigt, dass der Anteil des normalverteilten Rauschens in den Messwerten durch Mittelbildung signifikant reduziert werden kann und die Low-Cost-Sensoren damit durchaus die Genauigkeitsanforderungen an der Benediktusbrücke erfüllen könnten. Dennoch sind die in diesem Laborversuch gezeigten Ergebnisse, besonders im Hinblick auf die noch fehlende Betrachtung weiterer Einflüsse, für die Praxis zu hinterfragen. Neben der Genauigkeit ist die Redundanz und Zuverlässigkeit in einem Monitoring von hoher Bedeutung. Da die MPU-9250 vergleichsweise günstig erhältlich sind, ist der Einsatz von mehreren Sensoren auf einer Monitoring-Sensoreinheit vorteilhaft. Neben der gegenseitigen Kontrolle und der besseren Ausfallsicherheit könnte durch das Mittel über alle verwendeten Sensoren eine weitere Steigerung der Nei-

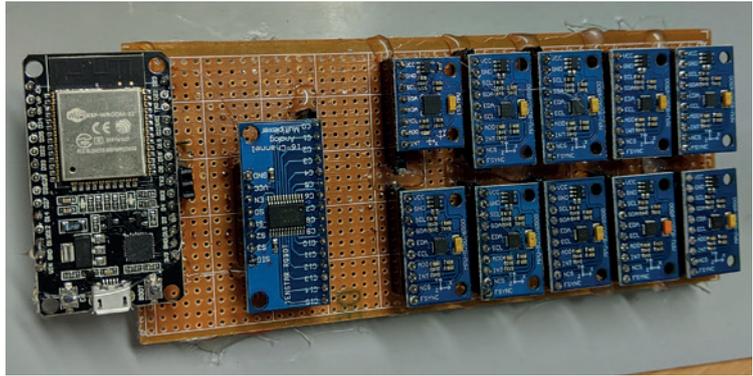


Abb. 5 | Eigenbau einer Multi-MEMS mit zehn MPU-9250-Sensoren. Links ist der Mikrocontroller ESP32 und rechts daneben ein Multiplexer verbaut /Willemsen 2020/.

gungsmessgenauigkeit ermöglicht werden. In gleicher Beobachtungszeit liegen somit mehr Messungen unterschiedlicher Sensoren vor. *Abb. 5* zeigt eine Sensorplatine mit zehn MPU-9250. Das Ziel ist die Beurteilung einer signifikanten Genauigkeitssteigerung durch die Erhöhung der Anzahl gleichzeitig arbeitender Sensoren. Die Genauigkeitssteigerung kann so ohne einen großen Verlust der Messfrequenz erreicht werden. Weiterhin ist eine Genauigkeitssteigerung durch Mittelbildung über einen längeren Messzeitraum möglich, sofern es die jeweilige Anwendung zulässt. Exemplarisch sei auf eine Untersuchung von /Willemsen 2020/ verwiesen, in der eine Multi-MEMS-Plattform verwendet wurde, um die Trajektorie eines Indoor-Mobile-Mapping-Systems zu bestimmen. In der Arbeit konnte durch den Einsatz von zehn MPU-9250 im Vergleich zum Einsatz eines Einzelsensors die Genauigkeit um das Zweifache gesteigert werden.

Die Vorarbeiten und ersten Untersuchungen zeigen, dass eine Steigerung der Genauigkeit von MEMS-Sensoren möglich ist und sich diese trotz des großen Messrauschens für die Bauwerksüberwachung eignen können. Den großen Standardabweichungen der nicht nach geodätischen Maßstäben gefertigten Sensoren können Maßnahmen entgegengestellt werden, wie die Mittelbildung einer größeren Anzahl aufeinanderfolgender Messungen oder die gemeinsame Nutzung einer größeren Anzahl von Sensoren. Die Nutzung mehrerer Sensoren hat neben der Steigerung der Genauigkeit den Vorteil, dass die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems steigt. Grobe Fehler einzelner Sensoren können im direkten Vergleich identifiziert werden. In *Tab. 1* sind zusammenfassend die wichtigsten Kenngrößen aus den zuvor beschriebenen zwei Laboruntersuchungen und den technischen Daten dargestellt.

Neben den messtechnischen Parametern, wie Auflösung und erreichbare Genauigkeit, sind es im Praxiseinsatz vor allem die Einflüsse durch Verkehr (Vibrationen) und Temperatur (Aufwärmeeffekte), die über einen langen Zeitraum auf die Sensorik einwirken und die Messergebnisse verfälschen. Zudem erfassen die Sensoren die eigentlichen Objektveränderungen durch Verkehr und Temperatur. Die ersten Voruntersuchungen der MEMS MPU-9250 müssen daher durch weiterführende Laboruntersuchungen unteretzt und dabei auch der realen Messumgebung möglichst gut angepasst werden, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

	Beschreibung
Sensor	MPU-6050/MPU-9250
Komponenten	MPU-6050: 3-Achsen-Beschleunigungssensor + 3-Achsen-Gyroskop. MPU-9250: 3-Achsen-Beschleunigungssensor + 3-Achsen-Gyroskop + 3-Achsen-Magnetfeldsensor.
Präzision Neigungsmessung im Labor	0,2° oder 3,5 mm/m für eine Einzelmessung (140 Hz). Beeinflusst durch systematische Effekte, die einen Neigungsoffset erzeugen. Entstehung durch sensorinhärentes Rauschen, Nullpunktabweichung und Maßstabsabweichung des Beschleunigungssensors. Verbesserung durch Kalibrierung des Beschleunigungssensors und Messablauf (mehrere Lagen, Umschlagsmessung)..
Neigungsänderung im Labor	Standardabweichung aus Versuchsdurchführung (60-s-Mittel bei 140 Hz): 0,006° oder 0,1 mm/m. Abweichungen zur horizontalen Ebene durch relative Betrachtung unbeachtet .
Messfrequenz	Abhängig von der verwendeten Prozessoreinheit und weiteren installierten Sensoren auf der Platine. In den Eigenentwicklungen mit Arduino und ESP32-Mikrocontroller: 30 Hz bis 450 Hz.
Typisches Einsatzgebiet	UAV und Smartphone

Tab. 1 | Erkenntnisse der Voruntersuchungen für den Einsatz des MPU-6050 in der Bauwerksüberwachung

4 PLATINENDESIGN UND AUFBAU DER SENSORPLATTFORM

Neben den zwingend zu erfüllenden messtechnischen Anforderungen an eine Low-Cost-Plattform bedarf es zudem eines geeigneten Sensorkonzepts, sodass alle notwendigen Funktionalitäten einer Monitoring-Plattform eingebunden sind.

4.1 Konzept einer Sensorplattform

Der Aufbau der Sensorplattform basiert auf Grundlage von MEMS und der notwendigen Sensorinfrastruktur zur Realisierung eines vollständigen Echtzeit-Überwachungssystems. *Abb. 6* visualisiert die konzeptionelle Sensorkonfiguration.

Neben den Beschleunigungssensoren zur Neigungs- und ggf. Schwingungsmessung werden Module zur Datenspeicherung, Messung der atmosphärischen Parameter, wie Lufttemperatur, Luftdruck und relativer Luftfeuchte, sowie zur Messung der Objekttemperatur eingeplant. Die Messwertregistrierung, Vorverarbeitung und das Versenden der Daten werden mittels eines ESP32-Mikrocontrollers realisiert. Dabei handelt es sich um keinen vollwertigen Computer mit eigenem Betriebssystem. Daher ist eine RTC-Sensorik (Real Time Clock: Echtzeituhr des Computers) einzubinden, damit die Sensordaten einen Zeitstempel erhalten. Des Weiteren besitzt der ESP32 eine integrierte Wi-Fi-Schnittstelle, die im Konzept zum Datentransfer über einen LTE-Router an den Server Verwendung findet. Mithilfe der Internetanbindung lässt sich zudem die Drift des RTC-Sensors kompensieren.

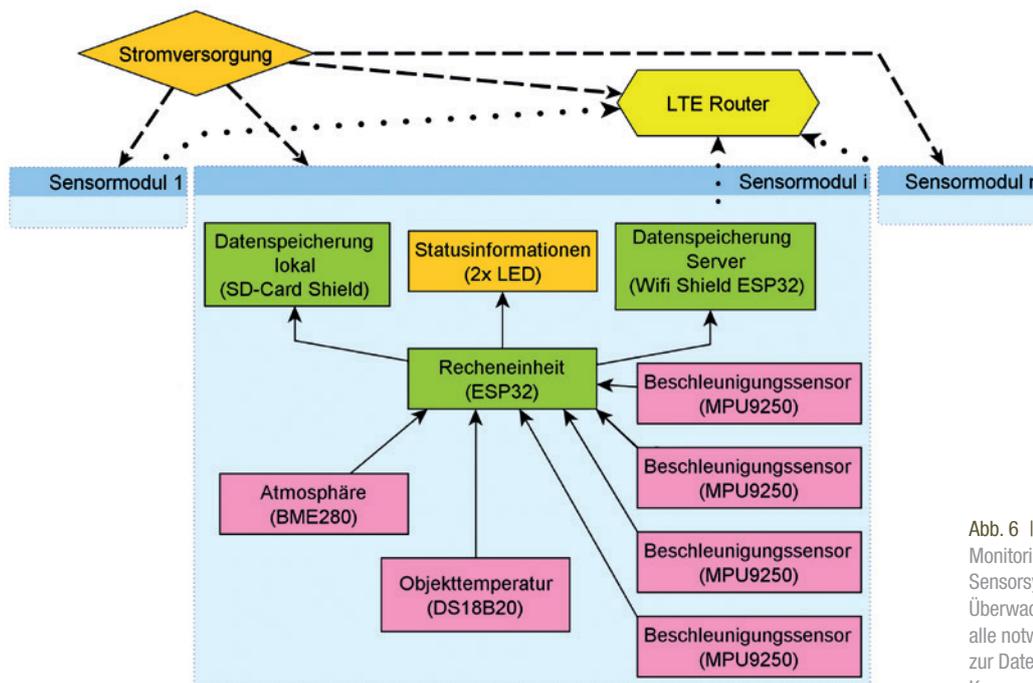


Abb. 6 | Konzept des Low-Cost-Monitoringsystems. Ein kompaktes Sensorsystem, das neben der Überwachungsmesstechnik (rosa) alle notwendigen Komponenten zur Datenaufzeichnung und Kommunikation (grün) enthält.

