

Die digitale Libelle für Baustellenvermessung

Bachelorarbeit

eingereicht von: Gerhard Planitzer

Matrikelnummer: 1128544

im Fachhochschul-Bachelorstudiengang Wirtschaftsinformatik (0470) der Ferdinand Porsche FernFH

zur Erlangung des akademischen Grades eines Bachelor of Arts in Business

Betreuung und Beurteilung: Prof. (FH) DI Dr. Martin Staudinger

Bruck an der Leitha, April 2025

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere hiermit,

- dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Inhalte, die direkt oder indirekt aus fremden Quellen entnommen sind, sind durch entsprechende Quellenangaben gekennzeichnet.
- dass ich diese Bachelorarbeit bisher weder im Inland noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit zur Beurteilung vorgelegt oder veröffentlicht habe.

Bruck an der Leita, Planitzer Gerhard, 05.06.2025

Unterschrift

Creative Commons Lizenz

Das Urheberrecht der vorliegenden Arbeit liegt bei Planitzer Gerhard . Sofern nicht anders angegeben, sind die Inhalte unter einer Creative Commons <,Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz" (CC BY-NC-SA 4.0)> lizenziert.

Die Rechte an zitierten Abbildungen liegen bei den in der jeweiligen Quellenangabe genannten Urheber*innen.

Die Kapitel 1 bis 4 der vorliegenden Bachelorarbeit wurden im Rahmen der Lehrveranstaltung "Bachelor Seminar 1" eingereicht und am <05.Mai 2025> als Bachelorarbeit 1 angenommen.

Kurzzusammenfassung: die digitale Libelle für Baustellenvermessung

In dieser Bachelorarbeit wird die Entwicklung einer digitalen Libelle für den Einsatz auf Baustellen untersucht. Im Vermessungswesen ist Präzision essenziell, da bereits geringe Lageabweichungen zu Baufehlern und zusätzlichen Kosten führen können. Traditionell wird die Ausrichtung durch eine mechanische Dosenlibelle überprüft, doch diese Methode zeigt Schwächen, insbesondere wenn die Justierung vernachlässigt wird. Diese Arbeit analysiert die Möglichkeiten durch den Einsatz eines digitalen Neigungssensors (MPU 6050) die Positionierung der Messinstrumente zu optimieren und eine Lagegenauigkeit von unter 5 mm zu gewährleisten.

Der theoretische Teil behandelt die aktuelle Technik im Vermessungswesen und die Genauigkeitsanforderungen. Im empirischen Teil wird ein Prototyp entwickelt, bestehend aus dem Sensor und einem Raspberry Pi zur Steuerung. Mithilfe eines Feldtests wird geprüft, ob die angestrebte Präzision erreicht werden kann.

Die Arbeit zeigt, dass der digitale Neigungssensor in der Lage ist, das traditionelle Instrument zu ersetzen und so die Effizienz und Genauigkeit der Vermessungsarbeiten auf Baustellen zu verbessern.

Schlagwörter;

Digitale Libelle, Baustellenvermessung, Neigungssensor, Baufehler, Raspberry Pi

Abstract

This bachelor thesis explores the development of a digital level for use in construction surveying. Precision is crucial in surveying, as even minor positional deviations can lead to construction errors and increased costs. Traditionally, alignment is checked using a mechanical bubble level, but this method has limitations, especially when adjustments are neglected. This study investigates the potential for a digital inclination sensor (MPU 6050) to improve the positioning of surveying instruments and achieve a positional accuracy of less than 5 mm.

The theoretical part of the thesis discusses he current technologies used in surveying and the accuracy requirements. In the empirical part, a prototype consisting of the inclination sensor and a Raspberry Pi for control are eveloped. A field test is conducted to determine whether the desired accuracy can be achieved.

The results demonstrate that the digital inclination sensor can effectively replace traditional equipment, thereby enhancing the efficiency and accuracy of surveying tasks on construction sites.

Keywords:

Digital level, construction surveying, inclination sensor, construction error, Raspberry Pi

Inhaltsverzeichnis

Theoretischer Teil

1. Ei	nleitung	1		
1.1	Problemstellung	1		
	Zielsetzung der Arbeit	1		
1.3	Aufbau der Arbeit			
2. St	and der Wissenschaft und Technik	2		
2.1	Historische Entwicklung der Vermessungstechnologien	2		
2.2	Moderne Vermessungstechnologien auf Baustellen	3		
2.3	Prismenstäbe	5		
2.3.1	Einfluss der Stabschrägstellung auf die Lageabweichung	7		
2.4	Neigungssensoren	9		
3. Genauigkeitsanforderungen im Bauwesen				
3.1	Lagegenauigkeit in der Bauvermessung	10		
3.2	Normen und Standards für Bauvermessung	11		
3.3	Anforderungen an Messgenauigkeit bei Bauprojekten	13		
4. Te	echnische Grundlagen	14		
4.1	Raspberry Pi	14		
4.2	Kalibrierung und Korrekturwerte der Sensoren	15		
4.3	Filterung der Messdaten: Kalman-Filter	16		
4.4	Sensor-Datenkompensation	17		
4.5	Messdatenspeicherung und Export in CSV	17		
4.6	Software Schnittstelle	18		
4.7	Libellenanzeige und grafische Benutzeroberfläche	19		

Empirischer Teil

5. Entwicklung der digitalen Libelle	23
5.1 Auswahl und Beschreibung der verwendeten Komponenten5.2 Zusammenbau und Kalibrierung des Neigungssensors5.3 Erstellung der Software für den Raspberry Pi	23 26 28
6. Durchführung des Feldtests	30
6.1 Versuchsaufbau6.2 Durchführung des Feldtests6.3 Datenausgabe und Dokumentation	30 32 34
7. Ergebnisse und Diskussion	35
7.1 Vergleich von Soll- und Ist Werten7.2 Analyse der Messergebnisse7.3 Diskussion und Beantwortung der Forschungsfrage	36 39 47
8. Fazit und Ausblick	44
9. Abbildungsverzeichnis	47
10. Literaturverzeichnis	49

1 Einleitung

Die fortschreitende Digitalisierung hat in den letzten Jahren alle Bereiche der Vermessungstechnik erfasst und zu signifikanten Verbesserungen in der Präzision und Effizienz geführt. Besonders in der Bauvermessung, die eine exakte Positionierung und Ausrichtung der Messinstrumente erfordert, können schon geringfügige Abweichungen gravierende bauliche Konsequenzen und hohe Kosten verursachen.

Traditionell erfolgt die Justierung über mechanische Dosenlibellen, deren Genauigkeit jedoch stark von der Sorgfalt der Bedienung abhängt. Die Kalibrierung dieser Dosenlibelle wird häufig vernachlässigt. Hier setzt die vorliegende Arbeit an, indem sie untersucht, ob eine digitale Libelle auf Basis eines Neigungssensors (MPU 6050) die Genauigkeit und Effizienz der Bauvermessung verbessern kann. Ziel ist es, Lageabweichungen von weniger als 5 mm zu erreichen und damit die häufigsten Fehlerquellen zu eliminieren.

1.1 Problemstellung

Die Bauvermessung erfordert eine präzise Ausrichtung von Messinstrumenten, die häufig mit mechanischen Dosenlibellen erfolgt. Diese Methode ist jedoch anfällig für Justierungsfehler, die durch unsachgemäße Handhabung oder fehlende Kontrolle entstehen. Besonders bei großen und komplexen Bauprojekten können solche Ungenauigkeiten erhebliche Auswirkungen auf die Qualität und Stabilität der Bauausführung haben. Ein digitales System könnte diese Fehler vermeiden und so die Effizienz und Präzision deutlich steigern.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und Evaluierung einer digitalen Libelle, die auf einem Neigungssensor (MPU 6050) basiert. Im Fokus steht die Hypothese, ob mit dieser Technologie eine Lagegenauigkeit von unter 5 mm erreicht werden kann. Der Prototyp soll durch einen Feldtest überprüft werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in zwei Teile: einen theoretischen und einen empirischen. Der theoretische Teil beschreibt den Stand der Technik in der Vermessung, die Genauigkeitsanforderungen im Bauwesen sowie die technischen Grundlagen der verwendeten Sensoren und Steuerungseinheiten. Der empirische Teil umfasst die Entwicklung des Prototyps, die Beschreibung des Feldtests und die Analyse der Ergebnisse. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und Perspektiven für weitere Forschung aufgezeigt.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Historische Entwicklung der Vermessungstechnologien

Die Geschichte der Vermessungstechnologien zeigt, wie technologische Fortschritte die Präzision und Effizienz von Vermessungen über die Jahrhunderte hinweg kontinuierlich verbessert haben.

Bereits die frühen Zivilisationen erkannten die Notwendigkeit genauer Vermessungen, insbesondere im Zusammenhang mit der Landnutzung und Bauplanung. Im alten Ägypten etwa nutzten Vermesser einfache Seile und Gewichte, um Grenzen nach den jährlichen Nilüberschwemmungen zu rekonstruieren(Uren & Price, 2010). Auch in antiken Kulturen wie Griechenland und Rom wurden Vermessungsmethoden weiterentwickelt. Die Griechen führten unter Verwendung mathematischer Prinzipien, wie sie von Eratosthenes angewandt wurden, bereits erstaunlich präzise Messungen durch (Uren & Price, 2010). Im europäischen Mittelalter wurden die antiken Vermessungstechniken weitergeführt und oft in Klöstern sowie durch militärische Ingenieure verbessert. Arabische Gelehrte trugen wesentlich zur Bewahrung und Weiterentwicklung des Wissens bei, indem sie antike Methoden mit neuen mathematischen Erkenntnissen kombinierten (Schofield & Breach, 2007). Diese Einflüsse trugen dazu bei, dass die Vermessungstechnik auch in Europa stetig präziser wurde.

Mit der Renaissance begann eine intensive Entwicklung im Bereich der Vermessungstechnologie. Der Theodolit, der im 16. Jahrhundert entwickelt wurde, stellte einen bedeutenden Fortschritt dar und ermöglichte erstmals die Messung von horizontalen und vertikalen Winkeln (Noble, 2015). Diese Verbesserung führte zu genaueren und zuverlässigeren Vermessungen, die besonders für komplexere Bauprojekte notwendig wurden (Noble, 2015).

Im 18. und 19. Jahrhundert erfolgte die Einführung der Triangulation, eine Methode, die die Vermessung großer Gebiete mit hoher Präzision ermöglichte. Diese Technik legte den Grundstein für die Erstellung umfassender Karten und erlaubte es, topografische Details exakt zu erfassen. Später, im 20. Jahrhundert, führten elektronische Distanzmessgeräte (EDM) und schließlich GPS-Technologien zu einer weiteren Revolution in der Vermessungstechnik, indem sie die Messgeschwindigkeit und Genauigkeit erheblich steigerten (Ghilani, 2021). Die Fortschritte der letzten Jahrzehnte in den Bereichen Laserscanning, Drohnentechnologie und satellitengestützten Systemen haben die Vermessungstechnik weiterentwickelt (Kavanagh, 2020). Moderne Methoden ermöglichen die Erfassung und Analyse von Vermessungsdaten in Echtzeit, was besonders im Bauwesen und in der Stadtplanung von zentraler Bedeutung ist (Kavanagh, 2020).

2.2 Moderne Vermessungstechnologien auf Baustellen

Die Anforderungen an Präzision und Effizienz im Bauwesen haben die Entwicklung und Einführung moderner Vermessungstechnologien stark beeinflusst. Auf Baustellen werden heute sowohl traditionelle Methoden als auch hochentwickelte digitale und elektronische Messgeräte verwendet, um eine hohe Genauigkeit und schnelle Datenerfassung zu gewährleisten.

Schnurgerüst

Ein Schnurgerüst ist eine einfache, aber effektive Methode zur Markierung und Absteckung von Fundamenten und Gebäudegrundrissen. Dieses traditionelle Hilfsmittel besteht aus Pfählen und gespannten Schnüren, die den Grundriss eines Bauwerks auf dem Baugelände markieren. Es wird zur exakten Übertragung der Baupläne auf das Gelände eingesetzt und stellt sicher, dass Baugruben und Fundamente an den richtigen Positionen und in den korrekten Winkeln errichtet werden. Diese Methode ist kostengünstig, einfach aufzubauen und anzupassen und ermöglicht eine klare Übersicht über die Baugrenzen, bevor die eigentlichen Arbeiten beginnen (Kavanagh, 2014).

Rotationslaser für Höhenabsteckung

Ein Rotationslaser ist ein modernes Vermessungsinstrument, das exakte Höhenmessungen über größere Distanzen ermöglicht. Er projiziert einen Laserstrahl, der um 360 Grad rotiert und eine horizontale oder vertikale Ebene als Referenzhöhe erzeugt (Schofield & Breach, 2007). Mithilfe eines Empfängers, der an einem Nivellierstab angebracht wird, können Höhenunterschiede auf der Baustelle ermittelt und angeglichen werden. Rotationslaser sind besonders nützlich für große Baustellen, auf denen eine einheitliche Höhe über weite Strecken gehalten werden muss, beispielsweise bei Fundamenten oder Bodenplatten.

Nivelliergerät

Ein Nivelliergerät ist ein optisches Vermessungsinstrument zur präzisen Messung von Höhenunterschieden zwischen verschiedenen Punkten. Es besteht aus einem Teleskop, das auf einem Stativ montiert ist, und einer Libelle zur horizontalen Ausrichtung des Geräts. Durch Ablesen der Skala auf einem Nivellierstab, der an den Messpunkten aufgestellt wird, kann der Vermesser den Höhenunterschied zwischen den Messpunkten bestimmen. Das Nivelliergerät ist in der Bauvermessung, im Straßenbau und bei der Erstellung von Geländemodellen unverzichtbar (Uren & Price, 2010).

Theodolit

Der Theodolit ist ein klassisches Messinstrument der Bauvermessung zur präzisen Bestimmung von horizontalen und vertikalen Winkeln. Er zählt zu den Grundgeräten der geodätischen Messtechnik und wird insbesondere für Absteckungen und Winkelübertragungen im Hoch- und Tiefbau eingesetzt (Uren & Price, 2010). Das Herzstück eines Theodoliten ist ein optisches Fernrohr, das sowohl um die Vertikalachse als auch um die Horizontalachse drehbar ist. Über integrierte Libellen und Nivellierschrauben kann das Gerät exakt ausgerichtet werden.

Die abgelesenen Winkelwerte dienen der geometrischen Punktbestimmung und der Übertragung planerischer Vorgaben in die Realität (Schofield & Breach, 2007). Der Theodolit wird traditionell in Kombination mit Vermessungspunkten oder Prismenstäben eingesetzt, wobei der Fokus stets auf der Winkelmessung liegt. Eine direkte Distanzmessung ist mit den Theodoliten nicht möglich; hierfür werden separat Maßbänder verwendet. Dies kann zu folgefehlern führen.

