

Voruntersuchung zum Einsatz von kostengünstigen MEMS-Beschleunigungssensoren für die kontinuierliche Bestimmung der Lageänderung von Brückenbauwerken

Dominik Thiem¹, Andreas Hennig¹, Gregor Schiele², Martin Krückhans³

¹Hochschule Ruhr West, Institut Mess- und Sensortechnik, 45479 Mülheim an der Ruhr, Deutschland

²Universität Duisburg-Essen, Eingebettete Systeme der Informatik, 47057 Duisburg, Deutschland

³Stadt Essen, Amt für Geoinformation, Vermessung und Kataster, 45127 Essen, Deutschland

Zusammenfassung

Die kontinuierliche Überwachung von Brückenbauwerken gewinnt vor dem Hintergrund einer alternden Infrastruktur und steigender Verkehrsbelastungen zunehmend an Bedeutung. Für eine flächendeckende Anwendung sind kostengünstige, langlebige und zugleich hinreichend genaue Sensorsysteme erforderlich. Der vorliegende Beitrag untersucht, inwieweit sich preisgünstige MEMS-Beschleunigungssensoren für die kontinuierliche Erfassung von Lageänderungen an Brücken eignen. Im Mittelpunkt stehen dabei zwei wesentliche Störgrößen: verkehrsbedingte dynamische Einflüsse an der Messstelle sowie temperaturabhängige Änderungen der Sensoreigenschaften.

Zur Bewertung des Verkehrseinflusses wurde ein Messsystem in einer stark frequentierten Straßenbrücke installiert und über mehrere Monate kontinuierlich betrieben. Ergänzend wurden die Genauigkeit der Sensorik unter Laborbedingungen sowie parasitäre Effekte in einem Klimaschrank über einen weiten Temperaturbereich untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich verkehrsbedingte Störungen aufgrund ihrer höheren Frequenzanteile durch eine ressourcenschonende Filterung wirksam um etwa 55 dB reduzieren lassen. Darüber hinaus lassen sich temperaturbedingte Abweichungen einzelner Sensorachsen durch sensor- und ausrichtungsabhängige Referenzmessungen sowie eine polynomiale Kompensation deutlich verringern, die Streuung sinkt um etwa den Faktor sechs.

Die Untersuchungen belegen, dass die eingesetzte Sensorik die geforderte Winkelauflösung von $0,0057^\circ$ grundsätzlich erreichen kann. Gleichzeitig zeigt sich die Relevanz einer individuellen Charakterisierung jedes Sensorelements, da jede Sensorachse in unterschiedlichen Einbaulagen markante temperaturbedingte Störungen aufweisen kann. Für quasistationäre Größen dieses Anwendungsfalls mit einer gleichbleibenden Ausrichtung lässt sich der Aufwand der erforderlichen Referenzmessung auf Basis dieser Voruntersuchung jedoch erheblich reduzieren.

Keywords:

kapazitive Beschleunigungssensoren, Inklinometer, Temperaturkompensation, Brücke, Structural Health Monitoring,

Einleitung

Nachbergbauliche Bodenbewegungen sowie eine alternde Infrastruktur, insbesondere im Brückenbestand, führen zu einem wachsenden Bedarf an flächendeckender Überwachung. In Deutschland existieren rund 130000 Brücken, darunter etwa 39500 Brücken an Autobahnen und Bundesstraßen sowie rund 64000 kommunale Straßen-, Fußgänger- und Radwegbrücken. Besonders kritisch ist das Alter vieler Bauwerke: Mehr als die Hälfte wurde vor 1985 errichtet und muss heute deutlich höhere Verkehrslasten aufnehmen als ursprünglich vorgesehen [1, 2].

Die Überwachung erfolgt derzeit überwiegend durch gesetzlich vorgeschriebene Regelprüfungen im Abstand von drei bis sechs

Jahren [3]. Diese Prüfungen liefern jedoch lediglich Momentaufnahmen des Bauwerkszustands. Kontinuierliches Structural Health Monitoring mit fest installierter Sensorik ist bislang die Ausnahme und findet meist nur im Rahmen einzelner Pilotprojekte Anwendung [4–7]. Der Fokus liegt dabei häufig auf bekannten Schadstellen oder zeitlich begrenzten Belastungssituationen. Die geringe Verbreitung solcher Systeme ist vor allem auf hohe Kosten, fehlende Standardisierung sowie den hohen Implementierungsaufwand in Bestandsbauwerken zurückzuführen [8, 9].

Problemstellung

Für eine flächendeckende Anwendung sind kostengünstige, langlebige und zuverlässige Sensoren essenziell. Eine wesentliche

Herausforderung besteht in der Überlagerung der eigentlichen Messgröße durch Störeinflüsse, insbesondere durch Verkehr, Temperaturschwankungen und Langzeitdrift der Sensorelemente. Kostengünstige MEMS-Beschleunigungssensoren haben ihre Eignung zur Erfassung dynamischer Effekte, etwa von Eigenschwingungen, bereits gezeigt [10, 11]. Für die Bestimmung quasistatischer Größen wie Lageänderungen können sie jedoch nicht ohne Weiteres eingesetzt werden.