Folgende Sensoren sind für die Realisierung des Konzepts eingebunden:

- Mikrocontroller ESP32 Node MCU (Recheneinheit),
- RTC-Uhrensensoren (für einen Zeitstempel an den Sensordaten),
- Status-LED zur schnellen Prüfung von Funktionalitäten (Datensicherung und Kommunikation),
- SD Card Shield (Datensicherung),
- BME280 (Lufttemperatur, Luftdruck und rel. Luftfeuchte),
- vier MPU-9250 (mit 3-Achs-Beschleunigungssensor),
- DS18B20-Sonde (Bauwerkstemperatur),
- HC-SR04 (Ultraschallabstandssensor als optionales Messsystem für einen hier nicht diskutierten Anwendungsfall).

Die BME280, der DS18B20 sowie die MPU-9250 sind die umgebungserfassende Sensorik, die Lufttemperatur, Objekttemperatur sowie Neigungen und ggf. Schwingungen aufzeichnen lassen. Alle weiteren Sensoren dienen der Datenvorverarbeitung, Datenkommunikation und Datenspeicherung. In *Abb. 7* ist der Funktionstest des Konzepts auf einem Steckbrett zu sehen. Das Ziel ist der Abruf sämtlicher Funktionalitäten der späteren Sensorplattform. Der eingesetzte Mikrocontroller ist nicht multitaskingfähig, sodass ein hoher Anspruch an das System- und Software-Design gelegt werden muss. Davon abhängig ist die maximal mögliche Messfrequenz der einzelnen Sensoren auf der Plattform, da diese nur hintereinander und nach Abfolge weiterer Arbeitsschritte abgefragt werden können. Zudem ist die Rechenleistung begrenzt. Somit bleibt festzuhalten, dass die Messfrequenz der eingesetzten MPU-Sensoren maßgeblich von der Anzahl aller verwendeten Sensoren und den notwendigen Arbeitsschritten im Mikrocontroller abhängig ist. Das führt dazu, dass gegenüber den Untersuchungen zur Prüfung auf dem Libellenprüftisch /Willemsen et al. 2017/ mit 8600 Messungen pro Minute sich in dieser Realisierung die Anzahl der Messungen eines Sensors auf 4500 Messungen pro Minute reduziert. Da aber vier Sensoren zur Verfügung stehen werden, können $4500 \times 4 = 18000$ Messungen pro

Minute für eine Neigungsberechnung Verwendung finden. Es wurden lediglich vier Sensoren des MPU-9250 verwendet, da in der aktuellen Sensorkonfiguration keine weiteren Steckplätze aufgrund der anderen notwendigen Sensoren am ESP32 verfügbar waren.

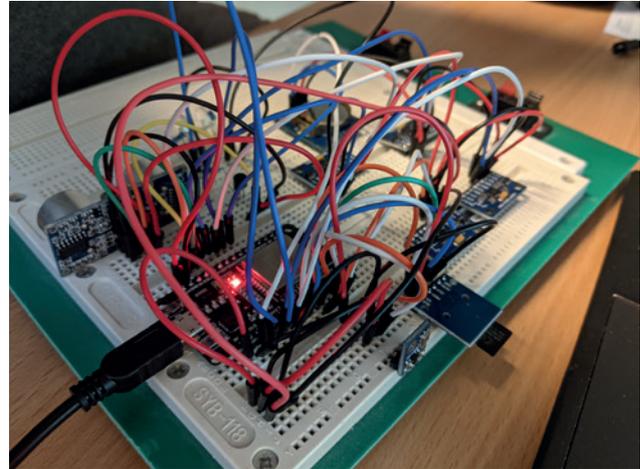


Abb. 7 | Erste Realisierung der Sensorplattform basierend auf dem zuvor erstellten Konzept. Sensoren wurden auf dem Steckbrett befestigt und mit Leitungen an den entsprechenden Anschlüssen verbunden.

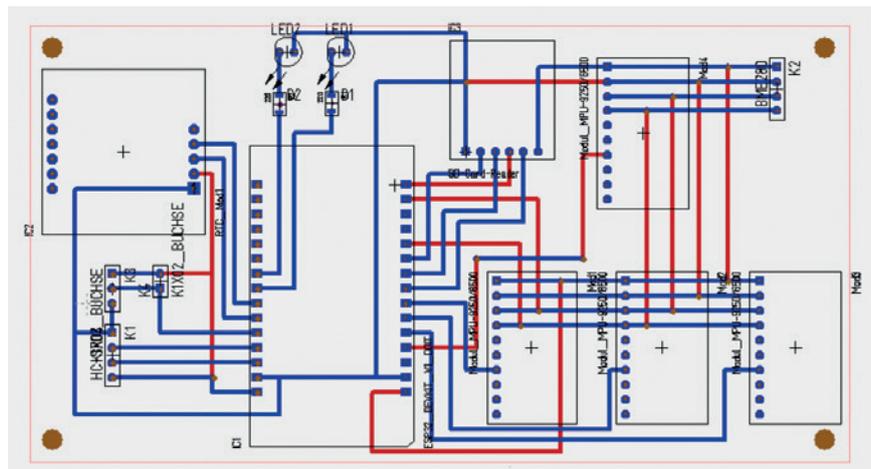


Abb. 8 | Platinenlayout in Target. Rote/blau Linien zeigen die Leiterbahnen an, jeweils farblich unterschieden nach Platinenseite. Zudem sind die Sensoren mit dünn gezeichneten Rahmen sichtbar.

Position	Stückpreis	Anzahl	Gesamtpreis	Bemerkung
Platine	5,00 €	1	5,00 €	Abhängig von der Stückzahl, hier 51 Stück
Mikrocontroller ESP32	8,00 €	1	8,00 €	
MPU-9250	5,00 €	4	20,00 €	4 x, zur Steigerung der Genauigkeit und der Zuverlässigkeit
BME280	5,50 €	1	5,50 €	
SD-Card Shield	3,50 €	1	3,50 €	
DS18B20	4,00 €	1	4,00 €	
Zubehör/Kleinteile	11,00 €	1	11,00 €	LED, Widerstände, Schrauben, Abstandshalter, Buchsenleisten
Gesamtsumme für ein Sensormodul:			57,00 €	

Tab. 2 | Auflistung der ungefähren Anschaffungskosten der einzelnen Komponenten

Zudem muss der ESP32 in der aktuellen Konfiguration alle Sensoren mit Energie versorgen können.

Nach dem ersten erfolgreichen Test zur Funktionalität kann mit dem Platinendesign begonnen werden. Die Fertigung einer professionellen, maschinell gefertigten Platine ist einer manuellen Lötung (siehe *Abb. 5*) vorzuziehen. Als nützliche Software bietet sich hier Target (<https://www.ibfriedrich.com/de/index.html>) an. In Target lassen sich Platinen planen und für jeden Sensor repräsentative digitale Zwillinge erstellen (Bauteile), die das Fertigen des Platinenlayouts stark vereinfachen. Eine große Anzahl typischer Sensoren und Elektronikkomponenten befindet sich bereits in einer Datenbank der Software. In *Abb. 8* ist das Platinenlayout mit allen Beziehungen für die Pin-Belegung zu sehen.

Im Anschluss kann eine definierte Stückzahl der Platinen bestellt und gefertigt werden. Eine Bestückung mit Sensoren wurde im Elektroniklabor der HS Neubrandenburg durchgeführt. Die Platine ist mit einem Isolierspray nachzubearbeiten, welches besonders die Lötstellen gegen Korrosion schützt. Die Kosten für die erstmalige Entwicklung sowie die Softwareentwicklung werden hier nicht weiter berücksichtigt, da diese Kosten einmalig anfallen und sich ggf. zukünftig auf eine große Stückzahl gefertigter Sensoren verteilen lassen. In *Tab. 2* werden die aktuellen ungefähren Kosten der Beschaffung der einzelnen Komponenten angegeben. Mit 57 Euro sind die Kosten für die Hardware äußerst gering. Allerdings entstehen bei jedem Sensormodul Kosten für die Kalibrierung zur Kompensation systematisch wirkender Messabweichungen. Die Bestimmung der Nullpunktabweichung und der Maßstabskorrektur sowie die Temperaturkompensation (vgl. Abschnitt 6) sind für jede Sensorachse eines MPU-9250 durchzuführen /Aggarwal et al. 2010/. Trotz der Möglichkeit, zukünftig mehrere Sensoren gleichzeitig im Kalibrierprozess einzubinden, bleibt dennoch ein signifikanter Personalaufwand bestehen. Dieser wird aktuell mit 100–200 Euro pro Platine angesetzt und beinhaltet die Messdatenerfassung zur Kalibrierung von Nullpunktabweichung und Maßstabskorrektur sowie die Steuerung des Klimageräts bei gleichzeitiger Sensordatenerfas-

sung und abschließender Durchführung der jeweiligen Parameterschätzung.