Elektronische Distanzmessung (EDM)

Die elektronische Distanzmessung (EDM – Electronic Distance Measurement) ermöglicht die präzise Bestimmung von Entfernungen zwischen zwei Punkten mittels elektromagnetischer Wellen. Die Technologie wurde ab den 1960er-Jahren entwickelt und hat sich seither als Standardverfahren in der Bauvermessung etabliert (Uren & Price, 2010). EDM-Geräte senden Licht- oder Mikrowellensignale an ein Reflexionsziel (z. B. ein Prisma) und messen die Laufzeit bzw. die Phasenverschiebung der zurückkehrenden Wellen. Aus dieser Information wird die Distanz zum Zielpunkt mit hoher Genauigkeit berechnet. EDM-Systeme werden in Totalstationen eingesetzt. Sie ermöglichen eine schnelle, berührungslose und präzise Distanzmessung, selbst bei unzugänglichem Gelände oder über große Strecken.

Totalstationen

Die Totalstation vereint die Funktionen eines Theodoliten zur Winkelmessung mit einem EDM-Modul zur elektronischen Distanzmessung in einem einzigen Gerät. Sie ist heute das zentrale Instrument moderner Bauvermessung und ermöglicht die dreidimensionale Bestimmung von Punktkoordinaten in einem einzigen Arbeitsschritt (Schofield & Breach, 2007).

Moderne Totalstationen sind meist mit einem Feldrechner(Tablet) ausgestattet. Die Messdaten – bestehend aus Horizontal- und Vertikalwinkeln sowie der gemessenen Distanz – werden in Echtzeit zu XYZ-Koordinaten umgerechnet und können direkt in CAD Systeme exportiert werden.

Darüber hinaus verfügen viele Totalstationen über motorisierte Antriebe, automatische Zielerkennung (ATR) sowie GPS-Integration. Diese Funktionen ermöglichen hochautomatisierte Messprozesse, z. B. bei Monitoring Aufgaben oder in der Ingenieurgeodäsie.

Durch die Kombination aus Winkel- und Distanzmessung sowie digitaler Auswertung ersetzt die Totalstation in vielen Fällen den klassischen Theodolit und ermöglicht effiziente, präzise und dokumentierbare Vermessungsabläufe.

GPS-basierte Vermessungssysteme

GPS-Vermessungssysteme erfassen präzise Positionsdaten mithilfe von Satellitensignalen und sind besonders nützlich für große Bauprojekte. Diese Technologie ermöglicht die Erfassung von Lagekoordinaten ohne Sichtverbindung und liefert Echtzeit-Koordinaten, die die exakte Positionierung auf der Baustelle unterstützen und Fehler minimieren (El-Rabbany, 2006).

2.3 Prismenstäbe

Prismenstäbe sind entscheidende Werkzeuge in der Bauvermessung, die in Verbindung mit Totalstationen verwendet werden, um präzise Vermessungen durchzuführen. Verschiedene Typen von Prismenstäben bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile, abhängig von der spezifischen Anwendung und den Anforderungen auf der Baustelle (Kavanagh, 2014). Abbildung 1 zeigt schematisch den Messaufbau mit einer Totalstation und einem Prismenstab. Das am Prismenstab befestigte Prisma reflektiert den von der Totalstation ausgesandten Laserstrahl und dient zur Distanzmessung.

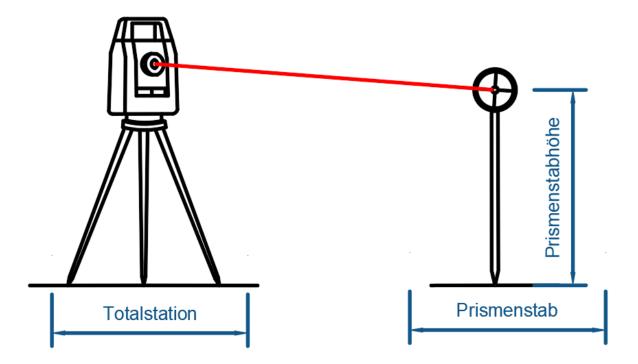


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Messung mit einer Totalstation und einem Prismenstab.

Teleskop-Prismenstäbe

Eigenschaften: Diese Prismenstäbe sind in der Länge verstellbar, oft mit einer maximalen Höhe von etwa 2 bis 5 Metern. Sie haben Markierungen für verschiedene Höhen, um die Absteckung zu erleichtern.

Vorteile: Flexibilität in der Höhe und einfaches Transportieren, besonders nützlich in unebenem Gelände, da die Länge angepasst werden kann.

Nachteile: Bei maximaler Ausdehnung könnte der Stab instabiler werden, was die Genauigkeit beeinträchtigen kann.

Materialien: Häufig aus leichtem Aluminium oder Carbon gefertigt.

Anwendungen: Vielseitig einsetzbar in verschiedenen Geländearten, geeignet für häufiges Wechseln der Messhöhe, z. B. im Hochbau und bei Infrastrukturprojekten (Schofield & Breach, 2007).

Feste Prismenstäbe

Eigenschaften: Diese Stäbe haben eine feste Länge, die typischerweise zwischen 1,5 und 2 Metern liegt.

Vorteile: Besonders stabil und genau, da keine beweglichen Teile vorhanden sind. Weniger anfällig für Schwingungen oder Bewegungen im Wind.

Nachteile: Weniger flexibel, da die Höhe nicht angepasst werden kann. Nicht ideal für stark unebenes Gelände.

Materialien: Meist aus robustem Aluminium gefertigt.

Anwendungen: Ideal für hochpräzise Messungen auf ebenen Flächen oder in kontrollierten Umgebungen, z. B. bei Bauarbeiten auf befestigtem Gelände oder in städtischen Bereichen (Uren & Price, 2010).

Prismenstäbe aus Carbon

Eigenschaften: Carbon Stäbe zeichnen sich durch ihr extrem geringes Gewicht und gleichzeitig hohe Stabilität aus.

Vorteile: Leicht und dennoch stabil, perfekt für längere Einsätze, bei denen der Stab häufig transportiert werden muss. Sie bieten eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse wie Korrosion.

Nachteile: Teurer als Stäbe aus Aluminium oder anderen Materialien.

Anwendungen: Besonders geeignet für Vermessungsarbeiten, bei denen das Gewicht des Stabs eine Rolle spielt, wie bei mobilen oder weiträumigen Vermessungen (Leica Geosystems, 2022).

Aluminium-Prismenstäbe

Eigenschaften: Aluminium ist das am häufigsten verwendete Material für Prismenstäbe, da es ein gutes Verhältnis zwischen Gewicht und Stabilität bietet.

Vorteile: Robustes und langlebiges Material, korrosionsbeständig und preiswerter als Carbon Stäbe.

Nachteile: Schwerer als Carbon Stäbe, was bei längeren Einsätzen oder häufigem Transport unpraktisch sein kann.

Anwendungen: Standard-Wahl für die meisten Vermessungsanwendungen, sowohl auf Baustellen als auch bei der Landvermessung (Nedo GmbH & Co. KG, 2023).

Prismenstäbe mit Libellen

Eigenschaften: Diese Stäbe sind mit integrierten Libellen (Wasserwaagen) ausgestattet, die eine präzise Vertikalausrichtung des Prismas ermöglichen.

Vorteile: Höhere Genauigkeit durch Kontrolle der Vertikalausrichtung, besonders bei Absteckungen, bei denen eine präzise Höhenmessung entscheidend ist.

Nachteile: Etwas schwerer und teurer aufgrund der zusätzlichen Ausrüstung.

Anwendungen: Besonders nützlich bei Vermessungen, bei denen genaue vertikale Messungen erforderlich sind, z. B. bei der Übertragung von Punkten in die Höhe (Trimble Inc., 2021).

Fazit

Für flexible und mobile Anwendungen sind Teleskop-Prismenstäbe aus Carbon eine exzellente Wahl, da sie leicht und verstellbar sind.

Für hochpräzise Messungen auf ebenen Flächen bieten feste Prismenstäbe aus Aluminium oder Carbon die beste Stabilität.

Wenn Stabilität und Kosten entscheidend sind, sind Aluminium-Prismenstäbe die Standardlösung, da sie langlebig und preiswerter sind (Topcon Positioning Systems Inc., 2022).

2.3.1 Einfluss der Stabschrägstellung auf die Lageabweichung

Definition und Bedeutung der Lagegenauigkeit

Die Lagegenauigkeit beschreibt die Abweichung eines gemessenen oder positionierten Punktes von seiner idealen geometrischen Lage in der X-Y-Ebene. Sie ist unabhängig von der Höhenlage (Z-Koordinate). In der bautechnischen Praxis bezeichnet sie die Genauigkeit, mit der beispielsweise ein Wandanschlag, ein Einbauteil oder ein Achspunkt auf einer Bodenplatte oder Schalung positioniert wird. Die Angabe erfolgt in Millimetern. In dieser Arbeit wird zur Beurteilung der Lagegenauigkeit ein Toleranzkreis mit einem Radius von 5 mm angesetzt. Liegt der tatsächlich gemessene Punkt innerhalb dieses Bereichs, gilt die Position als ausreichend genau. Dabei ist zu beachten, dass die tatsächliche Abweichung nicht nur durch das eingesetzte Messsystem entsteht, sondern auch durch dessen Anwendung und Auswertung beeinflusst wird.

Zu den wesentlichen Einflussgrößen auf die Lagegenauigkeit zählen:

Gerätebedingte Messabweichungen, z. B. durch begrenzte Sensorauflösung, interne Kalibrierfehler oder elektronische Signalverarbeitung,

Anwenderbedingte Fehler, z. B. durch eine fehlerhafte Handhabung oder unzureichende Ausrichtung des eingesetzten Werkzeugs (z. B. Prismenstab),

Umwelteinflüsse, insbesondere Temperaturschwankungen, die bei Distanzmesssystemen zu Längenausdehnungen führen können, sowie Sonneneinstrahlung oder Feuchtigkeit, die die Sensorik oder Sichtlinien beeinflussen.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Lagegenauigkeit im Kontext eines vereinfachten Grundrisses. Die grünen Punkte markieren die idealen Soll-Lagen. Die roten Kreise stellen – im Maßstab überzeichnet – mögliche Ist-Werte eines Messpunktes dar, die infolge kleiner Abweichungen von der Idealposition entstehen können. Diese Visualisierung verdeutlicht, dass bereits geringe Abweichungen bei präziser Absteckung maßgeblich sein können. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird untersucht, ob durch den Einsatz eines Neigungssensors die vertikale Ausrichtung des Prismenstabes und damit die gesamte Lagegenauigkeit verbessert werden kann.

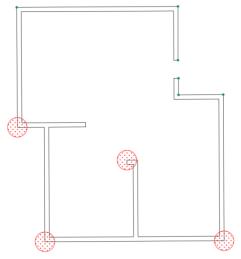


Abbildung 2: Darstellung der Lagegenauigkeit anhand eines Grundrisses.

Theoretische Grundlagen

Bei der Anwendung auf der Baustelle ist neben der Auswahl des passenden Prismenstabes auch dessen korrekte Handhabung von großer Bedeutung. Wird der Stab bei der Messung nicht exakt senkrecht gehalten, kommt es zu einer Lageabweichung(s). Diese Abweichung entsteht durch die Kombination aus der Schrägstellung des Stabs (Winkelabweichung α) und der Prismenstabhöhe(h).

Die resultierende Lageabweichung s berechnet sich nach folgender Beziehung: $s = h \cdot tan(\alpha)$

Praktisches Beispiel:

Abbildung 3 veranschaulicht den Einfluss einer Schrägstellung des Prismenstabes auf die Lageabweichung.

Bei einer Prismenstabhöhe von 1,5 m und einer Schrägstellung von 1° ergibt sich folgende Abweichung:

$$s = 1.5 \text{ m} \times \tan(1^{\circ}) \approx 0.02618 \text{ m} \approx 2.6 \text{ cm}$$

Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass bereits geringe Neigungsfehler zu Lageabweichungen im Zentimeterbereich führen können. Insbesondere bei millimetergenauer Absteckung müssen solche Effekte berücksichtigt werden.

Ausblick:

Zur Minimierung dieser Lageabweichungen wird im weiteren Verlauf der Arbeit der Einsatz eines Neigungssensors zur Überwachung der vertikalen Ausrichtung des Prismenstabes untersucht.

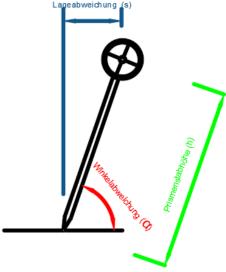


Abbildung 3: Einfluss der Stabschrägstellung auf die resultierende Lageabweichung s bei der Absteckung.

2.4 Neigungssensoren

Die Genauigkeit von Neigungssensoren wird in Grad oder Winkelsekunden angegeben. Ein Wert von $\pm 0,01^{\circ}$ bedeutet, dass der Sensor die Neigung eines Objekts auf ein Hundertstel Grad genau bestimmen kann. Solche Genauigkeiten sind entscheidend, wenn es um millimetergenaue Absteckungen auf Baustellen geht.

Sensortypen im Vergleich

Sensor	Тур	Genauigkeit	Messbereich	Schnittstellen	Besonderheiten	Quelle
Bosch BNO055	MEMS	±0,3°	±90°	I ² C	Integrierter 9-Achsen- Sensor, kompakt, tragbar	Bosch Sensortec, 2023
MPU-6050	MEMS	±250– 2000 °/s*	±2g-±16g*	I ² C	6-Achsen (Gyro + Acc), Bewegungserkennung	InvenSense, 2023
Jewell Inclinometer	Flüssigkeit	±0,005°	±60° pro Achse	RS232, RS485	Höchste Präzision, robust, Langzeitüberwachung	Jewell Instruments, 2023
SICK TMS/TMM22	MEMS	±0,01° bis ±0,02°	±90° (einachsig)	CANopen, Analog, SSI	IP67, industrietauglich, für raue Umgebungen	SICK AG, 2023
Murata SCL3300-D01	MEMS	±0,01°	±90° / ±45°	SPI	Geringe Drift, kompakt, zuverlässig	Murata, 2023
MEMSIC MXC4005XC	MEMS	±0,05°	±90°	I ² C	Stromsparend, hohe Stoßfestigkeit, langlebig	MEMSIC, 2023

Auswahl des Sensors für die Anwendung

Für die weitere Untersuchung wird der MPU-6050 verwendet, ein weit verbreiteter MEMS-Sensor, der Beschleunigungs- und Rotationsdaten liefert.