Die Ursache liegt insbesondere in ihrer ausgeprägten Temperaturabhängigkeit. Diese kann unter anderem durch thermische Spannungen infolge unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten der Materialien sowie durch Drift der Ausleseelektronik hervorgerufen werden [12–14]. Bereits Temperaturänderungen von wenigen Grad Celsius können dadurch Messfehler in der Größenordnung der zu erfassenden Neigungsänderung verursachen. Da bei jedem Sensor die einzelnen Achsen individuelle Temperaturabhängigkeiten aufweisen, die zusätzlich auch von der Einbaulage und gegebenenfalls dem Alter abhängig sind, ist ihre Vorabcharakterisierung aufwändig. Genau dies erschwert bislang eine breite Massenanwendung solcher Sensoren. Der vorliegende Beitrag untersucht daher zwei zentrale Einflussgrößen: Erstens den Einfluss von Verkehr und umgebungsbedingten Störungen an einer realen Messstelle und zweitens die Temperaturabhängigkeit sowie die allgemeine Genauigkeit der Sensorik unter Laborbedingungen. Auf Basis der gewonnenen Teilergebnisse wird ein reduzierter Ansatz zur Kompensation dieser Einflüsse vorgestellt.

Grenzen der Sensortechnologie

Als erster Indikator für ein kontinuierliches Monitoring wird die Änderung der Lage eines Bauwerks betrachtet. Dabei ist nicht die absolute Lage des Sensors entscheidend, sondern ausschließlich deren zeitliche Änderung. Die eingesetzte Sensorik basiert auf kostengünstigen MEMS-Beschleunigungssensoren, die die Beschleunigung in zwei orthogonalen Achsen erfassen. In der vorliegenden Anwendung soll der Sensor keiner relevanten dynamischen Beschleunigung ausgesetzt sein, sondern im Wesentlichen nur die Erdbeschleunigung, als Grundlage für die Berechnung der Lage, detektieren.

Durch die Auswertung zweier Achsen lassen sich sowohl Verdrehungen mit dem Winkel φ als auch Verkippungen um die y-Achse des Bezugssystems bestimmen (siehe Abb. 1), ohne dass das Ergebnis unmittelbar von Ausrichtungsfehlern oder vom exakten Betrag der Erdbeschleunigung abhängt [15].

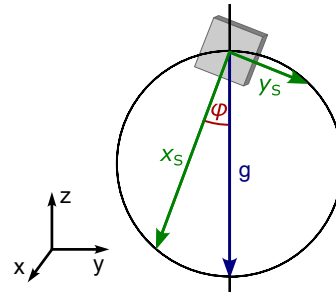


Abb. 1: Ausrichtung eines Sensorelements mit zugehörigen Beschleunigungskomponenten und Bezugssystem.

Als Zielauflösung wird eine Winkeländerung von $0,0057^\circ$ angesetzt, für eine direkte Vergleichbarkeit mit einem an der Messstelle genutztem Messverfahren. Dies kann eine Höhenänderung von 1 mm auf einer Messstrecke von 10 m detektieren, was gemäß dem geometrischen Zusammenhang den genannten Winkel entspricht. Voruntersuchungen zeigten, dass neben der Auflösung insbesondere Skalierungsfehler und Temperaturabhängigkeiten einzelner Achsen die größten Einflüsse auf das Messergebnis haben. Der IIS2ICLX der Firma STMicroelectronics wurde als Sensor gewählt, da er den Stand der Technik für hoch präzise Beschleunigungssensoren repräsentiert. Dieser zeichnet sich durch geringes Rauschen, hohe Stabilität und eine hohe Wiederholgenauigkeit aus und wird daher auch für Inklinometeranwendungen empfohlen. Unter Berücksichtigung der Herstellerangaben ist bei einer Sensitivität von $0,061 \text{ mg/LSB}$ je nach Ausrichtung ein maximaler Quantisierungsfehler von weniger als $0,005^\circ$ zu erwarten (siehe Abb. 2) [15].

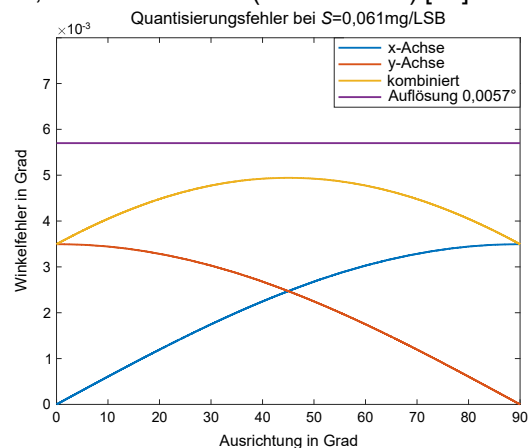


Abb. 2: Maximaler Winkelfehler durch Quantisierungsfehler einer Achse (blau, rot) in Abhängigkeit von der Ausrichtung und bei Kombination beider Achsen (gelb).

