



Archer-Tracking

Bewegungstracking für Sportler

Antonio Rehwinkel

9. Januar 2022

Unterstützende Lehrer: Herr Czernohous
Herr Dierle
Emails?

und Professoren: Hochschule1
Hochschule2
Emails?

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	3
1.1	Einleitung	3
1.1.1	Problemlage	3
1.1.2	Anforderungen	4
1.2	Vorgehensweise	4
1.2.1	Möglichkeiten	4
1.2.2	Materialsuche	4
2	Hardware	5
2.1	Arduino Nano 33 BLE	5
2.2	MPU9250	5
2.3	Benötigte Leistung	6
3	Bluetooth-Low-Energy	7
3.1	Datengröße	7
3.2	Datendurchsatz per BLE	8
3.3	Tatsächliche Übertragungsgeschwindigkeit	8
4	Bewegungen, Analyse und bekannte Systeme	9
4.1	Analyse	9
4.2	3D-Darstellung(Theorie)	9
4.3	Bewegung	10
5	Software	11
5.1	Datenübertragung	11
5.2	Arduino Firmware	11
5.3	Android-App	11
5.3.1	Rohdaten	12
5.3.2	Graph	12
5.3.3	Animation	12
5.3.4	Aufgezeichnete Daten	13
5.4	Gleichmäßige und ungleichmäßige Beschleunigung	13
5.4.1	Gleichmäßige Formel	13
5.4.2	Integral	14
6	Tests	15
6.1	Distanz - Testaufbau	15
6.1.1	Distanzmessungen	15
6.1.2	Fehler	15
7	Fazit	17

1 Vorwort

Mithilfe eines Bewegungssensors kann man viele Bewegungen erforschen und vermessen. Mit meinem System sollen mehrere Beschleunigungssensoren dazu eingesetzt werden, Bewegungsabläufe aufzunehmen, miteinander zu vergleichen und zu erkennen.

Die Daten werden über Bluetooth-Low-Energy an ein Handy geschickt, wo Sie sowohl gespeichert als auch ausgewertet werden können. Als Beispiel gilt hier für mich das Bogenschießen, bei dem selbst kleine Bewegungen immer wieder auf gleiche Weise ausgeführt werden müssen. Mit meinem Sensor sollen hier teure Kamerasysteme abgeschafft werden und es so jedem¹ ermöglichen, selbst ohne Bogen oder Trainer bei sich Zuhause den Bewegungsablauf zu trainieren.

1.1 Einleitung

1.1.1 Problemlage

Als Bogenschütze bekommt man schnell mit, auf welch hohem Niveau andere Schützen es schaffen, immer wieder dasselbe zu tun. Dies bezieht sich nicht nur auf den allgemeinen Aufbau, bei dem diese Eigenschaft sogar von Nöten ist, sondern auch auf Fehler im Aufbau.

Da ich selbst schieße und die Möglichkeit hatte in zwei unterschiedlichen Vereinen zu trainieren, ergab sich schnell das Problem, dass meine Schussform drohte schlechter zu werden. Ohne Trainer, der meinen persönlichen Aufbau kannte, konnte ich nicht feststellen, wann ich Fehler wiederholte oder sogar neue einbaute. Eine Lösung musste her, die es mir erlaubte meinen Schussablauf selbst nachzuverfolgen und Unterschiede oder Fehler selbst zu finden.

Bei Profi-Schützen wird schon seit Langem ähnliches getan. Mit Hilfe von mindestens 2 Hochgeschwindigkeitskameras und Punkten am Schützen ist man in der Lage, den Bewegungsablauf eines Schützen zu analysieren und Dreidimensional darzustellen.

Die wohl bekanntesten Aufnahmen werden derzeit vorrangig zum Perfektionieren der mechanischen Ausrüstung und als Lehrmaterial verwendet. Da Profi-Schützen häufig einen nahezu perfekten Aufbau haben, werden die Daten selten zum Korrigieren von Aufbau Fehlern eingesetzt.

Zur Auswertung der Daten ist eine weitere Person von Nöten, die speziell darauf geschult wurde die erzeugten Daten auszuwerten.

¹Aus Gründen der Lesbarkeit wird das Gendern weggelassen

Die Hochgeschwindigkeitskameras, welche bei den ersten Aufnahmen von Bogenschützen benutzt wurden, sind in der Lage 6000 bis 8000 Fotos in der Sekunde zu schießen. Kameras dieser Qualität kosten selbst heute noch über 100 000 €.

Der Raum, den diese Messmethode in Beschlag nimmt, ist ebenfalls nicht zu unterschätzen.