Der MPU-6050 vereint in einem einzigen Baustein einen 3-Achsen-Beschleunigungssensor und ein 3-Achsen-Gyroskop. Die Beschleunigungsdaten geben an, wie stark der Sensor entlang der drei Raumachsen (X, Y, Z) linear beschleunigt wird, während die Rotationsdaten (Gyroskop) messen, wie schnell sich der Sensor um diese Achsen dreht. Durch die Kombination beider Messgrößen lässt sich die Neigung eines Objekts im Raum bestimmen, auch wenn es sich bewegt oder leicht schwankt. Diese Eigenschaften ermöglichen eine Berechnung von Neigungswinkeln bei unterschiedlichen Einbausituationen.

3. Genauigkeitsanforderungen im Bauwesen

3.1 Lagegenauigkeit in der Bauvermessung

Die Lagegenauigkeit beschreibt im Bauwesen die Differenz zwischen der geplanten und der tatsächlich realisierten Position eines Vermessungspunkts (Soll-Ist-Abweichung). Besonders bei großflächigen oder tragenden Strukturen ist eine exakte Positionierung entscheidend für Funktionalität, Sicherheit und die Anschlussfähigkeit angrenzender Bauteile. Gemäß DIN 18202 gelten – abhängig vom Bauteiltyp und der Ausführung – unterschiedliche zulässige Abweichungen (Deutsches Institut für Normung, 2019, S. 6). Im Kontext dieser Arbeit wird eine maximale Lageabweichung von 5 mm als Grenze definiert, ab der potenzielle Folgeschäden oder Bauverzögerungen entstehen können. Gerade bei der Absteckung mit Prismenstäben und Totalstationen können bereits geringe Fehler, beispielsweise durch eine nicht exakt senkrechte Haltung des Stabs, zu Lagefehlern führen. Die Entwicklung einer digitalen Libelle zielt darauf ab, diese Fehlerquelle durch den Einsatz eines Neigungssensors zu reduzieren und so die Einhaltung der geforderten Lagegenauigkeit zu gewährleisten.

Toleranzen für Achsmaße gemäß DIN 18202 (Deutsches Institut für Normung, 2019, S. 6):

Nennmaß (z. B. Abstand zweier Wände) Zulässige Toleranz

bis 100 mm $\pm 5 \text{ mm}$

 $101-500 \text{ mm} \qquad \qquad \pm 8 \text{ mm}$

 $501-1000~mm \qquad \qquad \pm 10~mm$

über 1000 mm ± 15 mm

Im praktischen Ablauf werden Vermessungspunkte auf der Baustelle mithilfe von einer Totalstation und einen Prismenstäben bestimmt. Dabei ist eine lotrechte Haltung des Stabs entscheidend, um korrekte Messwerte zu erhalten. Eine Abweichung – selbst um wenige Grad – führt zu deutlichen Lagefehlern, insbesondere bei großen Distanzen. Der genaue Messablauf wird im Kapitel 6 detailliert beschrieben.

3.2 Normen und Standards für Bauvermessung

Um sicherzustellen, dass Bauprojekte präzise und den Planvorgaben entsprechend ausgeführt werden, sind in der Bauvermessung verschiedene Normen und Standards definiert. Diese Normen legen Toleranzen und Anforderungen für Maßabweichungen fest und bieten Richtlinien für die Genauigkeit von Bauvermessungsarbeiten (Deutsches Institut für Normung, 2019). Die wichtigsten Normen und Standards im Bauwesen sind:

DIN 18202: Toleranzen im Hochbau – Bauwerke

Diese Norm legt die Toleranzen für Maßabweichungen im Hochbau fest und definiert die zulässigen Abweichungen von der Ebenheit, Geradheit und Winkeligkeit von Bauteilen (Deutsches Institut für Normung, 2003).

DIN 18710: Vermessung – Bauvermessung

Diese Normenreihe behandelt verschiedene Aspekte der Bauvermessung, einschließlich der Bauwerksüberwachung, Absteckung und geometrischen Kontrolle von Bauwerken (Deutsches Institut für Normung, 2003).

ÖNORM B 2110: Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen

Diese Norm enthält Bestimmungen über die Toleranzen und Maßabweichungen, die bei Bauarbeiten in Österreich einzuhalten sind (Österreichisches Normungsinstitut, 2017).

ÖNORM B 2205: Bauvermessung

Diese Norm legt die Anforderungen und Verfahren für Bauvermessungsarbeiten in Österreich fest und gibt konkrete Vorgaben für die Durchführung solcher Arbeiten (Österreichisches Normungsinstitut, 2017).

ISO 4463-1: Measurement methods for Building – Setting-out and measurement

Diese internationale Norm legt die Verfahren zur Absteckung und Messung in der Bauvermessung fest und bietet einen international gültigen Standard für Messverfahren (International Organization for Standardization, 1989).

EN 13670: Ausführung von Betonbauwerken

Diese europäische Norm bezieht sich auf die Ausführung von Betonbauwerken und enthält Toleranzen und Anforderungen für die Vermessung und Kontrolle von Betonbauteilen (European Committee for Standardization, 2009).

VOB/C – Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen

Die VOB/C enthält spezifische technische Anforderungen, die für Vermessungsarbeiten relevant sind, und allgemeine Richtlinien für Bauleistungen im Hoch- und Tiefbau (Deutsches Institut für Normung, 2019).

Bedeutung von DIN-Normen und ÖNORMEN in der Bauvermessung

In der Bauvermessung sind sowohl **DIN-Normen** (Deutsches Institut für Normung) als auch **ÖNORMEN** (Österreichisches Normungsinstitut) von zentraler Bedeutung, da sie wichtige Richtlinien und Standards für die Genauigkeit und Ausführung von Bauprojekten festlegen. Obwohl beide Normsysteme ähnliche Ziele verfolgen, gibt es wesentliche Unterschiede in Bezug auf ihre Verbindlichkeit und Anwendung.

DIN-Normen

DIN-Normen werden vom **Deutschen Institut für Normung e.V.** herausgegeben und stellen freiwillige Standards dar, die jedoch häufig von Auftraggebern und Bauunternehmen in Bauverträgen als verbindlich vereinbart werden (Deutsches Institut für Normung, 2020). In Österreich sind DIN-Normen nicht gesetzlich vorgeschrieben, finden jedoch Anwendung, wenn keine entsprechende ÖNORM existiert oder wenn internationale Bauunternehmen tätig sind, die nach deutschen Standards arbeiten (Österreichisches Normungsinstitut, 2020). Die Verwendung von DIN-Normen kann sinnvoll sein, da sie eine hohe technische Qualität bieten und häufig eine Ergänzung zu bestehenden ÖNORMEN darstellen (Österreichisches Normungsinstitut, 2017).

ÖNORMEN

ÖNORMEN sind offizielle Normen, die vom **Österreichischen Normungsinstitut** entwickelt und herausgegeben werden. Im Gegensatz zu DIN-Normen haben sie in Österreich eine stärkere rechtliche Relevanz:

Verbindlichkeit: ÖNORMEN gelten als Stand der Technik und werden in Bauverträgen oft automatisch einbezogen. In der Praxis sind sie für die Durchführung von Bauarbeiten in Österreich de facto verpflichtend (Österreichisches Normungsinstitut, 2017). Anwendung: Sie enthalten spezifische Anforderungen, die an österreichische Baugesetze und Vorschriften angepasst sind, und sind daher für österreichische Bauprojekte besonders relevant (Österreichisches Normungsinstitut, 2020).

Zusammenfassung der Unterschiede zwischen DIN-Normen und ÖNORMEN

DIN-Normen und ÖNORMEN sind zwei bedeutende Normensysteme, die in der Bauvermessung eine zentrale Rolle spielen. Während DIN-Normen vom Deutschen Institut für Normung e.V. (DIN) herausgegeben werden und als freiwillige Standards gelten, die durch vertragliche Vereinbarungen verbindlich werden können, haben ÖNORMEN, die vom Österreichischen Normungsinstitut (ASI) veröffentlicht werden, eine deutlich höhere rechtliche Verbindlichkeit (European Committee for Standardization, 2009).

Ein wesentlicher Unterschied liegt in der Verpflichtung zur Einhaltung: In Österreich gelten ÖNORMEN in vielen Bereichen als Stand der Technik und werden oft automatisch in Bauverträgen integriert. Das bedeutet, dass Bauunternehmen diese Normen in der Regel verpflichtend einhalten müssen. Im Gegensatz dazu sind DIN-Normen in Deutschland grundsätzlich freiwillige Empfehlungen, es sei denn, sie werden explizit in Verträgen oder rechtlichen Vorschriften festgelegt.

Auch der Anwendungsbereich unterscheidet sich: DIN-Normen sind international anerkannt und werden häufig in grenzüberschreitenden Projekten verwendet, insbesondere wenn deutsche Unternehmen an der Planung und Umsetzung beteiligt sind. ÖNORMEN sind hingegen speziell an österreichische Baugesetze und Vorschriften angepasst und haben daher in Österreich eine höhere praktische Relevanz.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass DIN-Normen primär als technische Empfehlungen mit internationalem Bezug betrachtet werden, während ÖNORMEN eine rechtlich bindende Grundlage für Bauprojekte in Österreich darstellen. In internationalen Bauprojekten kann es daher sinnvoll sein, beide Normensysteme zu berücksichtigen, um die Einhaltung der technischen und rechtlichen Anforderungen in den jeweiligen Ländern sicherzustellen (Österreichisches Normungsinstitut, 2020).

3.3 Anforderungen an Messgenauigkeit bei Bauprojekten

Die Anforderungen an die Messgenauigkeit variieren stark je nach Art des Bauprojekts und der Größe des Bauwerks (Österreichisches Normungsinstitut, 2017). Wohnungsbau:

Im Wohnungsbau sind die Toleranzen oft etwas großzügiger, da kleinere Abweichungen in der Regel keine großen Auswirkungen haben (Deutsches Institut für Normung, 2019). Infrastrukturbau:

Beim Bau von Brücken, Tunneln oder Hochhäusern ist die Messgenauigkeit besonders entscheidend, um sicherzustellen, dass die geplanten Höhen und Neigungen exakt eingehalten werden. Fehler bei den Erdarbeiten können dazu führen, dass Fundamente falsch positioniert werden, was wiederum die gesamte Statik des Bauwerks gefährden kann. Präzise Höhenmessungen und die Kontrolle von Böschungswinkeln sind unerlässlich, um die Stabilität des Geländes und die Sicherheit des Bauwerks zu gewährleisten (Deutsches Institut für Normung, 2003).

Erdarbeiten:

Erdarbeiten umfassen die Vorbereitung des Baugrunds, einschließlich des Aushubs für Fundamente, Gräben und sonstige Geländemodellierungen.

Bauteilbezogene Genauigkeit

Unterschiedliche Bauteile erfordern unterschiedliche Messgenauigkeiten:

Fundamente: Hier ist eine hohe Genauigkeit erforderlich, da die Position und Ebenheit des Fundaments die Stabilität des gesamten Bauwerks beeinflusst (Deutsches Institut für Normung, 2019).

Wände und Stützen: Für tragende Wände und Stützen sind genaue Messungen entscheidend, um sicherzustellen, dass sie in der richtigen Position und mit der richtigen Neigung errichtet werden (Deutsches Institut für Normung, 2019).

Dächer und Fassaden: Auch hier müssen genaue Messungen vorgenommen werden, um ein ansprechendes Erscheinungsbild und die Einhaltung von Dichtungs- und Isolationsanforderungen zu gewährleisten (Deutsches Institut für Normung, 2019).

Technologische Unterstützung

Die Nutzung moderner Vermessungstechnologien trägt wesentlich zur Einhaltung der geforderten Messgenauigkeit bei:

Totalstationen: Diese Geräte kombinieren die Messung von Winkeln und Distanzen mit hoher Genauigkeit und ermöglichen präzise Absteckungen auf Baustellen (Schofield & Breach, 2007).

Rotationslaser: Werden häufig zur Erstellung von Referenzhöhen verwendet und bieten eine einfache Methode zur Sicherstellung der Ebenheit von Bauflächen (Nedo GmbH & Co. KG, 2023).

GPS-gestützte Systeme: Diese Systeme werden vor allem bei großen Bauprojekten und in der Geländevermessung eingesetzt, um Positionen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen (El-Rabbany, 2006).

Einflussfaktoren und Umweltbedingungen

Die Genauigkeit von Messungen kann durch verschiedene Umweltfaktoren beeinflusst werden, die bei der Planung und Durchführung von Vermessungsarbeiten berücksichtigt werden müssen:

Wetterbedingungen: Wind, Regen und Temperaturänderungen können die Genauigkeit der Messungen beeinträchtigen (Ghilani, 2021).

Bodenbeschaffenheit: Instabile oder unebene Böden können zu Messfehlern führen, wenn das Vermessungsgerät nicht korrekt aufgestellt wird (Schofield & Breach, 2007). **Geräteeinstellungen** und Kalibrierung: Regelmäßige Kalibrierung und richtige Einstellungen der Vermessungsgeräte sind entscheidend, um genaue Messungen sicherzustellen (Welch & Bishop, 1995).

4. Technische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die technischen Grundlagen beschrieben, die für die Umsetzung des Messsystems erforderlich sind. Ziel ist es, die Entwicklung und der Aufbau einer mobilen digitalen Libelle auf Basis eines Raspberry Pi und eines Neigungssensors (MPU6050) darzustellen.

Dazu werden zunächst die verwendete Hardware und deren Funktionen erläutert. Anschließend folgen die Konzepte zur Kalibrierung und Korrektur der Sensordaten, die Anwendung des Kalman-Filters zur Filterung der Messwerte sowie die Methoden zur Datenkompensation. Weiterhin wird die Speicherung der Messdaten in CSV-Dateien erklärt. Abschließend werden die grafische Benutzeroberfläche (GUI) und der Einsatz von RealVNC Viewer zur mobilen Anzeige der Messergebnisse vorgestellt.

Im Rahmen der praktischen Umsetzung wird ein zuvor definiertes Testfeld genutzt. Ziel ist es, den Prismenstab mit Hilfe des MPU6050 möglichst genau in eine lotrechte (senkrechte) Position zu bringen. Nach der Ausrichtung werden Messpunkte aufgenommen. In der anschließenden Auswertung wird ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt, um die Genauigkeit der lotrechten Ausrichtung zu beurteilen und die Leistungsfähigkeit des entwickelten Messsystems unter realen Bedingungen zu überprüfen.

Ziel dieses Kapitels ist es, die einzelnen technischen Komponenten sowie deren Zusammenspiel zu beschreiben und ihren Beitrag zur präzisen Neigungsmessung und zur Qualitätssicherung in der Bauvermessung nachvollziehbar darzustellen.