4.2 REALISIERUNG DER MULTI-MEMS

Das Ziel ist es, eine langlebige Sensorplattform zu entwickeln, die im Außenbereich an einer Brücke auch dauerhaft einsatzbereit bleibt. In einer ersten Realisierung ist die Platine in *Abb. 9* entstanden. Oben rechts in der Abbildung ist die Temperatursonde des DS18B20 für die Bauwerkstemperatur zu sehen. Vergrößert, unten rechts in der Abbildung, ist im Kreis das eigentliche Sensorgehäuse des MPU-9250 zu erkennen. Der in *Abb. 9* gezeigte MPU-9250 befindet sich in einem $3 \times 3 \text{ mm}^2$ großen Gehäuse auf der blauen Platine. Die blaue Platine wurde ganzflächig mit der grünen Trägerplatine verklebt. Beide Platinen bestehen aus dem gleichen FR4-Grundmaterial, einem Verbund von gehärtetem Epoxidharz und Glasfasergewebe. Die Abkürzung FR bezieht sich dabei auf „flame retardant“ und bezeichnet eine Gruppe von Leiterplattengrundmaterialien, die schwer entflammbar sind. Erst dann erfolgte die Verlötlung der blauen Platinen. Mit diesem Grundaufbau sollen zukünftig verschiedene Anwendungsszenarien für MEMS für die Ingenieurvermessung betrachtet werden.

5 SOFTWAREKONZEPT UND DATENVORVERARBEITUNG

Die Programmierung der ESP32-Mikroprozessoren kann mittels der Arduino-IDE-Softwareumgebung (<https://www.arduino.cc/en/software>) durchgeführt werden. Die Struktur des Basisprogramms basiert auf einer Festlegung globaler Variablen, einem nach dem Start durchgeführten Setup, in dem unter anderem die Parameter der Sensoren festgelegt werden, und dem anschließenden Hauptprogrammiercode, der in einer Dauerschleife (loop) wiederholt wird.

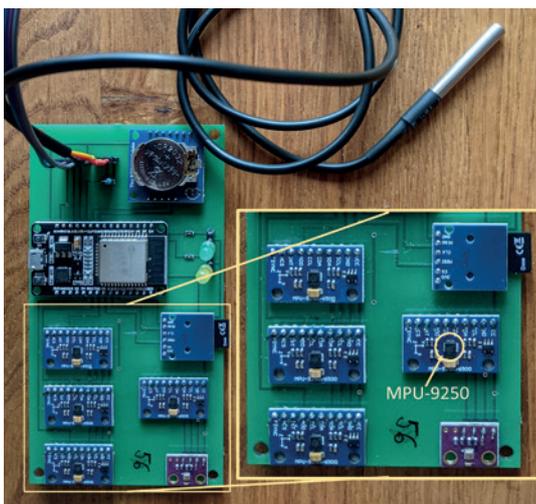


Abb. 9 | Draufsicht auf eine Sensoreinheit mit vier MPU-9250. Rechts oben ist die Temperatursonde des DS18B20 zu sehen. Vergrößert, rechts unten in der Abbildung, ist im Kreis das eigentliche Sensorgehäuse des MPU-9250 zu sehen (gelber Kreis).

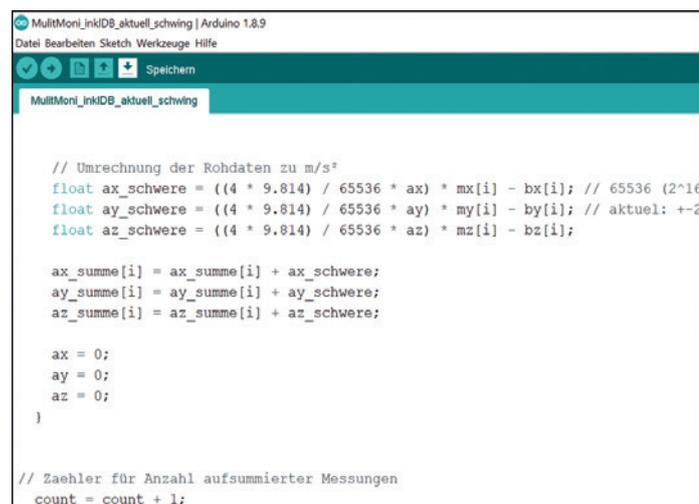


Abb. 10 | Ausschnitt aus der Programmierumgebung Arduino IDE. Zu sehen sind wenige Zeilen Code, in denen die Beschleunigungen der MPU-9250 im Bit-Format zu Beschleunigungen im Format m/s^2 umgerechnet werden. Zudem werden Korrekturen (Maßstäbe m und Offsets x) der Sensorachsen eingebunden.

Im Setup können für die Sensoren je nach Anwendungsfall Voreinstellungen vorgenommen werden. Die eingesetzten MPU-9250 dienen als Neigungssensoren. Da es sich um 3-Achsen-Beschleunigungssensoren handelt, sind beliebige Neigungen ohne Begrenzung des Messbereichs messbar. Die erreichbare Auflösung richtet sich nach den internen Einstellungen des 16-Bit-Analog-Digital-Wandlers für den gewünschten maximalen Messbereich von Beschleunigungen. Für den Sensor wählbare Messbereiche sind: ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g und ± 16 g, die jeweils bei ansteigendem Messbereich zu einer niedrigeren Auflösung der Messwerte des Beschleunigungssensors führen /Techn. Daten TDK-InvenSense MPU-9250 2016/. Die höchste Auflösung wird mit ± 2 g erreicht. Bei 16-bit-Auflösung kann der Messbereich von 4 g (± 2 g) in 65 536 Abschnitte unterteilt werden. Das entspricht $0,0006 \text{ m/s}^2$. Das führt rechnerisch nach Gl. (1) zu einer Neigungsauflösung von näherungsweise $0,06 \text{ mm/m}$ ($0,0035^\circ$). Dieser Messbereich wird für die MPU-9250 festgelegt, da die Auflösung der Neigungsmessung von höherer Bedeutung ist, als hohe Beschleunigungen zu erfassen, beispielsweise hervorgerufen von spontanen Brückenbelastungen.

Der Mikrocontroller ESP32 bildet das Herzstück des Monitoring-systems. Die Daten werden von den Sensoren abgefragt und vorverarbeitet. Zudem können Korrekturen, wie die Parameter der Kalibrierung, eingebunden werden, siehe in *Abb. 10* für Maßstab m und Nullpunktabweichung b . Des Weiteren erfolgt die Mittelbildung vieler aufeinanderfolgender Messwertregistrierungen. In diesem ersten Ansatz werden im Minutentakt Daten bereitgestellt, sodass der Mikrocontroller alle eingehenden Sensordaten innerhalb einer Minute mittelt und dadurch direkt ein rauschreduziertes Ergebnis liefert. Es werden ungefähr 4 500 Messungen pro Minute pro Sensor registriert und gemittelt. Weitere Aktivitäten des Mikrocontrollers sind: Abfragen von Uhrzeit, Temperatur und Luftdruck der weiteren Sensoren, Datensicherung im Minutentakt auf einer Mikro-SD-Karte und Regelung der Statusanzeigen. Besonders von Vorteil ist die im Mikrocontroller integrierte Funkschnittstelle. Diese erlaubt die in *Abb. 11* beschriebene Realisierung des Datentransfers ohne die

notwendige Einbindung weiterer Computertechnik. Das reduziert die Kosten und erlaubt eine flexible Montage. Lediglich die Stromversorgung muss ggf. kabelbasiert erfolgen, wenn keine alternativen autarken Einheiten (Solarzelle) funktionieren. Ergänzend lassen sich weitere Korrekturen, besonders die Temperaturkompensation, nachträglich mittels des php-Skripts vor der Umrechnung der Beschleunigungen zu Neigungen und der Visualisierung einbinden.

6 VORUNTERSUCHUNGEN ZUR MESSTECHNISCHEN TAUGLICHKEIT

Bisher wurde in dieser Arbeit der grundsätzliche Aufbau eines MEMS-Multi-Sensor-Systems (Multi-MEMS) beschrieben. Neben der Zusammenstellung der Soft- und Hardware muss anschließend die messtechnische Tauglichkeit der Multi-MEMS für den Praxiseinsatz in der geodätischen Bauwerksüberwachung untersucht werden. Die Einflüsse, die eine Überwachungsmessung verfälschen können, sind zum einen der Fehlercharakteristik des messenden Sensors und zum anderen der Stabilität der Konstruktion des Sensoraufbaus zuzuordnen. In *Tab. 3* wird ein Überblick der maßgebenden Einflüsse gegeben.

6.1 Messabweichungen des Beschleunigungssensors

6.1.1 Nullpunktabweichung, Maßstabskorrektur und Orthogonalität

Die Achsen des Beschleunigungssensors unterliegen systematischen Abweichungen. Besonders Nullpunktabweichung, Maßstabskorrektur und Orthogonalität erzeugen Messabweichungen, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Neigungsbestimmung haben

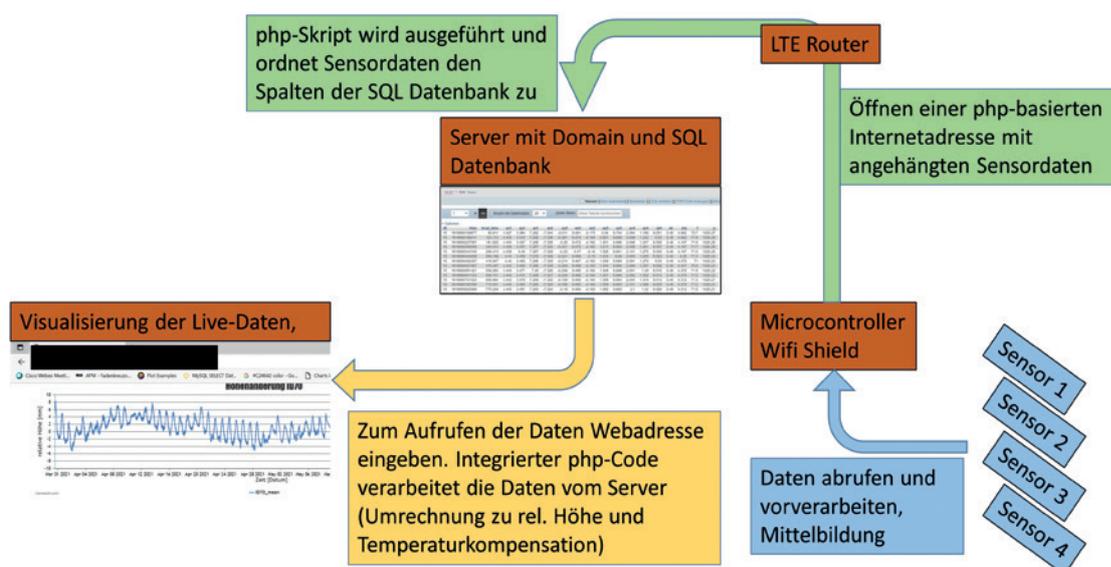


Abb. 11 | Konzept der Datenkommunikation und Visualisierung. Vorteil: Rohdaten werden gesichert, sodass weitere Korrekturen nach verbessertem Kenntnisstand durch ein php-Skript eingebunden werden können.

