

Untersuchung zum Einsatz von **Low-Cost** Sensorlösungen für die **Bauwerksüberwachung** mit primären vertikalen Deformationsverhalten am Beispiel der **Brücke Benediktusstraße** Düsseldorf

Gemeinsame Arbeit der Stadt Düsseldorf und der Hochschule
Neubrandenburg

Vortrag vom 10.08.2022 von Thomas Willemsen

Hochschule Neubrandenburg

Ort: Landeshauptstadt Düsseldorf

Inhalt

- Vorstellung, Motivation und Vorarbeiten
- Ansätze zur Realisierung einer Brückenüberwachung
- Projektrealisierung der aktuellen Konfiguration und weitere Untersuchungen
- Ergebnisse im Vergleich zum Schlauchwaagensystem
- Ausblick

Persönliche Vorstellung

Prof. Dr.-Ing. Thomas Willemsen

Praktische Geodäsie und Ingenieurvermessung

Hochschule Neubrandenburg

Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik

Brodaer Straße 2

17033 Neubrandenburg

Interessensgebiete:

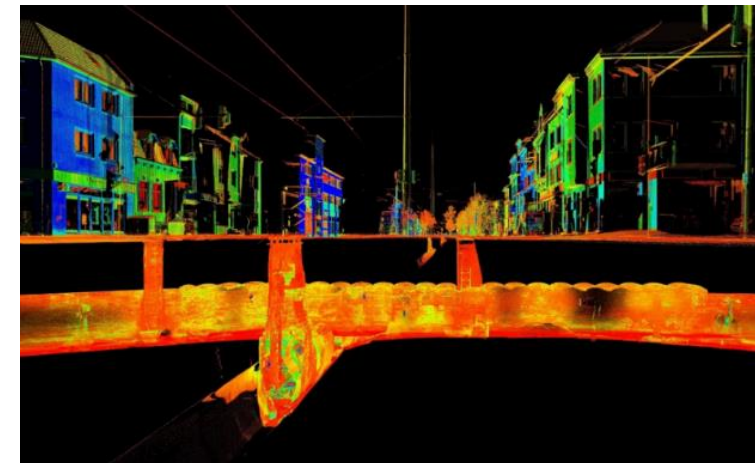
Multi-Sensor-Fusion:

Intelligente Verknüpfung verschiedenster Sensoren zur Bewältigung komplexer geodätischer Fragestellungen.

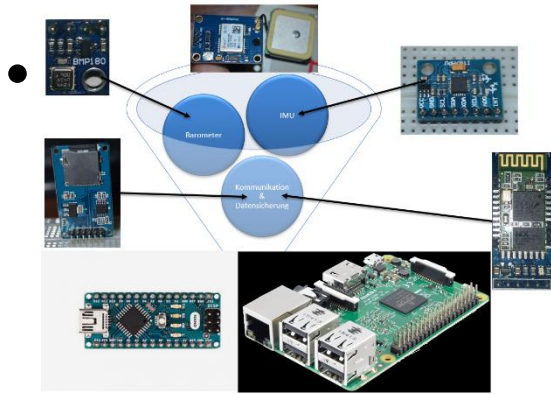
Building Information Modelling (BIM)

Der Fachbereich ist Mitglied im Kompetenznetzwerk BuildingSmart e.V.

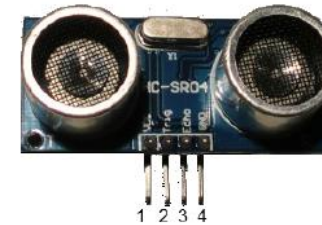
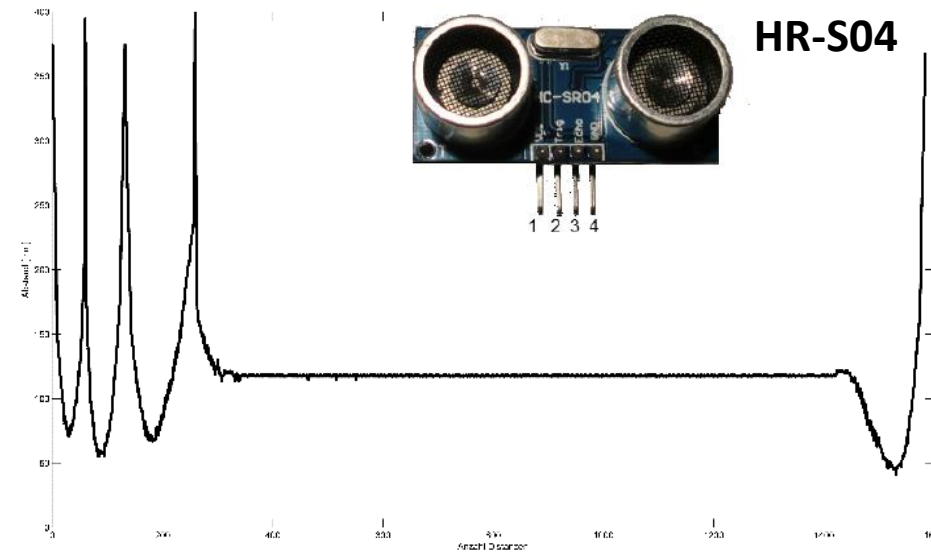
Mitglied im Ausschuss Digitalisierung und BIM bei der Ingenieurkammer M-V



Motivation low cost

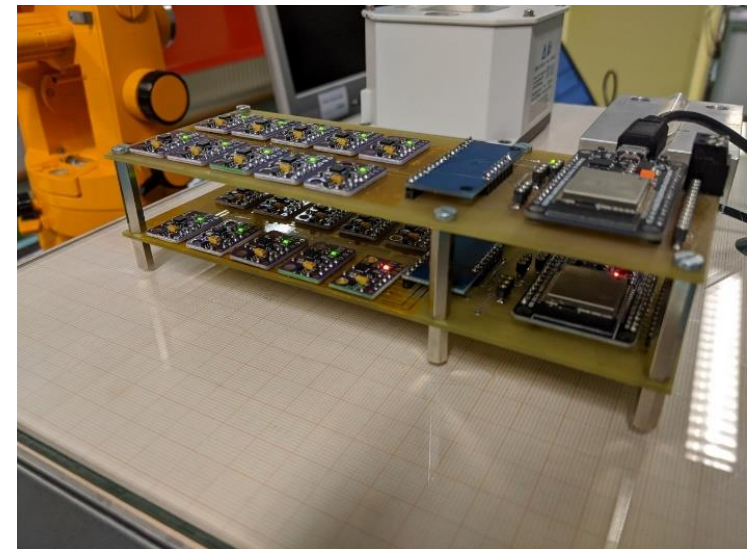


Ultraschalldistanzsensor HR-S04



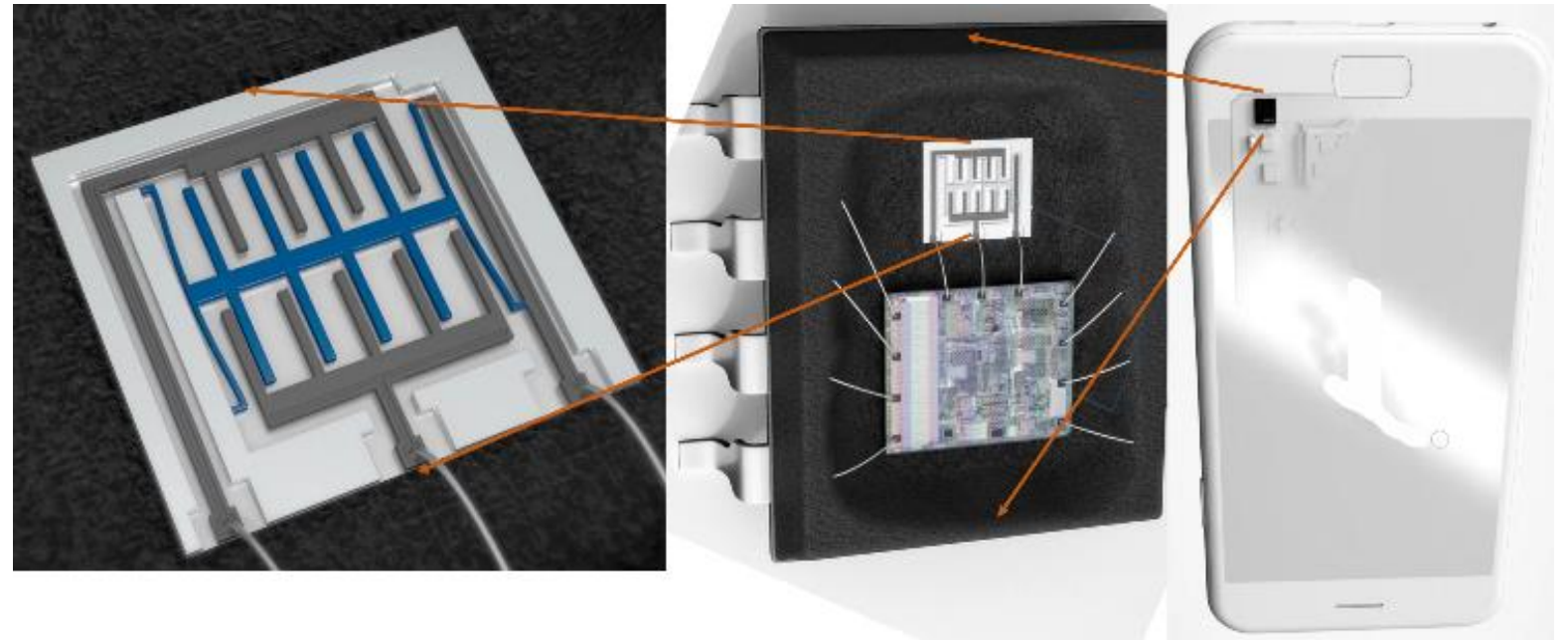
Motivation aus geodätischer Sicht

- Smartphone als Messwerkzeug ernst nehmen.
- Low-Cost Sensoren (MEMS) hinsichtlich geodätischer Aufgaben untersuchen. Potential kritisch bewerten.
- Verfügbarkeit von Low-Cost Sensoren!
- Wirtschaftlichkeit!
- Automation für jedermann!
- **Challenge: Low cost $\equiv$ niedrige Genauigkeit!**



MEMS – Micro Electro Mechanical Systems

- Geringe Größe
- Niedrige Kosten
- Geringes Gewicht
- Niedriger Energiebedarf
- Niedrige Genauigkeit!

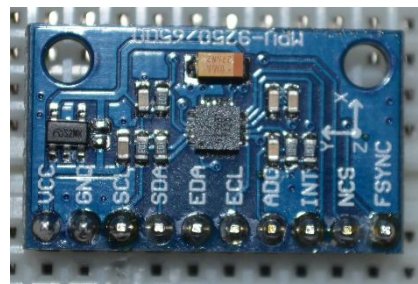


BOSCH BMP280



Luftdrucksensor
Temperatursensor

TDK Invensense MPU-9250 (Motion Processing Unit)

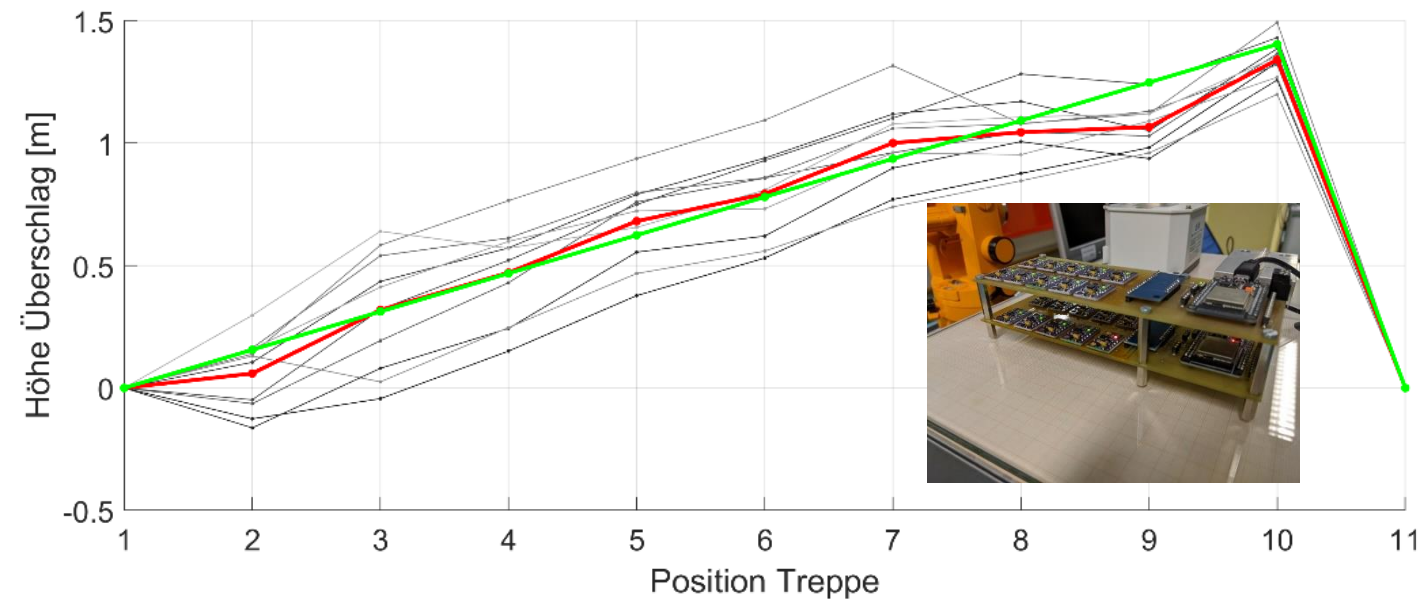
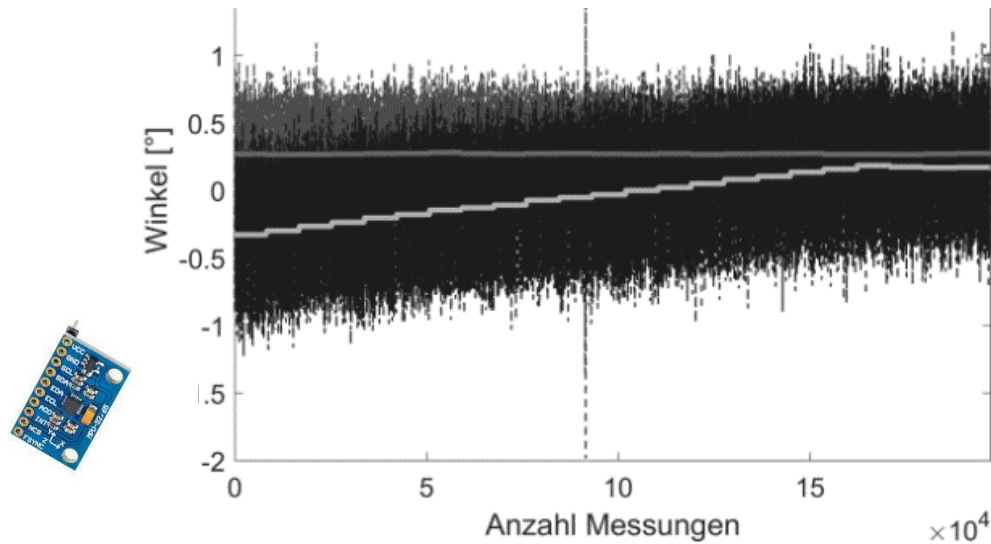