1.1.2 Anforderungen

Wenn man es nun schafft, den Kostenpunkt zu drücken und weniger Platz zu benötigen, ergeben sich völlig neue Möglichkeiten. Dies würde vor allem den kleinen Vereinen zu Gunsten kommen. Sie wären endlich in der Lage den Schussaufbau aller Schützen auf kleinste Fehler zu prüfen und eintrainierte Fehler einfach festzustellen.

Die Anforderungen an mein Projekt wären damit, dass eine kostengünstige Alternative geschaffen wird, die wenig Platz benötigt und schnelle Ergebnisse liefert. Dabei müssen diese Ergebnisse genau und für jeden verständlich sein.

Desweiteren darf der Schütze auf keinen Fall gestört werden. Dies wirkte sich bei meiner Idee vor allem auf die Größe, das Gewicht und die Datenübertragung aus.

Entwickelt und gebaut wurde dieses Projekt im Schuljahr 2020/21 von Zuhause aus und wurde im Schuljahr 2021/22 weitergeführt.

1.2 Vorgehensweise

1.2.1 Möglichkeiten

Auf meiner Suche hatte ich die Idee, einen Ultraschallsensor am Schützen zu befestigen. Der Ultraschallsensor hätte am Boden befestigt werden können, um die Höhe der einzelnen Punkte des Schützen bestimmen. Ebenfalls wäre eine Kabelführung für schnellere Datenübertragung und damit ein günstigerer Preis möglich gewesen. Dieses System muss allerdings sehr genau auf den Schützen eingestellt werden und liefert wenig verwendbare Daten. Auch die Verwendung einer günstigeren Kamera wäre möglich gewesen. Dabei vereint man allerdings alle Nachteile, die das jetzige System hat. Man braucht viel Platz und trotz sehr günstiger Kameras übersteigt der Preis sehr schnell den Kostenpunkt sowohl meiner Ersten als auch meiner folgenden Idee. Meine finale Idee war, einen Beschleunigungssensor und einen BLE-Chip zu kombinieren.

1.2.2 Materialsuche

Es galt nun, die genannten Kriterien zur Hardware zu erfüllen. Um die Bewegungen des Schützen nachzuverfolgen muss ich wissen, wo die einzelnen wichtigen Punkte des Aufbaus sind. Dies betrifft beide Arme und die Schultern. Da sich die Arme viel bewegen, schien es mir möglich, mithilfe eines günstigen Beschleunigungssensors die Änderungen festzustellen. Bei hoher Genauigkeit könnte dieser vielleicht sogar die Bewegungen der Schultern messen. Um den Schützen nicht zu behindern, ist eine kabellose Verbindung von Vorteil.

2 Hardware

2.1 Arduino Nano 33 BLE

Der Arduino Nano 33 BLE ist ein Prozessor aus dem Hause Arduino der Nano Reihe. Was diesen von der normalen Nano-Reihe unterscheidet ist der BLE-Chip NINA-b3(nRF52840) auf seinem Rücken. Dieser Chip ermöglicht es dem Arduino über Bluetooth 5.0, auch Bluetooth-Low-Energy genannt, mit allen anderen Bluetooth-Geräten ab der Bluetooth Version 4.0 kabellos zu kommunizieren.

Eigenschaft	Daten
Memory	1MB Flash — 256 KB SRAM
Interfaces	I^2C , SPI, ...
Volt	Input: 4,5 - 21 V — Output: 3,3 V

Der Arduino ist aufgrund seines BLE-Chips, der I^2C -Verbindungsmöglichkeit und der Output-Volt Zahl von 3,3 Volt der richtige Prozessor für dieses Projekt. Auch die kleinen Maße und das geringe Gewicht bringen ihm nur Pluspunkte ein.

2.2 MPU9250

Für eine genaue Datenlage sorgt in meinem Projekt der Multi-Chip MPU9250. Dieser ist mit einem 3-Achsen Beschleunigungssensor, einem 3-Achsen Gyroskop Sensor und einem 3-Achsen Magnetometer ausgerüstet. Damit bietet er 9 Freiheitsgrade (9 Degrees of Freedom). Alle Sensoren beinhalten eine Kalibrierung innerhalb der Firma und einen Selbsttest bei Benutzung. Der Sensor benötigt nur 2,4 bis 3,6 Volt für die Inbetriebnahme. In der Tabelle sind die Datenpins und die Genauigkeit der Sensoren notiert.