Ursprung	Bezeichnung	Beschreibung	Auswirkung
MPU-9250 (3-Achs Beschleunigungssensor)	Nullpunktabweichung	Liegt getrennt für jede Achse vor. Gemessene Beschleunigung trotz Ruhelage.	Erzeugt direkt einen Neigungsoffset in Anlehnung an Gl. (1) und Gl. (2).
	Maßstabsabweichung	Liegt getrennt für jede Achse vor. Korrekturfaktor, angegeben mit der Abweichung von 1.	Aufgrund üblicherweise niedriger Beschleunigungen besonders auffällig auf der g -erfassenden z -Achse bei horizontalem Aufbau.
	Orthogonalität	Die drei Achsen des Beschleunigungssensors sind orthogonal zueinander ausgerichtet. Die Abweichungen zu dieser 90° -Ausrichtung zwischen x - y -, x - z - und y - z -Achsen können als Nichtorthogonalitäten bezeichnet werden.	Es werden Beschleunigungen in einer fehlerhaften Ausrichtung erfasst, sodass die einzelnen Sensorachsen höhere bzw. niedrigere Beschleunigungen erfassen.
	Temperatur im Sensorgehäuse	Die Umgebungsbedingungen im Sensor ändern sich und es entstehen Messabweichungen. Auch Einlauf- und Aufwärmeeffekte sind möglich.	Abweichungen abhängig von der im Sensor gemessenen Temperatur.
	Drift	Der Betrag der Abweichung steigt während der Messung an.	Neigungsabweichungen entstehen, Anstieg zeitabhängig.
Konstruktion Sensormodul	(In)Stabilität	Verformungen der Trägerplatine aufgrund äußerer Einwirkungen, wie Vibrationen, Temperatur, Windlast.	Nicht korrigierbare Abweichungen durch unvorhergesehene Verformung der Konstruktion und Platinen.
Verbindung Sensormodul an Objekt	Montageart	Anbringung der Sensormodule kann auf verschiedene Arten erfolgen.	Die Auswirkungen sind je nach Methode unterschiedlich.

Tab. 3 | Überblick der maßgebenden Einflüsse auf eine Überwachungsmessung mit MEMS-Neigungsmessung

können. Den funktionalen Zusammenhang zwischen den Korrekturparametern einer Kalibrierung, der benannten Komponenten und Beobachtungen zeigen Gl. (3) und Gl. (4) /Willemsen 2016/. Als Referenzwert wird der örtliche Schwerewert g herangezogen.

$$g^2 = \hat{a}_x^2 + \hat{a}_y^2 + \hat{a}_z^2; \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{a}_x \\ \hat{a}_y \\ \hat{a}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & r_{x,y} & r_{x,z} \\ r_{y,x} & s_y & r_{y,z} \\ r_{z,x} & r_{z,y} & s_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_x & b_x \\ a_y & -b_y \\ a_z & b_z \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Aus fehlerfreien Beschleunigungen \hat{a}_x , \hat{a}_y und \hat{a}_z lässt sich in Ruhelage g berechnen (Gl. (3)). Den Zusammenhang mit fehlerbehafteten Messungen, dem Maßstab s , der Nullpunktabweichung b (Offset) und den Komponenten der Orthogonalität r beschreibt Gl. (4). Durch das Einsetzen von Gl. (4) in Gl. (3) wird das vollständige funktionale Modell für eine Parameterschätzung erzeugt. In /Willemsen 2016/ wird auf Basis dieses funktionalen Modells ein Kalman-Filter eingesetzt. Damit das Kalman-Filter die Korrekturparameter signifikant schätzen kann, ist eine aussagekräftige Datenerhebung Voraussetzung. Dazu wird die Plattform während der Messdatenregistrierung um die eigene Achse mehrfach rotiert. Dabei ist es entscheidend, dass alle Sensorachsen negativ wie auch positiv während der Rotation zum Schwerevektor ausgerichtet werden. Die Bewegungen sind sehr langsam durchzuführen, damit der Einfluss von weiteren Beschleunigungen, hervorgerufen durch die Rotation, keine signifikanten Auswirkungen hat. Der Vorteil dieses Ansatzes ist die gleichzeitige Bestimmung aller Korrekturparameter aller drei Achsen, sodass auch die Orthogonalitäten mitgeschätzt werden können. Die Datenaufnahme erfolgt allerdings während der Bewegung, sodass zusätzliche Beschleunigungen auftreten können, die nicht dem Schwerevektor zuzuordnen sind.

Da für den Einsatz des MPU-9250 keine absoluten Neigungen, sondern Neigungsänderungen im Vordergrund stehen, kann ein vereinfachter Ansatz der Kalibrierung des 3-Achsen-Sensors genutzt werden, da sich die systematischen Einflüsse durch die Differenzbildung weitgehend reduzieren. Bei diesem vereinfachten Ansatz werden die Orthogonalitäten nicht geschätzt. Lediglich Nullpunktabweichung und Maßstab werden für jede Sensorachse unabhängig betrachtet. Für die Umsetzung der vereinfachten Kalibrierung wird die örtliche Schwerebeschleunigung $g = 9,814 \text{ m/s}^2$ (Neubrandenburg, Quelle: <http://gibs.bkg.bund.de/geoid/gcomp.php?p=s>) als Referenzwert herangezogen sowie eine horizontale Plattform im geodätischen Labor der Hochschule Neubrandenburg genutzt. Die Achsen der Beschleunigungssensoren werden nun positiv und negativ (180° -Drehung des Sensors) zum Erdschwerevektor ausgerichtet. Eine fehlerfreie Sensorachse würde nur den örtlichen Schwerewert (positiv/negativ) aufzeichnen. Nachteilig ist, dass Abweichungen bei der Ausrichtung zur Lotrechten bei der Kalibrierung unentdeckt bleiben und ggf. fehlerhafte Korrekturen erzeugen lassen. Jede Sensorachse jedes 3-Achsen-Sensors wird so überprüft und die Korrekturen für Maßstab und Offset werden berechnet und dokumentiert. Gl. (5) und Gl. (6) zeigen die Berechnung für Maßstab und Nullpunktabweichung.

$$b_x = \frac{(a_x^+ + a_x^-)}{2}; \quad (5)$$

$$m = \frac{g}{(a_x^+ - b)} = -\left(\frac{g}{(a_x^- - b)}\right). \quad (6)$$

Tab. 4 zeigt exemplarisch die Ergebnisse einer Kalibrierung für vier Sensoren auf einer Platine. Dies erlaubt einen Eindruck der Streuung der Parameter. Für die Kalibrierung wurden je Ausrichtung des Sensors für jede Sensorachse fünf Messungen, intern aus einer

Nullpunktabweichung (b) Maßstabsfaktor (m)	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
b_x in m/s^2	0,114	0,102	0,050	0,080
b_y in m/s^2	0,037	0,997	0,045	0,036
b_z in m/s^2	-0,040	-0,207	-0,287	0,021
m_x	0,9961	0,9968	0,9981	0,9972
m_y	0,9957	0,9967	0,9963	0,9971
m_z	0,9893	0,9850	0,9826	0,9821

Tab. 4 | Ergebnisse einer vereinfachten Bestimmung von Nullpunktabweichung und Maßstab der Achsen von vier Beschleunigungssensoren des MPU-9250

Mittelung von 4500 Einzelmessung entstanden, gemittelt. Die Beschleunigungen der für jede Achse ausgegebenen fünf Messungen streuten dabei innerhalb von $0,002 m/s^2$. Die Streuung als Neigungsabweichung ausgedrückt beträgt $0,20 mm/m (0,012^\circ)$.

Anhand der vier Sensoren auf einer Platine zeigt sich die Streuung der zu schätzenden Parameter. Besonders bei den Werten der Nullpunktabweichung streuen die Parameter zwischen $-0,287 m/s^2$ und $+0,997 m/s^2$. Nullpunktabweichungen von bis zu $1 m/s^2$ zeigten sich auch in vorangegangenen Untersuchungen. Es konnte bislang nicht festgestellt werden, ob die große Abweichung durch den Sensor direkt oder durch seine unsachgemäße Verarbeitung, beispielsweise bei Lötarbeiten, hervorgerufen wird. Die Auswirkungen auf eine Neigungsmessung können anhand von Gl. (1) und Gl. (2) berechnet werden. Die maximale Nullpunktabweichung in Tab. 4 ist bei der y -Achse des Sensors 2 mit $0,997 m/s^2$ zu finden. Der Korrekturparameter für die zugehörige z -Achse wird mit $-0,207 m/s^2$ angegeben. Falls diese Werte nicht korrigiert werden, beträgt der Neigungsfehler ungefähr $-5,7^\circ$ (Gl. (7)):

$$\Delta r_x = \tan^{(-1)} \frac{(-0,997)}{(9,814 + 0,207)}. \quad (7)$$

Da aktuell nur Neigungsänderungen von Interesse sind, wird sich dieser Neigungsfehler auch ohne Berücksichtigung der Kalibrierung weitgehend durch die Differenz der berechneten Neigungen minimieren lassen.