3-achs Beschleunigungssensor
3-achs Gyroskop
3-achs Magnetfeldsensor

Mikrocontroller ESP32



Vorarbeiten: Untersuchungen zum Einsatz einer Multi-MEMS



LINKS: MEMS als Neigungssensor auf einem Libellenprüftisch

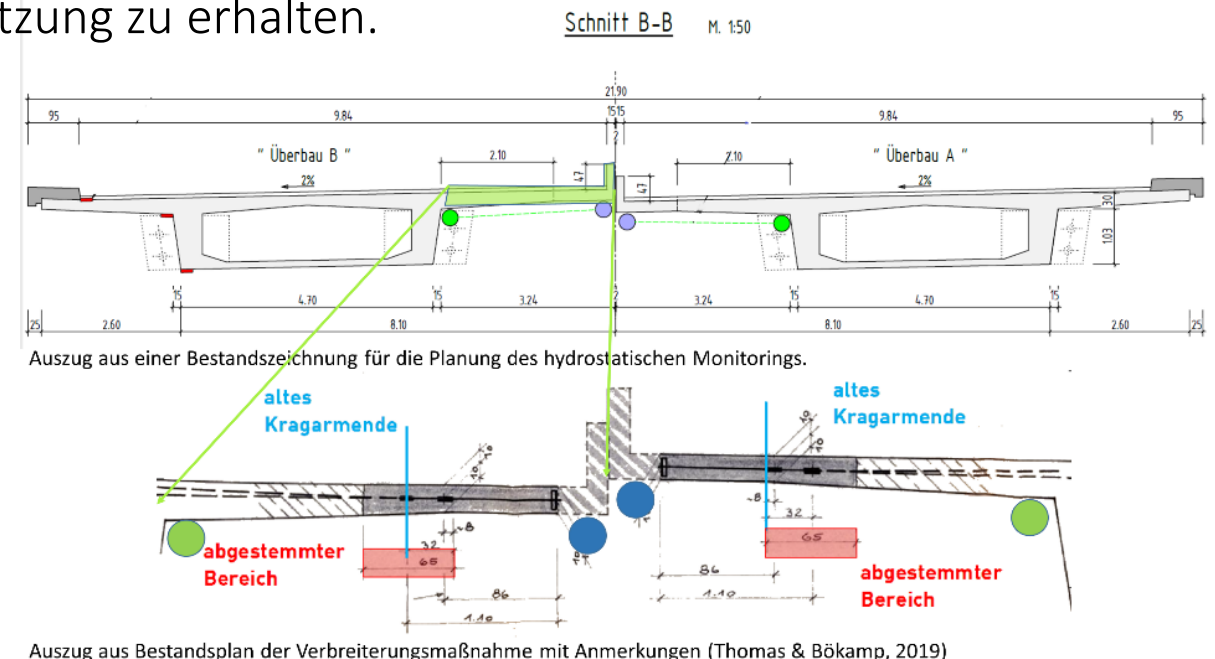
RECHTS: Multi-MEMS als barometrischer Hözensensor: Grün = Referenz, Rot = Mittel über 10 Sensoren

Aus:

Willemsen, T., Multi-MEMS - *Genauigkeitssteigerung gegenüber dem Einsatz einzelner Sensoren*, Oldenburger 3D-Tage, 2020

Motivation Brückenmonitoring

- Zustand deutscher Brückeninfrastruktur, Beispiel Landeshauptstadt Düsseldorf
(AVN, 01-2/2022; Willemsen et.al. 2022):
 - 350 Brückenbauwerke im Durchschnittsalter von 54 Jahren
 - Faktische Nutzungsänderung aufgrund des erhöhten Verkehrsaufkommens und der überproportionalen Zunahme von Schwerverkehr erfordert erweiterten Handlungsbedarf
 - Bis zur Umsetzung von Ertüchtigungsmaßnahmen sind Bauwerke stand- und verkehrssicher bei weitgehendem Erhalt der verkehrlichen Nutzung zu erhalten.
- Bedarf an Monitoring wächst
- Beispiel: Brücke Benediktusstraße



Vorteile der Zusammenarbeit zur Multi-MEMS

- Interdisziplinäre Kompetenz in der Projektgruppe vorhanden: Entwicklung und Nutzergruppe
- Sensorentwicklung erlaubt individuelle Anpassungen auf die Fragestellung bzw. den Kundenanspruch.
- Sensorkosten gering. Defekt und Diebstahl ohne sichtbare Kostensteigerung für das Projekt. Möglichkeit des „Einweg“-Systems: dauerhafte Installation, ohne Rückbau.
- First Aid Koffer für den schnellen Einsatz ohne notwendiges geodätisches Fachwissen.



Ansätze zur Realisierung einer Brückenüberwachung

Forschungsfrage

- Ist der Einsatz von Consumer Elektronik (MEMS) für die Bauwerksüberwachung sinnvoll?
- Wenn ja, welche Aufgaben sind realistisch?
 - Ersetzen bestehender bewährter Systeme (Schlauchwaage, Totalstation, Inklinometer...)
 - Nutzung für Teilaufgaben (Atmosphäre oder Neigung oder Schwingung)
 - Unterstützung bei Entscheidungsprozessen, z.b. zur präziseren Definition eines Leistungsverzeichnisses.
 - Zur Voruntersuchung eines Bauwerks kann ein Sensor-Kit schnell installiert werden und die erhobenen Daten werden automatisiert ausgewertet.

Bildbasierte Überwachung (im Aufbau)

- Automatische Detektion von Höhenunterschieden (+Lage) mittels Fotos und Target.
- Hohe Genauigkeit (ca. 0,2mm)
- Herausforderung :
 - Nachtsicht
 - Rechenaufwand

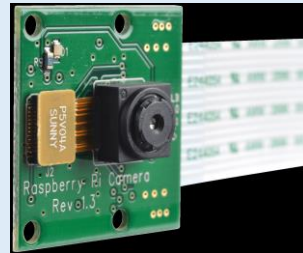
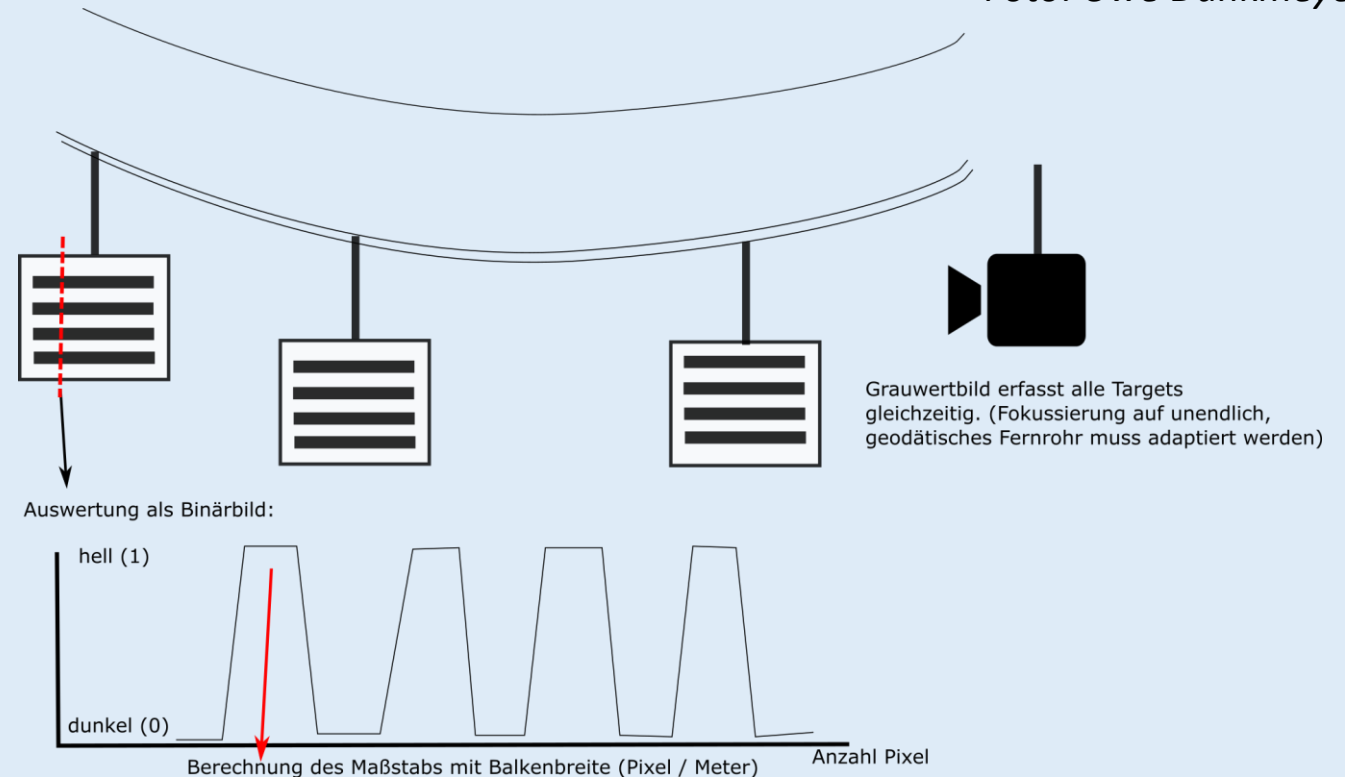
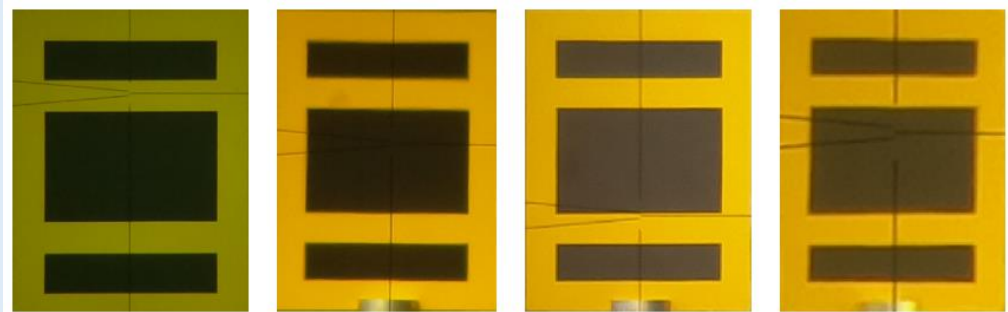


Foto: Uwe Dankmeyer



Aktueller Stand: Bildbasierter Ansatz



Grundlage:

Masterarbeit an der HafenCity Universität 2016:
Automatisierung Stromübergangsnivellement

Masterarbeit an der HS Neubrandenburg 2021 zur
Untersuchung der Realisierung eines Ansatzes zur
Brückenüberwachung. Höhe und auch Lage.

Indirekte Messung (hier realisiert)

- Neigungsmessung in Verbindung mit bekanntem Bauwerksverhalten
- Gleichzeitige Schwingungsmessung möglich
- Biegelinie mit mehreren Sensoren in einer Reihe (Querprofil)
- Herausforderung :
 - indirekte Höhenmessung
 - Bauwerksverhalten muss bekannt sein

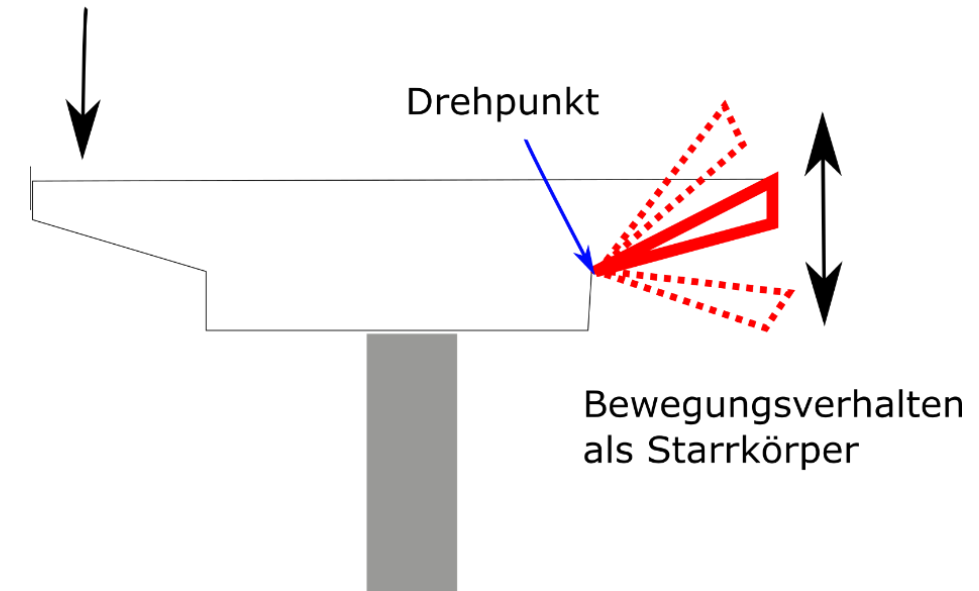
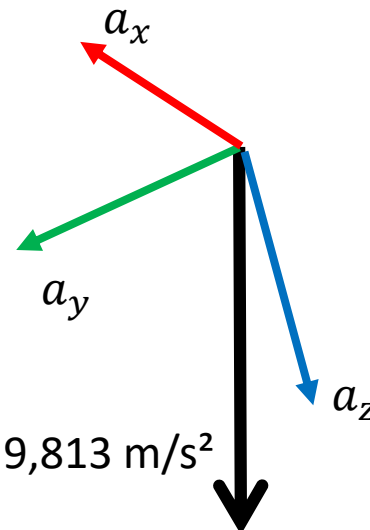