Gleichzeitig ist die temperaturabhängige Änderung der Sensitivität mit bis zu $\pm 0,012\%/^{\circ}\text{C}$ angegeben. Daraus ergibt sich, dass bei unveränderter Sensorausrichtung bereits deutliche scheinbare Winkeländerungen auftreten können. Im ungünstigsten Fall kann bei einer Ausrichtung von 45° (gemäß der Definition in Abb. 1) und entgegengesetzten Temperaturkoeffizienten beider Achsen bei einer Temperaturspanne von 50°C eine scheinbare Winkeländerung von etwa $0,34^{\circ}$ entstehen.

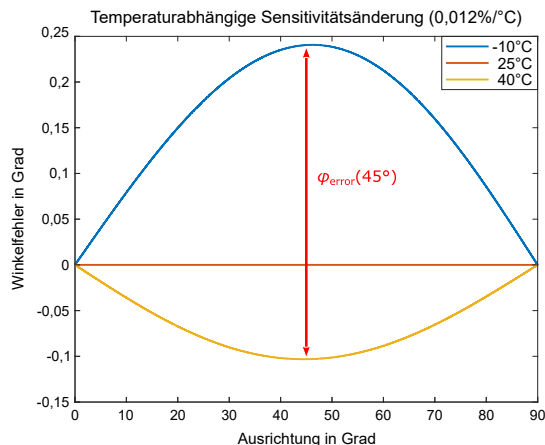


Abb. 3: *Maximaler Winkelfehler durch temperaturabhängige Sensitivitätsänderung in Abhängigkeit von der Ausrichtung*

Im Folgenden wird deshalb untersucht, wie stark die tatsächlichen Störungen an einer repräsentativen Messstelle ausfallen (*Testinstallation im Brückenbauwerk*) und welche praktische Genauigkeit unter idealisierten Bedingungen erreicht werden kann (*Genauigkeit der Sensorik*).

Testinstallation im Brückenbauwerk

Zur Untersuchung realer Störeinflüsse wurde in einer etwa 60 Jahre alten Straßenbrücke, die eine Bundesstraße im Ruhrgebiet trägt, ein Messsystem mit zwei Sensoren installiert. Beide Sensoren zeichnen kontinuierlich mit einer Abtastrate von 5 Hz auf. Die x-Achse ist jeweils in Fahrtrichtung, also näherungsweise horizontal ausgerichtet, die y-Achse zeigt näherungsweise in Richtung der Erdbeschleunigung, also vertikal.

Daraus ergibt sich, dass die x-Achse vor allem sensorinterne Störungen und Bewegungen des Bauwerks abbildet, während die y-Achse zusätzlich den größtmöglichen Einfluss des Straßenverkehrs enthält. Die ungefilterten Messwerte (siehe Abb. 4) bestätigen diese Erwartung. Im Verlauf der x-Komponente ist eine deutliche Ähnlichkeit zum Temperaturverlauf erkennbar. Diese kann sowohl auf temperaturinduzierte Bauwerksbewegungen

als auch auf die Temperaturabhängigkeit des Sensors zurückzuführen sein; eine nachträgliche Trennung der Ursachen ist an dieser Messstelle jedoch nicht möglich. In der y-Komponente ist dieser Zusammenhang aufgrund der Skalierung und der stärkeren Überlagerung durch verkehrsbedingte Störungen weniger direkt sichtbar.

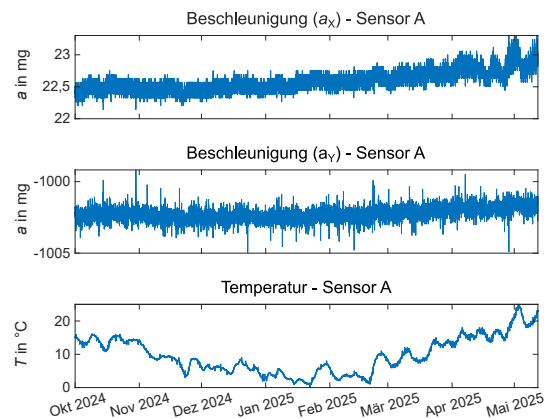


Abb. 4: *Ungefilterte Messwerte der Beschleunigungskomponenten und Sensortemperatur.*

Werden beide Beschleunigungskomponenten geometrisch kombiniert (siehe Abb. 5), treten die verkehrsbedingten Störungen deutlicher hervor. Im Mittel sollte näherungsweise 1 g detektiert werden, die beobachteten Auslenkungen sind primär dem Verkehr zuzuschreiben. Temperaturbedingte Einflüsse können in kurzen Betrachtungszeiträumen aufgrund ihrer deutlich geringeren Änderungsrate vernachlässigt werden. Im Zeitverlauf zeigt sich, dass die Störungen vor allem werktags und tagsüber ausgeprägt sind, während sie an Wochenenden sowie in den Randzeiten des Tages abnehmen. Dieses Verhalten stimmt mit dem zu erwartenden Verkehrsaufkommen überein. Im Spektrogramm konzentrieren sich die dominanten Anteile der Störungen insbesondere auf Frequenzbereiche um 1,1 Hz und 2,2 Hz.