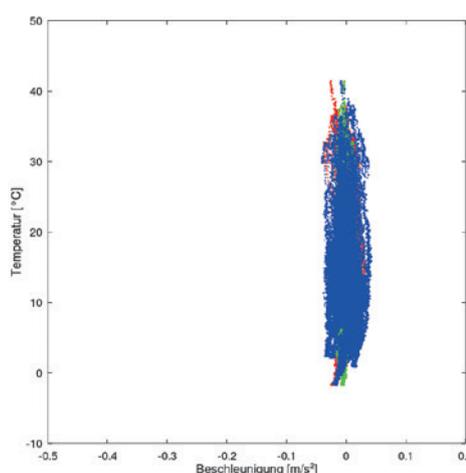
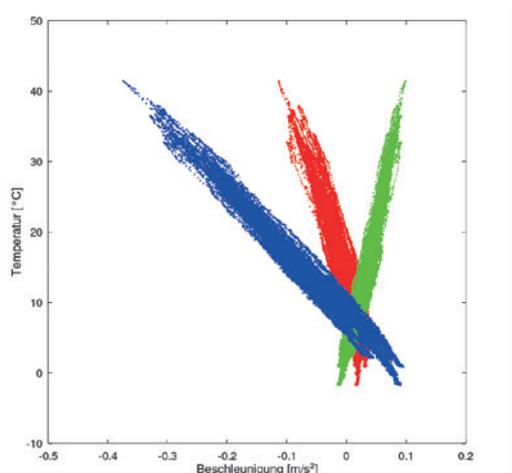


Abb. 12 | Links: Rohdaten einer 6-wöchigen Messung der Beschleunigungen in Ruhelage im Außenbereich. Beschleunigungen auf der horizontalen Achse und Temperaturen auf der vertikalen Achse. Rot = x -Achse, grün = y -Achse und blau = z -Achse des Sensors. Rechts: Nach Anbringung der Korrekturen.

6.1.2 Temperaturbedingte Messunsicherheiten

Der MPU-9250 unterliegt im Außenbereich unterschiedlichen Temperaturen. Während des Betriebs gibt es zwar ein Aufwärmverhalten, allerdings wird die Sensortemperatur besonders durch die Umgebungstemperatur beeinflusst. Die intern vorherrschende Sensortemperatur kann laut Datenblatt eine typische Messabweichung der Beschleunigungsmessungen von $0,026 \%/^\circ C$ erzeugen [Techn. Daten TDK-InvenSense MPU-9250 2016/]. Für den Fall, dass sich die Messabweichungen zur Temperatur linear verhalten, wird folgend eine Temperaturkompensation vorgestellt. Für jede Sensorachse und jeden Sensor sind die Einflüsse von Temperatur unterschiedlich in Ausrichtung und Skalierung. Für eine erste Einschätzung des Einflusses der Temperatur wurde ein Sensor im Außenbereich auf festem Untergrund montiert und es wurden Daten von sechs Wochen Dauer aufgezeichnet (April bis Mai 2021). Die Rohdaten sowie die korrigierten Daten sind in Abb. 12 aufgeführt. Der Temperaturbereich von $-3^\circ C$ bis $42^\circ C$ entspricht der intern im Sensor gemessenen Temperatur. Da es auch zu direkter Sonneneinstrahlung auf das Gehäuse des Sensors kam, sind Aufwärmefekte der Grund für die erhöhten Temperaturen. Die Korrektur erfolgte mit einer Schätzung der Korrekturparameter als lineare Regression (Gl. (8)). Dazu werden der Offset (in m/s^2) und der Maßstab bzw. die Steigung abhängig von der Temperatur (in $m/s^2/^\circ C$) aus Beobachtungen geschätzt. Als Beobachtungen wurden die Differenzen zum Gesamtmittel jeder Beobachtungsreihe je Sensorachse berechnet. Jeder Beobachtung kann eine zugehörige Temperaturmessung t zugeordnet werden:

$$\Delta a_x^t = m_x^t \cdot t + b_x^t; \quad (8)$$

$$\hat{a}_x = a_x + \Delta a_x^t. \quad (9)$$

In Gl. (8) ist der funktionale Zusammenhang für die x -Achse zu sehen. Die Parameter Δa_x^t und t repräsentieren alle Beobachtungen in Vektorform. Für die weiteren Achsen y und z gilt äquivalent der gleiche Zusammenhang. Nach linearer Regression und Anbringung der in Tab. 5 aufgeführten Korrekturparameter (Gl. (9)) zeigen die Achsen des Beschleunigungssensors keine sichtbare Abhängigkeit zur Temperatur (vgl. Abb. 12, rechts).

Achsbezeichnung	Maßstab	Standardabweichung s_m	Offset b	Standardabweichung s_b
x	-0,003394 m/s ² /°C	0,000031 m/s ² /°C	0,0381 m/s ²	0,0006 m/s ²
y	0,002406 m/s ² /°C	0,000021 m/s ² /°C	0,0016 m/s ²	0,0004 m/s ²
z	-0,010007 m/s ² /°C	0,000055 m/s ² /°C	0,0800 m/s ²	0,0011 m/s ²

Tab. 5 | Ergebnis der linearen Regressionen für die x-, y- und z-Achse des Beschleunigungssensors MPU-9250

Die Abweichungen in *Abb. 12* (links) können in Messabweichungen für die Neigungsbestimmung umgerechnet werden. Über den gesamten Temperaturbereich hat die y-Achse (grün) eine Änderung der Beschleunigung von ungefähr 0,12 m/s² erfahren, während sich die Messdaten der z-Achse (blau) in einem Bereich von 0,45 m/s² bewegen. Nach Gl. (2) ergibt sich eine Neigungsabweichung von ungefähr 0,8°.

Die Ergebnisse dieses ersten Versuchs zeigen deutlich auf, dass es einen signifikanten Einfluss der Temperatur auf den MPU-9250 gibt. Zudem wird gezeigt, dass es über eine lineare Regression möglich ist, die signifikanten Bestandteile zu kompensieren, sofern der Sensor keinen zusätzlichen Bewegungen unterliegt. Diese Kompensation lässt sich optimal mithilfe eines Klimageräts im Labor umsetzen, sodass sie zu einem festen Bestandteil im Fertigungsprozess der Multi-MEMS inkl. Kalibrierung werden kann. Zudem wäre es möglich, die Kalibrierung der Sensorachsen direkt unter verschiedenen Temperaturen mit dem Klimagerät durchzuführen. Somit wäre die Temperaturkompensation direkt in die Kalibrierung der Sensoren eingebunden und es entstehen temperaturabhängige Korrekturen für Nullpunktabweichung und Maßstab für jede Sensorachse.

6.2 Drift

Die Messwerte von Beschleunigungssensoren unterliegen Driften. Zu Anfang kann die durch die Drift hervorgerufene Messabweichung meist nicht aufgedeckt werden, da sie niedriger als das Sensorrauschen ist. Bei einer Bauwerksüberwachung werden die Sensoren dauerhaft über Jahre eingesetzt. Eine Drift ruft so Messabweichungen hervor, die zu einer Fehlinterpretation des Bauwerksverhaltens führt. Damit dieser Einfluss aufgedeckt werden kann, sind unabhängige Überprüfungen notwendig. Eine Möglichkeit ist eine periodische Prüfung mit einem zusätzlichen Neigungssensor, der an den jeweiligen Messstellen kurzfristig positioniert wird. Der Einfluss der Drift kann dann durch den Vergleich der Neigungsmessungen beider Systeme zum jeweiligen Zeitpunkt zweier Epochen bestimmt werden. Die Epochen der periodischen Messung müssen dafür einander zugeordnet werden



Abb. 13 | Links: Sensormodul, Sensoren von links nach rechts: RTC Echtzeitzuhrensensoren, LED-Status sowie Mikrocontroller ESP32, SD-Card Shield für die Datensicherung, 4 x MPU-9250, 1x BME280 (lila). Rechts: Sensormodul 102 in einer Zwei-Komponenten-Vollgussmasse eingebunden. Schwarze Sensorgehäuse der MPU-9250 sind nun mit den blauen und der grünen Platine verbunden.

können. Dazu ist eine langzeitstabile Adaptiermöglichkeit zu installieren, die sich beispielsweise mit Passungen oder drei zueinander orthogonal ausgerichteten Ebenen realisieren lässt.

6.3 Konstruktion des Sensormoduls

Eine Verformung des Sensormoduls erzeugt Lageveränderungen der MPU-9250, sodass davon beeinflusste Messungen registriert und als Bauwerksbewegungen fehlinterpretiert werden. Die Konstruktion muss den äußeren Einflüssen, wie Vibration, Windlast, Temperaturen sowie einseitige Erwärmung, standhalten.

Die in *Abb. 9* aufgebaute Sensorplattform ist mit einer geeigneten Konstruktion zu verbinden, damit die Montage an einem Objekt prinzipiell möglich ist. Für die Einschätzung des Einflusses von Temperatur wurden beispielhaft zwei Versuche durchgeführt. Dazu wurden zwei Platinen unterschiedlich befestigt. Eine Platine wurde auf einer Metallkonstruktion als Unterbau mit fünf Schrauben befestigt (*Abb. 13*, links). Die Aluminiumgrundplatte hat eine Dicke von 7 mm. In der Mitte der vier Sensoren findet die Fixierung der grünen Platine mit dem Gehäuseunterbau mit einer Schraube statt. So entsteht unmittelbar bei den vier Sensoren eine Fixierung der Platine. Die äußeren vier Verschraubungen der grünen Platine mit dem Gehäuse werden erst im Anschluss festgeschraubt. Um weitere Einflüsse, wie beispielsweise die Durchbiegung der Platinen durch Ausdehnung, zu minimieren, wird der zweite Aufbau in gleicher Weise vorgenommen und zusätzlich mit einer Vollgussmasse vergossen (*Abb. 13*, rechts). Es wird dazu eine auf einer Zwei-Komponenten-Epoxidharzmasse basierende Gussmasse verwendet. Aus dem Epoxidharz werden vier Abstandshülsen herausgeführt, sodass die Platine nicht auf dem Kunststoffgehäuse lagert. Die Vollgussmasse ist unterhalb der Hauptplatine 10 mm dick. Oberhalb sind die MPU-9250 (schwarze Sensorhülsen) nur mit einer 1 mm dicken Schicht überzogen, da ansonsten die Funktionalität der Anschlüsse am Mikrocontroller nicht gewährleistet werden konnte.