Foto: Uwe Dankmeyer

Neigungen aus 3-achs
Beschleunigungssensordaten

$$g^2 = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2$$

$$g = 9,813 \text{ m/s}^2$$



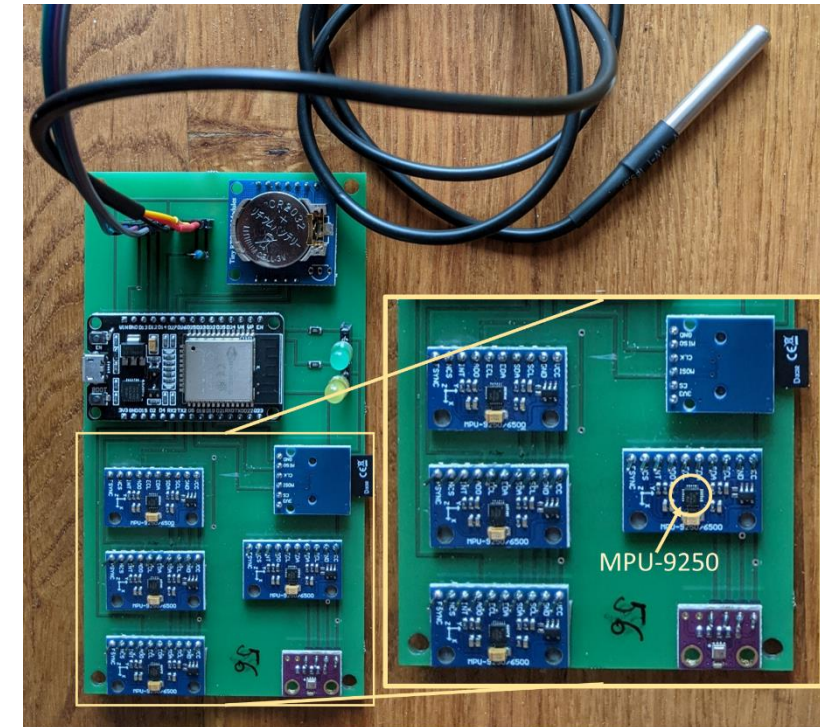
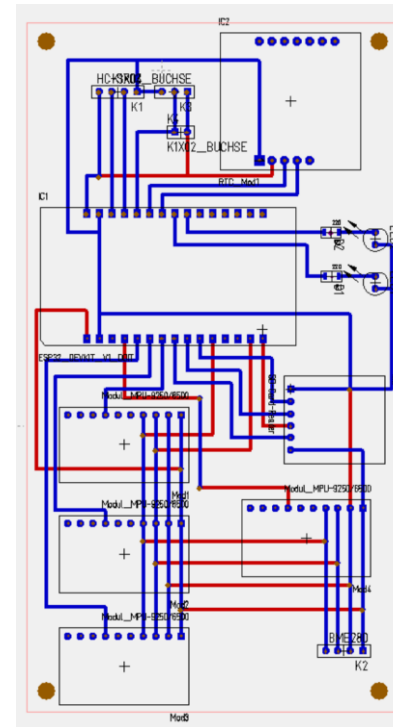


Projektrealisierung und aktuelle Konfiguration

Entwicklung einer Multi-Sensor-Platine

- Platinendesign mit der Software *Target*
- Kosten der Hardware niedrig
- Zusätzlicher Aufwand: Kalibrierung und Temperaturkompensation

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



Motion Processing Unit (MPU-9250)

- 3-Achs accelerometer
- 3-Achs gyroscope
- 3-Achs magnetic field sensor

Kosten: ca. 5 Euro

Verbaut in Smartphones

Massenproduktion in manueller Fertigung

Langlebigkeit verbessern
mit Isolierspray gegen
Rost:



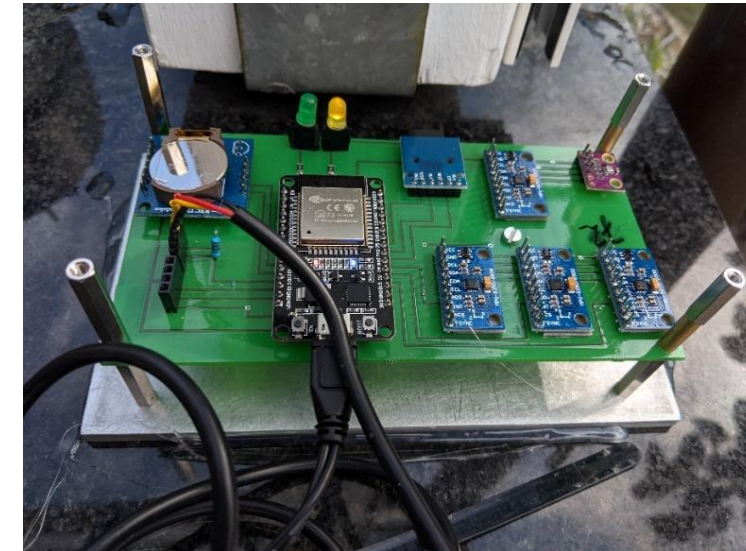
Ablauf der Sensormodulfertigung:

1. Platinenfertigung
2. Bestückung der Platinen: Auflöten der Sensoren
3. Isolierung mit Spray
4. Software aufspielen
5. Uhr stellen
6. Sensorplatine ins Gehäuse einbauen
7. Kalibrierung der Sensoren
8. (Temperaturkompensationsmessung)

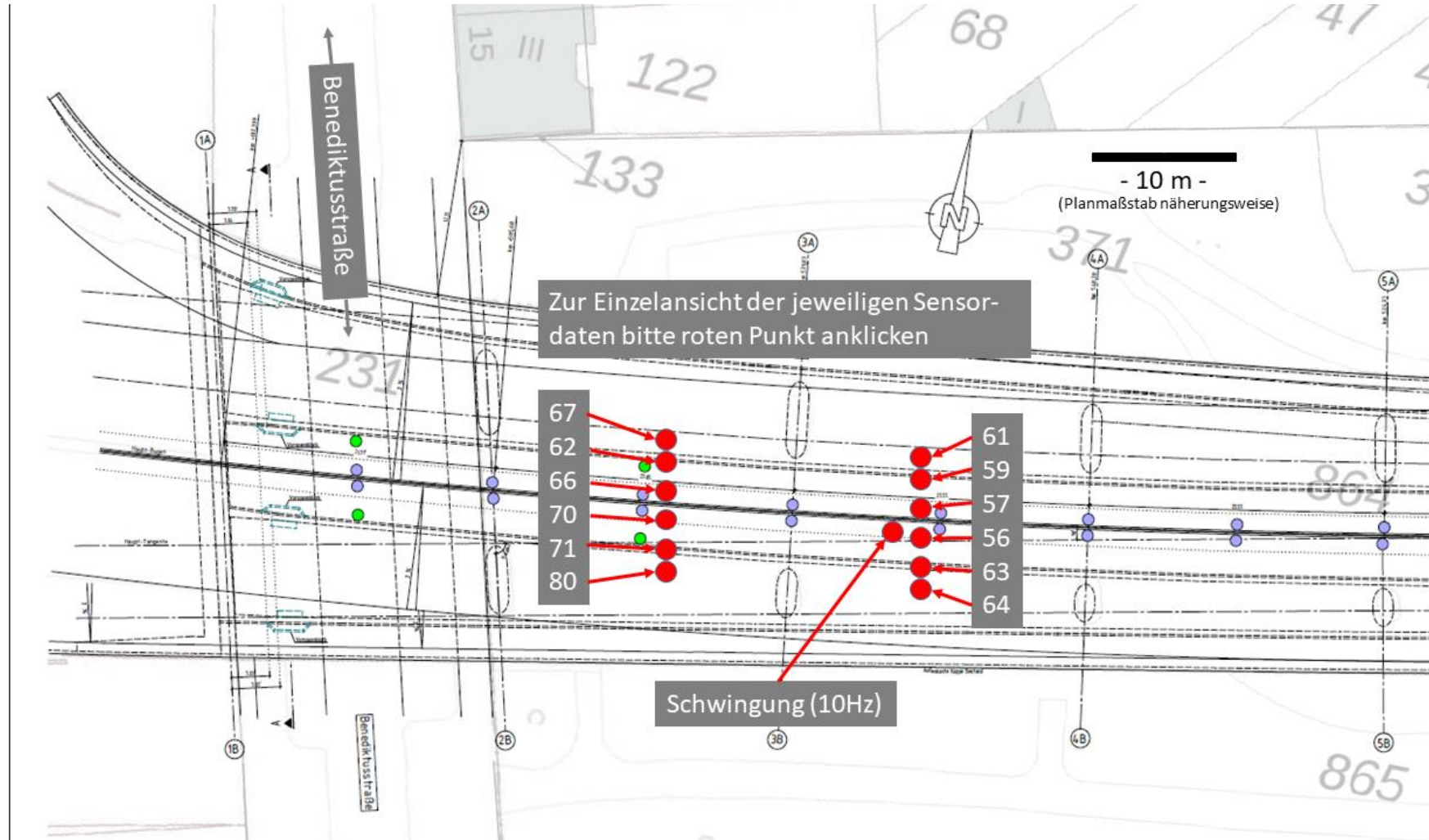


Links:
Gehäuse mit
Aluminium
Grundplatte

Rechts:
Grundplatte mit
Sensormodul



Installation



Installation an der Brücke

- Stromversorgung über Steckdose am Widerlager Benediktusstraße
- Verlängerungskabel zu den Messstellen
- Stromversorgungsgehäuse inkl. LTE-Router zur Kommunikation
- Alles IP44 geschützte Gehäuse/Kabel
- Sensoren und Gehäuse mittels Grundplatten an die Brückenunterseite verklebt



Oben:
Zwei Sensoren jeweils am
Übergang Brücke-Kragarm

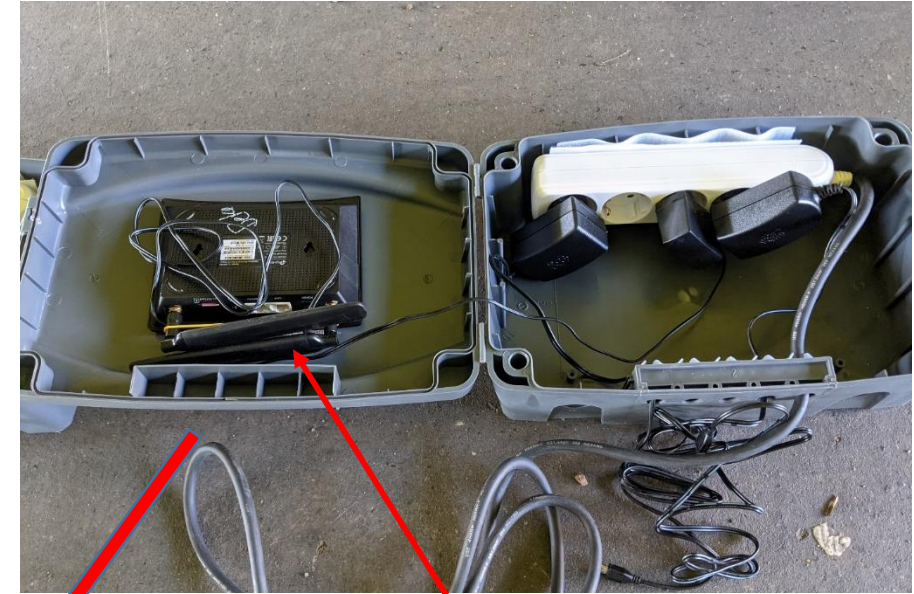


Links:
Zwei Sensoren an den
Kragarmenden innen

Installation an der Brücke



Ansicht des ganzen Profils: linker und rechter Kragarm.
Sensormodule und Versorgungsboxen



Stromversorgung
Und
LTE Router



Stromversorgung und Sensoren
Kragarmenden Innen



Messdatenverarbeitung

Zentrale Datensicherung

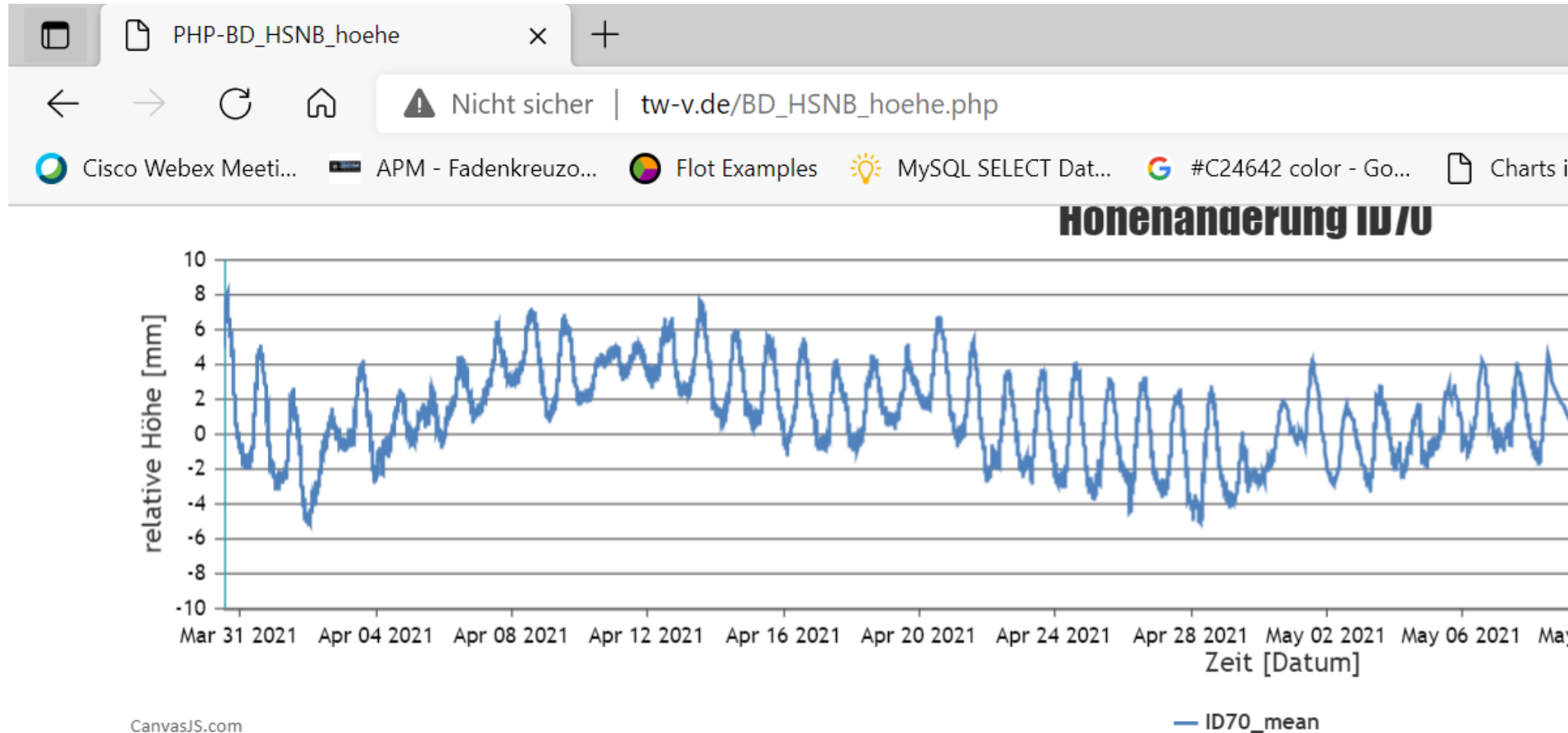
- MySQL Datenbank mittels STRATO Server bereitgestellt
- Definition einer klaren Datenbankstruktur für die sinnvolle und einfache Weiterverarbeitung
- Ansatz: Speicherung der Rohdaten und Echtzeitkonvertierung, je nach Anfrage.