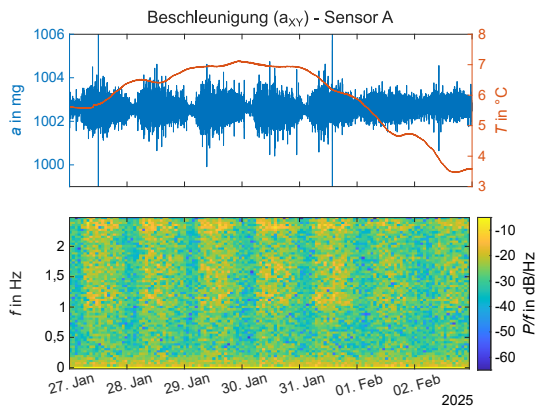


Abb. 5: Oben: Beschleunigung und Temperatur eines Sensors innerhalb einer Woche. Unten: Spektrogramm der gemessenen Beschleunigung.

Für eine detailliertere Analyse werden zwei Zeitfenster im Frequenzbereich verglichen (siehe Abb. 6): Montag von 6:00 bis 10:00 Uhr als Zeitraum hohen Verkehrsaufkommens und Sonntag von 0:00 bis 4:00 Uhr als Zeitraum geringen Verkehrsaufkommens. Im Spektrum zeigt sich ab etwa 20 mHz ein klarer Unterschied zwischen beiden Zuständen. Diese Differenz kann dem Einfluss des Verkehrs zugeschrieben werden.

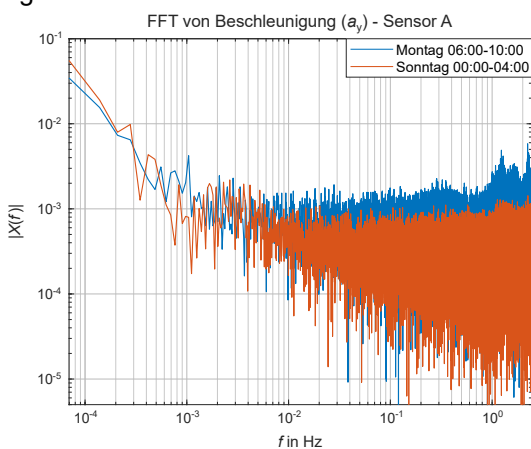


Abb. 6: FFT für verschiedene Zeitbereiche, Einfluss des Verkehrsaufkommens.

Bereits durch den Einsatz einer Tiefpassfilterung mit einem Moving-Average-Filter lässt sich das Rauschen deutlich reduzieren [16]. Die zuvor beschriebenen verkehrsbedingten Störungen sind danach im Spektrogramm deutlich weniger ausgeprägt.

Genauigkeit der Sensorik

Unabhängig von den an der Messstelle beobachteten Störungen ist die tatsächliche Genauigkeit der verwendeten Sensoren unter idealen Umgebungsbedingungen zu bewerten.

Dazu wird betrachtet wie nah der Messwert am wahren Wert liegt. Hierzu wird ein Sensorpaar auf einem drehbar gelagerten Balken montiert. Dieser Balken kann über einen motorisierten Linearpositionierer mit mikrometergenauer Verstellung (*ThorLabs LNR50SE* und *ThorLabs BSC103*) schrittweise bewegt werden. In Abhängigkeit vom Abstand zwischen Drehpunkt und Positionierer lässt sich so durch eine lineare Bewegung eine definierte Rotation erzeugen. Im vorliegenden Laboraufbau entspricht eine translatorische Bewegung von 45 μm einer Rotation von 0,0057 $^\circ$ und damit der angestrebten Zielauflösung.

Die resultierenden Signalverläufe (siehe Abb. 7) zeigen die diskreten Verstellschritte deutlich und stimmen nach kurzer Einschwingzeit gut mit dem theoretischen Verlauf überein. Damit kann der ausgewählten Sensorik grundsätzlich die geforderte Auflösung und Genauigkeit für die betrachtete Anwendung zugesprochen werden.

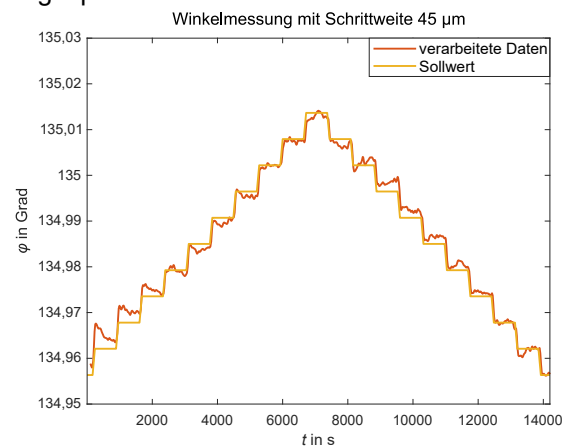


Abb. 7: Verarbeitete Sensordaten (rot) und theoretische Werte (gelb) einer Winkelmessung bei stufenweiser Lageänderung.