Sensoren	Datenübertragung	Empfindlichkeit
Gyroskop	3 * 16bit ADCs	± 250 /sec, ± 500 sec, ± 1000 /sec, ± 2000 /sec
Beschleunigungssensor	3 * 16bit ADCs	$\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$
Magnetometer	3 * 16bit ADCs	full-scale range of ± 4800 mT mT
Übertragung	I^2C , SPI, ...	

Die Daten werden über den I^2C -Bus vom Arduino abgefragt. Die Abtastrate beträgt hierbei stolze mögliche 400kHz. Dabei werden alle Sensoren abgefragt und die Daten versendet. Die geringe Größe des Chips (150mm*250mm), der geringe Energieverbrauch (3,5mA wenn alle Sensoren ausgelesen werden), die hohe Genauigkeit und die Geschwindigkeit der Datenübertragung lassen diesen Sensor perfekt für dieses Projekt werden. Der verbaute DMP (Digital Motion Processor) wird ebenfalls verwendet und filtert die Daten mit einem Low-Pass-Filter.

2.3 Benötigte Leistung

Der Stromverbrauch wurde mit einem Multimeter am Batterieanschluss in verschiedenen Modi gemessen. Die Ergebnisse stehen in der Tabelle:

Modul	An/Aus	Verbrauch(in mA)
BLE	aus	5
BLE	an	10.2
BLE	an und verbunden	13
MPU9250	an	5

Der Stromverbrauch lässt sich so berechnen und erleichtert die korrekte Batterie-Wahl. Die verwendeten Formeln:

$$\begin{aligned}
 P &= U \cdot I \\
 Ah \cdot V &= Wh \\
 Wh \cdot W &= t \rightarrow (U \cdot I \cdot t) / U \cdot I = t
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

So hat der Arduino eine Leistung von:

$$0,005 \text{ A} \cdot 7,4 \text{ V} = 0,037 \text{ W} \tag{2.2}$$

Die verschiedenen Batterien-Typen stehen in der folgenden Tabelle:

Typ	Laufzeit(in Stunden)	Gewicht	Cut-Off-Spannung	Differenz
9V	40	0,05Kg	7.2V	$9 - 7.2 = 2,8$
CR2025	12	0,0025Kg	2V	$3 - 2 = 1$
2 * CR2025	48,6	0,005Kg	2V	$6 - 2 = 4$

Um eine Stromversorgung des Arduinos sicher zu stellen, benötigt man 2 Knopfzellen des Typs CR2025. Dennoch hat die Knopfzelle CR2025 nicht nur eine bessere Laufzeit sondern ebenfalls weniger Gewicht, braucht weniger Platz und eine bessere Differenz zwischen Cut-Off-Spannung zu angebotener Spannung.

Gegen das Umrüsten auf die Knopfbatterie spricht einzig der Umweltschutz. Denn im Gegensatz zu 9-Volt-Batterien gibt es keine Akkus für Knopfzellen.

3 Bluetooth-Low-Energy

Mit Bluetooth 5.0 wurde eine neue Übertragungsweise zu Bluetooth hinzugefügt. Diese nennt sich Bluetooth-Low-Energy und zeichnet sich durch einen geringen Stromverbrauch und dennoch einem höherem Datendurchsatz aus.

Bluetooth sendet Daten in Paketen. Hierbei ist bei Bluetooth-Low-Energy (zukünftig BLE) der Sender als Server ausgewiesen und der Empfänger als Client.

Die Server bieten "Services" an die mit "Characteristics" befüllt sind. So bietet mein Arduino den Service "MPU9250" an mit dem Characteristics "Accl", "Gyro" und "Mag". Der Nachteil dieser Verteilung der einzelnen Daten besteht hierbei in der Zeit die für die Abfrage gebraucht wird. Jede Characteristic muss einzeln abgefragt werden, hierbei kann ein Großteil des Datensatzes des MPU9250 verloren gehen.

Laut Dokumentation beträgt der Maximale Datensatz von BLE 244 Bytes pro Paket bei aktiviertem DLE. Diese Funktion ließ ich ausgeschaltet, wodurch ich Maximal 27 Bytes pro Paket versenden kann. Dieses Problem erklärt ebenfalls weshalb die Sensor-Daten auf verschiedene Characteristics aufgeteilt werden. Alle Daten passen nicht in ein einzelnes zu versendendes Paket.