SELECT * FROM `Daten`

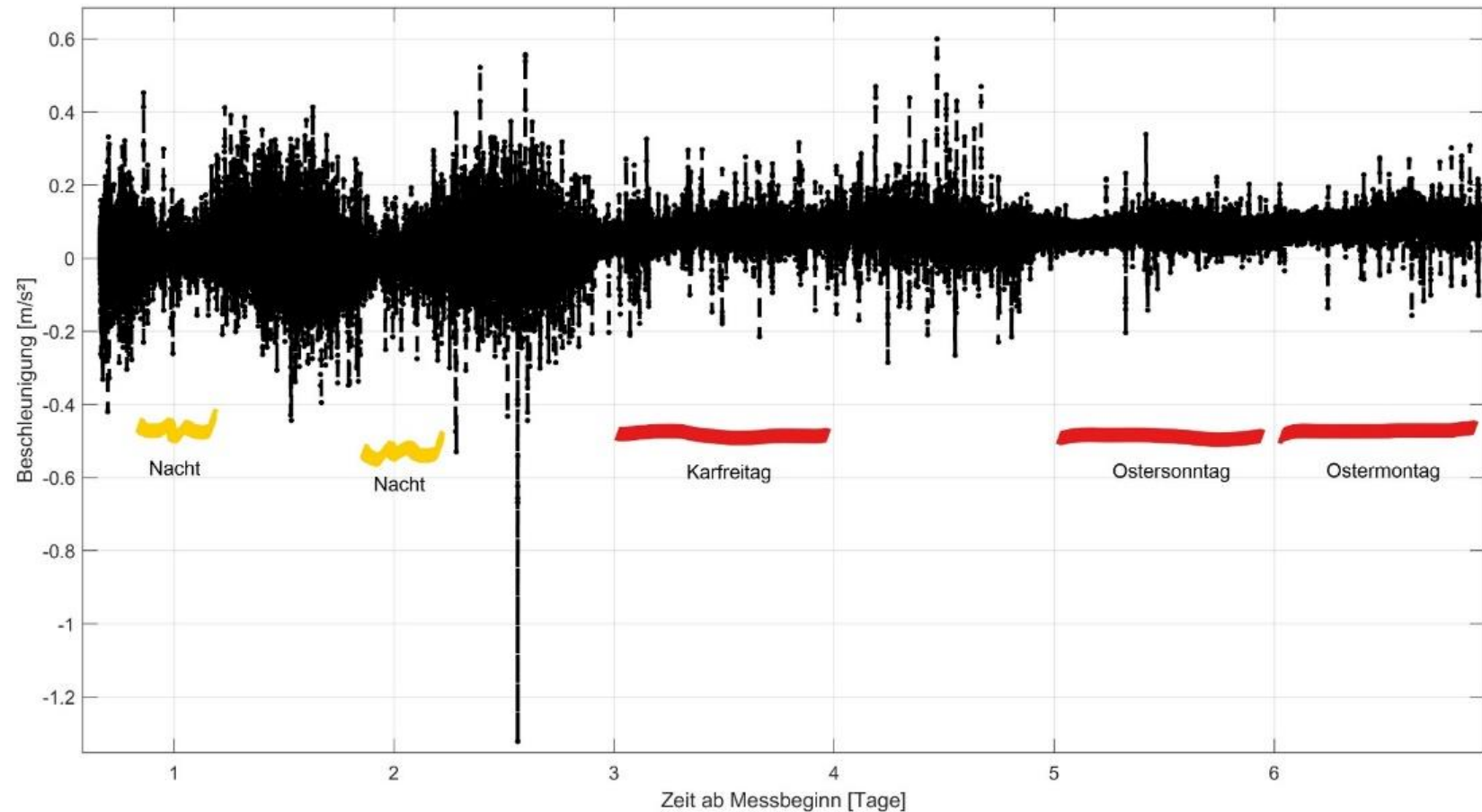
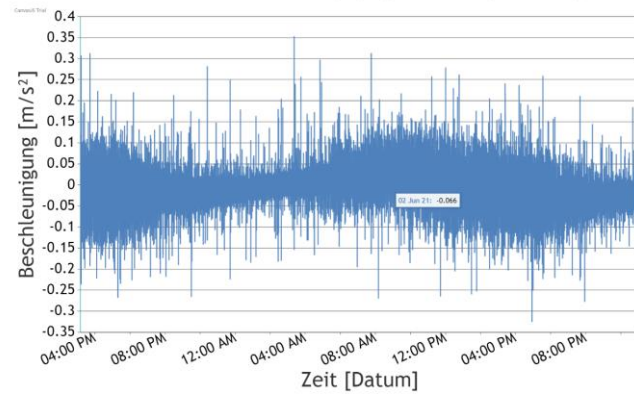
☐ Messen [\[Inline bearbeiten\]](#) [\[Bearbeiten\]](#) [\[SQL erklären\]](#) [\[PHP-Code erzeugen\]](#) [\[Aktu...](#)

Sensornummer / Zeitstempel			Beschleunigungen von vier Sensoren für Geometrieveränderung												Einfluss Atmosphäre			
ID	time	local_time	ax1	ay1	az1	ax2	ay2	az2	ax3	ay3	az3	ax4	ay4	az4	air	obj	f	p
15	1616890109677	63.611	4.427	0.364	7.292	-7.344	-0.311	9.481	-0.173	0.94	9.704	2.084	1.188	9.531	3.48	4.062	72.7	1025.27
15	1616890168411	123.112	4.433	0.416	7.288	-7.336	-0.261	9.474	-0.163	0.991	9.698	2.086	1.232	9.53	3.48	4.062	71.9	1025.26
15	1616890227087	181.825	4.434	0.427	7.288	-7.335	-0.25	9.472	-0.162	1.001	9.696	2.086	1.247	9.536	3.48	4.187	71.6	1025.26
15	1616890285939	240.514	4.435	0.437	7.287	-7.332	-0.241	9.472	-0.162	1.011	9.693	2.089	1.261	9.537	3.49	4.187	71.7	1025.26
15	1616890344745	299.413	4.438	0.45	7.287	-7.329	-0.23	9.47	-0.16	1.025	9.691	2.101	1.275	9.535	3.48	4.187	71.5	1025.25
15	1616890403538	358.196	4.44	0.459	7.279	-7.329	-0.221	9.468	-0.16	1.034	9.69	2.093	1.283	9.523	3.49	4.25	71.4	1025.24
15	1616890462357	416.947	4.44	0.465	7.288	-7.329	-0.214	9.467	-0.163	1.039	9.689	2.091	1.279	9.53	3.49	4.375	71	1025.23
15	1616890521567	476.297	4.442	0.469	7.286	-7.328	-0.209	9.466	-0.163	1.044	9.689	2.098	1.297	9.528	3.49	4.437	70.9	1025.23
15	1616890581421	536.064	4.443	0.471	7.29	-7.326	-0.206	9.466	-0.163	1.048	9.688	2.091	1.29	9.516	3.49	4.375	71.5	1025.22
15	1616890641124	595.741	4.442	0.474	7.289	-7.327	-0.203	9.466	-0.164	1.051	9.686	2.092	1.302	9.514	3.49	4.375	71.5	1025.22
15	1616890701023	655.684	4.442	0.478	7.289	-7.325	-0.199	9.465	-0.163	1.055	9.684	2.094	1.315	9.513	3.49	4.312	71.3	1025.21
15	1616890760795	715.531	4.443	0.485	7.285	-7.324	-0.195	9.465	-0.163	1.059	9.683	2.101	1.306	9.525	3.49	4.375	71.2	1025.21
15	1616890820568	775.249	4.443	0.491	7.283	-7.324	-0.19	9.464	-0.163	1.062	9.683	2.1	1.32	9.528	3.49	4.312	71.5	1025.21

Visualisierung in Echtzeit: relative Höhenänderung



Visualisierung in Echtzeit: Schwingungen



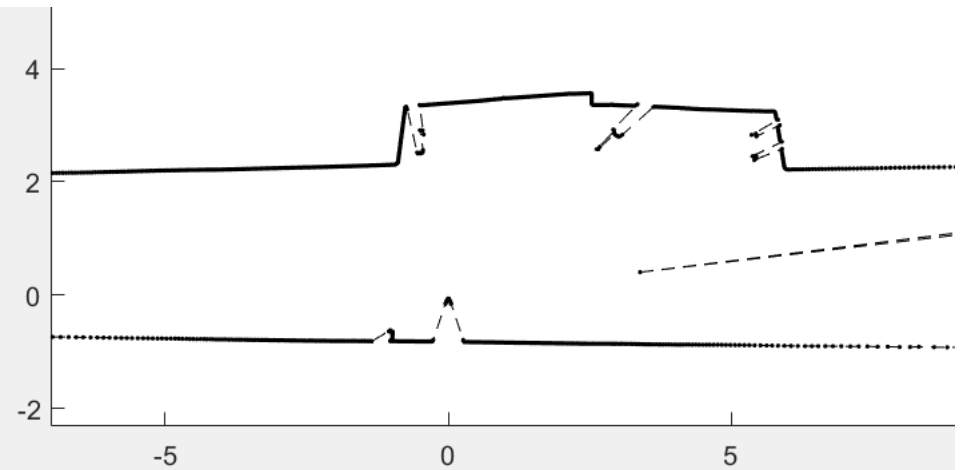
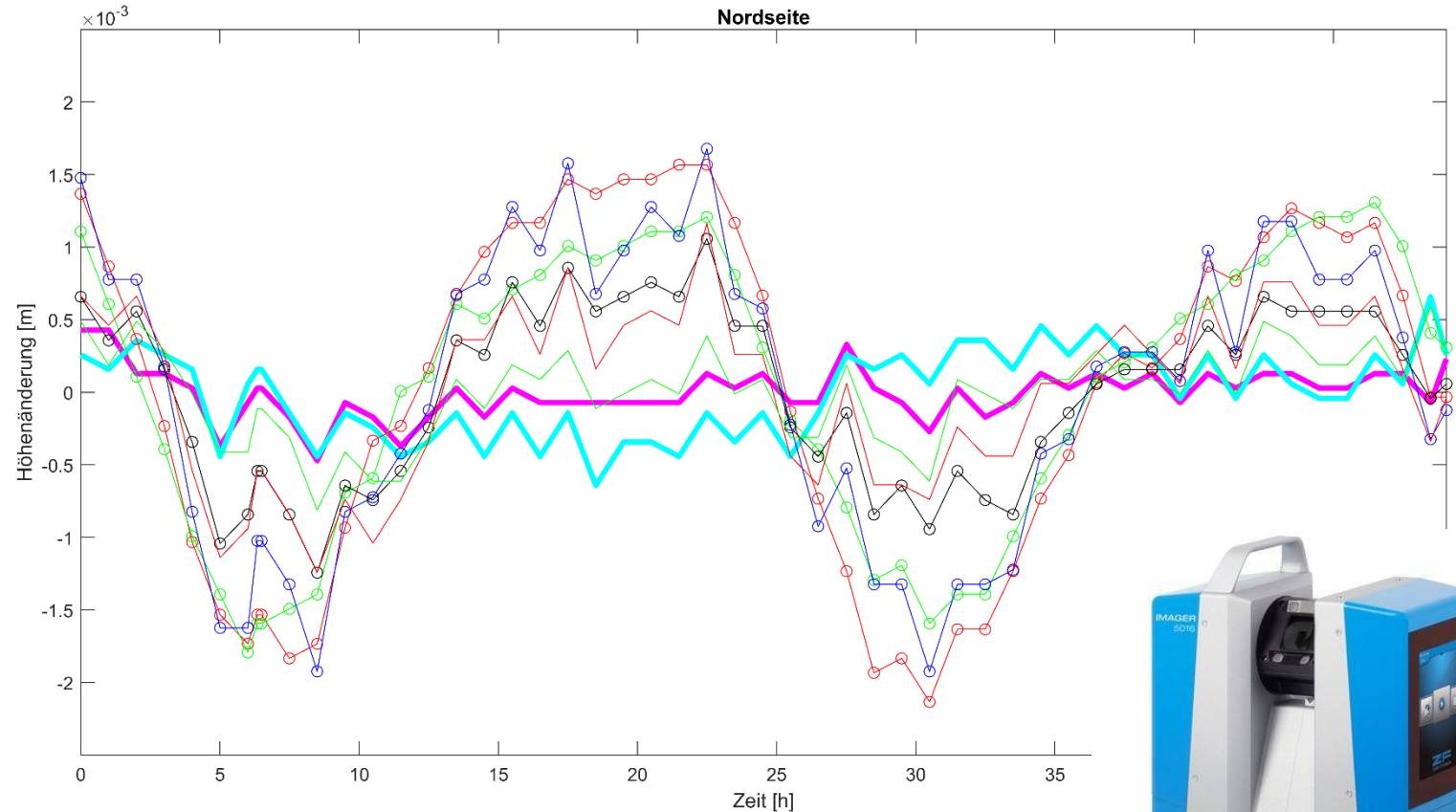
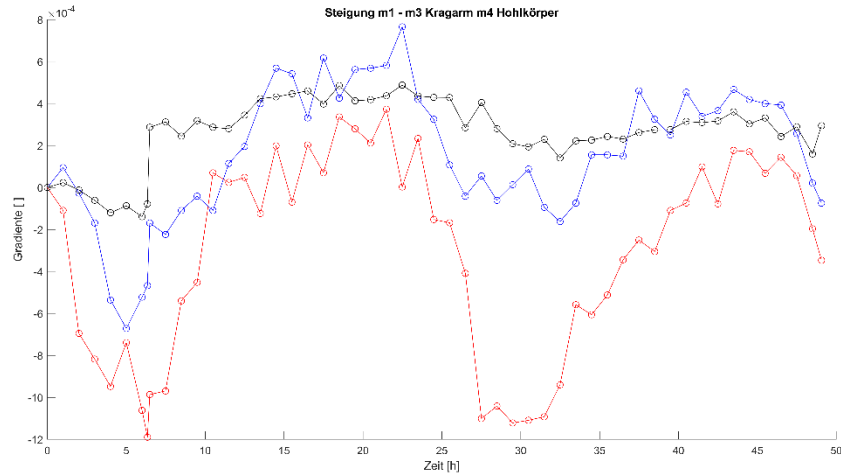