Temperaturabhängigkeit

Gemäß den auf Herstellerangaben basierenden Vorüberlegungen stellt die temperaturabhängige Sensitivitätsänderung die wichtigste Ursache für die zu erwartende Messungenauigkeit dar und liegt oberhalb der angestrebten Zielgenauigkeit. Daher wurden mehrere Sensoren in unterschiedlichen Ausrichtungen über einen Temperaturbereich von -30 $^\circ\text{C}$ bis 50 $^\circ\text{C}$ untersucht [14]. Hierzu durchliefen die Sensoren jeweils zwölf Zyklen in einem Klimaschrank des Typs *Weiss WK3* bei konstanter Luftfeuchtigkeit und einer rampenförmigen Temperaturänderungsrate von 0,25 $^\circ\text{C}/\text{min}$. Die geringe Änderungsrate wurde gewählt, um thermische Ausgleichsvorgänge weitgehend zu ermöglichen. Da die Lage der

Sensoren während der Messung konstant gehalten wurde, wird jede Änderung der Messgröße als Störung interpretiert.

Bereits bei der geringen Stichprobengröße (siehe Abb. 8) mit vier Sensoren (Zeilen) in vier Ausrichtungen (Spalten) werden vier wesentliche Eigenschaften sichtbar.

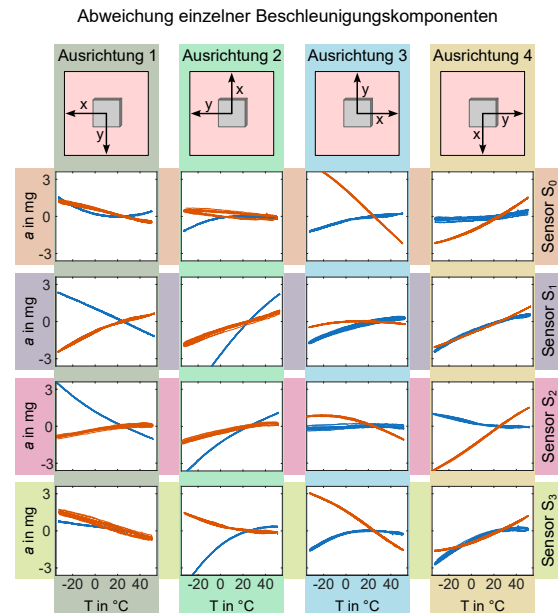


Abb. 8: Abweichung der Beschleunigungskomponenten verschiedener Sensoren (Zeilen) bei verschiedenen Ausrichtungen (Spalten) im Bereich von -30 °C bis 50 °C bei $0,25\text{ °C/min}$; blau: x-Achse, rot: y-Achse.

Erstens weisen einzelne Achsen unterschiedlich starke Temperaturabhängigkeiten auf. Für die in Richtung der Erdbeschleunigung ausgerichtete Achse wurden Abweichungen von bis zu $\pm 0,08\text{ mg/°C}$ beobachtet, diese entsprechen einer relativen Abhängigkeit von $\pm 0,008\%/°\text{C}$ und damit leicht unterhalb der Herstellerangabe. Die horizontale Komponente erreicht Werte bis zu $\pm 0,04\text{ mg/°C}$. Aufgrund des geringeren Absolutwerts entspricht dies jedoch einer vergleichsweise hohen relativen Abweichung. In diesem Fall ist wahrscheinlich der temperaturabhängige Nullpunkt dominanter als die eigentliche Sensitivitätsänderung.

Zweitens führt eine Spiegelung der Achse nicht zwangsläufig zu einer spiegelbildlichen Signalantwort. Zwar wechselt bei der vertikalen Achse das Vorzeichen der Temperaturabhängigkeit häufig mit der Spiegelung der Einbaulage, die Stärke der Abhängigkeit kann jedoch deutlich variieren. Bei der horizontalen Achse zeigt sich ein solcher Vorzeichenwechsel nicht in allen Fällen. Diese Betrachtung ist unter anderem relevant für eine Beurteilung zum Einsatz von zwei Sensoren in einer differentiellen

Auswertung. Bei gegenphasigen Signalen können Störungen die auf beiden Signalen wirken besonders effektiv kompensiert werden. Drittens sind die Verläufe teilweise nur eingeschränkt linear und können vereinzelt sogar einen Scheitelpunkt innerhalb des untersuchten Temperaturbereichs aufweisen.

Viertens lässt sich weder eine bestimmte Ausrichtung noch ein bestimmter Sensor als grundsätzlich besonders vorteilhaft identifizieren.

Insgesamt zeigt sich somit, dass jede Sensorachse in jeder Ausrichtung eine individuelle Temperaturabhängigkeit besitzt. Ein Sensor kann in einer Einbaulage eine sehr geringe Streuung aufweisen und in einer anderen Lage gleichzeitig zu den schwächsten Exemplaren der Stichprobe gehören. Soll die geforderte Genauigkeit über den zu erwartenden Temperaturbereich in der realen Anwendung erreicht werden, muss daher jeder Sensor in seiner späteren Installationsausrichtung bei verschiedenen Temperaturwerten charakterisiert werden.