6.3.1 Unterschiedliche Umgebungstemperaturen

Um das Verhalten der beiden in *Abb. 12* vorgestellten Testplatinen unter dem Einfluss verschiedener Temperaturen zu beobachten, wurden die Sensoreinheiten zusammen mit einem Referenzneigungssensor Leica Nivel 210 im Klimagerät der Hochschule Neubrandenburg Temperaturen von -18 °C bis 48 °C ausgesetzt. Dieser Temperaturbereich übertrifft zwar die üblichen in Deutschland gemessenen Temperaturen, allerdings sind die Sensoren in diesem Bereich und darüber hinaus spezifiziert und lassen eine Betrachtung über die üblichen Temperaturen hinaus zu. Die Aufzeichnungsrate der Sensoren wurde auf 1 Sekunde erhöht, sodass Änderungen an den Messwerten durch Temperaturveränderung oder Verformung zeitlich höher aufgelöst aufgedeckt werden konnten. Intern wurden daher lediglich ca. 70 Messungen gemittelt (Messrate 70 Hz).

Die beiden Sensorplatinen wurden entsprechend der Neigungsrichtung des Nivel 210 ausgerichtet (vgl. *Abb. 14*). Die vom Klimagerät entkoppelte Grundplatte wird einseitig aus dem Klimagerät herausgeführt und ist an einer Wand im Labor befestigt. Somit ist

sichergestellt, dass die Vibrationen der Klimaeinheit, hervorgerufen durch den Aufwärm- und Abkühlprozess, nicht auf die Messungen übertragen werden. Das Nivel 210 wird auf der Grundplatte verschraubt, damit das ggf. vorhandene Bewegungsverhalten der Plattform zeitgleich erfasst wird. Alle Sensoren liefern sekundlich Daten und sind über den Aufzeichnungsrechner synchronisiert.

Die gemessenen Neigungen des Nivel 210 liegen im gesamten Messzeitraum zwischen $-0,004^\circ$ und $+0,003^\circ$. Laut technischem Datenblatt des Nivel 210 kann sich die Temperatur mit bis zu $5\text{ } \mu\text{rad}/^\circ\text{C}$ auswirken /Techn. Daten Leica Nivel 210 o. D./.. Über den in diesem Versuch vorhandenen Temperaturbereich können sich daraus systematische Neigungsabweichungen bis zu $0,02^\circ$ ergeben. Diese Neigungsänderungen liegen unterhalb dieses Werts; daher wird die Stabilität der Trägerplattform in Anlehnung an die technischen Daten mit $0,35\text{ mm/m}$ ($0,02^\circ$) angegeben.

In *Abb. 15* sind die aus Beschleunigungen berechneten Neigungen der jeweils vier MPU-9250 entlang der x-Achse zu sehen. In Schwarz wird die jeweils vom Sensor 1 ermittelte Sensortemperatur geplottet. Bis ca. 1,3 h wurde das Klimagerät auf -18 °C herabgekühlt und diese Temperatur gehalten. In allen Sensoren werden

höhere Temperaturen gemessen. Nach 1,3 h wurde das Klimagerät ausgestellt und die Tür geöffnet. Der Aufwärmprozess findet beim Sensormodul ohne Gussmasse schneller statt, während bei dem vergossenen Sensor die Erwärmung langsamer und gleichmäßiger erfolgt (*Abb. 15*). Bei 2,1 h wurde das Klimagerät wieder verschlossen und auf 48 °C aufgeheizt. Bei 2,7 h wurde die Tür des Klimageräts wieder geöffnet und das Heizen wurde ausgestellt. Bei allen Neigungen ist ein Bewegungsverhalten zu erkennen, welches weitgehend synchron zur intern gemessenen Sensortemperatur verläuft. Die Neigungsänderungen erreichen $17\text{--}35\text{ mm/m}$ (1° bis 2°). Mit den Daten des Nivel 210 konnte gezeigt werden, dass die Grundplatte diese Bewegungen nicht vollzieht. Diese Neigungen können daher nur durch eine Verformung der Konstruktion oder durch temperaturbedingte

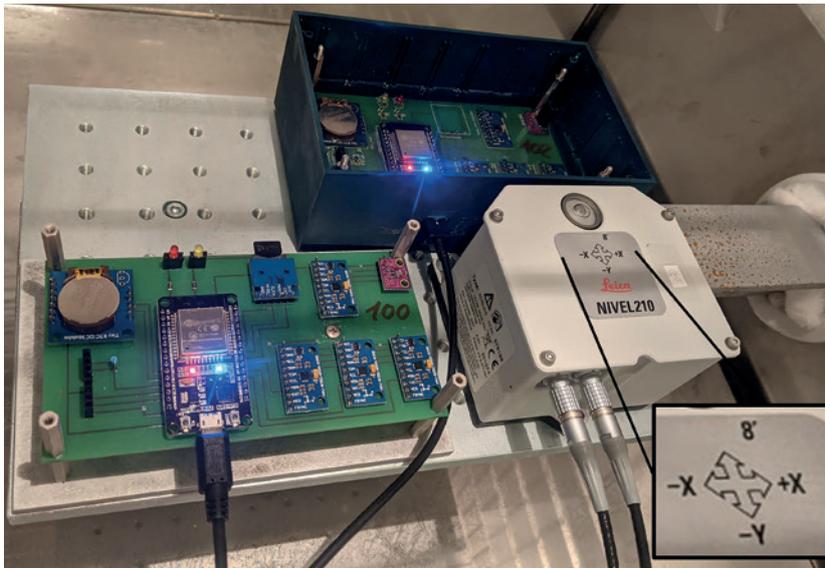


Abb. 14 | Versuchsaufbau im Klimagerät der HS Neubrandenburg. Die Sensormodule 100 und 102 (mit Gussmasse) sind neben einem fest verschraubten Leica Nivel 210 gleich ausgerichtet positioniert. Alle Leitungen sind an einem Gitter im Klimagerät mit Kabelbindern fixiert und sind spannungsfrei gelagert.

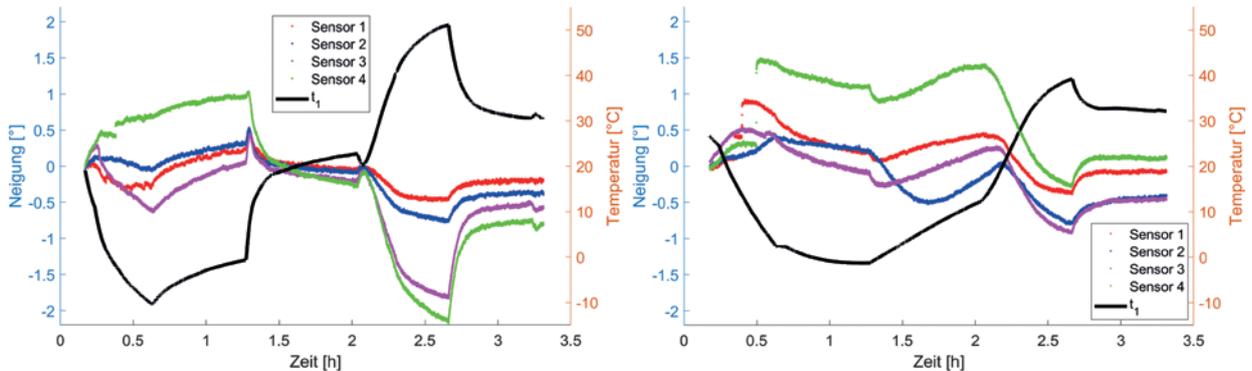


Abb. 15 | Links: Neigungen r_x der vier MPU-9250 des unvergossenen Sensormoduls. In Schwarz ist die interne Sensortemperatur vom Sensor 1 zu sehen. Rechts: Ergebnisse der Messungen im Klimagerät für die vergossene Platine.

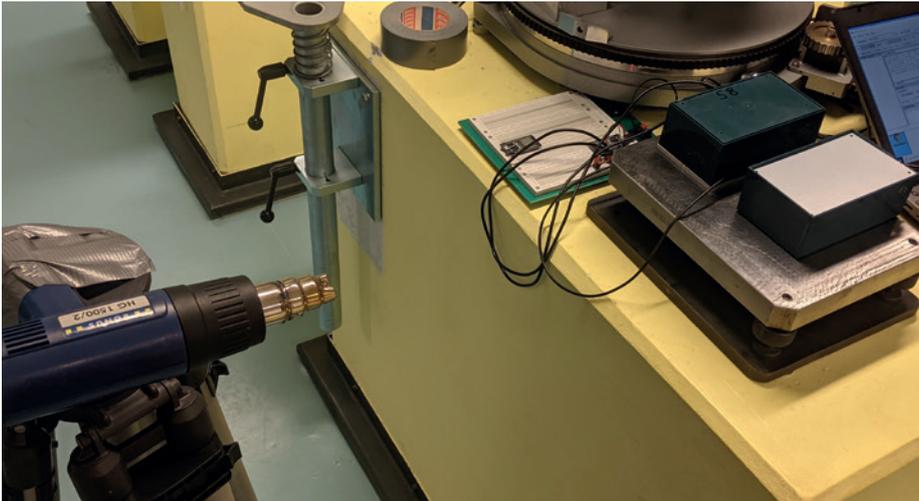


Abb. 16 | Versuchsaufbau zu Auswirkung einseitiger Aufwärmung der Sensormodule. Links ist das Industrieheizgebläse zu sehen. Auf der rechten Seite ist die horizontalisierte Stahlplatte mit den beiden aufgesetzten Gehäusen zu sehen.