Weitere Untersuchungen zur Überprüfung der Richtigkeit

Offene Fragen

- Stabilität der Montage / Konstruktion der Platine
- Einfluss der äußeren Umgebung
- Erreichbare Genauigkeiten unter realen Messbedingungen
- Ggf.
 - Anpassungen der Platinen Konstruktion und der Montage an der Brücke
 - Anpassungen der Sensorpositionen an der Brücke (Biegelinie)
 - Vergleichbarkeit zu einem Referenzsystem herstellen

Scannermessung – echte Bauwerksbewegung



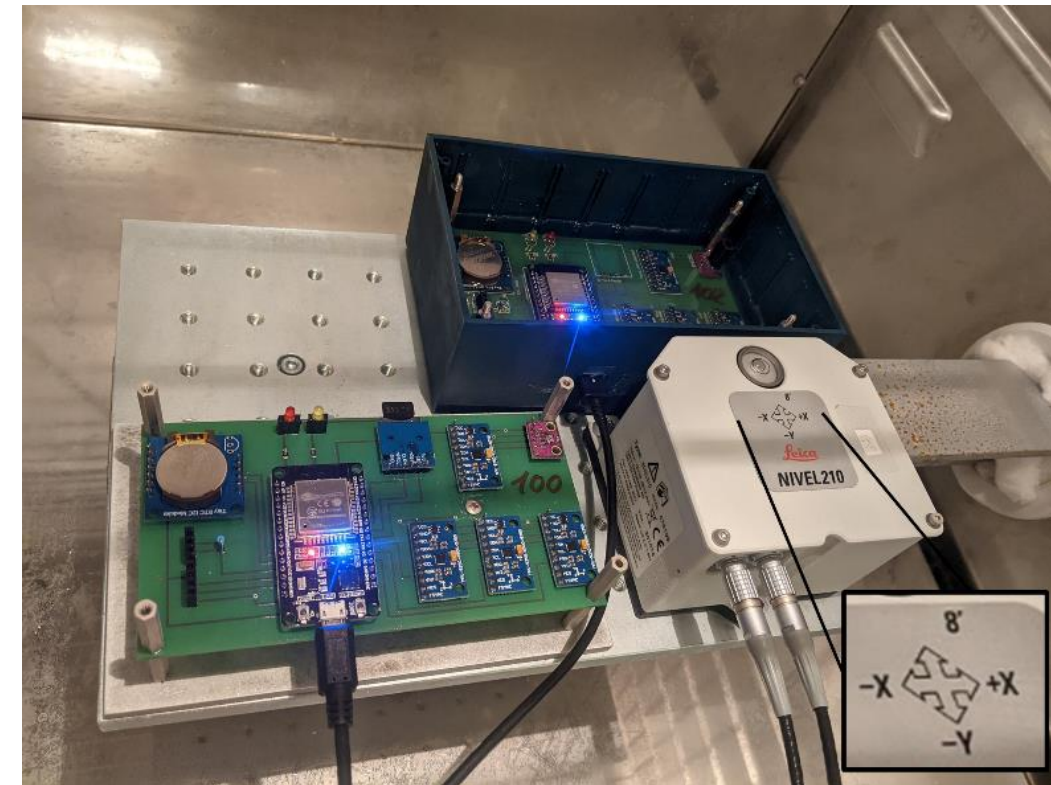
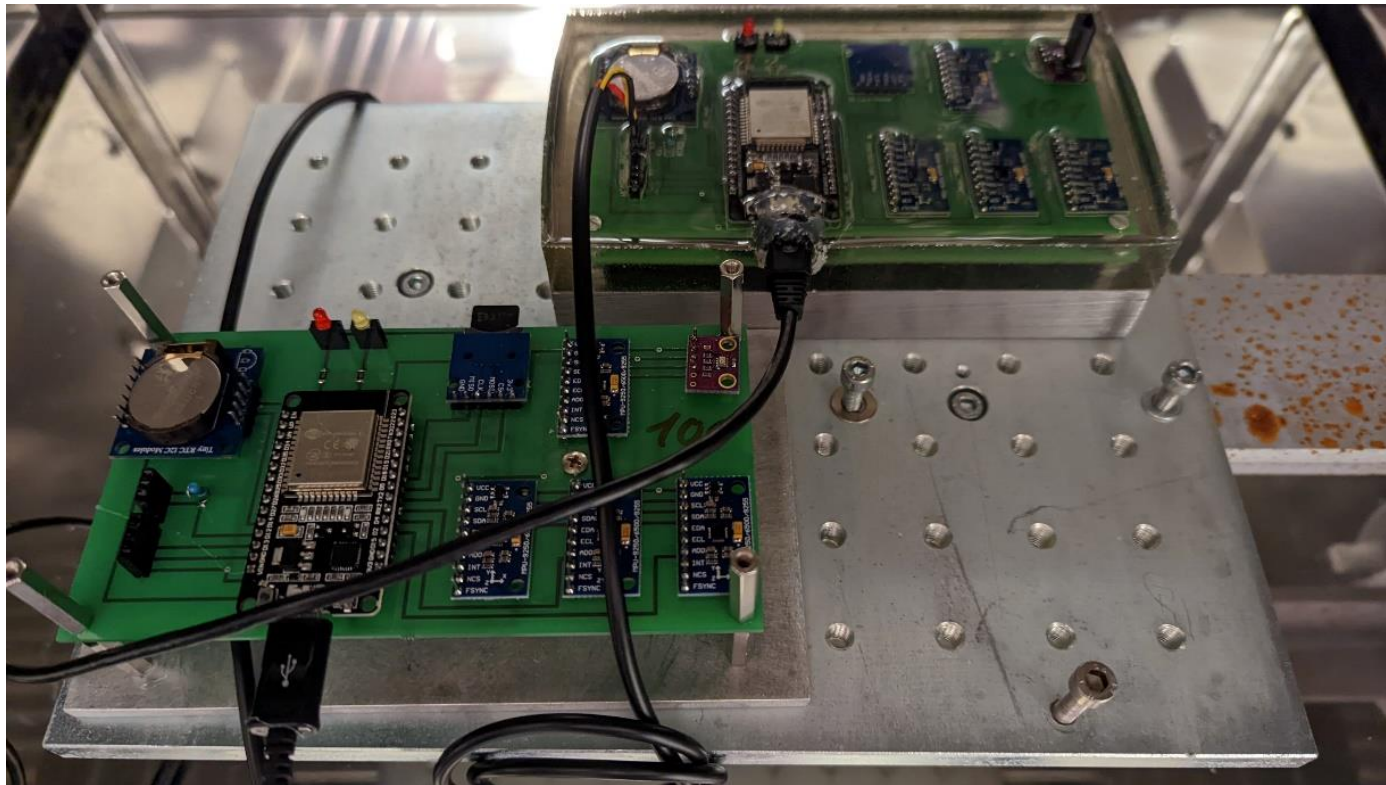
Messgenauigkeit:
Unter optimalen Bedingungen: 0,3 mm



ZF Imager 5016

Ausdehnung der Platine – mit Guss und ohne Guss

- Temperaturstabilität: Verschraubung im Vergleich zu vergossener Platine

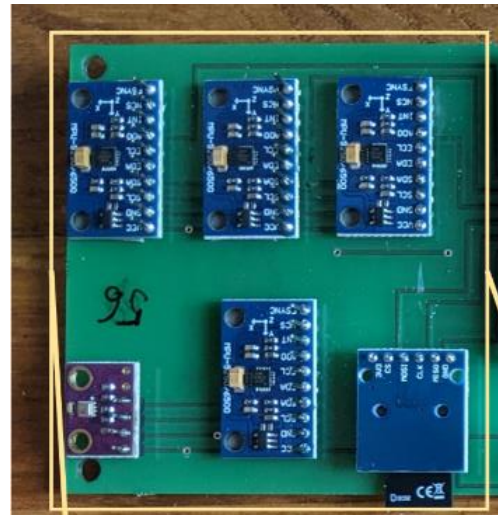


Ausdehnung der Platine

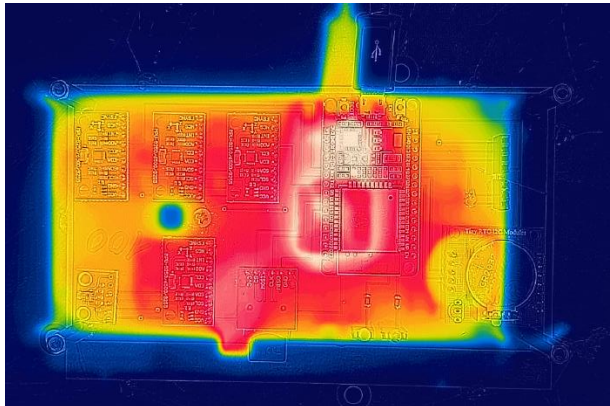
- Temperaturstabilität der Montage (Verschraubung)
- Test mit Creaform Handy Scan Black (0.035 mm)



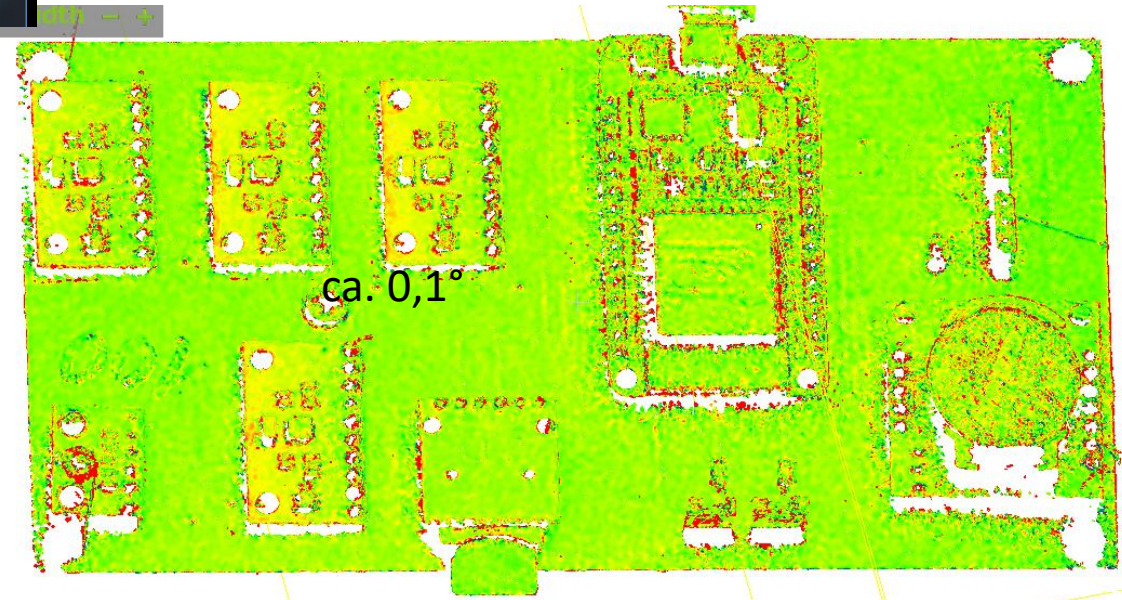
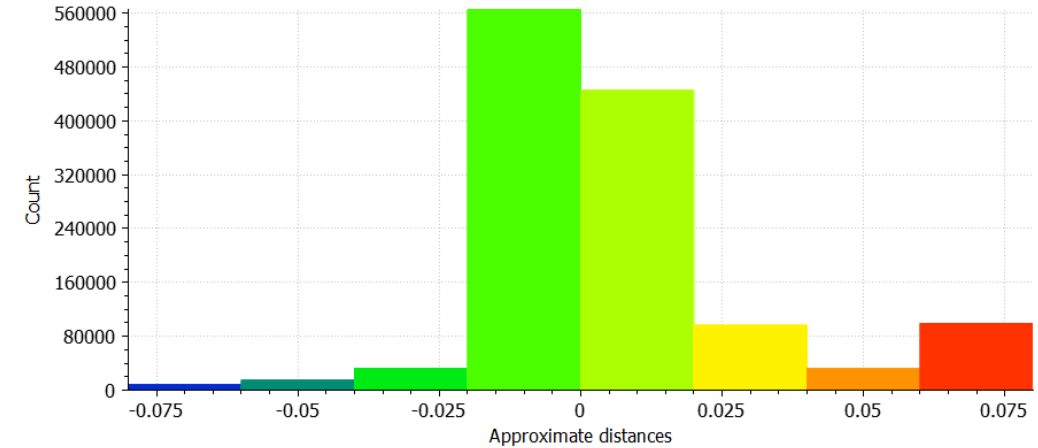
24-41°C



24-65°C



Approximate distances (866009 values) [8 classes]