3.1 Datengröße

Die Daten werden als String versendet, diese werden von Arduino mit einer Null Terminiert. Die Größe der Sensordaten beträgt:

$$\text{Vorkommastellen (3) + Komma (1) + Dezimalstellen (2) + Terminierung (1) = 7 Char} \quad (3.1)$$

1 Char entspricht 1 Byte, somit gilt:

$$\begin{aligned} 9 \text{ Sensoren} * 7 \text{ Byte} &= 63 \text{ Byte} \\ 63 \text{ Byte} / 27 \text{ Byte} &= 2,3 \text{ Datenpakete pro alle Sensoren} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Somit brauche ich für das Senden aller Sensoren mindestens 3 Characteristics.

3.2 Datendurchsatz per BLE

2Mbps, steht in Prozessor Doku, lieber nochmal in BLELib nachlesen!

Das Sendeprotokoll von Bluetooth schreibt vor, das ein Datenpaket von leeren Datenpaketen eingepackt wird, somit beträgt die Sendezeit pro Datenpaket:

$$\text{Zeit} = \text{Leer} + \text{IFS} + \text{Data} + \text{IFS} \text{ Leer} = \text{leerespacket(größe)} / \text{datarate} \quad (3.3)$$

Für mich heißt das:

$$\text{leerGröße} = 2 + 4 + 2 + 3 = 11 \text{ Bytes} == 88 \text{ bits} \quad (3.4)$$

und die Sendezeit für das leere Paket beträgt damit:

$$\text{leerZeit} = 88 / 2\text{Mbps} = 44 \text{ Mikro Sekunden.} \quad (3.5)$$

Für ein volles Datenpaket brauche ich:

$$\begin{aligned} \text{Voll} &= 44 + 2*150 + 2+4+2+4+20+3 = 44+300+35 = 379\text{Bytes} *8 == 3032 \text{ Bits Vollzeit} \\ &= 3032 / 2 = 1,516 \text{ Mikrosekunden} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Für ein gesamtes Datenpaket brauche ich damit mindestens:

$$\text{Zeit} = 44 + 2*150 + 1,516 = 345,516 \text{ Mikrosekunden} \quad 88/2 + 2*150 + (2 + 4 + 2 + 4 + 20 + 3)*8/2 \quad (3.7)$$

3.3 Tatsächliche Übertragungsgeschwindigkeit

4 Bewegungen, Analyse und bekannte Systeme

4.1 Analyse

Da der Schussablauf eines Bogenschützen viele Stationen mit verschiedenen Bewegungen beinhaltet fällt es häufig sogar den Trainern schwer zwischen einem technisch guten oder schlechtem Schuss zu unterscheiden.

Somit galt es einen Punkt zu finden bei dem Fehler auffällig sind, so das ich die Daten auch im Leben nachvollziehen kann.

Der MPU9250 bietet 9 Freiheitsgrade (Degrees Of Freedom - DOF). Aus welchen diese bestehen wird im Kapitel zum MPU9250 erläutert. Diese Freiheitsgrade lassen es zu, die Orientierung des Sensors und damit die Orientierung des Körpers an der er befestigt ist genau zu messen. Sogar die Distanz die der Sensor sich bewegt ist in der Theorie messbar.

So ist eine Darstellung als 3D-Modell möglich an der der Schütze seine Fehler sieht und Unterschiede zu vorangegangenen Schüssen hervorgehoben werden.

Denkbar wäre eine Klassifizierung der einzelnen Schüsse um wie in einem Videospiel die Genauigkeit der Wiederholung in Prozent anzugeben. Interessant wird es, sobald mehrere Schützen Datensätze ihrer Schüsse vergleichen. Unterschiede werden ersichtlich, genau wie Gemeinsamkeiten.

4.2 3D-Darstellung(Theorie)

Die benötigten Daten für ein 3D-Modell variieren je nach gewollter Genauigkeit der Darstellung. Mithilfe von Euler Winkeln ist es möglich aus Beschleunigungsdaten die Orientierung des Sensors zu berechnen. Somit müsste man nur noch einen Datensatz übertragen. Allerdings verliert die Darstellung so einen Freiheitsgrad durch den sogenannten “Gimbal-Lock”. Die Euler Winkel drehen das Objekt um gedachte Achsen herum, wenn dabei eine Axe um 180° gedreht wird würde es zu einer zweimaligen Drehung um die selbe Axe kommen. Ebenfalls gestaltet sich die Berechnung der Gier-Axe schwer, da hier keine Veränderung in eine der gemessenen Axen für Beschleunigung erkennbar ist.

Um dieses Problem zu lösen muss man das Gyroskop mit einbeziehen, dieses kann die Beschleunigung in Winkeln bemessen. Damit könnte man die Orientierung eines Objekt bestimmen, allerdings ohne Bezug zur Orientierung in der echten Welt. Man wüsste nicht wie das Objekt steht, man weiß nur das es sich um einen bestimmten Winkel in diese oder die andere Richtung gedreht hat.