4.1 Raspberry Pi

Der Raspberry Pi ist ein vielseitiger Einplatinencomputer, der sich durch seine kompakte Bauweise, geringe Kosten und hohe Anpassungsfähigkeit auszeichnet. Er wird häufig für Elektronik- und Steuerungsprojekte eingesetzt. In diesem Projekt dient der Raspberry Pi als zentrale Einheit zur Steuerung des Messvorgangs und zur Verarbeitung der Sensordaten. Er ermöglicht die Echtzeiterfassung und -auswertung der Neigungsdaten, die anschließend durch einen Kalman-Filter gefiltert und grafisch visualisiert werden (Raspberry Pi Foundation, 2023).

Technische Spezifikationen des Raspberry Pi

Der im Projekt eingesetzte Raspberry Pi verfügt über folgende Hauptmerkmale:

- Prozessor: ARM-basierter Quad-Core-Prozessor mit 1,2 GHz Taktfrequenz, der ausreichend Rechenleistung für die Datenverarbeitung und Bedienung der grafischen Oberfläche bietet (Raspberry Pi Foundation, 2023).
- Arbeitsspeicher (RAM): 1 GB RAM, geeignet für die Speicherung von Echtzeitdaten und die gleichzeitige Ausführung der Visualisierungsanwendung (Raspberry Pi Foundation, 2023).

- GPIO-Pins: 40 General Purpose Input/Output (GPIO)-Pins zur Anbindung von Sensoren und externen Komponenten, insbesondere zur Kommunikation mit dem MPU6050-Sensor (Adafruit, 2024).
- Speicher und Schnittstellen: MicroSD-Karte für Betriebssystem und Datenspeicherung sowie USB- und HDMI-Anschlüsse für Peripheriegeräte und externe Bildschirme (Raspberry Pi Foundation, 2023).

Verwendete Schnittstellen

Für die Umsetzung des Messsystems spielen insbesondere die I²C-Schnittstelle und die GPIO-Pins eine zentrale Rolle:

I²**C-Schnittstelle:** Ermöglicht eine serielle Kommunikation mit mehreren Geräten über nur zwei Leitungen, was eine platzsparende Verdrahtung erlaubt (Adafruit, 2024).

GPIO-Pins: Dienen als universelle Schnittstellen zur Steuerung und zum Empfang von Signalen, sowohl als Eingänge als auch als Ausgänge (Adafruit, 2024).

- **USB- und HDMI-Schnittstellen:** Dienen primär der Entwicklung und Visualisierung, etwa durch Anschluss von Eingabegeräten oder Bildschirmen während der Testphase (Raspberry Pi Foundation, 2023).

Einsatz und Funktionalität

Der Raspberry Pi übernimmt im Projekt folgende Hauptaufgaben:

- **1. Sensorsteuerung und Kalibrierung:** Kommunikation mit dem MPU6050-Sensor, Erfassung der Rohdaten und Durchführung von Kalibrierungsroutinen (Adafruit, 2024).
- **2. Datenverarbeitung:** Anwendung der Korrekturwerte und des Kalman-Filters zur Optimierung der Sensordaten (Welch & Bishop, 1995).
- **3. Visualisierung:** Darstellung der Messdaten über eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) in Form einer digitalen Libelle (RealVNC, 2024).

4.2 Kalibrierung und Korrekturwerte der Sensoren

In diesem Projekt spielt die Kalibrierung des MPU6050-Sensors eine wesentliche Rolle, um präzise Neigungsdaten zu erhalten. Ziel der Kalibrierung ist es, systematische Abweichungen zu minimieren und Korrekturwerte für die X- und Y-Achsen zu bestimmen. Diese Korrektur trägt dazu bei, die Stabilität der Messwerte zu erhöhen und mechanische sowie elektrische Einflüsse auszugleichen (Adafruit, 2024).

Ziel der Kalibrierung

Die Kalibrierung soll anfängliche Offsets kompensieren, die durch mechanische Montagetoleranzen oder elektrische Störungen entstehen können. Dazu werden serielle Messungen durchgeführt und Durchschnittswerte gebildet, um den Sensor so einzustellen, dass er bei einer lotrechten Ausrichtung möglichst exakte Ausgangswerte liefert (Adafruit, 2024).

Kalibrierungsverfahren

Das Kalibrierungsverfahren gliedert sich in folgende Schritte:

1. Messung und Mittelwertbildung:

Der Sensor erfasst über einen definierten Zeitraum eine Serie von Rohdaten für die Xund Y-Achse. Anschließend werden Mittelwerte gebildet (Adafruit, 2024).

2. Berechnung der Korrekturwerte:

Die Mittelwerte werden als Korrekturwerte gespeichert. Diese dienen später dazu, die laufenden Sensordaten zu korrigieren (Adafruit, 2024).

3. Bestätigung:

Nach Abschluss der Kalibrierung zeigt ein Popup-Fenster die berechneten Korrekturwerte sowie die Anzahl der verwendeten Samples an.



Abbildung 4: Kalibrierungsprozess des Sensors

Anwendung der Korrekturwerte

Bei jeder neuen Messung werden die erfassten Rohdaten zunächst um die gespeicherten Korrekturwerte reduziert. Erst danach erfolgt die weitere Verarbeitung der korrigierten Werte im Kalman-Filter. Dieses Vorgehen optimiert die Genauigkeit und reduziert systematisches Rauschen, was insbesondere für präzise Messaufgaben auf Baustellen von Bedeutung ist (Welch & Bishop, 1995).

4.3 Filterung der Messdaten: Kalman-Filter

Um die Genauigkeit der Messwerte weiter zu verbessern und das Rauschen der Sensordaten zu minimieren, wird in diesem Projekt ein Kalman-Filter eingesetzt. Der Kalman-Filter ist ein rekursiver Algorithmus, der kontinuierlich neue Messungen mit vorherigen Schätzungen kombiniert, um stabilisierte Werte zu erzeugen. Diese Methode ist besonders vorteilhaft für dynamische Messungen, wie sie bei Neigungserfassungen erforderlich sind (Welch & Bishop, 1995).

Funktionsweise des Kalman-Filters

Der Kalman-Filter arbeitet in zwei Hauptschritten:

1. Prädiktionsschritt:

Basierend auf dem vorherigen Zustand wird eine Schätzung des aktuellen Systemzustands berechnet. Gleichzeitig wird der Schätzfehler prognostiziert.

2. Update-Schritt:

Der geschätzte Wert wird mit der aktuellen Messung verglichen. Durch Anwendung des Kalman-Gain (eines dynamischen Gewichtungsfaktors) werden der neue Schätzwert und die neue Unsicherheit bestimmt (Welch & Bishop, 1995).

Dadurch entsteht eine kontinuierliche Anpassung, die Rauschen effektiv unterdrückt und gleichzeitig schnelle Reaktionen auf tatsächliche Lageänderungen ermöglicht. Implementierung und Parameterwahl

Im Projekt wurden folgende Parameter für den Kalman-Filter festgelegt:

- **Prozessvarianz:** 1×10^{-4} Steuert, wie stark sich der Filter auf frühere Schätzungen stützt. Eine niedrige Prozessvarianz sorgt für eine sanfte Anpassung (Welch & Bishop, 1995).
- **Messvarianz:** 1×10^{-2} Bestimmt die Gewichtung der aktuellen Messung gegenüber der Schätzung. Eine moderate Messvarianz ermöglicht eine ausgewogene Berücksichtigung beider Anteile (Welch & Bishop, 1995).
- **Geschätzte Messvarianz:** 1×10^{-1} Anfangswert für den Schätzfehler, der eine stabile Filterinitialisierung ermöglicht (Welch & Bishop, 1995).

Diese Einstellungen gewährleisten eine robuste und ausgewogene Filterung der Sensordaten.

Vorteile des Kalman-Filters in der Bauvermessung

Der Einsatz eines Kalman-Filters ermöglicht es, präzise und stabilisierte Neigungsdaten auch unter schwierigen Bedingungen wie Vibrationen oder leichten Bewegungen zu erfassen. Dies ist besonders wertvoll auf Baustellen, wo Umwelteinflüsse die Messergebnisse verfälschen können. Durch die kontinuierliche Optimierung der Werte trägt der Filter wesentlich zur Gesamtgenauigkeit und Zuverlässigkeit des Systems bei (Welch & Bishop, 1995).

4.4 Sensor-Datenkompensation

In diesem Projekt wird eine Routine angewendet, die Kalibrierung, Korrektur und Filterung der Sensordaten kombiniert, um Messabweichungen durch Umwelteinflüsse zu minimieren und präzise Neigungsdaten bereitzustellen. Die Datenkompensation basiert auf den ermittelten Korrekturwerten (siehe Kapitel 4.2) und der nachgeschalteten Filterung mittels Kalman-Algorithmus (siehe Kapitel 4.3) (Welch & Bishop, 1995). Ziel der Datenkompensation

Ziel der Sensordatenkompensation ist es, Messfehler, die durch leichte Erschütterungen, mechanische Offsets oder Fertigungstoleranzen entstehen, gezielt zu reduzieren. Durch diese Korrekturen wird eine konsistente und zuverlässige Ausgabe der Neigungswerte ermöglicht (Welch & Bishop, 1995).

Ablauf der Datenkompensation

Die Kompensation erfolgt in mehreren Schritten:

1. Anwendung der Korrekturwerte:

Die vom Sensor gelieferten Rohdaten werden zunächst um die ermittelten Korrekturwerte für die X- und Y-Achsen reduziert. Dadurch werden mechanische und elektronische Offsets kompensiert. (Adafruit, 2024).

2. Filterung der korrigierten Werte:

Die korrigierten Daten werden anschließend in den Kalman-Filter eingespeist. Dieser unterdrückt verbleibendes Rauschen und gleicht kleine Schwankungen aus (Welch & Bishop, 1995).

3. Ausgabe der stabilisierten Messwerte:

Die gefilterten und korrigierten Neigungswerte werden abschließend in der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) visualisiert und für die spätere Speicherung bereitgestellt.

4.5 Messdatenspeicherung und Export in CSV

Zur systematischen Dokumentation und späteren Analyse der erfassten Messdaten bietet das System die Möglichkeit, diese im CSV-Format zu speichern. CSV-Dateien eignen sich durch ihre einfache Struktur besonders für die Weiterverarbeitung in Tabellenkalkulationen oder Analyseprogrammen (Python Software Foundation, 2023).

Aufbau und Struktur der CSV-Datei

Die CSV-Datei ist tabellarisch aufgebaut und enthält folgende Spalten:

• Datum und Uhrzeit:

Erfassung des Zeitpunkts jeder einzelnen Messung für die zeitliche Analyse der Daten.

• Messpunkt:

Eindeutige Nummerierung der Messungen zur Identifikation einzelner Datensätze.

• Rohdaten der X- und Y-Achse:

Direkte Sensordaten, wie sie vom MPU6050-Sensor ausgelesen werden.

• Korrigierte Werte:

Sensordaten nach Anwendung der Korrekturwerte.

• Gefilterte Werte:

Durch den Kalman-Filter bereinigte, stabilisierte Neigungswerte.

• Temperatur:

Während der Messung erfasste Temperaturwerte des Sensors, um eventuelle temperaturempfindliche Abweichungen nachvollziehen zu können (Adafruit, 2024).

Prozess der Datenspeicherung

Die Speicherung der Messdaten erfolgt in drei Schritten:

1. Erfassung der Rohdaten:

Der Raspberry Pi liest die aktuellen Rohdaten des MPU6050-Sensors aus.

2. Anwendung von Korrektur und Filterung:

Die Daten werden um die Korrekturwerte bereinigt und anschließend durch den Kalman-Filter verarbeitet (Welch & Bishop, 1995).

3. Formatierung und Export:

Die verarbeiteten Daten werden in einer neuen Zeile der CSV-Datei gespeichert. Jeder neue Datensatz wird chronologisch angehängt, um eine vollständige Dokumentation zu gewährleisten.

Nutzen der CSV-Datenspeicherung

Das CSV-Format ermöglicht eine flexible Weiterverarbeitung der Daten in nahezu allen gängigen Programmen. Die textbasierte Speicherung erleichtert die Überprüfung, Bearbeitung und Analyse der Messergebnisse und bildet eine Grundlage für die anschließende Auswertung.

4.6 Softwareschnittstellen

Zur Visualisierung der Messdaten und zur Fernsteuerung des Raspberry Pi wird in diesem Projekt der RealVNC Viewer eingesetzt. Die Software ermöglicht den Remote-Zugriff auf die grafische Benutzeroberfläche (GUI) des Raspberry Pi und trägt damit wesentlich zur Bedienbarkeit des Systems im Baustellenumfeld bei (RealVNC, 2024).

Remote-Zugriff

RealVNC Viewer überträgt den Bildschirm des Raspberry Pi auf ein externes Gerät, beispielsweise ein Tablet oder einen PC. Dadurch können Benutzer aus der Ferne auf die grafische Benutzeroberfläche zugreifen und Messvorgänge überwachen sowie steuern (RealVNC, 2024).

Anwendungsfall im Projekt:

Die Benutzeroberfläche der digitalen Libelle wird über RealVNC Viewer auf einem Tablet dargestellt, wodurch der mobile Einsatz auf Baustellen ohne direkt angeschlossene Peripheriegeräte wie Monitore oder Tastaturen möglich wird.

Visualisierung und Interaktivität

Neben der reinen Anzeige der Messdaten ermöglicht RealVNC Viewer auch eine vollständige Interaktion mit der Software auf dem Raspberry Pi:

- Anpassung von Messparametern:
 Beispielsweise Aktualisierungsrate, Kalibrierungseinstellungen oder Filterparameter.
- Fehlersuche:
 Direkter Zugriff auf die Systemumgebung erleichtert die Analyse bei Problemen.
- Bedienung: Starten oder Stoppen von Messvorgängen und Export der Messdaten.

Sicherheit und Netzwerkanforderungen

Für die sichere Nutzung unterstützt RealVNC verschlüsselte Verbindungen und verschiedene Authentifizierungsmethoden. Im Projekt wurde eine passwortgeschützte Verbindung eingerichtet, um den Zugriff auf die digitale Libelle abzusichern (RealVNC, 2024).

4.7 Libellenanzeige und grafische Benutzeroberfläche (GUI)

Zur benutzerfreundlichen Darstellung der erfassten Neigungsdaten wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) entwickelt. Die GUI ermöglicht eine Echtzeit-Visualisierung der Messwerte und bietet dem Anwender eine intuitive Bedienung. Die Anzeige erfolgt als digitale Libelle mit einem zentralen Kreuz zur Orientierung. Zusätzlich werden numerische Neigungswerte angezeigt, um mögliche Drifts zu erkennen (Python Software Foundation, 2023).

