



Archer-Tracking

Bewegungstracking für Sportler

Antonio Rehwinkel

5. 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 | Materialsuche | 4 |
| 1.2.2 | Möglichkeiten | 4 |
| 2 | Bewegungen, Analyse und bekannte Systeme | 5 |
| 2.1 | Analyse | 5 |
| 2.2 | Bewegung | 5 |
| 2.3 | IMU vs Kameratracking | 5 |
| 3 | Hardware | 7 |
| 3.1 | Arduino Nano 33 BLE | 7 |
| 3.2 | MPU9250 | 7 |
| 3.3 | Stromverbrauch | 8 |
| 4 | Bluetooth-Low-Energy | 9 |
| 4.1 | Datendurchsatz per BLE | 9 |
| 4.2 | Datengröße | 10 |
| 4.3 | Tatsächliche Übertragungsgeschwindigkeit | 10 |
| 5 | Software | 11 |
| 5.1 | Datenübertragung | 11 |
| 5.2 | Android-App | 11 |
| 5.2.1 | Rohdaten | 11 |
| 5.2.2 | Graph | 11 |
| 5.2.3 | Aufgezeichnete Daten | 12 |
| 5.3 | Arduino Firmware | 12 |
| 5.4 | Gleichmäßige und ungleichmäßige Beschleunigung | 12 |
| 5.4.1 | Gleichmäßige Formel | 13 |
| 5.4.2 | Integral | 13 |
| 5.4.3 | Tests zu den Messungen | 13 |
| 6 | Machine Learning | 15 |
| 6.1 | Datenauswahl und Dimensionen | 15 |
| 6.2 | Modell und Funktion | 15 |
| 7 | Fazit | 16 |

1 Vorwort

Mithilfe eines Beschleunigungssensoren kann man viele Bewegungen erforschen und vermessen. Mit meinem System sollen mehrere Beschleunigungssensoren dazu eingesetzt werden können, 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 verwertet werden können. Als Beispiel gilt hier für mich das Bogenschießen, bei dem selbst kleine Bewegungen immer wieder auf gleiche Weise ausgeführt werden müssen. Mit meinen Sensor sollen hier teure Kamerasysteme abgeschafft werden und es so jeden ermöglichen, selbst ohne Bogen oder Trainer bei sich Zuhause zu 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, das 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 3D 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.

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.

Ein weiterer Punkt der zu beachten war ist, dass der Schütze auf keinen Fall gestört werden darf. 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 im Schuljahr 2021/22 weitergeführt.

1.2 Vorgehensweise

1.2.1 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.

1.2.2 Möglichkeiten

Auf meiner Suche hatte ich die Idee, einen Ultraschallsensor am Schützen zu befestigen. Der Ultraschallsensor hätte am Boden befestigt werden können und um die Höhe der einzelnen Punkte des Schützen bestimmen. Ebenfalls wäre eine Kabelführung für schnellere Datenübertragung und 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.

2 Bewegungen, Analyse und bekannte Systeme

2.1 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 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.

2.2 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 allerdings in der Höhe des Zugarms. Um diese zu messen muss man die Erdanziehungskraft der Z-Achse herausrechnen.

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 höherem Standard.

2.3 IMU vs Kameratracking

Mein Projekt überschneidet sich in seinen Zielen häufig mit Tracking das bei VR-Brillen eingesetzt wird. Hier wird zur Feststellung der Position des Spielers häufig eine Kombination aus Kameratracking und Infrarot-LED.

Hierbei muss der Spieler die Fernbedienungen festhalten die die Infrarot-LEDs beinhalten, während die Kameras im Raum so verteilt werden müssen das der Spieler immer erkannt wird.

Die Neigung des Kopfes und der Hände werden auch hier häufig Mithilfe eines IMU bestimmt.

Da diese Systeme viel Platz benötigen, viel Geld kosten und für die Bildverarbeitung häufig eine große Rechenkraft benötigen ist dieses System nicht für viele Privatanutzer sinnvoll oder bieten einen Bewegungsfreiraum der Sport zu lässt.