Deshalb muss man die Daten des Beschleunigungssensors und des Gyroskops fusionieren. So kann man die Drehung in jede Rechnung erfassen. Der “Gimbal-Lock” bleibt jedoch

bestehen.

Dieses Problem kann man mithilfe von Quaternionen als Orientierung lösen. Da ich jedoch keine Winkel von 180° erwartete sind die Euler Winkel meine Problemlösung.

4.3 Bewegung

Eine Interessante Bewegung stellt vor allem der Zugarm des Schützen dar. Der Auszug verläuft nahezu linear, der häufigere Fehler an dieser Stelle versteckt sich in der Höhe des Zugarms. Um diese zu messen muss man die Erdanziehungskraft der Z-Achse herausrechnen.

Möglich ist ebenso die Neigung des Armes über die Euler-Winkel zu berechnen. Sollte der Arm zu hoch sein wird sich die Ausrichtung des Sensors stark verändern.

Um den Schützen möglichst genau zu tracken sind mehrere Sensoren an eine Schützen denkbar und wünschenswert. So könnten Fehler der einzelnen MPUs herausgerechnet werden. Auch die Klassifizierung der Schüsse liefere so auf einem höheren Standard.

5 Software

Die Anzeige für Daten erfolgt am Handy, hier habe ich genug Rechenpower nicht nur Nachkommastellen genau zu berechnen, sondern kann ebenfalls visuelle Darstellungen erzeugen. Die Daten werden hierfür über das bereits erklärte BLE an das Handy gesendet. Somit brauchte ich sowohl eine Android App als auch ein Programm für den Arduino.

5.1 Datenübertragung

Die Daten werden wie in Kapitel zur BLE-Datenübertragung beschrieben in maximal 3 verschiedenen Charakteristiken gesendet und empfangen.

Eine Instanz muss hierbei sicherstellen das Daten nicht doppelt gesendet oder empfangen werden.

Dies wird beim Arduino durch die Abfrage einer bibliothekseigenen Funktion sichergestellt, die erst auslöst wenn neue Daten des MPU9250 erzeugt wurden. Dies bewirkt das Bereitstellen der Daten in den Characteristics.

Sobald diese Daten gesendet wurden, bekommt das Handy ein Signal und liest daraufhin die neuen Daten.

5.2 Arduino Firmware

Das Programm auf dem Arduino Nano 33 Ble stellt zu Beginn eine I²C Verbindung mit dem MPU9250 her und startet das BLE-Modul.

Sobald ein Gerät sich mit dem Arduino verbindet beginnt dieser mit der Datenübertragung. Hierbei wurden die Filter vom Digital-Motion-Processors des MPU9250 schon mit einem Low-Pass-Filter verarbeitet.

5.3 Android-App

Zur Erstellung der Android-App wurde AppInventor(<https://appinventor.mit.edu/>) und die BLE-Extension verwendet.

Geschrieben wurde das Programm von mir. Ideen und Anregungen wurden in verschiedensten Foren gefunden.

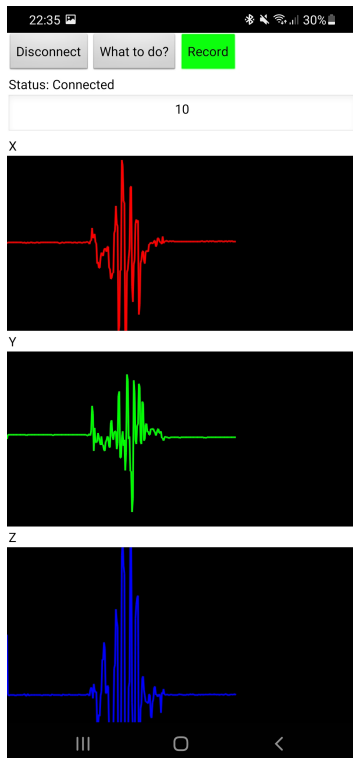
Beim Start der App wird man aufgefordert Bluetooth und GPS anzuschalten, das GPS ist nach Android-Richtlinien zu aktivieren. Danach kann man nach verschiedenen Geräten scannen und sich mit diesen zu verbinden. Erfolgt die Verbindung mit einem falschen Gerät schließt sich die App. Nach der Verbindung wird sofort die Übertragung gestartet. Das empfangene Datenpaket muss vor der Verarbeitung in die einzelnen Daten aufgespalten und von String zu Float-Werten, besser Double-Werten gepaart werden. Diese werden in ein Array gespeichert welches später die einzelnen aktuellen Werte ausgeben kann.