Die grafische Benutzeroberfläche umfasst folgende Funktionen:

• Libellenanzeige mit Kreuz:

Eine virtuelle Blase bewegt sich innerhalb eines Kreises und zeigt die Neigung des Systems an. Ein zentrales Kreuz erleichtert die genaue Lotausrichtung.

• Numerische Anzeige der Neigungswerte:

Die gemessenen Werte für die X- und Y-Achsen werden in Echtzeit angezeigt, um Drifts oder Veränderungen der Neigung frühzeitig zu erkennen.

• Temperaturanzeige:

Die aktuelle Sensortemperatur wird mitgeführt, um potenzielle temperaturempfindliche Abweichungen nachvollziehen zu können.

• Messwertanzeige und Kalibrierung:

Neben den aktuellen Neigungsdaten werden die verwendeten Korrekturwerte dargestellt. Über die GUI kann eine Kalibrierungsroutine gestartet werden, die automatisch neue Korrekturwerte bestimmt.

• Interaktive Steuerung:

Einstellungen wie die Aktualisierungsrate, die Größe der Libellenanzeige oder die Neigungskompensation können über die Benutzeroberfläche angepasst werden. Auch der Export der Messdaten als CSV-Datei erfolgt über die GUI.

Technische Umsetzung der GUI

Die grafische Benutzeroberfläche wurde mit Python unter Verwendung der Bibliothek Tkinter realisiert:

• Canvas-Element für die Libellenanzeige:

Die digitale Blase wird auf einem Canvas dargestellt und bewegt sich entsprechend der Sensordaten innerhalb eines definierten Bereichs.

• Label-Elemente:

Für die Darstellung der numerischen Neigungs- und Temperaturwerte werden Label-Widgets verwendet.

• Buttons und Eingabefelder:

Interaktive Elemente ermöglichen das Starten von Kalibrierungen, das Speichern von Daten und die Anpassung der Messparameter.

Nutzen der GUI

Durch die Kombination aus visueller Darstellung und numerischer Ausgabe wird eine intuitive und präzise Überwachung der Neigungswerte ermöglicht. Die GUI erleichtert die schnelle und sichere Bedienung des Systems, auch unter den erschwerten Bedingungen auf Baustellen.

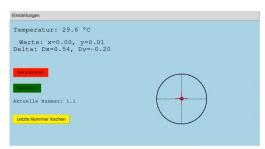


Abbildung 5: Benutzeroberfläche(GUI)

5. Entwicklung der digitalen Libelle

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung und Implementierung einer digitalen Libelle. Der Fokus liegt auf der Auswahl geeigneter Komponenten, dem mechanischen Aufbau sowie der Entwicklung der Steuerungssoftware.

5.1 Auswahl und Beschreibung der verwendeten Komponenten

Die digitale Libelle basiert auf einem modularen Aufbau. Die folgenden Hauptkomponenten wurden aufgrund ihrer Funktionalität, Genauigkeit und Praxistauglichkeit ausgewählt.

Verwendete Hauptkomponenten:

• Raspberry Pi 4: Zentraler Einplatinencomputer mit ausreichender Rechenleistung und vielen Schnittstellen. Der Raspberry Pi wurde aufgrund seiner einfachen Programmierbarkeit und Unterstützung von Echtzeit-Datenverarbeitung gewählt (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Raspberry Pi 4

MPU 6050 Neigungssensor: Kombinierter 3-Achsen-Gyroskop und 3-Achsen-Beschleunigungssensor mit I2C- und SPI-Unterstützung. Der Sensor wurde gewählt, um zu überprüfen, ob ein günstiger Sensor die Genauigkeitsanforderung unter 5 mm erfüllt (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: MPU 6050 Neigungssensor

Reflektorstab Hilti POA52 (siehe Abbildung 8): Leicht und stabil, ideal für die exakte Positionierung der Messgeräte auf Baustellen.



Abbildung 8: Hilti POA 52 Reflektorstab

Hilti POA 20 Prisma (siehe Abbildung 9):

Dieses Prisma wird in Verbindung mit der Totalstation verwendet, um genaue Messpunkte auf der Baustelle zu bestimmen. Das POA 20 Prisma ist aufgrund seiner hohen Präzision und Kompatibilität mit der Hilti PLT 400-4 Totalstation ausgewählt worden.



Abbildung 9: Hilti POA 20 Prisma

Hilti PLT 400-4 Totalstation (siehe Abbildung 10):

Diese Totalstation von Hilti wird für die präzise Positionierung und Vermessung auf der Baustelle verwendet. Sie ermöglicht die genaue Ausrichtung und Absteckung der Messpunkte und arbeitet in Kombination mit dem POA 20 Prisma und dem Reflektorstab, um exakte Daten für die Bauvermessung zu liefern.



Abbildung 10: Hilti PLT 400-4 Totalstation

Stromversorgung durch Powerbank: Die Energieversorgung des Raspberry Pi und des Sensors wird durch eine Powerbank sichergestellt. Diese mobile Stromversorgung gewährleistet eine flexible und autarke Nutzung des Systems, insbesondere auf Baustellen ohne direkte Stromversorgung.

Zweibein für Stabilität: Um die Stabilität des Reflektorstabes während der Messungen sicherzustellen, wird ein Zweibein von Hilti (siehe Abbildung 11) verwendet. Dies minimiert Bewegungen und Vibrationen und trägt so zu präziseren Messungen bei.



Abbildung 11: Zweibein POA 75

PLC 400 (siehe Abbildung 12) von Hilti:

Das externe Gerät, das den Raspberry Pi steuert, ist ein PLC 400 von Hilti. Dieses robuste Steuergerät ermöglicht die präzise Bedienung und Überwachung der digitalen Libelle direkt auf der Baustelle.



Abbildung 12: Hilti PLC 400

PLC 600 von Hilti (siehe Abbildung 13):

Ein Tablet, das für die Absteckung auf der Baustelle verwendet wird und eine direkte Interaktion mit der Totalstation ermöglicht.



Abbildung 13: Hilti PLC 600

Weitere Komponenten: Dazu gehören notwendige Zubehörteile wie Verbindungskabel und ein stabiles Gehäuse für den Raspberry Pi (siehe Abbildung 14), das Schutz vor Umwelteinflüssen auf der Baustelle bietet.



Abbildung 14: Gehäuse für Raspberry Pi 4

RealVNC Viewer: Eine Softwarelösung, die es ermöglicht, die Benutzeroberfläche des Raspberry Pi auf einem externen Gerät, wie einem Tablet, anzuzeigen und zu steuern. Diese Komponente wurde ausgewählt, um die mobile Überwachung und Steuerung der digitalen Libelle zu ermöglichen.

5.2 Zusammenbau und Kalibrierung des Neigungssensors

Dieser Abschnitt beschreibt den Zusammenbau der Hardwarekomponenten und die Kalibrierung des Neigungssensors.

Hardwareintegration: Der MPU 6050 wird über die I²C-Schnittstelle mit dem Raspberry Pi verbunden. Die genaue Belegung der Verbindungen zwischen Sensor und GPIO-Pins des Raspberry Pi ist in **Abbildung 1**5 dargestellt



Abbildung 15: Anschluss des MPU 6050 an die GPIO-Pins des Raspberry Pi

Montage: Die elektronische Einheit – bestehend aus MPU 6050, Raspberry Pi, Powerbank und Gehäuse – werden auf dem Reflektorstab angeklebt.

Die Befestigung am Reflektorstab ist in Abbildung 16 dargestellt.



Abbildung 16: Befestigung der Sensor- und Steuereinheit am Reflektorstab

Das POA 20 Prisma wird am Reflektorstab angebracht und dient in Verbindung mit der Totalstation Hilti PLT 400-4 zur Messung der Lage

Stromversorgung: Die Energieversorgung erfolgt über eine mobile Powerbank, die direkt mit dem Raspberry Pi verbunden ist. Dies ermöglicht einen netzunabhängigen und flexiblen Einsatz auf der Baustelle.

Gesamtsystem: Eine Übersicht des komplett aufgebauten Messsystems inklusive Sensorik, Stromversorgung, Montage und Reflektorstab zeigt **Abbildung 17**.



Abbildung 17: Gesamtansicht des Messsystems mit Stromversorgung, Gehäuse und Prisma

Kalibrierung des Neigungssensors:

Vorbereitung: Vor der Kalibrierung wird der Reflektorstab mithilfe der integrierten und werkseitig kalibrierten Blasenlibelle des Hilti POA52 exakt ausgerichtet. Zur Unterstützung die das Zweibein.

Kalibrierungsprozess: Nach der mechanischen Ausrichtung wird die Kalibrierungsroutine über ein Python-Skript auf dem Raspberry Pi gestartet. Der MPU 6050 erfasst dabei mehrere Rohdatenmessungen, aus denen Mittelwerte gebildet werden, um die Offsets zu bestimmen. Diese berechneten Korrekturwerte werden in der grafischen Benutzeroberfläche dargestellt (siehe Abbildung 18) und können anschließend über ein Bestätigungsfenster gespeichert werden (siehe Abbildung 19).

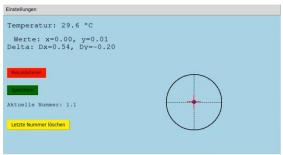


Abbildung 18: GUI-Anzeige der berechneten Korrekturwerte (Offsets)



Abbildung 19: Bestätigungsdialog zur Speicherung der Kalibrierung

Überprüfung: Nach der Kalibrierung werden Testmessungen durchgeführt, um die Genauigkeit der Kalibrierung zu überprüfen und gegebenenfalls weitere Anpassungen vorzunehmen. Die Hilti PLT 400-4 Totalstation und das POA 20 Prisma werden dabei zur Validierung der Ergebnisse eingesetzt.

5.3 Erstellung der Software für den Raspberry Pi

Dieser Abschnitt beschreibt den Entwicklungsprozess der Software, die auf dem Raspberry Pi ausgeführt wird.

Softwarearchitektur:

Die Software besteht aus mehreren Modulen:

Sensorintegration: Über die Python-Bibliothek mpu6050 werden die Sensordaten kontinuierlich über die I²C-Schnittstelle ausgelesen.

Kalibrierungsmodul: Mittels wiederholter Messwertaufnahme berechnet das System Offset-Korrekturen für Beschleunigung und Rotation. Diese können vom Benutzer über die grafische Oberfläche bestätigt und gespeichert werden.

Filterung: Ein Kalman-Filter wird eingesetzt, um Messrauschen zu unterdrücken und stabile, geglättete Werte zu erzeugen.

Datenspeicherung: Die Messwerte werden automatisch im CSV-Format mit Zeitstempeln, Roh- und gefilterten Werten dokumentiert.

Benutzeroberfläche (GUI): Die grafische Oberfläche wurde mit tkinter entwickelt. Sie bietet eine intuitive Bedienung zur Durchführung der Kalibrierung, zur Steuerung der Messungen und zur Visualisierung der Ergebnisse. Die Echtzeitdarstellung erleichtert die unmittelbare Kontrolle des Systems.

Die grafische Benutzeroberfläche wurde so gestaltet, dass sowohl die Kalibrierung als auch die Ausrichtung visuell nachvollziehbar sind. Die Anzeige erfolgt in Echtzeit auf dem angeschlossenen PLC 400, wie in **Abbildung 20** zu sehen ist.



Abbildung 20: Benutzeroberfläche zur Kalibrierung und Messwertanzeige

Funktionen im Überblick

- Live-Visualisierung der Neigungswerte und Temperaturdaten
- Durchführung und Speicherung der Kalibrierung
- Konfiguration von Messintervall und Messdauer
- Start von Messreihen per Knopfdruck
- CSV-basierte Datenspeicherung
- Statusanzeige und einfache Fehlererkennung

Benutzeroberfläche (GUI):

Es wurde eine benutzerfreundliche grafische Oberfläche entwickelt, die eine intuitive Bedienung zur Durchführung der Kalibrierung, Steuerung der Messungen und Echtzeitüberwachung der Messdaten bietet.

Die GUI bietet zudem Optionen zur Anpassung wichtiger Parameter wie Messintervall, Messzyklen und zur Speicherung der Daten.

Fehlertoleranz & Stabilität:

Die erfassten Sensordaten werden kontinuierlich durch einen implementierten Kalman-Filter geglättet. Dadurch lassen sich unerwünschte Schwankungen und kurzzeitiges Rauschen wirkungsvoll reduzieren. Ein Driftverhalten des Sensors wird in der grafischen Benutzeroberfläche durch abweichende Werte unmittelbar sichtbar. In solchen Fällen kann eine Neukalibrierung direkt über die Bedienoberfläche ausgelöst werden, ohne dass ein Neustart des Systems erforderlich ist. Dies gewährleistet eine hohe Betriebssicherheit und Stabilität, auch bei längeren Messreihen.

Diese Systemkombination bildet die Basis für die im nächsten Kapitel beschriebenen Feldtests und die Auswertung der Messergebnisse.

6. Durchführung des Feldtests

Einleitung

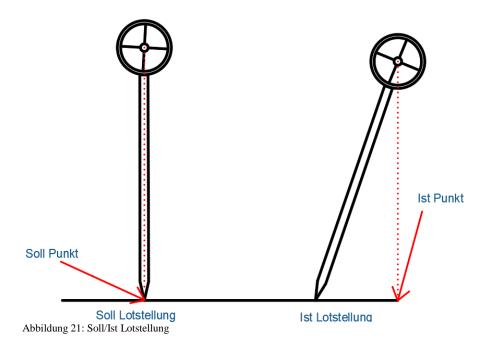
Ziel des Feldtests war es, die Funktionsweise und Genauigkeit der entwickelten digitalen Libelle unter realitätsnahen Bedingungen zu überprüfen. Der Test wurde auf einer ebenen Betonfläche durchgeführt und gliederte sich in drei Abschnitte: den Aufbau und die Vorbereitung, die eigentliche Durchführung sowie die Datenerfassung und -auswertung.

6.1 Versuchsaufbau

Zur Überprüfung der Sensorpräzision wurden 25 definierte Punkte aus vier verschiedenen Richtungen gemessen. Bei jeder Messung wurden die x- und y-Koordinaten erfasst, die in Kapitel 7 analysiert werden.

Die Totalstation (Hilti PLT 400) wurde außerhalb des Testfelds positioniert. Von dieser festen Position aus erfolgte die Einmessung der Punkte auf dem Testfeld mithilfe eines Laserstrahls, wodurch potenzielle Lageabweichungen durch die Verwendung eines Reflektorstabes vermieden wurden. Die Punkte können durch die Messung von Winkel und Distanz bestimmt werden. Die PLT 400 war zuvor in einer Fachwerkstatt kalibriert und überprüft worden. Aufgrund der geringen Distanz von maximal fünf Metern zum Testfeld kann der angegebene Messfehler von 2 mm auf 100 m in der Distanz als vernachlässigbar betrachtet werden.