Messabweichungen des Beschleunigungssensors hervorgerufen werden. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die gemessenen Neigungen abschließend nicht in die Ausgangslage zurückkehren. Allerdings liegt zum Abschluss der Zeitreihe die Sensortemperatur im Sensor 1 auch noch deutlich höher als zu Beginn der Messung.

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Temperaturen gleichmäßig innerhalb des Klimageräts verändert haben und sich die Platinenkomponenten gleichmäßig erwärmen oder abkühlen konnten.

6.3.2 Einseitige Erwärmung

Um einseitige Aufwärmeeffekte, wie Sonneneinstrahlung, zu untersuchen, wurde eine zweite Versuchsanordnung durchgeführt. Hierfür wurde eine horizontal ausgerichtete massive Stahlplatte verwendet. Die Sensoren wurden mit geschlossenem Gehäuse nebeneinander positioniert. Im Gehäuse wurden zusätzlich je zwei Temperatursensoren positioniert, jeweils an den kurzen Seiten, um die Temperaturveränderungen in den Gehäusen erfassen zu können. Es wurde ein

Heißgebläse verwendet, um hohe Temperaturen in einer kurzen Zeit zu erzeugen. Nach 30 Minuten wurde das Heißgebläse abgestellt, aber die Datenaufzeichnung einige Stunden aufrechterhalten. In Abb. 16 ist der Versuchsaufbau zu sehen.

Das Nivel 210 konnte für diesen Versuch nicht auf der Stahlplatte positioniert werden, sodass in einem ersten Versuch die Sensordaten unter der Annahme ausgewertet werden, dass die Stahlplatte der kurzzeitigen Temperaturveränderung ausreichend Masse entgegenstellen konnte. Die maximal im vorderen Bereich der Sensor-

gehäuse gemessenen Temperaturen betragen 48–50 °C bei ca. 0,8 h. Zur gleichen Zeit wurden bei den hinteren Sensoren im Gehäuse Temperaturen von 30–35 °C gemessen. Anschließend wurde der Aufwärmprozess beendet.

Aus den aufgezeichneten Beschleunigungen wurden Neigungen berechnet. In Abb. 17 werden die Neigungen r_x für jeden Sensor auf der jeweiligen Platine angezeigt. Zudem wird die Temperaturmessung im Sensor 1 in Schwarz gekennzeichnet. Während in beiden Gehäusen nahezu gleiche Temperaturen der Luft gemessen wurden, sind die in den Sensoren gemessenen Temperaturen aufgrund der Gussmasse sehr unterschiedlich. Es hätte eine viel längere Aufwärmphase benötigt, damit die Sensoren in der Gussmasse nahezu den gleichen Temperaturen ausgesetzt wären, wie bei den ungeschützten Sensoren. Bei beiden Sensormodulen zeigen sich ähnliche Ergebnisse wie im Versuch mit dem Klimagerät. Hohe Temperaturen erzeugen hohe Neigungsänderungen. Allerdings lässt sich auch hier nicht ableiten, welchen Anteil der Neigungsänderung die Konstruktionsmängel bzw. die Messabweichungen des Sensors aufgrund von Temperatur haben.

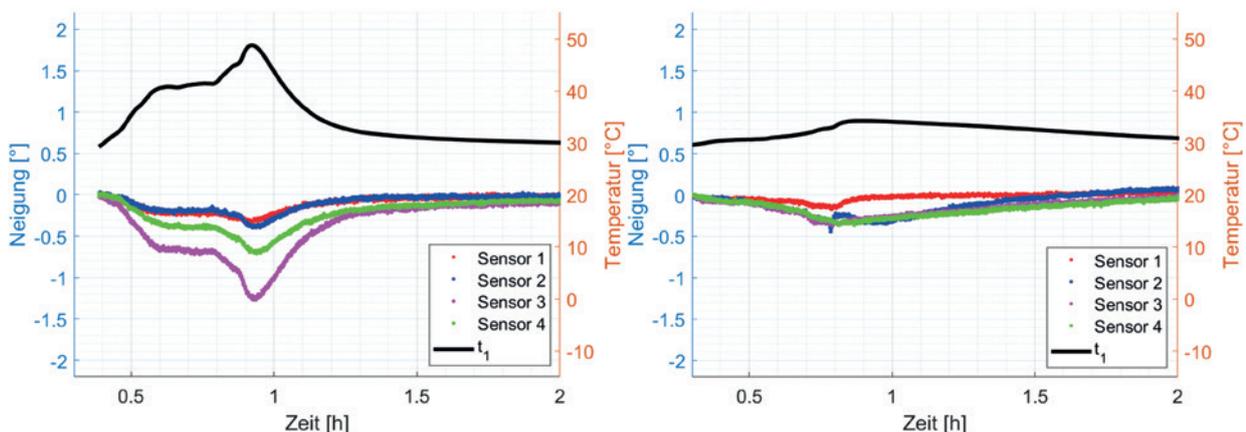


Abb. 17 | Neigungen der vier MPU-9250 der jeweiligen Sensormodule während und nach der einseitigen Erwärmung. Links die Ergebnisse des unvergossenen Sensormoduls und rechts sind die Ergebnisse des vergossenen Sensormoduls zu sehen. In Schwarz ist die interne Sensortemperatur vom Sensor 1 geplottet.

Insgesamt zeigt sich ein Unterschied in den Neigungsberechnungen zwischen Platine in der Gussmasse und der verschraubten Platine. Der offensichtliche Nachteil der lediglich mit fünf Schrauben und Abstandshülsen fixierten Hauptplatine ist die Anfälligkeit auf Verformungen durch Temperatur. Der Ausdehnungskoeffizient des Platinenmaterials, FR4-Verbundmaterial, liegt zwischen 12–17 ppm/°C. Bei der Platinenlänge von 140 mm und 70 °C Temperaturveränderung beträgt die maximale Dehnung bzw. Stauchung 0,17 mm in den Versuchen. Wird nun von einer gleichmäßigen Durchbiegung ausgegangen, biegt sich die Platine bis zu 3,5 mm über den gesamten Temperaturbereich durch. Das würde einer Neigungsänderung von ungefähr 3° entsprechen. Die Verschraubung der grünen Hauptplatine wirkt diesem Effekt zwar entgegen, aber die Verformungen können auch zwischen den jeweiligen Platinen und den Sensorgehäusen stattfinden.

Da die Sensormodule in der Gussmasse im gleichen Verhältnis der Neigungsänderung eine geringe Temperaturerwärmung erfahren haben, ist die Trennung zwischen Messabweichung und Konstruktionsschwäche nicht möglich. Daher bleibt vorerst festzustellen, dass die Konstruktion der Multi-MEMS den gleichen Ansprüchen genügen muss, die auch für geodätische Sensoren gelten, sodass die Konstruktion als Einflussgröße weitgehend minimiert werden kann.

Für weitere Untersuchungen wird eine verbesserte Konstruktion entwickelt, die mit ausgewählten Materialien, wie Invarstahl, realisiert wird. Der neue Aufbau wird gegenüber den hier gezeigten Lösungen und präzisen Neigungssensoren von anderen Herstellern erneut geprüft.

6.4 MONTAGE DER MULTI-MEMS AN DAS ÜBERWACHUNGSOBJEKT

Neben der Sicherstellung einer stabilen Plattform ist zudem die Verbindung zum Überwachungsobjekt von großer Bedeutung. Für eine Überwachung an der Benediktusbrücke sind Verschraubungen untersagt worden. Als Alternative können die Sensoren an dem Bauwerk über eine Grundplatte flächenhaft an das Objekt geklebt werden. Die Auswahl eines geeigneten Klebers ist eine Herausforderung. Es existieren keine Verklebungen, die vollständig ohne Elastizität auskommen. Gerade das zeichnet einen Kleber aus: hohe Elastizität bei starker Haltekraft zwischen unterschiedlichen Materialien. Darüber hinaus müssen die Verklebungen langzeit- und temperaturstabil sein. Für die Auswahl eines geeigneten Klebers ist daher das Elastizitätsmodul ein relevanter Parameter. Der Parameter, definiert als Kraft pro Klebefläche (N/mm²), beschreibt, welche Kraft aufgewendet werden muss, um eine elastische Verformung des Klebers hervorzurufen. Je höher der Wert ist, desto weniger ist der Kleber elastisch. In /Habenicht 2012/ werden Grundlagen zu verschiedenen Klebstoffen vorgestellt. Als Kleber mit geringen verformbaren Klebeschichten werden beispielsweise Epoxidharze und Phenolharze benannt. Der Einfluss von Luftfeuchtigkeit und Temperaturänderung auf die Verklebung wird damit jedoch nicht betrachtet. Zudem muss der Kleber so gewählt werden, dass eine Montage nach den vor Ort vorliegenden Situationen möglich ist. Dazu zählen beispielsweise auch die ggf. notwendige hohe Anfangshaftung einer

Verklebung sowie die zu verklebenden Materialien. Die Untersuchung geeigneter Klebstoffe zur Befestigung von Sensormodulen am Überwachungsobjekt wird daher ein weiterer Bestandteil zukünftiger Untersuchungen sein.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zu Beginn dieses Beitrags wurde dargelegt, dass sich der Aufwand, die marode Verkehrsinfrastruktur in Deutschland zu erhalten, zukünftig deutlich erhöhen wird. Zur Unterstützung dieser Aufgaben werden Technologien benötigt, die nicht nur zuverlässige Messdaten liefern, sondern auch quantitativ in großer Zahl vorliegen. Sensorplattformen auf Basis von Multi-MEMS könnten hier einen wertvollen Beitrag für die zukünftig vermehrt auftretenden Überwachungsaufgaben leisten.