Es gibt insgesamt 3 Möglichkeiten die Daten anzeigen zu lassen.

5.3.1 Rohdaten

Die gelesenen Daten werden direkt im Textformat auf dem Bildschirm ausgegeben. Der Zeitunterschied zwischen Datenpaketen wird in Millisekunden auf dem Bildschirm angezeigt. Es ist möglich die Daten gleichzeitig aufzuzeichnen.

5.3.2 Graph

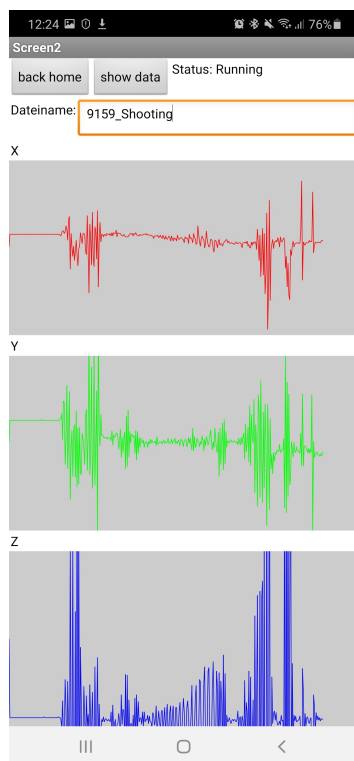


Die Beschleunigungs-Daten werden in einem Graph dargestellt, hierzu werden sie zuerst in ein Array geschrieben. Aus diesem Array erzeugt das Programm in einem vorgegebene Bereich die Datenpunkte, die aufgrund ihrer Masse wie ein Liniendiagramm aussehen. Neue Daten werden rechts geschrieben, während die alten Daten nach Links aus dem Bildschirm verschwinden. Der Zeitunterschied zwischen Datenpaketen wird in Millisekunden auf dem Bildschirm angezeigt. Es ist möglich die Daten gleichzeitig aufzuzeichnen.

5.3.3 Animation

Hier wird die Distanz aus den Beschleunigungsdaten berechnet und mithilfe eines Punktes visualisiert. Benutzt werden hierfür die X- und Y-Achse. Die Rechnung ist in Kapitel “5.4.1 Gleichmäßige Formel” beschrieben.

5.3.4 Aufgezeichnete Daten



Die von den anderen Funktionen aufgezeichneten Funktionen können hier ausgegeben werden. Hierzu benötigt der Schütze den Namen der Datei. Die Dateien werden seit kurzem unter Android in einem App-Eigenem Ordner gespeichert. Diesen muss der Schütze momentan auslesen um den zufälligen Namen der neuen Datei zu kennen. Die Daten werden als Graph dargestellt. Die Beschleunigungsdaten werden außerdem in Rohform über dem Graphen ausgegeben.

5.4 Gleichmäßige und ungleichmäßige Beschleunigung

Um die Distanz aus der gemessenen Beschleunigung zu berechnen fand ich zwei verschiedene Formeln. Die wohl bekannteste Umrechnung benutzt Integrale, die zweite Formel ist die der gleichmäßigen Beschleunigung.

Während die Integration von allen mir bekannten Forschungsprojekten verwendet werden sind ihre Fehler bekannt. Man muss eine Doppelintegration ausführen um von Beschleunigung auf Distanz zu kommen, hierbei verwandelt sich das Rauschen des Sensors in Drift und so einen exponentiell steigenden Fehler.

Die gleichmäßige Formel kann im Gegensatz zum Integrall nur positive Beschleunigungen verwerten, hat in den folgenden Tests allerdings deutlich genauere Werte und einen geringeren Fehler bei Stillstand aufgezeigt. So wird in diesem Projekt die gleichmäßige Beschleunigungsformel verwendet.

Als Zeit wird die Frequenz mit der der Sensor Daten misst genommen. Hierfür wird die Frequenz in Zeitabschnitte umgerechnet mit der die Formeln letztendlich arbeiten.

5.4.1 Gleichmäßige Formel

Die angepasste Formel für gleichmäßige Beschleunigung berechnete die Distanz in meinen Versuchen mit einer Genauigkeit von Die physikalisch Richtige Formel lautet $s + v * t + a * t^2 * 0.5$, allerdings wurden mit der Formel $s + a * t^2 * 0.5$ bessere Testergebnisse erzielt. Da die negative Beschleunigung den Wert der Distanz wieder nullierte wurden zu dieser Formel nur positive Distanzmessungen zugelassen.