3 Hardware

3.1 Arduino Nano 33 BLE

Der Arduino Nano 33 BLE ist wie der Name schon sagt 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 genannt Bluetooth-Low-Energy, mit allen anderen Bluetooth-Geräten ab der Bluetooth Version 4.0 kabellos zu kommunizieren.

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

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 spielen ihm nur Pluspunkte ein.

3.2 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. 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.

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

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 (150*250), der geringe Energieverbrauch (3,5mA wenn alle Sensoren ausgelesen werden), die hohe Genauigkeit und 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.

3.3 Stromverbrauch

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

Der Stromverbrauch lässt so berechnen und erleichtert die Korrekte Batterie-Wahl.

Die Verwendeten Formeln: $P = U \cdot I$

$Ah \cdot V = Wh$

$Wh \cdot W = t \quad (U \cdot I \cdot t) / U \cdot I = t$

So verbraucht der Arduino

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

Die Verschiedenen Batterien-Typen stehen in der folgenden Tabelle:

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, weniger Platz und eine bessere Differenz zwischen Cut-Off-Spannung zu angestotener Spannung.

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

4 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 damit 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.

Hierdurch kann der Client bis zu??? Server abfragen ohne sich mit diesen verbinden zu müssen. Jeder Server kann unbegrenzt Charakteristiken anbieten, diese Stellen verschiedenen Datensätze dar, die vom Client abgefragt werden können.

Laut Dokumentation beträgt der Maximale Datensatz 244 Bytes pro Paket bei aktiviertem DLE. Diese Funktion ließ ich ausgeschaltet, wodurch ich Maximal 27 Bytes pro Paket versenden kann.

4.1 Datendurchsatz per BLE

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

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

$$\text{Zeit} = \text{Leer} + \text{IFS} + \text{Data} + \text{IFS} \text{ Leer} = \text{leerespacket}(\text{größe}) / \text{datarate} \quad (4.1)$$

Für mich heißt das:

$$\text{leerGröße} = 2 + 4 + 2 + 3 = 11 \text{ Bytes} == 88 \text{ bits} \quad (4.2)$$

und die Sendezeit für das leere Paket beträgt damit:

$$\text{leerZeit} = 88 / 2\text{Mbps} = 44 \text{ Mikro Sekunden.} \quad (4.3)$$

Für ein volles Datenpaket brauche ich:

$$\begin{aligned} \text{Voll} &= 44 + 2 \cdot 150 + 2 + 4 + 2 + 4 + 20 + 3 = 44 + 300 + 35 = 379 \text{ Bytes} \cdot 8 = 3032 \text{ Bits Vollzeit} \\ &= 3032 / 2 = 1,516 \text{ Mikrosekunden} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Für ein gesaamtes Datenpaket brauche ich damit mindestens:

$$\begin{aligned} \text{Zeit} &= 44 + 2 \cdot 150 + 1,516 = 345,516 \text{ Mikrosekunden} \\ &= 88 / 2 + 2 \cdot 150 + (2 + 4 + 2 + 4 + 20 + 3) \cdot 8 / 2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

4.2 Datengröße

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

$$\begin{aligned} \text{Vorkommastellen (3) + Komma (1) + Dezimalstellen (2) + Terminierung (1)} &= 7 \text{ Char} \end{aligned} \quad (4.6)$$

1 Char entspricht 1 Byte, somit gilt:

$$\begin{aligned} 9 \text{ Sensoren} \cdot 7 \text{ Byte} &= 63 \text{ Byte} \\ 63 \text{ Byte} / 27 \text{ Byte} &= 2,3 \text{ Datenpakete pro alle Sensoren} \end{aligned} \quad (4.7)$$

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

4.3 Tatsächliche Übertragungsgeschwindigkeit

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 anzeigen. Die Daten werden hierfür über das bereits erklärte BLE an das Handy gesendet.

5.1 Datenübertragung

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

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

Dies wird beim Arduino durch Abfrage einer Bibliothekseigenen Funktion sichergestellt, die erst auslöst wenn neue Daten des MPU9250 erzeugt wurden.