Im Anschluss wurden dieselben Punkte erneut mit dem entwickelten Sensorsystem überprüft. Dadurch konnte ein direkter Vergleich der Koordinatenwerte erfolgen. In **Abbildung 21** ist zunächst der Sollpunkt dargestellt – dieser entspricht der idealen Position bei exakt senkrechtem Stab. Auch die direkte Laser-Einmessung liefert diesen Referenzwert. Die Ist-Punkte (in der Darstellung bewusst überhöht eingezeichnet) zeigen hingegen die tatsächlich ermittelten Positionen, wie sie durch eine minimale Schiefstellung des Stabs entstehen.



Im ersten Schritt wird das Testfeld angelegt. Hierfür werden in der Hilti Software Messpunkte mit einem eingezeichnet.

Die Gesamtpunktanzahl beträgt 25 mit einem Abstand von je 0.1m in x sowie y Richtung. Dargestellt ist das Testfeld in **Abbildung 22**.

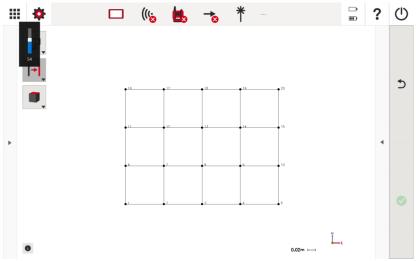


Abbildung 22: Ansicht Testfeld

Jeder Punkt wird aus vier Richtungen gemessen wodurch 100 Messungen erhalten werden. Der regelmäßige Abstand sowie die Anzahl der Messungen sollen die Auswertung vereinfachen und leichter verständlich machen.

Um das Testfeld reflektorlos abzustecken und die digitale Libelle zu überprüfen, ist es nötig die Stationierung über sogenannte Referenzpunkte abzusichern.

In **Abbildung 23** werden diese als RP1-RP5 dargestellt. Es wurde Abbildung 2 aus Kapitel 2.3.1 um die Referenzpunkte erweitert.

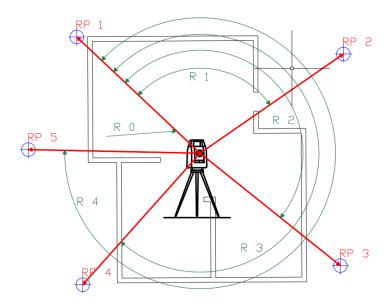


Abbildung 23: Testfeld mit Referenzpunkte

Für die Absteckung (Punkt von Plan in die Natur übertragen) des Testfeldes wird die PLT 400 außerhalb platziert, um alle Punkte aus einer Position zu messen.

Da sich die PLT im lokalen System (Nullpunkt wird selbst festgelegt) befindet, ist es nicht nötig das Testfeld von einem Geometer einmessen zu lassen (Geometer messen die Baustelle vor Baustart ein).

Für die Vorbereitung werden die Referenzpunkte eingemessen. Hierfür wird der Reflektorstab über einen Referenzpunkt platziert. Die Totalstation misst auf das Prisma POA 20 Winkel (R0-R4) und Distanzen (rote Linien). Mit diesen Werten kann die Lage der Station am Testfeld zurückgerechnet werden.

Diese Vorbereitung ist nötig um den Test bei Bedarf unter anderen Bedingungen nochmalig zu wiederholen. Sollte die PLT 400 die automatische Kalibrierung durchführen sind diese Punkte zu Kontrolle bzw. bei Abweichungen zur Neustationierung notwendig.

6.2 Durchführung des Feldtests

Reflektorlose Absteckung:

Wie in der Einleitung beschrieben werden im ersten Schritt des Feldtests die zwanzig Messpunkte reflektorlos eingemessen. Hierzu wird der gewünschte Messpunkt am Tablet ausgewählt. Die PLT 400 dreht sich anschließend automatisch auf die gewünschte Position (Absteckpunkt). Jeder Punkt wurde nur am Testfeld markiert wenn die Abweichung 0mm angezeigt hat.

Am Testfeld werden wie in Abbildung 24 dargestellt die Messpunkte markiert. Die Markierung mit einem Punkt und Kreuz ist nötig um bei der Überprüfung der digitalen Libelle den Punkt wiederzufinden.



Abbildung 24: Markieren eines Messpunktes

Dieser Vorgang wird für alle 20 Messpunkte wiederholt. Am Ende erhält man das digitale Testfeld in der Natur wie in **Abbildung 25** dargestellt.



Abbildung 25: Testfeld mit 25 Messpunkten

Überprüfung der digitalen Libelle:

Zu Beginn muss eine Kalibrierung der digitalen Libelle durchgeführt werden. Dieser Vorgang wird in Kapitel 5.2 beschrieben.

Nach der Kalibrierung wird die Spitze des Reflektorstabes wie in **Abbildung 26** dargestellt exakt über einen Messpunkt aufgestellt. An der Spitze des Stabes befindet sich der Soll Punkt.



Abbildung 26: Reflektorstabspitze über einen Messpunkt

Die Ausrichtung des Sensors erfolgte dabei manuell anhand der grafischen Darstellung in der Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 27). Sobald die digitale Libelle optisch mittig stand, wurde die Messung ausgelöst. Dabei wurden sowohl die Sensordaten gespeichert als auch die tatsächliche Position des Prismas mittels der PLT 400 erfasst.



Abbildung 27: Ausrichtung Stab mit digitaler Libelle

6.3 Datenausgabe und Dokumentation

Im Feldtest wurde auf das Prisma POA 20 welches sich am oberen Ende des Reflektorstabes befindet gemessen. Dabei wurden horizontale und vertikale Winkel sowie Distanzen erfasst, aus denen die jeweiligen x- und y-Koordinaten als Ist-Werte gemessen wurden. Pro Zielpunkt wurden vier Einzelmessungen durchgeführt. Zwischen den Messungen wurde der Reflektorstab mit der digitalen Libelle jeweils um 90 Grad um die vertikale Achse (Z-Achse) gedreht, um Richtungsabhängigkeiten zu erkennen.

Die erfassten Daten wurden in CSV-Format gespeichert.

Jeder der 25 Messpunkte liegt in vier Ausführungen vor, eindeutig gekennzeichnet durch IDs wie 1.1 bis 1.4, 2.1 bis 2.4 usw.

Die spätere Auswertung erfolgt durch den Vergleich der gemessenen x- und y-Koordinaten mit den Sollwerten. Aus den Differenzen (Delta X, Delta Y) wird die euklidische Distanz berechnet, welche die tatsächliche Lageabweichung beschreibt. Die detaillierte Analyse dieser Werte folgt in Kapitel 7.

7. Ergebnisse und Diskussion

Einleitung

In diesem Kapitel werden die Messwerte genauer betrachtet

Für die Auswertung der Messdaten wurde MS Excel verwendet. Durch die Messungen wurden x sowie y Koordinaten erhalten. Für die Lageabweichung ist die Euklidische Distanz relevant.

Diese wird in **Abbildung 28** vereinfacht dargestellt. Der Sollwert des Beispielpunktes liegt im Nullpunkt des Koordinatensystems.

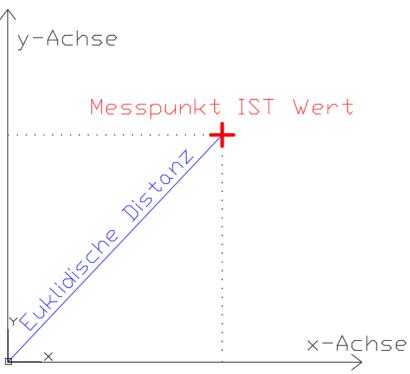


Abbildung 28: Darstellung Lageabweichung

7.1 Vergleich von Soll- und Ist-Werten

In der folgenden Tabelle sind die erhaltenen Rohdaten sowie die berechnete Lageabweichung (Euklidische Distanz) enthalten. Delta X und Delta Y ist jeweils die Abweichung im positiven Bereich.

Aus diesen Werten wir die Euklidische Distanz berechnet.

Die erste Ziffer der Punkt ID (1-25) gibt den Punkt am Testfeld an. Die Ziffer nach der Kommastelle steht für die unterschiedlichen Richtungen eines Messpunktes.

Pkt. ID	X IST	X SOLL	Y IST	Y SOLL	Delta X	Delta Y	Euklidische D.
1.1	0.0017	0.0000	0.002	0.000	0.0017	0.001808	0.0025
1.2	0.0016	0.0000	-0.001	0.000	0.0016	0.000591	0.0017
1.3	0.0077	0.0000	0.002	0.000	0.0077	0.002209	0.0080
1.4	0.0007	0.0000	0.000	0.000	0.0007	0.000392	0.0008
2.1	0.1021	0.1000	-0.002	0.000	0.0021	0.002171	0.0030
2.2	0.0965	0.1000	0.000	0.000	0.0035	0.000482	0.0035
2.3	0.0963	0.1000	0.004	0.000	0.0037	0.003761	0.0053
2.4	0.1019	0.1000	0.005	0.000	0.0019	0.004915	0.0053
3.1	0.2002	0.2000	0.001	0.000	0.0002	0.000961	0.0010
3.2	0.1973	0.2000	-0.005	0.000	0.0027	0.004953	0.0057
3.3	0.1948	0.2000	0.002	0.000	0.0052	0.001723	0.0055
3.4	0.1983	0.2000	0.005	0.000	0.0017	0.005390	0.0056
4.1	0.3005	0.3000	0.000	0.000	0.0005	0.000293	0.0006
4.2	0.2976	0.3000	-0.002	0.000	0.0024	0.002351	0.0033
4.3	0.2977	0.3000	0.003	0.000	0.0023	0.003028	0.0038
4.4	0.2994	0.3000	0.005	0.000	0.0006	0.005047	0.0051
5.1	0.4020	0.4000	-0.002	0.000	0.0020	0.001772	0.0026
5.2	0.4023	0.4000	-0.003	0.000	0.0023	0.002938	0.0038
5.3	0.3962	0.4000	0.004	0.000	0.0038	0.003647	0.0052
5.4	0.3962	0.4000	0.008	0.000	0.0038	0.007981	0.0088
6.1	0.0005	0.0000	0.102	0.100	0.0005	0.001627	0.0017
6.2	0.0021	0.0000	0.097	0.100	0.0021	0.003495	0.0041
6.3	0.0047	0.0000	0.101	0.100	0.0047	0.001162	0.0048
6.4	0.0007	0.0000	0.107	0.100	0.0007	0.006934	0.0070
7.1	0.1005	0.1000	0.102	0.100	0.0005	0.001526	0.0016
7.2	0.0956	0.1000	0.099	0.100	0.0044	0.001054	0.0045
7.3	0.0958	0.1000	0.103	0.100	0.0042	0.003079	0.0052
7.4	0.0997	0.1000	0.108	0.100	0.0003	0.007769	0.0078
8.1	0.2006	0.2000	0.103	0.100	0.0006	0.002631	0.0027
8.2	0.1988	0.2000	0.099	0.100	0.0012	0.001255	0.0018
8.3	0.1930	0.2000	0.103	0.100	0.0070	0.002833	0.0076
8.4	0.2008	0.2000	0.108	0.100	0.0008	0.007896	0.0079
9.1	0.3036	0.3000	0.098	0.100	0.0036	0.002178	0.0042
9.2	0.2999	0.3000	0.096	0.100	0.0001	0.003593	0.0036
9.3	0.2966	0.3000	0.102	0.100	0.0034	0.002491	0.0042
9.4	0.3000	0.3000	0.106	0.100	0.0000	0.005707	0.0057

					•		
10.1	0.4006	0.4000	0.098	0.100	0.0006	0.002286	0.0024
10.2	0.3989	0.4000	0.099	0.100	0.0011	0.001163	0.0016
10.3	0.3958	0.4000	0.103	0.100	0.0042	0.002914	0.0051
10.4	0.4020	0.4000	0.103	0.100	0.0020	0.002857	0.0035
11.1	0.0022	0.0000	0.202	0.200	0.0022	0.002318	0.0032
11.2	0.0035	0.0000	0.196	0.200	0.0035	0.003523	0.0050
11.3	0.0047	0.0000	0.205	0.200	0.0047	0.005333	0.0071
11.4	0.0037	0.0000	0.204	0.200	0.0037	0.004335	0.0057
12.1	0.1010	0.1000	0.200	0.200	0.0010	0.000138	0.0010
12.2	0.0980	0.1000	0.197	0.200	0.0020	0.003286	0.0039
12.3	0.0938	0.1000	0.202	0.200	0.0062	0.001794	0.0065
12.4	0.1016	0.1000	0.205	0.200	0.0016	0.004818	0.0051
13.1	0.2030	0.2000	0.200	0.200	0.0030	0.000331	0.0030
13.2	0.1944	0.2000	0.200	0.200	0.0056	0.000286	0.0057
13.3	0.1926	0.2000	0.207	0.200	0.0074	0.007295	0.0104
13.4	0.2021	0.2000	0.203	0.200	0.0021	0.002872	0.0036
14.1	0.3004	0.3000	0.199	0.200	0.0004	0.000679	0.0008
14.2	0.2950	0.3000	0.197	0.200	0.0050	0.003470	0.0061
14.3	0.2939	0.3000	0.200	0.200	0.0061	0.000213	0.0061
14.4	0.2982	0.3000	0.205	0.200	0.0018	0.005414	0.0057
15.1	0.4040	0.4000	0.200	0.200	0.0040	0.000423	0.0040
15.2	0.3969	0.4000	0.198	0.200	0.0031	0.002297	0.0038
15.3	0.3946	0.4000	0.204	0.200	0.0054	0.004065	0.0068
15.4	0.4022	0.4000	0.206	0.200	0.0022	0.006178	0.0066
16.1	0.0007	0.0000	0.302	0.300	0.0007	0.002326	0.0024
16.2	0.0011	0.0000	0.299	0.300	0.0011	0.001184	0.0016
16.3	0.0055	0.0000	0.303	0.300	0.0055	0.002835	0.0062
16.4	0.0003	0.0000	0.305	0.300	0.0003	0.005191	0.0052
17.1	0.1015	0.1000	0.300	0.300	0.0015	0.000253	0.0016
17.2	0.0970	0.1000	0.297	0.300	0.0030	0.002662	0.0040
17.3	0.0973	0.1000	0.303	0.300	0.0027	0.003038	0.0041
17.4	0.0972	0.1000	0.304	0.300	0.0028	0.004267	0.0051
18.1	0.2006	0.2000	0.300	0.300	0.0006	0.000396	0.0007
18.2	0.2001	0.2000	0.297	0.300	0.0001	0.003237	0.0032
18.3	0.2005	0.2000	0.303	0.300	0.0005	0.003341	0.0034
18.4	0.1979	0.2000	0.304	0.300	0.0021	0.004104	0.0046
19.1	0.3034	0.3000	0.301	0.300	0.0034	0.001032	0.0035
19.2	0.3009	0.3000	0.297	0.300	0.0009	0.002674	0.0028
19.3	0.2945	0.3000	0.304	0.300	0.0055	0.004267	0.0070
19.4	0.3018	0.3000	0.303	0.300	0.0018	0.003110	0.0036
20.1	0.4025	0.4000	0.302	0.300	0.0025	0.001620	0.0029
20.2	0.3994	0.4000	0.297	0.300	0.0006	0.003236	0.0033
20.3	0.3992	0.4000	0.304	0.300	0.0008	0.003751	0.0038
20.4	0.3997	0.4000	0.302	0.300	0.0003	0.002116	0.0021
21.1	0.0021	0.0000	0.402	0.400	0.0021	0.002450	0.0032