Hier der Code-Ausschnitt:

```

if (acc > 0) {
t = (freq / 1000); //hz is not time but frequenzy

distance = (distance) + (acc * (t * t) * 0.5);
velocity = acc * t;
}

```

Für die Tests wurde dieser Code statt der BLE-Übertragung auf dem Arduino ausgeführt.

5.4.2 Integral

Die Berechnung der Distanz über Integrale ist der Standard in der Wissenschaft, obwohl die Fehler die sie mit sich bringt bekannt sind. Eben diese Fehler wirkten sich bei meinem Sensor stark aus.

Die Testergebnisse ergaben einen Fehler von $\pm 15\text{cm}$ auf einer Strecke von 30cm . Ebenso war das Ergebnis sofort in Centimetern, statt wie erwartet in Metern. Wurde der Sensor zurückbewegt an seinen Startpunkt sank der Wert jedoch wieder auf Null ab. Somit kann man schließen, dass das Ergebniss nur falsch skaliert ist.

Dieser Fehler wurde noch nicht behoben.

Ein klarer Vorteil dieser Rechnung zeigt sich schon beim Test, die Formel funktioniert auch für negative Beschleunigungen. Der Wert sinkt am Ende der Teststrecke nicht ab, sondern bleibt auf seinem hohen Wert.

Folgend der Code-Ausschnitt der Integral-Rechnung:

```

t = (freq / 1000); // hz to time

velocity = t * ((acc + accOld) / 2) + velocity;
accOld = acc;
distance = t * ((velocity + velocityOld) / 2) + distance;
velocityOld = velocity;

```

6 Tests

6.1 Distanz - Testaufbau

Der Sensor wurde auf einem Breadboard mit einem Arduino Uno verbunden und übertrug die Werte via USB-Kabel an den Seriellen Monitor der Arduino IDE. Um eine mögliche Schiefelage auf dem Breadboard abzufedern wurden aus 200 Messungen der Durchschnitt berechnet und von den Werten vor der Verarbeitung subtrahiert. So liegt der Sensor mathematisch absolut flach auf.

6.1.1 Distanzmessungen

Insgesamt wurden 10 Tests pro Formel gemacht, die Ergebnisse können Sie unten einsehen.

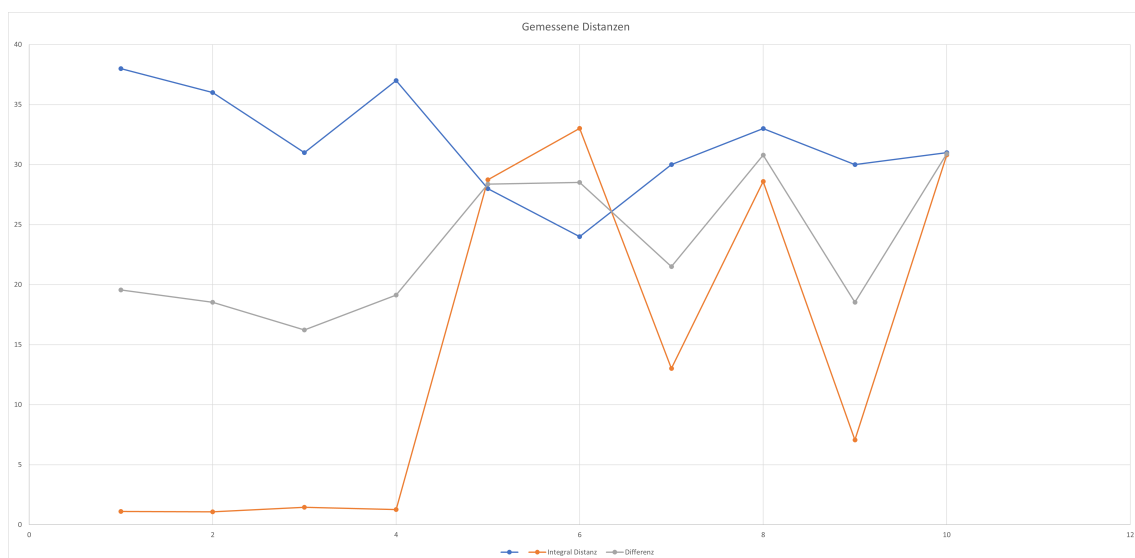


Abbildung 6.1: Distanzen — Alle Tests

6.1.2 Fehler

Die zwei weiteren Graphen zeigen die Fehler bei 10 Sekündigem Stillstand. Der exponentielle Drift bei der Integralen Formel ist typisch.