Als Lösungsansatz für dieses Teilproblem wird auf Basis der vorangegangenen Referenzmessungen die Temperaturabhängigkeit mithilfe eines polynomialen Modells beschrieben [17]. Der temperaturabhängige Anteil wird anschließend für jeden Messpunkt aus dem Sensorsignal subtrahiert.

Die Auswertung zeigt eine deutliche Reduktion der Streuung nach der Kompensation (siehe Abb. 9). Besonders effizient ist der gewählte Ansatz bei der vertikalen Achse, die zuvor eine höhere Varianz aufwies. Bei der horizontalen Achse ist die Kompensation hingegen weniger wirksam. Nach der Stauchung der Daten wird dort sichtbar, dass sich teilweise Bahnkurven ausbilden, die an Lissajous-Figuren erinnern. Dies deutet auf eine verzögerte Systemantwort beziehungsweise auf ein Hystereseverhalten hin [18, 19]. Offenbar hängt das Verhalten in diesen Fällen zusätzlich davon ab, ob ein Aufheiz- oder ein Abkühlvorgang vorliegt. Aufgrund der geringen verbleibenden Abweichungen wird ihr Einfluss auf den berechneten Winkel jedoch im Hinblick auf die geforderte Auflösung als vernachlässigbar bewertet.

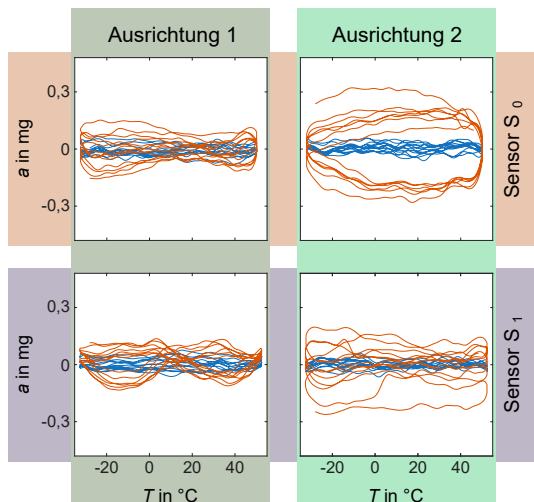


Abb. 9: Abweichung von kompensierten Beschleunigungskomponenten bei verschiedenen Ausrichtungen im Bereich von -30 °C bis 50 °C bei $0,25\text{ °C/min}$; blau: x-Achse, rot: y-Achse.

Gesamtkonzept

Gemäß den ermittelten Einflussfaktoren und darauf abgestimmten einzelnen Lösungsansätzen ergibt sich folgende Signalkette mit mehreren Verarbeitungsschritten, von der Aufnahme der Rohdaten bis zur berechneten Neigung (siehe Abb. 10). Zunächst wird auf die gemessenen Beschleunigungskomponenten eine Tiefpassfilterung angewendet, um allgemeine Störungen und insbesondere den Einfluss des Verkehrs zu reduzieren. Anschließend erfolgt die Temperaturkompensation auf Basis des polynomialen Modells und einer Referenzmessung in identischer Ausrichtung. Im Rahmen dieser Referenzmessung kann zusätzlich der integrierte Temperatursensor des Beschleunigungssensors kalibriert werden. Dies ist für die reine Messgenauigkeit nicht zwingend erforderlich, verbessert jedoch die Vergleichbarkeit der kompensierten Messwerte. Abschließend werden aus den kompensierten Beschleunigungskomponenten die Neigungswerte berechnet und im letzten Schritt mehrere Sensoren zur weiteren Erhöhung der Genauigkeit kombiniert. Gemäß der Anzahl an genutzten Sensoren sinkt die theoretische Empfindlichkeit des Gesamtsystems und Störungen einzelner Sensoren weisen einen geringeren Beitrag zum ausgegebenen Wert des Sensorsystems. Es werden sowohl Kombinationen aus zwei und vier Sensoren betrachtet.

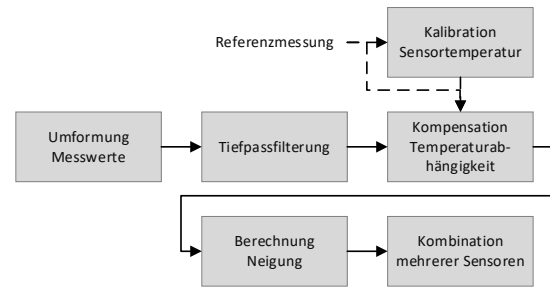


Abb. 10: Vollständige Signalkette von der Aufnahme der Beschleunigungswerte bis zur berechneten Neigung.

Ergebnisse

Das Sensorsystem liefert unter realen Umgebungsbedingungen zuverlässig kontinuierliche Daten. Die durch den Verkehr hervorgerufenen Störungen sind im Frequenzspektrum klar identifizierbar und erfordern zusätzliche Maßnahmen. Da diese deutlich höherfrequent sind als die zu beobachtenden Lageänderungen, lassen sie sich durch eine ressourcenschonende Tiefpassfilterung wirksam mindern (siehe Abb. 11). Beim Vergleich zwischen den Rohdaten und den gefilterten Daten beträgt das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) bei etwa 55 dB.