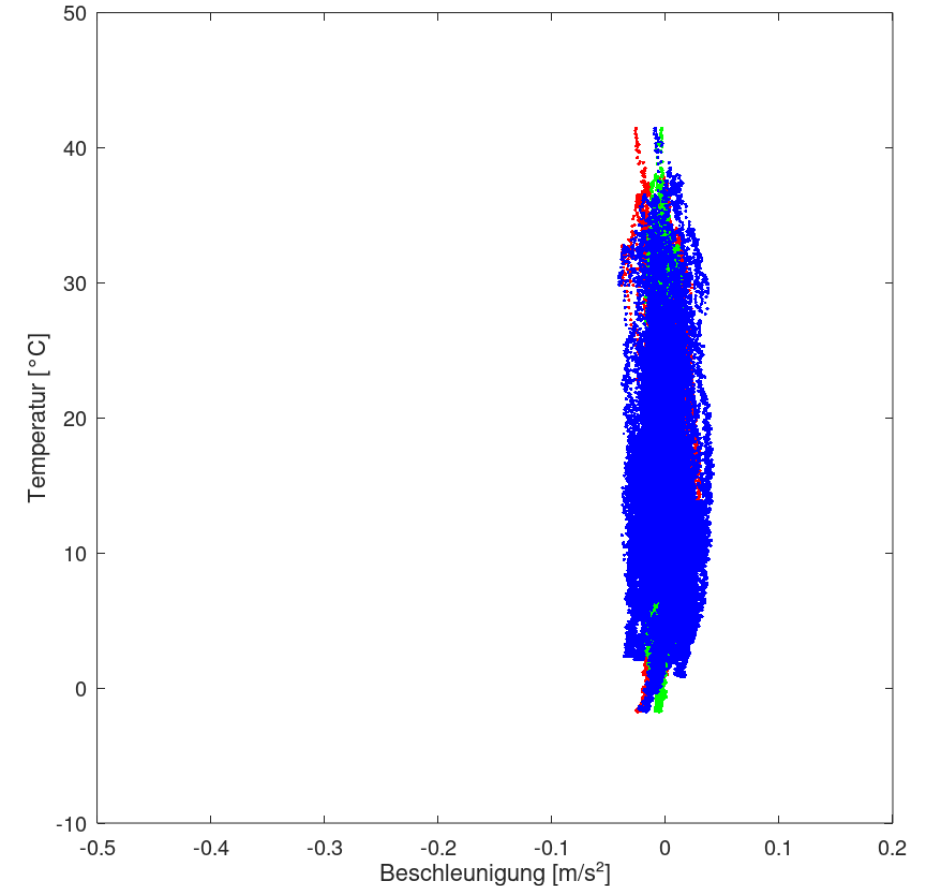
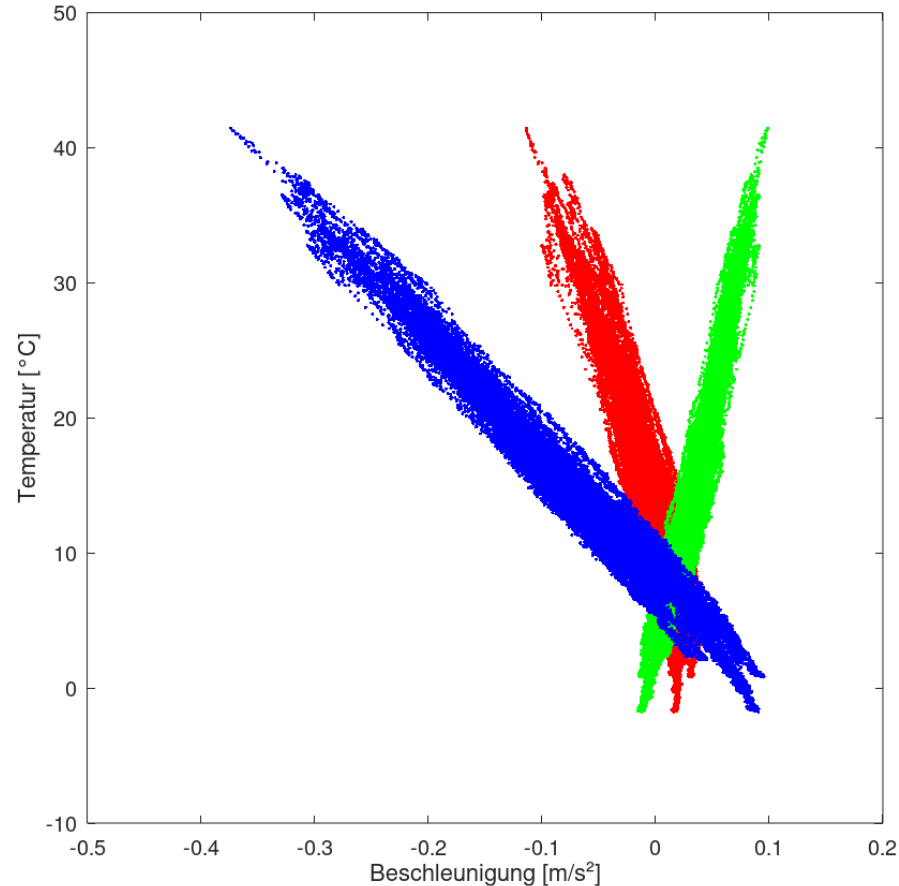


Kompensation temperaturabhängiger Sensorfehler

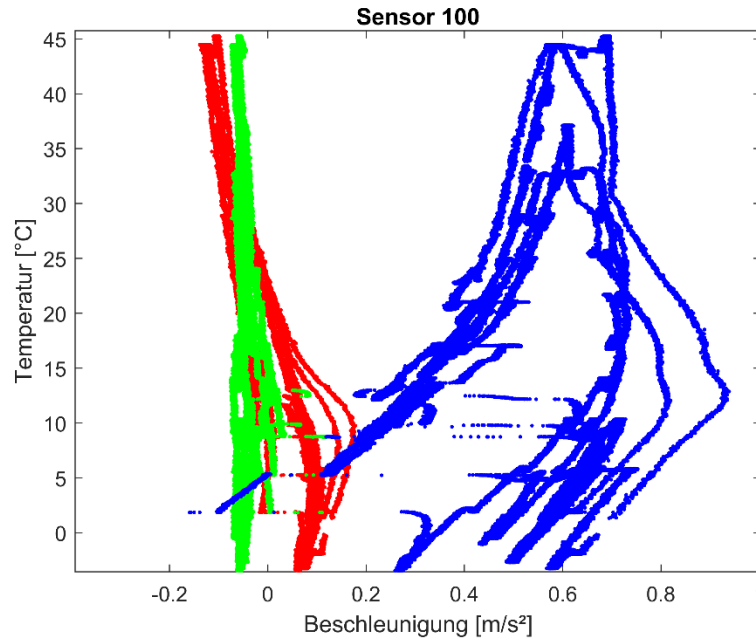
Darstellung zeigt den Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Rohdaten Beschleunigung der X, Y und Z Achse

Links: Rohdaten

Rechts: nach Berücksichtigung der Korrekturfunktion (linear)

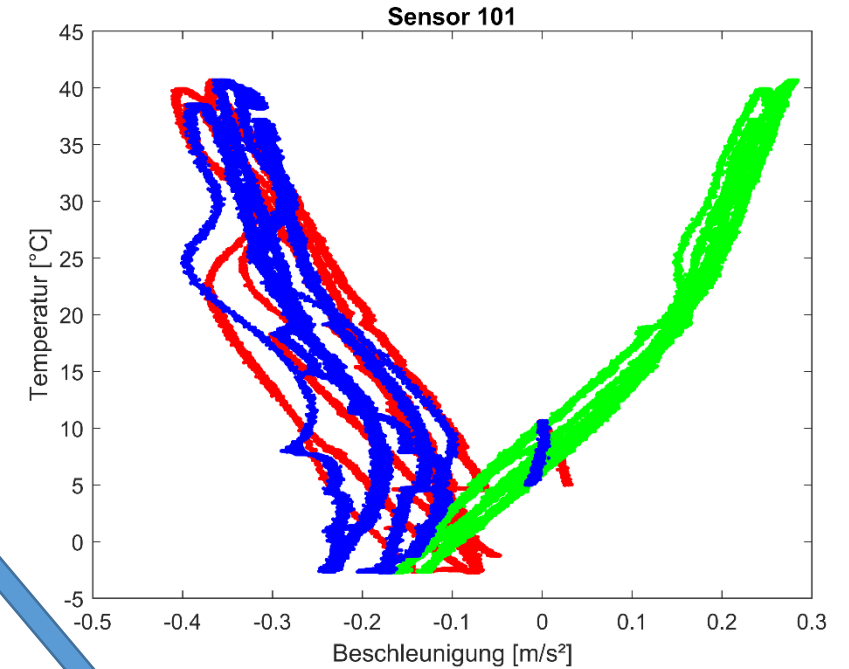
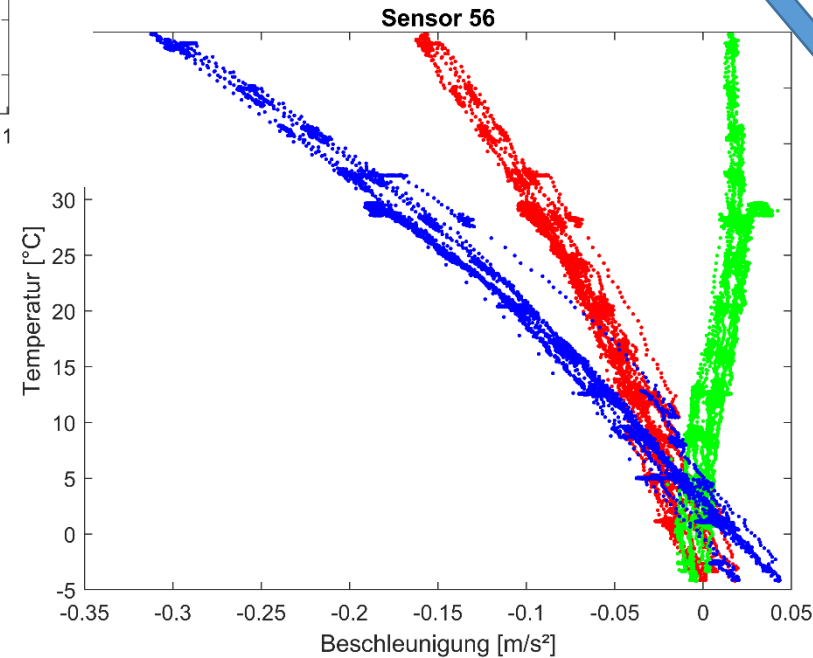


Kompensation temperaturabhängiger Sensorfehler



Gleichzeitige Temperaturmessung
+ Parameterschätzung aus Klimagerät

$y = p1 \cdot x + p2$	$y = p1 \cdot x + p2$	$y = p1 \cdot x + p2$
Coefficients:	Coefficients:	Coefficients:
p1 = -0.0060358	p1 = -6.8087e-05	p1 = -0.0017003
p2 = 0.12053	p2 = -0.04579	p2 = 0.62638



Live-Korrektur des
Temperatureinflusses
möglich

Kalibrierung typischer systematischer Sensorenunsicherheiten

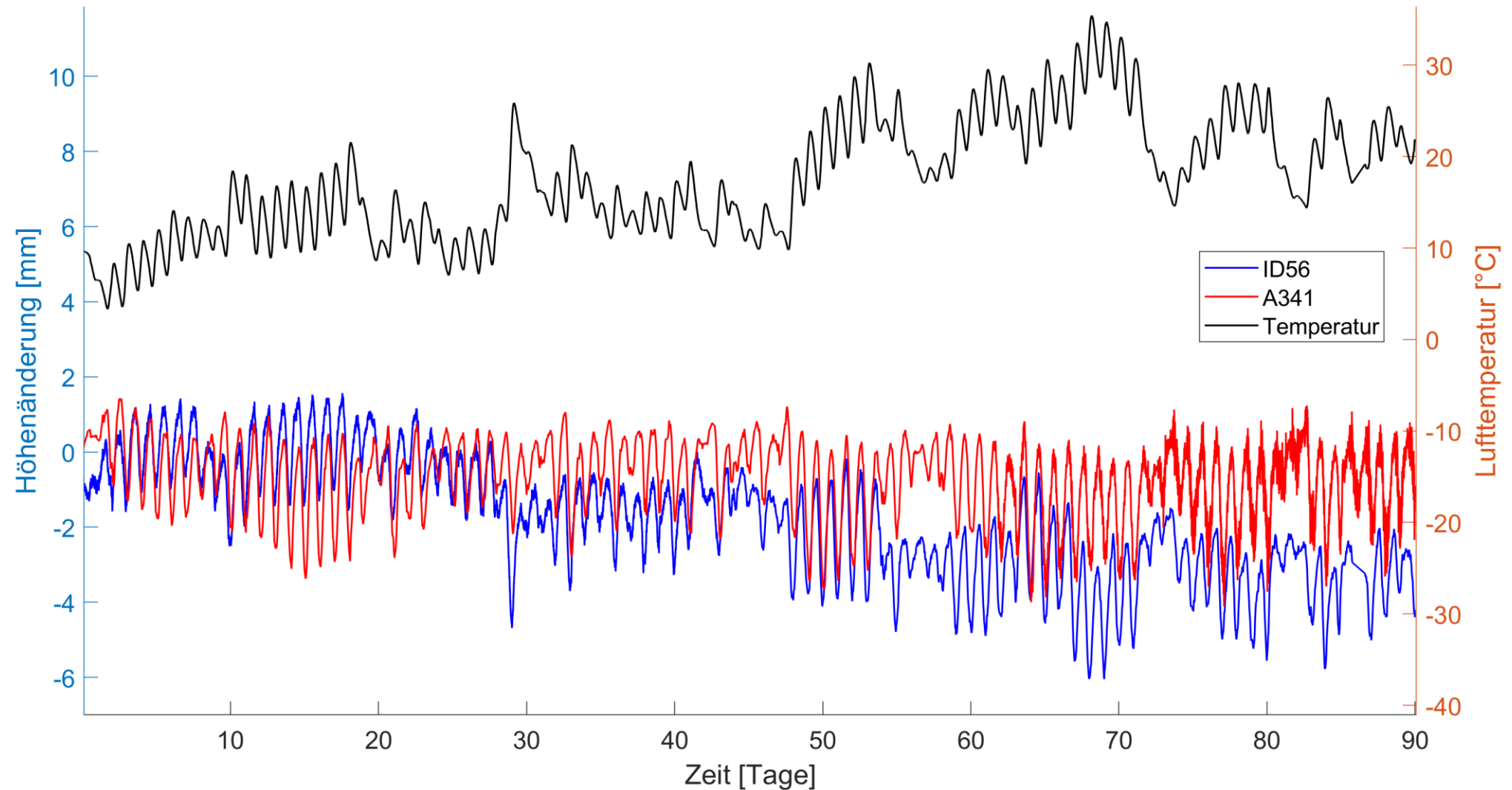
- Offset / Nullpunktfehler
- Maßstab
- Qualität der Orthogonalität
- Bestehende Ansätze nutzen:
 - Messdaten für die Kalibrierung erzeugen
 - Korrekturparameter schätzen
 - Anbringung an Rohdaten