			•		-		
21.2	0.0014	0.0000	0.396	0.400	0.0014	0.004466	0.0047
21.3	0.0053	0.0000	0.403	0.400	0.0053	0.003461	0.0063
21.4	0.0010	0.0000	0.406	0.400	0.0010	0.006367	0.0064
22.1	0.1030	0.1000	0.400	0.400	0.0030	0.000352	0.0031
22.2	0.0969	0.1000	0.396	0.400	0.0031	0.003806	0.0049
22.3	0.0938	0.1000	0.404	0.400	0.0062	0.003535	0.0072
22.4	0.1003	0.1000	0.403	0.400	0.0003	0.002852	0.0029
23.1	0.2033	0.2000	0.399	0.400	0.0033	0.000802	0.0034
23.2	0.1992	0.2000	0.398	0.400	0.0008	0.002049	0.0022
23.3	0.1966	0.2000	0.402	0.400	0.0034	0.001629	0.0037
23.4	0.1971	0.2000	0.406	0.400	0.0029	0.005907	0.0066
24.1	0.3057	0.3000	0.402	0.400	0.0057	0.001512	0.0059
24.2	0.2982	0.3000	0.399	0.400	0.0018	0.001188	0.0022
24.3	0.2945	0.3000	0.403	0.400	0.0055	0.003459	0.0065
24.4	0.2999	0.3000	0.407	0.400	0.0001	0.006698	0.0067
25.1	0.4052	0.4000	0.400	0.400	0.0052	0.000165	0.0052
25.2	0.3992	0.4000	0.398	0.400	0.0008	0.002294	0.0024
25.3	0.3979	0.4000	0.402	0.400	0.0021	0.002099	0.0030
25.4	0.4000	0.4000	0.404	0.400	0.0000	0.003529	0.0035

7.2 Analyse der Messergebnisse

Die Auswertung der Messdaten ergab für die Lageabweichung einen Mittelwert von 0,00429 m (4,29 mm) bei einer Standardabweichung von 0,001991 m (1,99 mm) und einem Standardfehler von 0,0002 m (0,20 mm). Der Median lag bei 0,003998 m. Das 95 %-Konfidenzintervall für den Mittelwert beträgt $\pm 0,0003951$ m, sodass der wahre Mittelwert der Lageabweichung mit 95 %-Wahrscheinlichkeit im Bereich von 0,00389 m bis 0,00469 m liegt. Die Mindestabweichung betrug 0,00061 m, der Maximalwert 0,01037 m.

Mittelwert 0.00429 Standardfehler 0.000200 Median 0.003998 Standardabweichung 0.001991 Minimum 0.000613 Maximum 0.0103784 Anzahl 100 Konfidenzniveau(95.0%) 0.0003951 obere Grenze 0.0046848

Verwendete Excel-Formeln

Anzahl der Werte = ANZAHL(B2:B101)
Mittelwert = MITTELWERT(B2:B101)
Standardabweichung = STABW.S(B2:B101)

Standardfehler =STABW.S(B2:B101)/WURZEL(ANZAHL(B2:B101))

Median =MEDIAN(B2:B101) Minimum =MIN(B2:B101) Maximum =MAX(B2:B101)

Konfidenzniveau (95 %) (Populationskenngrößen-Add-In)

Untere Grenze Intervall =MITTELWERT(B2:B101)-[Konfidenzniveau]
Obere Grenze Intervall =MITTELWERT(B2:B101)+[Konfidenzniveau]

95%-Perzentil = OUANTIL.INKL(B2:B101:0,95)

Die grafische Auswertung in **Abbildung 29** zeigt deutlich, dass eine erhebliche Anzahl der Einzelmessungen außerhalb der 5 mm-Toleranzgrenze liegt. Dies macht deutlich, dass die Streuung der Werte größer ist als ursprünglich erwartet und die 5 mm-Toleranz für Einzelmessungen nicht durchgehend eingehalten wird. Während der Mittelwert der Lageabweichungen mit 95 %-Sicherheit unterhalb von 5 mm liegt, überschreiten etwa 40 % der Einzelmesswerte diese Grenze. Daraus ergibt sich, dass das Sensorsystem zwar im Mittel die Genauigkeitsanforderung erfüllt, jedoch in der Praxis ein signifikanter Anteil der Messungen außerhalb der zulässigen Toleranz liegt.

Der Ursprung (Nullpunkt) markiert die Sollposition, die Kreuze die Ist-Koordinaten der jeweiligen Messpunkte. Jeder Messpunkt wird nur einmalig dargestellt, auch bei mehrfacher Übereinstimmung. Der blaue Kreis markiert die 5 mm-Toleranzgrenze als maximal erwartete Abweichung.

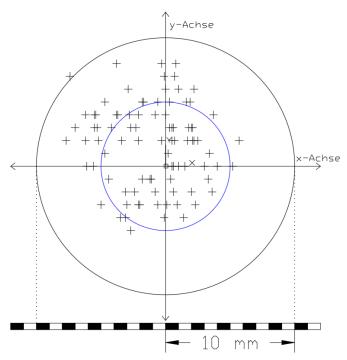


Abbildung 29: Lageabweichungen aller Einzelmessungen

Die Zielscheibengrafik veranschaulicht bereits anschaulich, dass ein erheblicher Teil der Einzelmessungen außerhalb der 5 mm-Toleranzgrenze liegt. Um die Streuung und Verteilung der Lageabweichungen noch detaillierter zu bewerten, wurde ergänzend das 95%-Quantil der Messwerte berechnet und den Einzelergebnissen gegenübergestellt.

In **Abbildung 30** sind sämtliche Einzelmesswerte sowie die Toleranzgrenze und das 95%-Quantil grafisch dargestellt. Hierbei gibt das 95%-Quantil den Wert an, unterhalb dessen 95 % aller Messwerte liegen. Es ist erkennbar, dass das 95%-Quantil oberhalb der geforderten Toleranzgrenze liegt, sodass mehr als 5 % der Messungen die zulässige Abweichung überschreiten. Diese ergänzende Betrachtung bestätigt die zuvor grafisch dargestellten Befunde und zeigt, dass das Sensorsystem im Mittel die Anforderungen erfüllt, jedoch die Einhaltung der Toleranz für Einzelmessungen nicht garantiert werden kann.

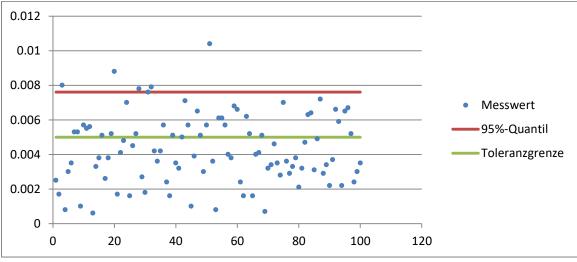
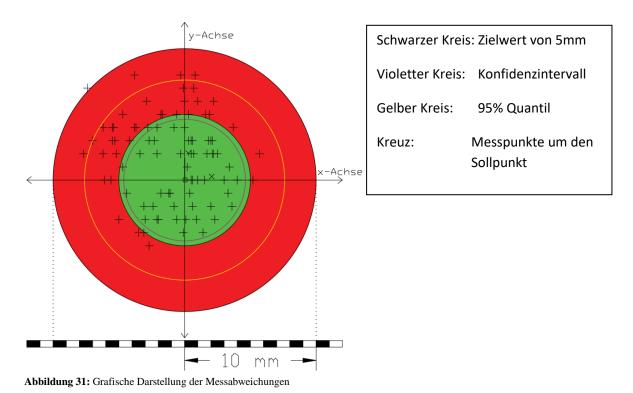


Abbildung 30: Darstellung 95% Quantil

In **Abbildung 31** ist die Streuung der Einzelmessungen nochmals detailliert als Zielscheibendiagramm dargestellt. Der Nullpunkt markiert die Sollposition.



Die farblich hinterlegten Bereiche verdeutlichen verschiedene Genauigkeitsklassen: Der innere grüne Kreis umfasst alle Messungen, die innerhalb der geforderten Toleranzgrenze von 5 mm liegen und kennzeichnet somit den Sollbereich. Der äußere rote Bereich zeigt die Messungen, die außerhalb dieser Toleranz liegen und damit als nicht akzeptabel einzustufen sind.

Zusätzlich sind im Diagramm Kreise dargestellt, die statistisch relevante Grenzen markieren: Der violette Kreis repräsentiert das 95 %-Konfidenzintervall, während der gelbe Kreis die obere Grenze des 95 %-Perzentils angibt. Das bedeutet, dass 95 % aller Messwerte innerhalb des gelben Kreises liegen. In diesem Fall beträgt der Radius des gelben Kreises 0,0076 m (7,6 mm), was deutlich über der geforderten Toleranz von 5 mm liegt. Damit überschreiten mehr als 5 % der Einzelmessungen die zulässige Grenze.

Die grafische Darstellung zeigt, dass ein erheblicher Anteil der Messpunkte die Toleranzgrenze von 5 mm einhält, allerdings überschreiten etwa 40 % der Einzelwerte diese Grenze. Besonders anschaulich ist erkennbar, dass die Messwerte sich nicht in eine bestimmte Richtung häufen, sondern gleichmäßig um die Sollposition verteilt sind. Die Visualisierung unterstützt damit die statistische Auswertung und bestätigt die quantitative Analyse, nach der zwar der Mittelwert die Anforderung erfüllt, aber nicht alle Einzelmessungen innerhalb der geforderten Toleranz bleiben.

7.3 Diskussion und Beantwortung der Forschungsfrage

Im folgenden Kapitel werden die im empirischen Teil gewonnenen Ergebnisse ausführlich diskutiert und abschließend im Hinblick auf die zentrale Forschungsfrage bewertet. Ziel der Untersuchung war es, die Genauigkeit des entwickelten Sensorsystems unter realitätsnahen Bedingungen zu prüfen und festzustellen, ob die geforderte Lagegenauigkeit von maximal 5 mm eingehalten werden kann.

Statistische Bewertung der Messergebnisse:

Die statistische Auswertung der insgesamt 100 Einzelmessungen ergab einen Mittelwert der euklidischen Lageabweichungen von 0,00429 m (4,29 mm). Damit bleibt das Sensorsystem im arithmetischen Mittel klar unterhalb der vorgegebenen Toleranzgrenze von 5 mm. Das berechnete zweiseitige 95 %-Konfidenzintervall für den Mittelwert reicht von 0,00389 m bis 0,00469 m. Somit kann mit einer statistischen Sicherheit von 95 % angenommen werden, dass der wahre Mittelwert der Lageabweichungen tatsächlich die geforderte Genauigkeit erfüllt. Für eine umfassendere Bewertung der Messqualität reicht die Betrachtung des Mittelwerts jedoch nicht aus. Entscheidender ist die Streuung der Einzelmesswerte um den Sollpunkt. Die grafische Analyse in Form von Zielscheibendiagrammen zeigt, dass die Messwerte symmetrisch um den Sollpunkt verteilt sind und keine systematische Richtungsabhängigkeit vorliegt. Es ist jedoch deutlich zu erkennen, dass einzelne Werte, sogenannte Ausreißer, teilweise deutlich außerhalb des geforderten Bereichs liegen.

Bedeutung des 95 %-Quantils

Ein zentraler Kennwert für die Bewertung, ob die Toleranzgrenze in der Praxis eingehalten wird, ist das 95 %-Quantil. Im vorliegenden Fall liegt das 95 %-Perzentil der Abweichungen bei 0,0076 m (7,6 mm). Dies bedeutet, dass 95 % aller Einzelmessungen innerhalb eines Radius von 7,6 mm um den Sollpunkt liegen, aber 5 % der Messungen noch größere Abweichungen aufweisen. Somit wird die geforderte Toleranz von 5 mm nicht für sämtliche Einzelmessungen eingehalten.

Die grafische Darstellung (siehe Abbildung 31) unterstreicht diesen Befund anschaulich: Der innere grüne Kreis markiert alle Messungen, die die 5 mm-Toleranz einhalten, während der rote Bereich außerhalb des Kreises alle Messungen mit unzulässiger Abweichung kennzeichnet. Zusätzlich sind im Diagramm ein violetter Kreis (95 %-Konfidenzintervall) und ein gelber Kreis (95 %-Quantil) eingetragen. Es ist ersichtlich, dass etwa 40 % der Messpunkte außerhalb der Toleranz liegen.

Kritische Einordnung und methodische Reflexion

Die vorliegenden Ergebnisse machen deutlich, wie wichtig eine differenzierte, statistisch fundierte Betrachtung bei der Bewertung von Sensorsystemen ist. Die ausschließliche Fokussierung auf den Mittelwert der Abweichungen kann zu einer Überschätzung der Systemgenauigkeit führen, wenn gleichzeitig die Streuung der Werte hoch ist und sich dadurch viele Einzelwerte außerhalb der Toleranz bewegen.

Das Sensorsystem zeigt insgesamt eine gute mittlere Präzision und eine gleichmäßige, nicht richtungsabhängige Verteilung der Messabweichungen um den Sollpunkt. Dennoch ist die Varianz so ausgeprägt, dass die Toleranz für Einzelmessungen nicht sichergestellt werden kann. Ursachen hierfür könnten einerseits in äußeren Einflüssen (z. B. wechselnde Umweltbedingungen, Erschütterungen, Temperatur), andererseits in der Sensorkonfiguration oder der Bedienung liegen. Auch sind systematische Fehlerquellen denkbar, die sich nur bei bestimmten Messsituationen auswirken. Für eine abschließende Bewertung und zur Erhöhung der Zuverlässigkeit wäre eine weiterführende Untersuchung dieser Einflussfaktoren sinnvoll.