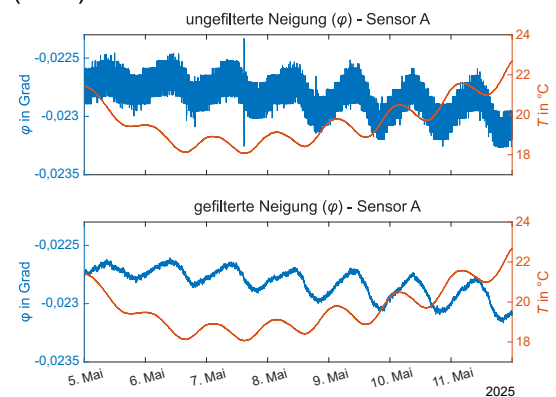


Abb. 11: Berechnete Neigung auf Basis ungefilterter und gefilterter Beschleunigungen von Messdaten innerhalb des Brückenbauwerks.

Die ausgewählten Sensoren erreichen in einer kontrollierten Laborumgebung bei einer Empfindlichkeit von $0,061\text{ mg/LSB}$ nach kurzer Einschwingzeit und bei konstanter Temperatur eine Winkelauflösung unterhalb der geforderten Auflösung von $0,0057^\circ$. Damit ist ihre grundsätzliche Eignung für die vorgesehene Anwendung belegt. Durch eine Referenzmessung bei konstanter Ausrichtung lässt sich außerdem die Temperaturabhängigkeit im erweiterten Bereich von -30 °C bis 50 °C deutlich reduzieren. Die folgende Tabelle zeigt die mittlere, minimale und maximale

Standardabweichung der zuvor präsentierten Messreihe mit vier verschiedenen Sensoren in jeweils vier Ausrichtungen nach den einzelnen Schritten der Verarbeitungskette. Dies bestätigt die Effizienz der Signalkette. Bei der Kombination mehrerer Sensoren sollten Sensoren mit gleicher oder entgegengesetzter Ausrichtung verwendet werden; in anderen Fällen führt dies in der Regel zu keiner weiteren Verbesserung der Auflösung.

Tab. 1: Übersicht der Standardabweichung s (Mittelwert, Minimum, Maximum) der berechneten Neigungen nach den einzelnen Verarbeitungsschritten.

	$\bar{s}_\varphi$	$s_{\min,\varphi}$	$s_{\max,\varphi}$
ungefiltert	2,12E-01	9,23E-03	1,45E+00
gefiltert (TP)	3,13E-02	7,13E-03	5,34E-02
Temperatur kompensiert	5,30E-03	3,21E-03	1,02E-02
Kombination zweier Sensoren	3,83E-03	2,50E-03	6,97E-03

Diskussion

Die Ergebnisse bestätigen, dass die gewählte Sensorik nach geeigneter Kalibrierung die geforderte Genauigkeit grundsätzlich erreichen kann. Zugleich wird deutlich, dass die Kalibrierung für jeden Sensor und dessen konkrete spätere Einbaulage individuell erfolgen muss. Dieser zusätzliche Aufwand erscheint jedoch beherrschbar, sofern ein standardisierter Referenzprozess etabliert wird. Bei geringen Beschleunigungswerten zeigt die verwendete Kompensation eine geringere Wirksamkeit. Ursache hierfür ist vermutlich, dass in diesem Bereich der temperaturabhängige Nullpunkt (Zero-g level change vs. temperature) stärker ins Gewicht fällt als die primär betrachtete Sensitivitätsänderung. Darüber hinaus wurde sichtbar, dass auch Hysterese-Effekte eine Rolle spielen können. Dies sollte in zukünftigen Modellen stärker berücksichtigt werden. Der zunächst stärkere Einfluss des vorherrschenden Verkehrs an der Messstelle lässt sich dagegen bereits mit einfachen Filterverfahren wirksam auf ein Minimum reduzieren.

Ausblick

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen innerhalb einer noch kleinen Stichprobe eine deutliche Variabilität zwischen einzelnen Sensoren. Da diese Unterschiede zwar reproduzierbar, aber individuell ausgeprägt sind, sollte der Ansatz künftig an einer größeren Anzahl von Sensoren validiert werden, um seine allgemeine Übertragbarkeit zu belegen. In

diesem Zusammenhang sind auch Untersuchungen mit alternativen Sensortypen sinnvoll.

Darüber hinaus ergeben sich mehrere weiterführende Fragestellungen. Zu klären ist insbesondere, wie stark sich der zeitliche Umfang einer Referenzmessung in kontrollierter Umgebung reduzieren lässt, ohne die erreichbare Genauigkeit wesentlich zu verschlechtern. Ebenso ist zu untersuchen, ob eine praxisnähere Referenzmessung mit geringerem apparativem Aufwand möglich ist, beispielsweise durch gezielte Erwärmung des Sensorelements. In diesem Zusammenhang wäre auch zu prüfen, ob auf Temperaturphasen im niedrigen oder negativen Bereich verzichtet werden kann. Schließlich sollten die beobachteten Hystereseeffekte systematisch untersucht und nach Möglichkeit in zukünftige Kompensationsmodelle integriert werden.