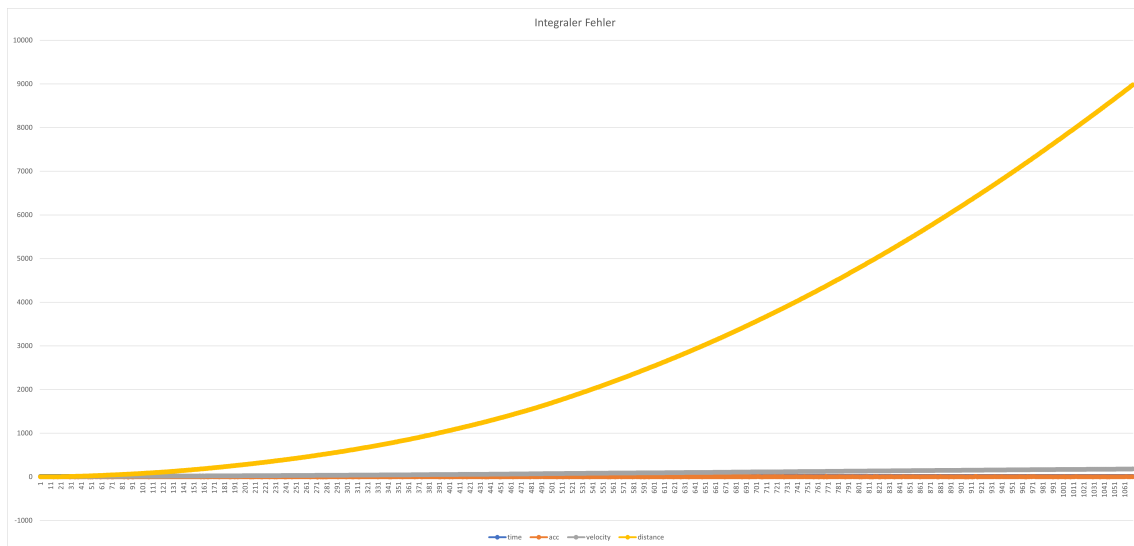


Abbildung 6.2: Integrale Formel — Drift

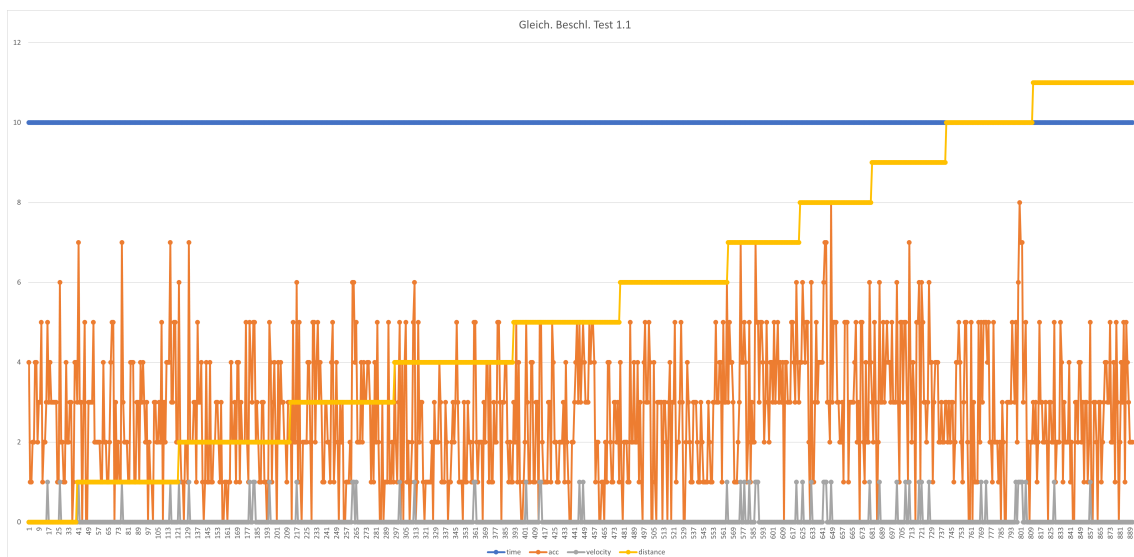


Abbildung 6.3: Gleichförmige Beschl. Formel — Drift

7 Fazit

Die Distanzmessung über den MPU9250 funktioniert mit einem relativ großem Fehler, der es schwer macht die Daten direkt in ein 3D-Programm einzufügen.