Beantwortung der Forschungsfrage

Die Forschungsfrage lautete, ob das entwickelte Sensorsystem die Lagegenauigkeit von 5 mm unter realen Bedingungen einhalten kann. Basierend auf der Auswertung lässt sich die Forschungsfrage wie folgt beantworten:

Bezogen auf den Mittelwert der Lageabweichungen erfüllt das Sensorsystem die gestellten Anforderungen eindeutig: Die durchschnittliche Abweichung bleibt mit 4,29 mm unter der Toleranz, und das Konfidenzintervall bestätigt diese Aussage mit hoher statistischer Sicherheit.

Mit Blick auf die Einzelmessungen wird die Toleranzgrenze von 5 mm jedoch von einem relevanten Anteil der Werte überschritten. Das 95 %-Quantil liegt mit 7,6 mm deutlich über der geforderten Grenze, sodass mehr als 40 % der Einzelmessungen die zulässige Toleranz überschreiten.

Die Forschungsfrage muss daher differenziert beantwortet werden: Das Sensorsystem genügt den Anforderungen im Mittel, für Einzelmessungen ist die Einhaltung der 5 mm-Toleranz jedoch nicht gesichert.

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend zeigt das Sensorsystem im Praxistest eine sehr gute mittlere Genauigkeit und erfüllt damit die grundlegenden Anforderungen für Anwendungen, bei denen gelegentliche Überschreitungen der Toleranz akzeptabel sind. Für hochpräzise oder sicherheitsrelevante Anwendungen, bei denen jede einzelne Messung innerhalb der Toleranz liegen muss, ist das aktuelle System dagegen nur eingeschränkt geeignet. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit, neben Mittelwerten auch Streuungs- und Quantil Betrachtungen in die Bewertung von Messsystemen einzubeziehen, um ein realistisches Bild der Systemzuverlässigkeit zu erhalten.

Für zukünftige Arbeiten erscheint es sinnvoll, die Ursachen für die Abweichungen weiter zu analysieren und gezielt zu minimieren, um die Einhaltung der Toleranzgrenze auch für Einzelmessungen zu verbessern. Hierzu bieten sich unter anderem eine Optimierung der Hardware, verbesserte Kalibrierungsroutinen oder eine systematische Analyse von Einflussfaktoren an.

8. Fazit und Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte digitale Lösung zur präzisen Lagebestimmung hat die Möglichkeiten und Grenzen aktueller Sensortechnik im Feldtest aufgezeigt. Die erzielten Ergebnisse liefern eine wichtige Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Ein zentrales Ergebnis ist, dass das Sensorsystem zwar eine hohe mittlere Genauigkeit erreicht und im statistischen Mittel die geforderte Toleranz von 5 mm erfüllt, jedoch die Streuung der Einzelmessungen in der Praxis zu signifikanten Überschreitungen der Toleranzgrenze führen kann. Daraus ergibt sich ein klarer Handlungsbedarf für die Weiterentwicklung und Optimierung des Systems, um die Einhaltung der Toleranz auch für Einzelmessungen sicherzustellen.

Optimierungspotenziale und Weiterentwicklung

Für die nächste Entwicklungsstufe ist insbesondere die Auswahl und Erprobung alternativer Sensortechnologien von Interesse. Im theoretischen Teil dieser Arbeit wurden bereits verschiedene Sensortypen wie die Modelle von Bosch und Jewell vorgestellt. Ein logischer nächster Schritt wäre es, mindestens zwei neue Prototypen zu konstruieren, in die jeweils unterschiedliche, leistungsfähigere Sensoren dieser Hersteller integriert werden. So ließen sich die Messergebnisse direkt vergleichen und die Auswirkungen verschiedener Sensorkonzepte auf die Lagegenauigkeit und die Streuung systematisch untersuchen.

Neben der Sensorik sollte auch das Testumfeld weiter verbessert werden. Um den Einfluss äußerer Störgrößen zu minimieren und reproduzierbare Ergebnisse zu ermöglichen, empfiehlt sich die Durchführung weiterer Tests unter kontrollierten Bedingungen. Beispielsweise könnten Messreihen bei konstanter Raumtemperatur (z. B. 20 °C) durchgeführt werden, um Temperatureffekte auf die Sensoren gezielt auszuschließen. Ebenso wäre die Entwicklung einer Vorrichtung sinnvoll, die die exakte und wiederholgenaue Ausrichtung des Reflektorstabes sicherstellt und dadurch menschliche Bedienfehler minimiert. Dies würde die Aussagekraft der Messergebnisse zusätzlich erhöhen.

Auch auf Softwareseite besteht Optimierungspotenzial, etwa durch fortschrittliche Algorithmen zur Filterung und Auswertung der Sensordaten, automatisierte Kalibrierungsroutinen oder die Entwicklung intelligenter Plausibilitätsprüfungen zur Echtzeiterkennung von Ausreißern.

Erweiterte Testreihen und Validierung

Zur weiteren Erhöhung der Aussagekraft sollten die Testreihen in Umfang und Tiefe erweitert werden. Eine größere Stichprobe, Langzeittests sowie Vergleichsmessungen mit etablierten Messsystemen (z. B. Präzisionslibellen) würden eine noch präzisere Bewertung der Zuverlässigkeit erlauben. Besonders relevant ist auch die gezielte Analyse der Ausreißer und der Messbedingungen, unter denen sie auftreten, um Optimierungsmaßnahmen gezielt ansetzen zu können.

Praktische Anwendung

Bereits im aktuellen Stand eröffnet das Sensorsystem zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten überall dort, wo eine hohe mittlere Genauigkeit ausreichend ist und vereinzelte Überschreitungen tolerierbar sind. Mit der geplanten Weiterentwicklung – insbesondere durch die Integration leistungsfähigerer Sensoren und verbesserte Test- und Auswertebedingungen – könnten zukünftig auch Anwendungen erschlossen werden, bei denen höchste Präzision und Zuverlässigkeit gefordert sind, beispielsweise im Bauwesen, in der industriellen Messtechnik oder bei sicherheitsrelevanten Aufgaben.

Ein weiterer vielversprechender Ansatz für die zukünftige Weiterentwicklung des Systems liegt im Funktionsumfang und der Integration des Sensors in das Gesamtsystem der Bauvermessung. Bislang ersetzt der digitale Sensor die klassische Blasenlibelle und dient damit hauptsächlich zur Überprüfung der senkrechten Ausrichtung des Reflektorstabes. Für die Praxis bedeutet das: Der Anwender muss den Stab weiterhin manuell möglichst exakt in die Lotposition bringen, um Messfehler zu vermeiden.

Ein innovativer Entwicklungsschritt wäre es, das Sensorsystem so auszulegen, dass die tatsächliche Lageabweichung des Stabs – also die Abweichung von der idealen Lotstellung – kontinuierlich und präzise erfasst und direkt in die Messdatenauswertung integriert wird. Dadurch könnte das System die exakte räumliche Orientierung des Stabs rechnerisch bestimmen und diese Information zur automatischen Korrektur der gemessenen Koordinaten nutzen. Infolgedessen würde die Notwendigkeit, den Stab während der Messung exakt lotrecht auszurichten, weitgehend entfallen.

Dies würde nicht nur den Bedienkomfort erheblich erhöhen und Anwenderfehler minimieren, sondern auch die Effizienz und Geschwindigkeit der Vermessungsarbeiten steigern.

Ergänzend ließe sich die Ausrichtung des Stabs zur Totalstation durch moderne Technologien weiter automatisieren. Denkbar wäre etwa die Integration von GPS-Modulen oder automatisierten Detektionssystemen, die die relative Position und Orientierung des Stabs erfassen. Mit solchen Erweiterungen könnte die Digitalisierung und Automatisierung im Feld weiter vorangetrieben werden, was nicht nur zu einer höheren Präzision und Zuverlässigkeit, sondern auch zu einer erheblichen Reduktion des Arbeitsaufwands und der Fehleranfälligkeit führen würde.

Insgesamt eröffnet dieser Entwicklungspfad das Potenzial, statt einer einfachen Überwachung der Lotstellung ein aktives und anpassungsfähiges Messsystem zu realisieren, bei der der Sensor aktiv zur Qualitätsverbesserung der gesamten Messkette beiträgt und menschliche Einflüsse weitgehend kompensiert werden können.

Schlussbetrachtung

Die vorliegende Arbeit unterstreicht das große Potenzial digitaler Sensorsysteme für präzise Lagebestimmungen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine solide Basis für die weitere Entwicklung und Optimierung. Durch den gezielten Einsatz moderner Sensortechnologien, kontrollierte Testbedingungen und fortschrittliche Auswertemethoden können künftige Messsysteme noch genauer und zuverlässiger werden und damit neue Anwendungsfelder erschließen.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Messung mit einer Totalstation und einem

Reflektorstab. Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 2: Darstellung der Lagegenauigkeit anhand eines Grundrisses.

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3: Einfluss der Stabschrägstellung auf die resultierende Lageabweichung s bei der

Absteckung.

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 4: Kalibrierungsprozess des Sensors.

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 5: Benutzeroberfläche (GUI). Quelle:

Eigene Darstellung

Abbildung 6: Raspberry Pi 4 Model B mit GPIO-Anschlüssen.

Quelle: BerryBase (n.d.)

Abbildung 7: Neigungssensor MPU-6050.

Quelle: Joy-IT (n.d.)

Abbildung 8: Reflektorstab Hilti POA 52.

Quelle: Hilti Deutschland (n.d.-a)

Abbildung 9: Prisma POA 20.

Quelle: Hilti Deutschland (n.d.-b)

Abbildung 10: Totalstation Hilti PLT 400-4.

Quelle: Hilti Deutschland (n.d.-c)

Abbildung 11: Zweibein POA 75

Quelle: Hilti Deutschland (n.d.-c)

Abbildung 12: Hilti PLC 400

Quelle: Hilti Deutschland (n.d.-c)

Abbildung 13: Hilti PLC 600.

Quelle: Hilti Deutschland (n.d.-d)

Abbildung 14: Gehäuse für Raspberry Pi 4

Quelle: BerryBase (n.d.)

Abbildung 15: Anschluss des MPU 6050 an die GPIO-Pins des Raspberry Pi

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 16: Befestigung der Sensor- und Steuereinheit am Reflektorstab

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 17: Gesamtansicht des Messsystems mit Stromversorgung, Gehäuse und Prisma

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 18: GUI-Anzeige der berechneten Korrekturwerte (Offsets)

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 19: Bestätigungsdialog zur Speicherung der Kalibrierung

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 20: Benutzeroberfläche zur Kalibrierung und Messwertanzeige

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 21: Soll/Ist Lotstellung

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 22: Ansicht Testfeld Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 23: Testfeld mit Referenzpunkten

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 24: Markieren eines Messpunktes

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 25: Testfeld mit 25 Messpunkten

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 26: Reflektorstabspitze über einen Messpunkt

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 27: Ausrichtung Stab mit digitaler Libelle

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 28: Darstellung Lageabweichung

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 29: Lageabweichung aller Einzelmessungen

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 30: Darstellung 95% Quantil

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 31: Grafische Darstellung Messabweichungen

Quelle: Eigene Darstellung

10. Literaturverzeichnis

Adafruit. (2024). *Using Raspberry Pi GPIOs and Sensors.* Abgerufen am 31. Januar 2025, von https://www.adafruit.com

Bosch Sensortec. (2023). *BMI160 Datasheet.* Abgerufen am 31. Januar 2025, von https://www.bosch-sensortec.com

Deutsches Institut für Normung. (2003). *DIN 18202: Toleranzen im Hochbau – Bauwerke.* Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung. (2019). *DIN 18710: Vermessung – Bauvermessung.* Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung. (2020). *VOB/C – Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen.* Berlin: Beuth Verlag.

El-Rabbany, A. (2006). *Introduction to GPS: The Global Positioning System.* Boston: Artech House.

European Committee for Standardization. (2009). *EN 13670: Execution of concrete structures.* Brussels: CEN.

Ghilani, C. D. (2021). *Adjustment computations: Spatial data analysis.* Hoboken: John Wiley & Sons.

International Organization for Standardization. (1989). *ISO 4463-1: Measurement methods for building.* Geneva: ISO.

InvenSense. (2022). *MPU6050 Datasheet.* Abgerufen am 31. Januar 2025, von https://www.invensense.com

Jewell Instruments. (2022). *Precision Inclinometers.* Abgerufen am 31. Januar 2025, von https://www.jewellinstruments.com

Kavanagh, B. F. (2014). *Surveying: Principles and applications.* New York: Pearson.

Kavanagh, B. F. (2020). *Surveying with construction applications.* New York: Pearson.

Leica Geosystems. (2022). *Total Stations User Manual.* Heerbrugg: Leica Geosystems AG.

Leica Geosystems. (2024). *Leica Surveying Instruments Catalogue.* Heerbrugg: Leica Geosystems AG.

MEMSIC Inc. (2023). *MEMSIC Accelerometers Overview.* Abgerufen am 31. Januar 2025, von https://www.memsic.com

Murata Manufacturing Co., Ltd. (2023). *Murata Accelerometer Products.* Abgerufen am 31. Januar 2025, von https://www.murata.com

Nedo GmbH & Co. KG. (2023). *Construction Lasers and Measuring Tools.* Dornstetten: Nedo.

Noble, J. (2015). *Surveying instruments and technology in Renaissance Europe.* Cambridge: Cambridge University Press.

Österreichisches Normungsinstitut. (2017). *ÖNORM B 2205: Bauvermessung.* Wien: Austrian Standards.

Österreichisches Normungsinstitut. (2020). *ÖNORM B 2110: Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen.* Wien: Austrian Standards.

Python Software Foundation. (2023). *Python 3 Documentation.* Abgerufen am 31. Januar 2025, von https://www.python.org

RealVNC. (2024). *RealVNC Viewer Documentation.* Abgerufen am 31. Januar 2025, von https://www.realvnc.com

Schofield, W., & Breach, M. (2007). *Engineering surveying.* Oxford: Butterworth-Heinemann.

SICK AG. (2023). *LiDAR Sensors for Precise Distance Measurement.* Waldkirch: SICK AG.

Sokkia. (2024). *Total Stations and GNSS Receivers.* Abgerufen am 31. Januar 2025, von https://www.sokkia.com

Topcon Positioning Systems Inc. (2022). *Topcon Surveying Solutions.* Abgerufen am 31. Januar 2025, von https://www.topconpositioning.com

Topcon Positioning Systems Inc. (2024). *Topcon Technology Updates.* Abgerufen am 31. Januar 2025, von https://www.topconpositioning.com

Trimble Inc. (2021). *Trimble Total Stations User Guide.* Sunnyvale: Trimble Inc.

Trimble Inc. (2024). *Trimble Construction Solutions Catalogue.* Sunnyvale: Trimble Inc.

Uren, J., & Price, W. F. (2010). *Surveying for engineers.* Basingstoke: Palgrave Macmillan.

Welch, G., & Bishop, G. (1995). *An introduction to the Kalman filter.* Chapel Hill: University of North Carolina.