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

5.2 Android-App

Zur Erstellung der Android-App wurde AppInventor und die BLE-Extension verwendet.

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 mindestens Float-Werten gepaart werden. Die Split-Funktion von AppInventor sucht nach “—” als Trennzeichen und spaltet hier die Werte. Diese werden in ein Array gespeichert welches später die einzelnen aktuellen Werte ausgeben kann. Es gibt insgesamt 3 Möglichkeiten die Daten anzeigen zu lassen.

5.2.1 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.

5.2.2 Graph

Die 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.

5.2.3 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.

5.3 Arduino Firmware

Das Programm auf dem Arduino Nano 33 Ble stellt zu Beginn eine I²C Verbindung mit dem MPU9250 her. Diese Verbindung wird über die Wire-Bibliothek im Fast-Mode (Frequenz:400 000) hergestellt. Das BLE-Objekt zur Kommunikation mit dem Boardeigenem Chip wird ebenfalls initialisiert.

Sobald eine BLE-Verbindung steht, fragt der Arduino den Sensor ab. Sollte dieser neue Daten bereitgestellt haben, werden die Daten in einem String verbunden und über die zu den Daten gehörende Characteristic veröffentlicht. Dabei ist die Characteristic so eingestellt das verbundene Geräte eine Nachricht bekommen, sobald der Wert der Characteristic sich verändert.

Der Motion-Processor wird von der Bibliothek verwendet und kann so die Roh-Daten des Sensors mit einem Tief-Pass-Filter vorverarbeiten. Weitere Datenverarbeitung übernimmt der Arduino nicht, um eine möglichst hohe Datenrate zu garantieren.

5.4 Gleichmäßige und ungleichmäßige Beschleunigung

Um die Distanz aus der gemessenen Beschleunigung zu berechnen gibt es 2 mögliche Wege.

Der erste Weg berechnet die Distanz mittels der Formel für gleichmäßig Beschleunigte Bewegungen. Die gemessene Bewegung ist allerdings nicht gleichmäßig, womit dieser Ansatz prinzipiell falsch ist.

Allerdings lieferte diese Formel die besseren Ergebnisse bei Tests.

Der zweite Weg verwendet Integrale, ein Ansatz der auch von verschiedenen anderen Forschern auf diesem Gebiet verfolgt wird. Um von Beschleunigung auf Distanz zu kommen muss man zwei mal integrieren.

Das Problem das schon beim ersten Integral auftritt ist, das Mess-Fehler von sogenannten Rauschen zu Drift wechseln. Dieser Fehler verstärkt sich beim zweiten integrieren weiter und liefert so schnell ungenaue Werte.

Als Zeit wird die Frequenz mit der der Sensor Daten misst genommen. Hierfür wird die Frequenz in Zeitabschnitte——Zeitperioden umgerechnet.

5.4.1 Gleichmäßige Formel

Die Formel für gleichmäßige Beschleunigung berechnete die Distanz in meinen Versuchen mit einer Genauigkeit von ± 10 cm auf 30cm Teststrecke. Wurden hierbei ebenfalls negative Beschleunigungen gemessen wirkten sich diese direkt auf die Distanz aus. Dies stellte ein Problem beim abbremsen am Ende der Teststrecke dar. Die Werte sanken wieder auf null.

Aus diesem Grund sind nur positive Werte für diese Funktion zugelassen. Hier der Code-Ausschnitt aus der Berechnung.

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

```
if (acc > 0) {  
  t = (freq / 1000); //hz is not time but frequenzy  
  
  distance = (distance) /*+ (velocity * t) */ + (acc * (t * t) * 0.5);  
  velocity = acc * t;  
}
```