$$g^2 = \hat{a}_x^2 + \hat{a}_y^2 + \hat{a}_z^2 \quad [3]$$

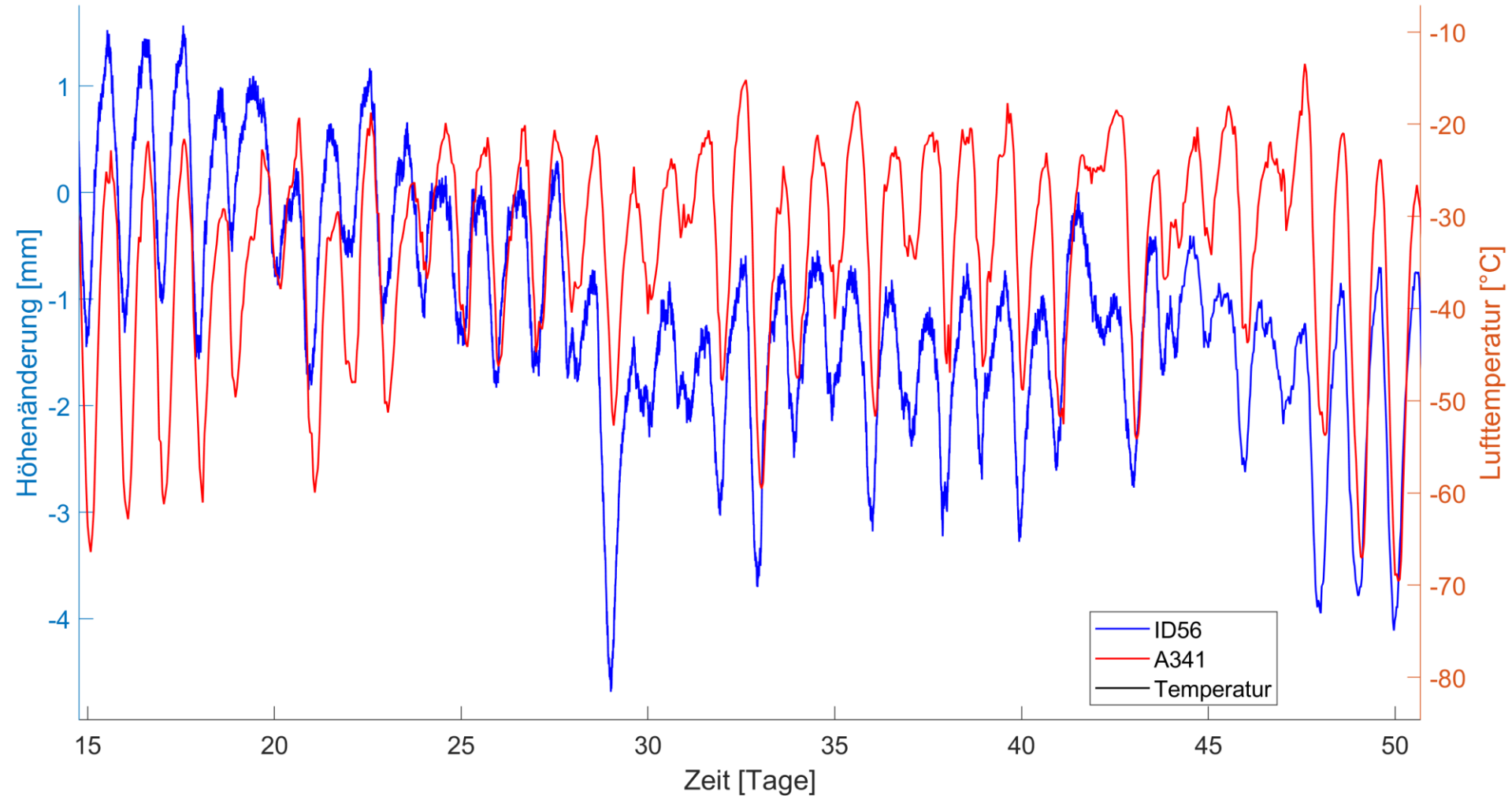
$$\begin{pmatrix} \hat{a}_x \\ \hat{a}_y \\ \hat{a}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & r_{x,y} & r_{x,z} \\ r_{y,x} & s_y & r_{y,z} \\ r_{z,x} & r_{z,y} & s_z \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a_x & b_x \\ a_y & b_y \\ a_z & b_z \end{pmatrix} \quad [4]$$

Ergebnisse im Vergleich zum Schlauchwaagensystem

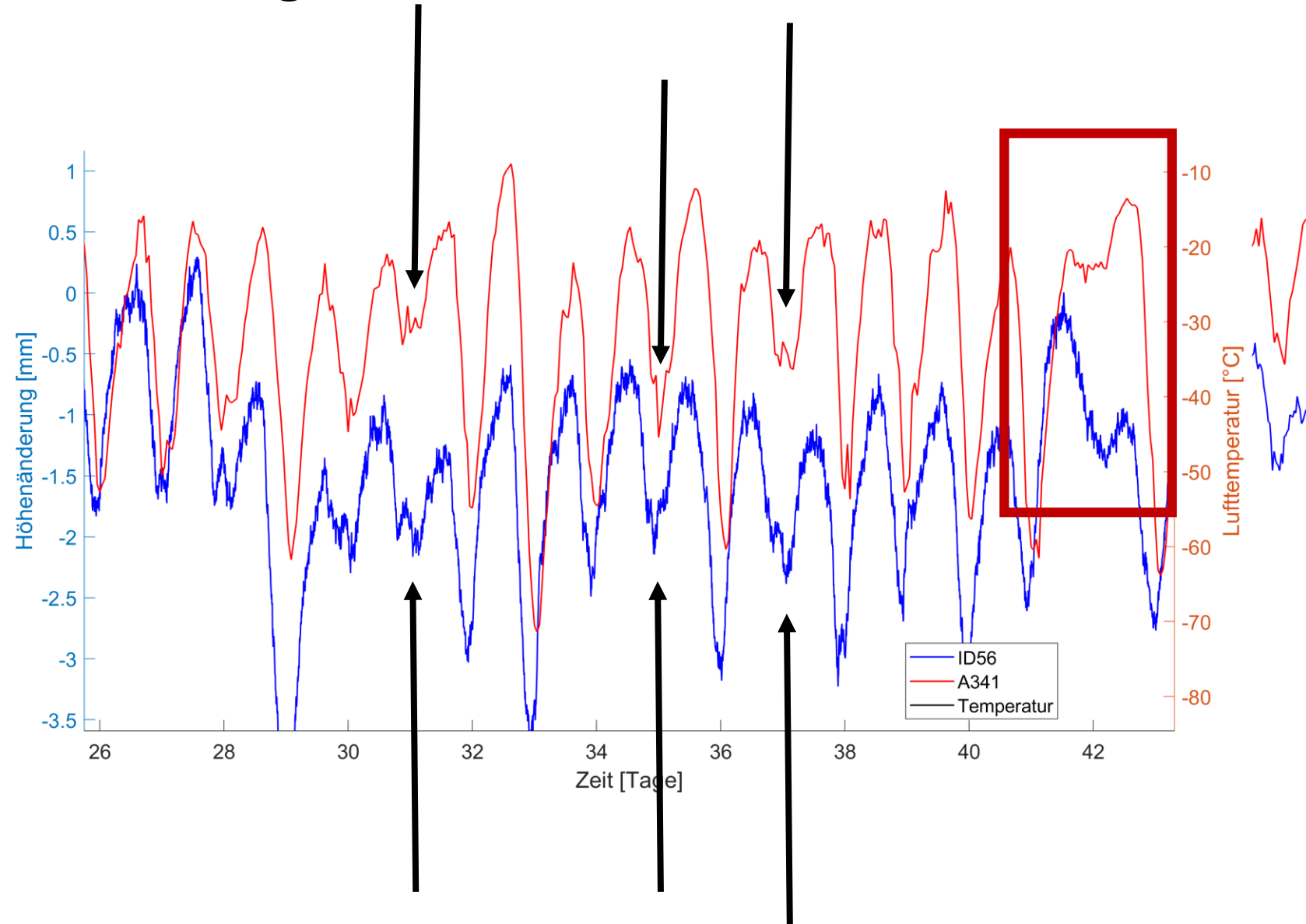
Vergleich des 90-Tage Datensatzes



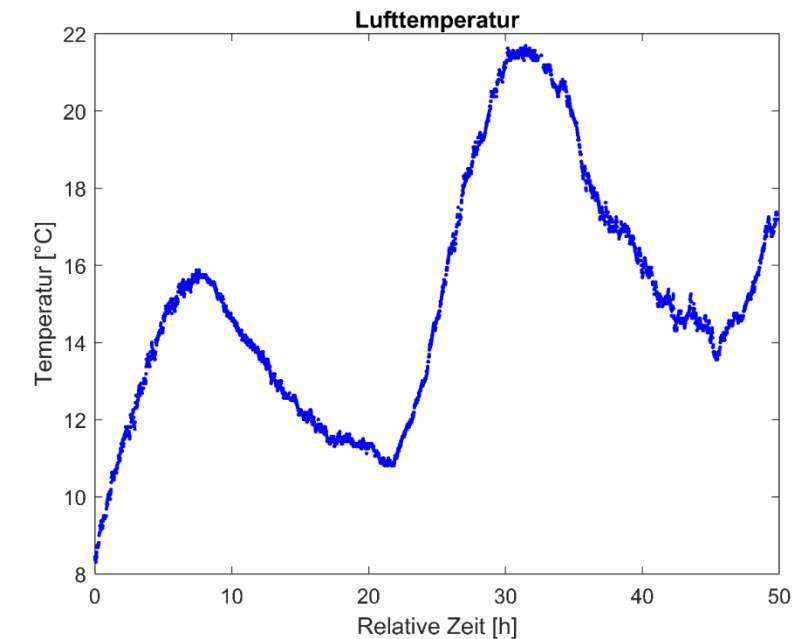
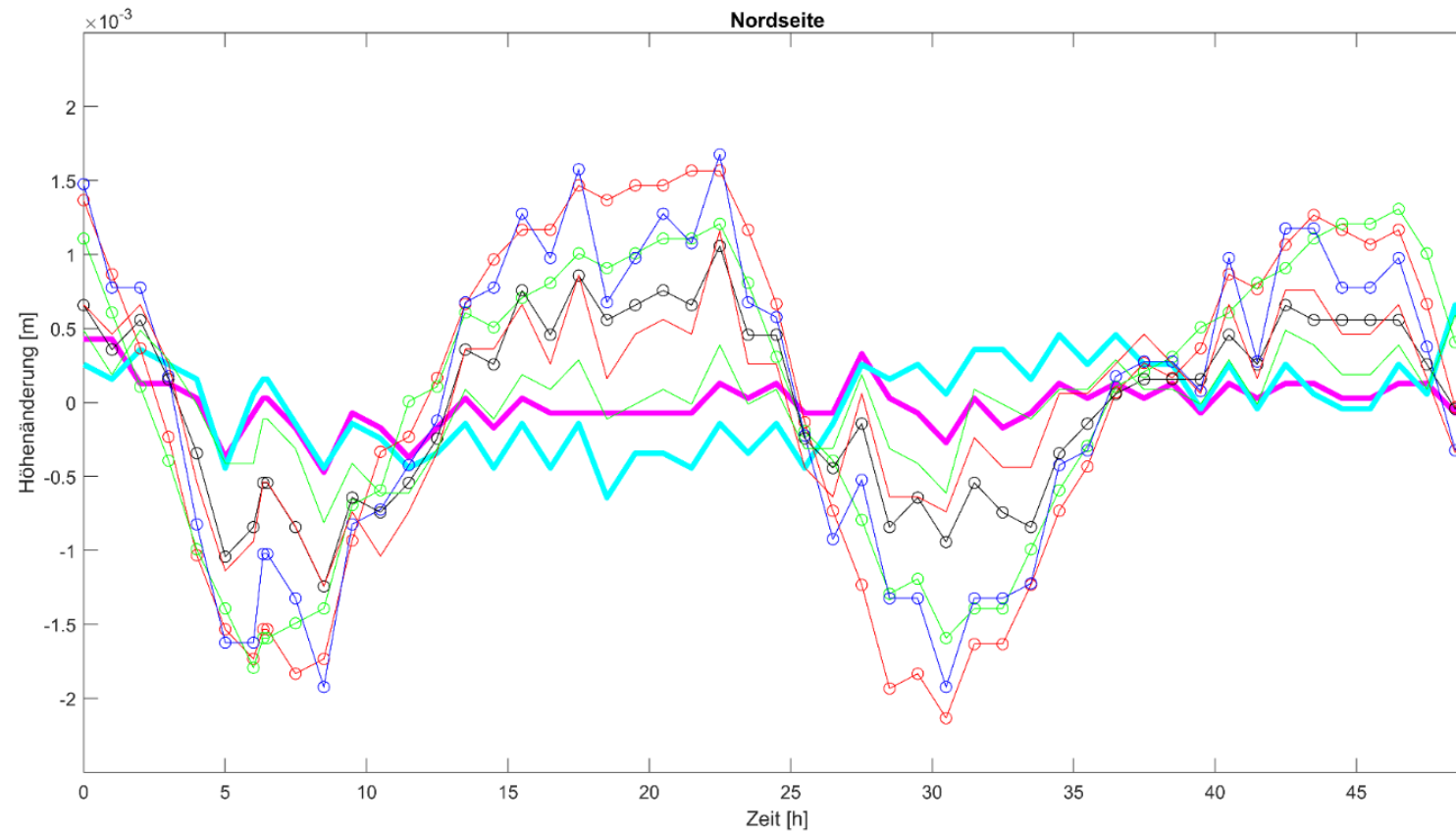
Vergleich des 90-Tage Datensatzes