Literaturnachweis

- [1] B. Novák *et al.*, „Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke“ 2024, doi: 10.60850/bericht-b197.
- [2] I. Hindersmann, „Monitoring von Straßenbrücken - aktueller Einsatz und zukünftige Anwendung“ *e-Journal of Nondestructive Testing*, Jg. 29, Nr. 04, 2024.
- [3] F. Wedel, S. Pitters, R. Herrmann, R. Schneider, F. Hille und I. Hindersmann, „Guideline for the strategic application of monitoring of road bridges in Germany“ *eJNDT*, Jg. 29, Nr. 7, 2024, doi: 10.58286/29582.
- [4] S. Selvakumaran *et al.*, „Combined InSAR and Terrestrial Structural Monitoring of Bridges“ *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Jg. 58, Nr. 10, S. 7141–7153, 2020, doi: 10.1109/TGRS.2020.2979961.
- [5] M. Reiterer, L. Praxmarer und A. Kammersberger, „Maintenance und Monitoring. Dauermonitoring zur Optimierung der Nutzungsdauer einer Brücke“ *Beton und Stahlbetonbau*, Jg. 103, Nr. 2, S. 103–111, 2008, doi: 10.1002/best.200700599.
- [6] R. Geier, T. Mack und E. Krebes, „Monitoring der Seitenhafenbrücke in Wien“ *Beton und Stahlbetonbau*, Jg. 109, Nr. 7, S. 486–495, 2014, doi: 10.1002/best.201400023.
- [7] F. Wedel, S. Pitters, F. Hille, R. Herrmann und R. Schneider, „Leitfaden – Strategischer Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke“ 2025, doi: 10.60850/bericht-b210.
- [8] I. Hindersmann, „Monitoring bei Straßenbrücken – Eine Kosten-Nutzen-Betrachtung“ *e-Journal of Nondestructive Testing*, Jg. 31, Nr. 03, 2026, doi: 10.58286/32740.
- [9] W. Ostachowicz, R. Soman und P. Malinowski, „Optimization of sensor placement for structural health monitoring: a review“ *Structural Health Monitoring*, Jg. 18, Nr. 3, S.

- 963–988, 2019, doi:
10.1177/1475921719825601.
- [10] C. Bedon, E. Bergamo, M. Izzi und S. Noè, „Prototyping and Validation of MEMS Accelerometers for Structural Health Monitoring—The Case Study of the Pietratagliata Cable-Stayed Bridge“ *JSAN*, Jg. 7, Nr. 3, S. 30, 2018, doi: 10.3390/jsan7030030.
 - [11] S. Morichika, H. Sekiya, Y. Zhu, S. Hirano und O. Maruyama, „Estimation of Displacement Response in Steel Plate Girder Bridge Using a Single MEMS Accelerometer“ *IEEE Sensors J.*, Jg. 21, Nr. 6, S. 8204–8208, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3051697.
 - [12] X. Ru, N. Gu, H. Shang und H. Zhang, „MEMS Inertial Sensor Calibration Technology: Current Status and Future Trends“ *Micromachines*. doi: 10.3390/mi13060879.
 - [13] C. Nagel, F. Ante, M. Putnik, J. Classen und J. Mehner, „Characterization of Temperature Gradients on MEMS Acceleration Sensors“ *Procedia Engineering*, Jg. 168, S. 888–891, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.298.
 - [14] M. Catelani *et al.*, „3-Axis accelerometer characterization: A dynamic analysis varying the operating temperature“ *Measurement: Sensors*, Jg. 38, S. 101599, 2025, doi: 10.1016/j.measen.2024.101599.
 - [15] S. Łuczak, „Guidelines for tilt measurements realized by MEMS accelerometers“ *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Jg. 15, Nr. 3, S. 489–496, 2014, doi: 10.1007/s12541-014-0362-5.
 - [16] A. I. Ozdagli, F. Moreu, J. Gomez, S. Vemuganti und P. Garg, „Data Fusion of Accelerometers with Inclinometers for Reference-free High Fidelity Displacement Estimation“ *e-Journal of Nondestructive Testing*, Jg. 21, Nr. 08, 2016.
 - [17] Y. Gunhan und D. Unsal, „Polynomial degree determination for temperature dependent error compensation of inertial sensors“ in *2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS 2014*, 2014, S. 1209–1212, doi: 10.1109/PLANS.2014.6851494.
 - [18] H. J. Kim und H. K. Jung, „Temperature Hysteresis Calibration Method of MEMS Accelerometer“ *Sensors*. doi: 10.3390/s25196131.
 - [19] F. Gulmammadov, „Analysis, modeling and compensation of bias drift in MEMS inertial sensors“ in *2009 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, Istanbul, Jun. 2009 - Jun. 2009, S. 591–596, doi: 10.1109/RAST.2009.5158260.