5.4.2 Integral

Die Berechnung der Distanz über Integrale ist “The way to go” 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 +70cm auf einer Strecke von 30cm. 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 auf, 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;
```

5.4.3 Tests zu den Messungen

Einer der insgesamt 4 Tests zur Distanz mit der gleichmäßigen Formel:

Einer der insgesamt 5 Tests zur Distanz mit der Integral-Formel:

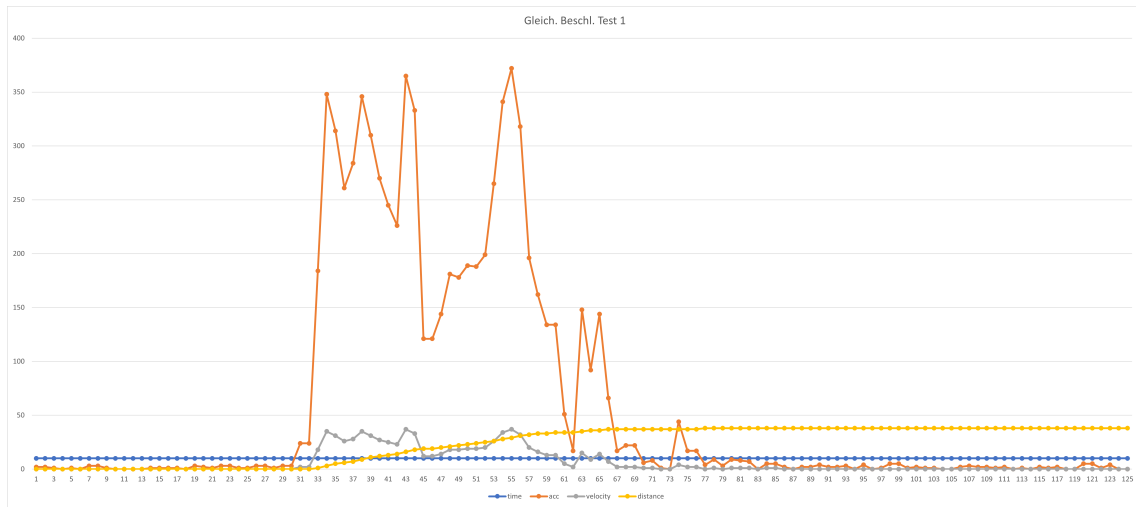


Abbildung 5.1: Gleichmäßige Formel — Test 1

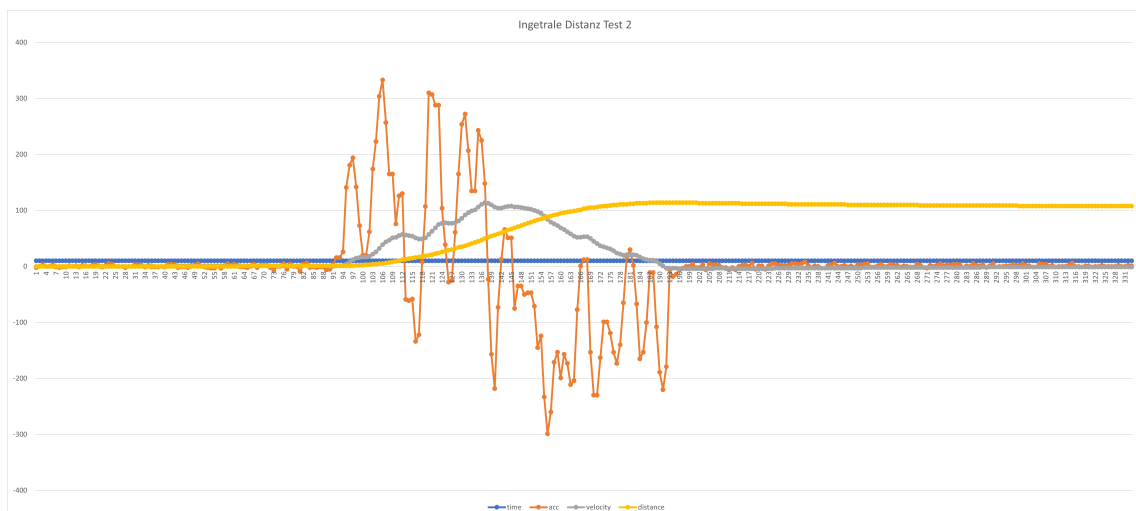


Abbildung 5.2: Integrale Formel — Test 2

6 Machine Learning

6.1 Datenauswahl und Dimensionen

6.2 Modell und Funktion

7 Fazit