Die hier entwickelte Versuchseinheit kann mit ungefähr 160 bis 260 Euro kostengünstig hergestellt werden. Davon werden ca. 2/3 der Kosten für die Kalibrierungs- und Temperaturkompensationsmaßnahmen vorgehalten. Das Sensormodul basiert auf einem ESP32-Mikrocontroller, der die Sensordaten ausliest, vorverarbeitet und über einen LTE-WLAN-Router an einen Server sendet. Die Installation vor Ort benötigt daher lediglich einen LTE-WLAN-Router und eine Stromversorgung. Nach Auswertung der ersten Voruntersuchungen ist davon auszugehen, dass sich die Kosten noch etwas erhöhen, da mehr Stabilität für die Konstruktion notwendig wird.

Die ersten Machbarkeitsuntersuchungen auf dem Libellenprüftisch im Labor vermitteln einen positiven Eindruck für den Einsatz in der Bauwerksüberwachung. Es können Neigungsänderungen durch die Mittelbildung der Sensordaten über eine Minute mit einer Standardabweichung von 0,1 mm/m (0,006°) berechnet werden. Für den Einsatz an der Benediktusbrücke wäre das bereits ausreichend genau. Die Ergebnisse der weiteren Voruntersuchungen zeigen allerdings, dass der Einfluss von starken Temperaturänderungen auf die Konstruktion und auf die Sensoren erhebliche Abweichungen von 1–3° hervorrufen kann. Diese Einflüsse müssen durch eine verbesserte Konstruktion und weitere Untersuchungen minimiert und erfasst werden, sodass eine Kompensation bestehender systematischer Abweichungen ermöglicht wird.

Die Folgearbeiten werden daher die Optimierung einer stabilen Konstruktion adressieren. Darüber hinaus werden auf Basis der Erkenntnisse der in diesem Beitrag vorgestellten Voruntersuchungen weitere Testszenarien entwickelt und durchgeführt, die zum Ziel haben, die erreichbare Genauigkeit der eingesetzten MEMS unter praxisnahen Bedingungen zu bestimmen.

LITERATUR

- Aggarwal,P.; Syed,Z.; Noureldin,A.; El-Sheimy,N. (2010): MEMS-Based Integrated Navigation (GNSS Technology and Applications). Artech House Inc.
- Averesch, S. (2021): hessenschau.de, Salzachtalbrücke bei Wiesbaden wegen Schäden gesperrt, <https://www.hessenschau.de/wirtschaft/salzachtalbruecke-bei-wiesbaden-wegen-schaeden-gesperrt--a66-und-zuege-betroffen,salzachtalbruecke-a66-100.html>; Artikel vom 18.06.2021 (12.11.2021).

Bosch Mobility Solutions (o.D.): Bosch MEMS-Sensoren – MEMS (mikro-elektro-mechanisches System) – Sensortechnologie im Chipformat. <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/elektronische-bauelemente/mems-sensoren/> (18.02.2022).

Bosch Sensortec, BMP280 tech. Daten (o.D.): Technisches Datenblatt des BMP280. <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/pressure-sensors/bmp280/#technical> (12.11.2021).

Frankfurter Allgemeine Zeitung – Faz.net (2021a): Infrastruktur in Deutschland: Jede zehnte Brücke ist in schlechtem Zustand (aktualisiert am 21.07.2021). <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/auto-verkehr/jedezehnte-bruecke-in-deutschland-in-schlechtem-zustand-17447315.html> (12.11.2021).

Frankfurter Allgemeine Zeitung – Faz.net (2021b): Die Salzachtalbrücke ist Geschichte (aktualisiert am 06.11.2021). <https://www.faz.net/aktuell/rhein-main/region-und-hessen/wiesbaden-die-sprengung-der-salzachtalbruecke-ist-geglueckt-17621739.html> (12.11.2021).

Habenicht, G. (2012): Kleben – erfolgreich und fehlerfrei, 6. Auflage. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.

Jensen, E.; Barnefske, E.; Sternberg, H. (2018): Multisensorsysteme mit MEMS-Sensoren am Beispiel der Bestimmung von Gap-Filler-Breiten. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 143(2018)3.

Löschmann, J.; Ahrens, M. A.; Dankmeyer, U.; Ziem, E.; Mark, P. (2017): Methoden zur Reduktion des Teilsicherheitsbeiwerts für Eigenlasten bei Bestandsbrücken. In: Beton- und Stahlbetonbau 112(2017)8, 506 ff.

Möser, M.; Müller, G.; Schlemmer, H. (Hrsg.) (2012): Handbuch Ingenieurgeodäsie – Grundlagen. 4. Auflage. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Omidalizarandi, M.; Neumann, I.; Kemkes, E.; Kargoll, B.; Diener, D.; Rüffer, J.; Paffenholz, J.-A. (2019): MEMS Based Bridge Monitoring supported by Image-Assisted Total Station. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences LII-4/W18(2019) (GeoSpatial Conference 2019 – Joint Conferences of SMPR and GI Research, 12 – 14 Oktober 2019, Karaj, Iran).

Paulat, V.; Medienportal – Stadt Düsseldorf (2020): Hochstraße Benediktusstraße: Belastung wird Ende März auf 30 Tonnen reduziert, 2020. <https://www.duesseldorf.de/medienportal/pressediensst-einzelansicht/pld/hochstrasse-benediktusstrasse-belastung-wird-ende-maerz-auf-30-tonnen-reduziert.html> (12.11.2021).

Sternberg, H.; Willemsen, T.; Keller, F. (2015): Einsatz von MEMS Inertial-Sensoren für die Orientierung in Gebäuden. In: DVW (Hrsg.): Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen – Darmstadt 2015. Beiträge zum 145. DVW-Seminar am 26. und 27. März 2015 in Darmstadt. Wißner, Augsburg.

Techn. Daten Leica Nivel 210 (2005): Broschüre mit technischen Daten zum Leica Nivel 210. https://leica-geosystems.com/de-de/products/total-stations/systems/geotechnical-sensors/leica-nivel210_220 (22.02.2022).

Techn. Daten Position Control PC-HSA4-500 (o.D.): Technisches Datenblatt des PC-HSA4-500. https://www.position-control.de/wp-content/uploads/2015/11/Datenblatt_PC_HSA4_5001.pdf (22.02.2022).

Techn. Daten TDK-InvenSense MPU-9250 (2016): Technisches Datenblatt des MPU-9250: <https://invensense.tdk.com/download-pdf/mpu-9250-datasheet> (18.01.2022).

Thomas & Bökamp (2019): Monitoringkonzept für die Brücke: „Benediktusstraße in Düsseldorf“, internes Gutachten zur Bewertung potentieller Überwachungsverfahren der Hochstraße Benediktusstraße. Auftraggeber: Landeshauptstadt Düsseldorf (unveröffentlicht).

Vetter, P. (2021): Welt am Sonntag, Welt.de: 3000 Autobahnbrücken in Deutschland teilweise in „ungenügendem Zustand“. <https://www.welt.de/wirtschaft/article233146965/Marode-Infrastruktur-3000-Autobahnbruecken-in-teilweise-ungenuegendem-Zustand.html>. Artikel vom 15.08.2021 (12.11.2021).

Wild-Pfeiffer, F.; Schäfer, B. (2011): MEMS Sensoren, auch für die Geodäsie. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 136(2011)1, 30–39.

Willemsen, T. (2016): Fusionsalgorithmus zur autonomen Positionsschätzung im Gebäude, basierend auf MEMS-Inertialsensoren im Smartphone. Dissertation, HafenCity Universität. Shaker, Aachen.

Willemsen, T. (2020): Multi-MEMS – Genauigkeitssteigerung gegenüber dem Einsatz einzelner Sensoren. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2020. Wichmann, Berlin/Offenbach, 132–143.

Willemsen, T.; Bornholdt, M.; Keller, F.; Sternberg, H. (2016): Untersuchungen zum Einsatz eines MEMS MPU-6050 zur Neigungsmessung. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016. Wichmann, Berlin/Offenbach, 72–83.

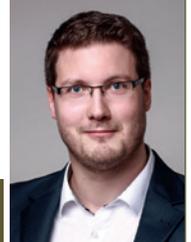
Willemsen, T.; Eppinger, G.; Sternberg, H. (2017): MEMS in der Ingenieurgeodäsie – Low-Cost-Sensorik zur Bewältigung komplexer Aufgaben. In: Lienhart, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 17. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, 2017. Wichmann, Berlin/Offenbach, 147–162.

Witte, B.; Spärla, P.; Blankenbach, J. (2020): Vermessungskunde für das Bauwesen mit Grundlagen des Building Information Modeling (BIM) und der Statistik. 9. Auflage. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Willemsen

HOCHSCHULE NEUBRANDENBURG

Brodaer Straße 2 | 17033 Neubrandenburg
willemsen@hs-nb.de



Dipl.-Ing. (FH) Michael Engenhorst

LANDESHAUPTSTADT DÜSSELDORF
AMT FÜR BRÜCKEN-, TUNNEL- UND
STADTBAHNBAU

Auf'm Hennekamp 45 | 40225 Düsseldorf
Michael.Engenhorst@duesseldorf.de



Dipl.-Ing. (FH) Andreas Schmitz

LANDESHAUPTSTADT DÜSSELDORF
AMT FÜR BRÜCKEN-, TUNNEL- UND
STADTBAHNBAU

Auf'm Hennekamp 45 | 40225 Düsseldorf
andreas.schmitz_amt66@duesseldorf.de



**Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing (FH)
Uwe Dankmeyer**

LANDESHAUPTSTADT DÜSSELDORF
VERMESSUNGS- UND KATASTERAMT

Brinkmannstraße 5 | 40225 Düsseldorf
uwe.dankmeyer@duesseldorf.de