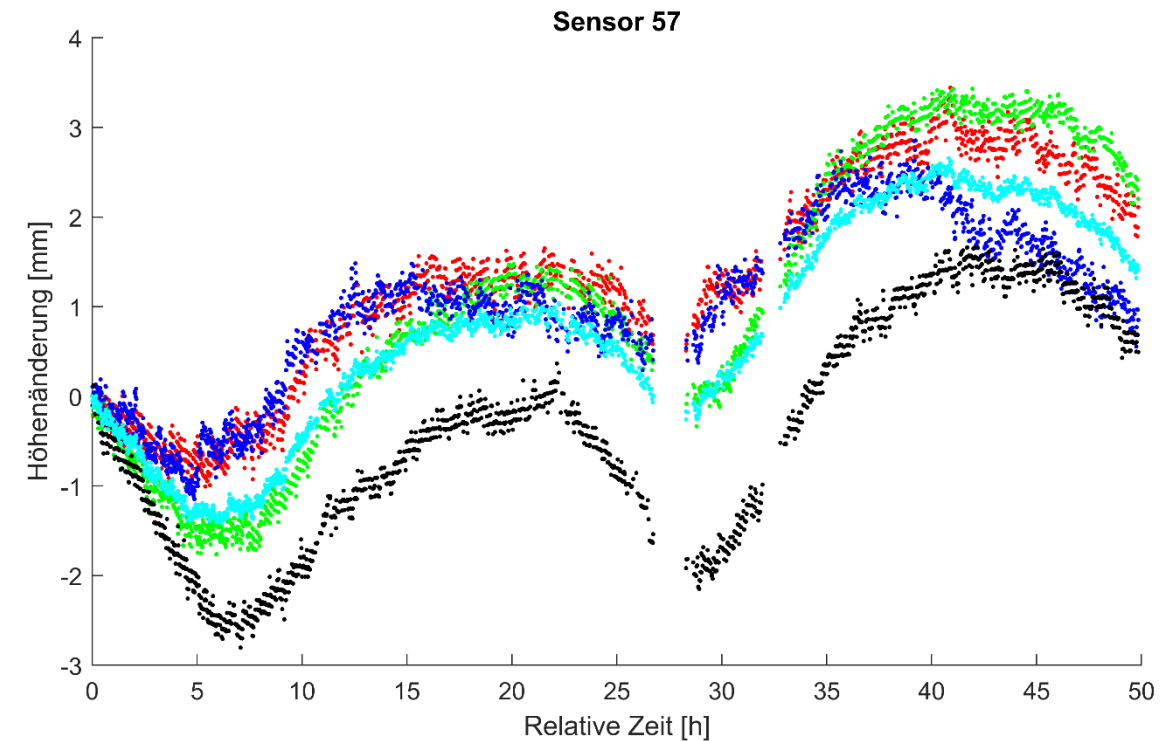
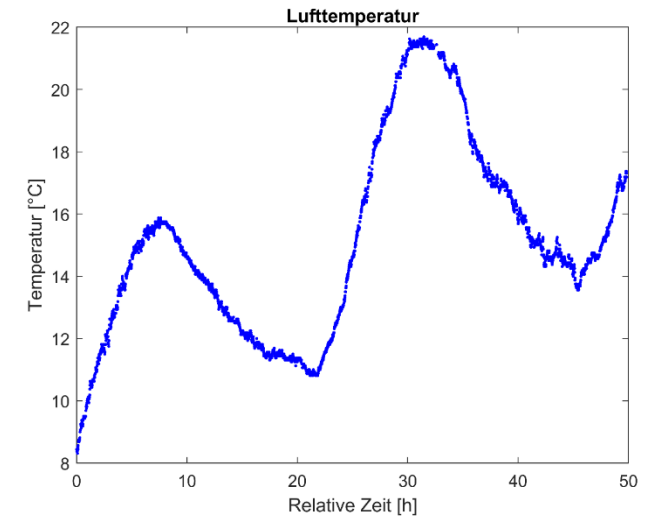
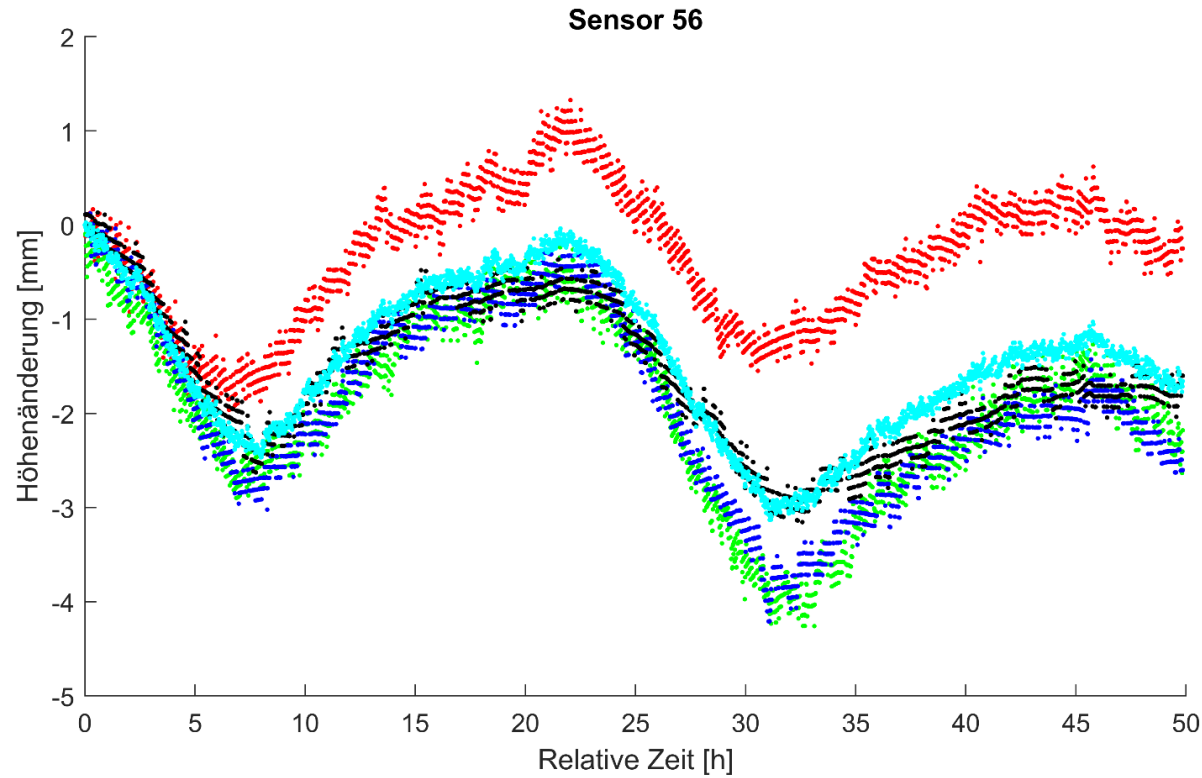
Vergleich des 90-Tage Datensatzes



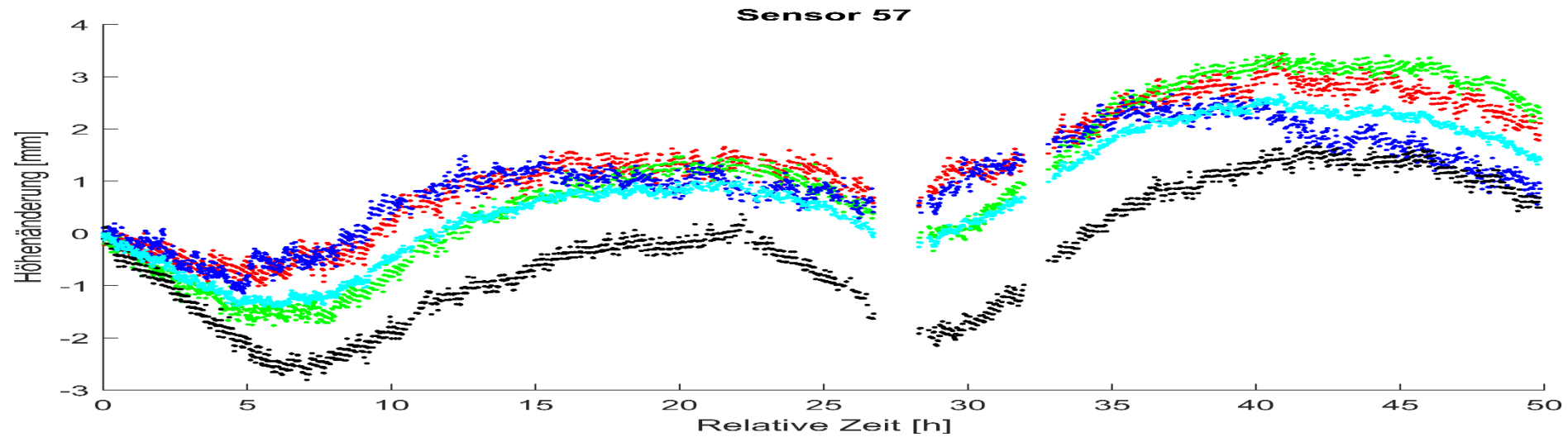
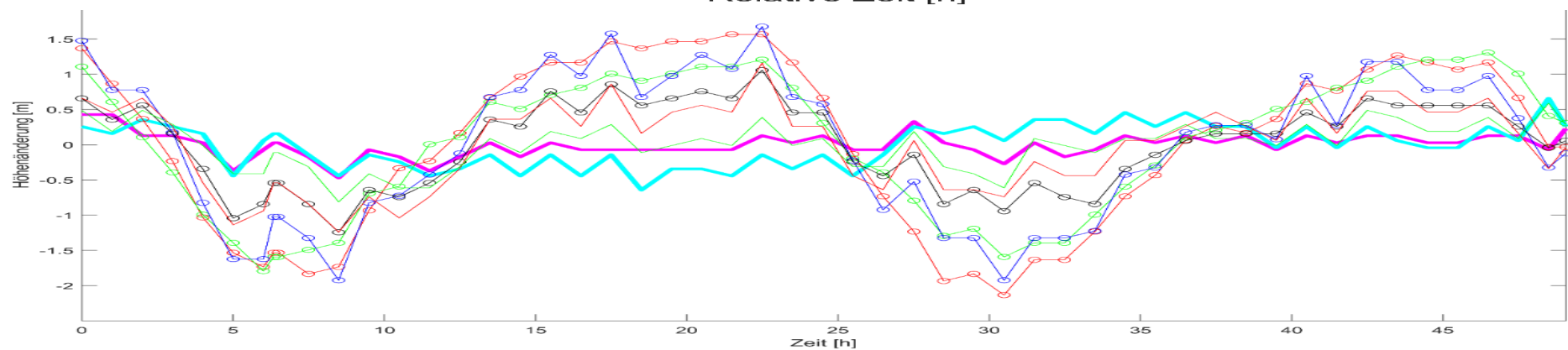
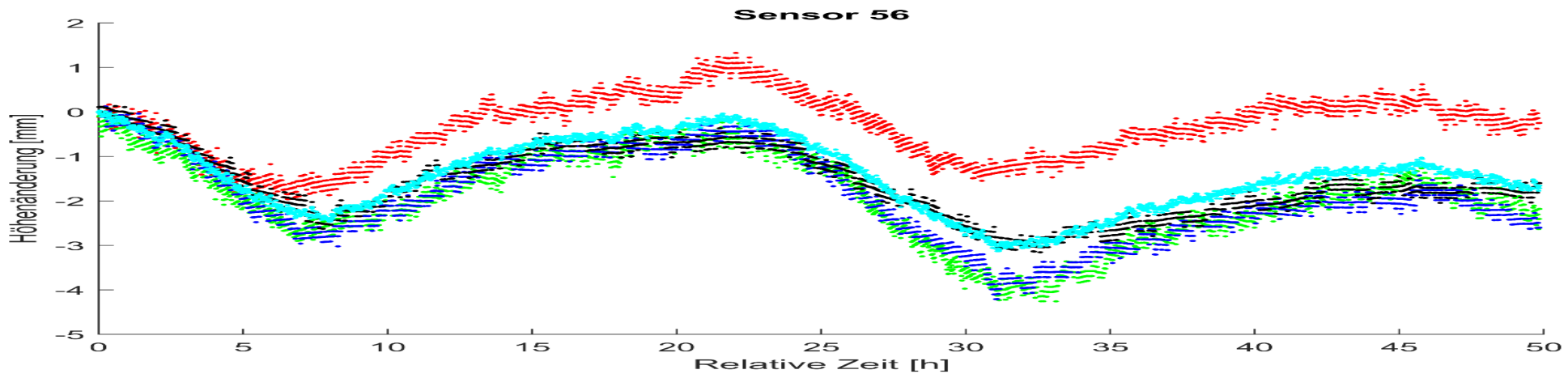
Vergleich des 2-Tage Scanzeitraumes



Vergleich des 2-Tage Scanzeitraumes



Verzerrung bewusst erzeugt
Zur passenden Überlappung der Zeitachse





Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- MEMS sind überall in Technologien des Alltags eingebunden.
- Monitoringaufgaben können mit bestehenden Messverfahren erfüllt werden. Allerdings können Aufwand und Kosten sehr hoch sein.
- Der Bedarf an Monitoring, besonders einfaches Monitoring, steigt.
- Messunsicherheiten bei Low-Cost machen den Einsatz für das Monitoring anspruchsvoll. Die Vorteile dieser Technologie überzeugen allerdings.

Zusammenfassung

- Der aktuelle Stand der Untersuchung zeigt, dass Potential für den Einsatz im Monitoring vorhanden ist.
- Die Zusammenarbeit zwischen HS Neubrandenburg und Landeshauptstadt Düsseldorf hat bestens funktioniert und nicht zuletzt sind diese tiefen Erkenntnisse auf Basis der guten Zusammenarbeit entstanden.
- Eine optimale Sensorkonfiguration und eine verbesserte Platinenkonfiguration sind noch zu entwickeln.

Ausblick

- Bis zum zuverlässigen Prototyp sind noch Optimierungen notwendig, besonders bei: Genauigkeit, Langzeitfehler, Zuverlässigkeit
- Gemeinsames Forschungsprojekt kann die Entwicklung beflügeln.
- Weitere Untersuchungen im Rahmen der Hochschularbeit sind vorgesehen. Die verbesserte Sensorkonfiguration soll zeitnah an die Brücke Benediktusstraße Einsatz finden.
- Als weitere Machbarkeitsstudie wurden Smartphones direkt an die Brücke montiert. Es läuft zur Zeit die Datengenerierung.

