

Sensordatenverarbeitung

ACCELEROMETER (5B)

(11.-15.11.24)



Was ist ein Inertialsensor?

- auch Inertial Measurement Unit, IMU genannt
- misst Bewegung ohne externe Referenz
- Accelerometer misst Beschleunigung (m/s^2) in 3 Achsen
 - Laut Duden: Beschleunigungssensor
 - \rightarrow 3D Translation (man sagt auch Position)
 - zweite Ableitung der Position
- Gyrometer misst Drehrate ($^\circ/\text{s}$) in 3 Achsen
 - Drehratensensor
 - \rightarrow 3D Rotation (man sagt auch Orientierung)
 - erste Ableitung der Orientierung
- Hier: Funktionsprinzip und was eine IMU genau misst
 - Nicht technisch detailrichtiger Aufbau
 - Formel (Beschleunigung, Drehrate) \rightarrow Pose



Quelle: XSens

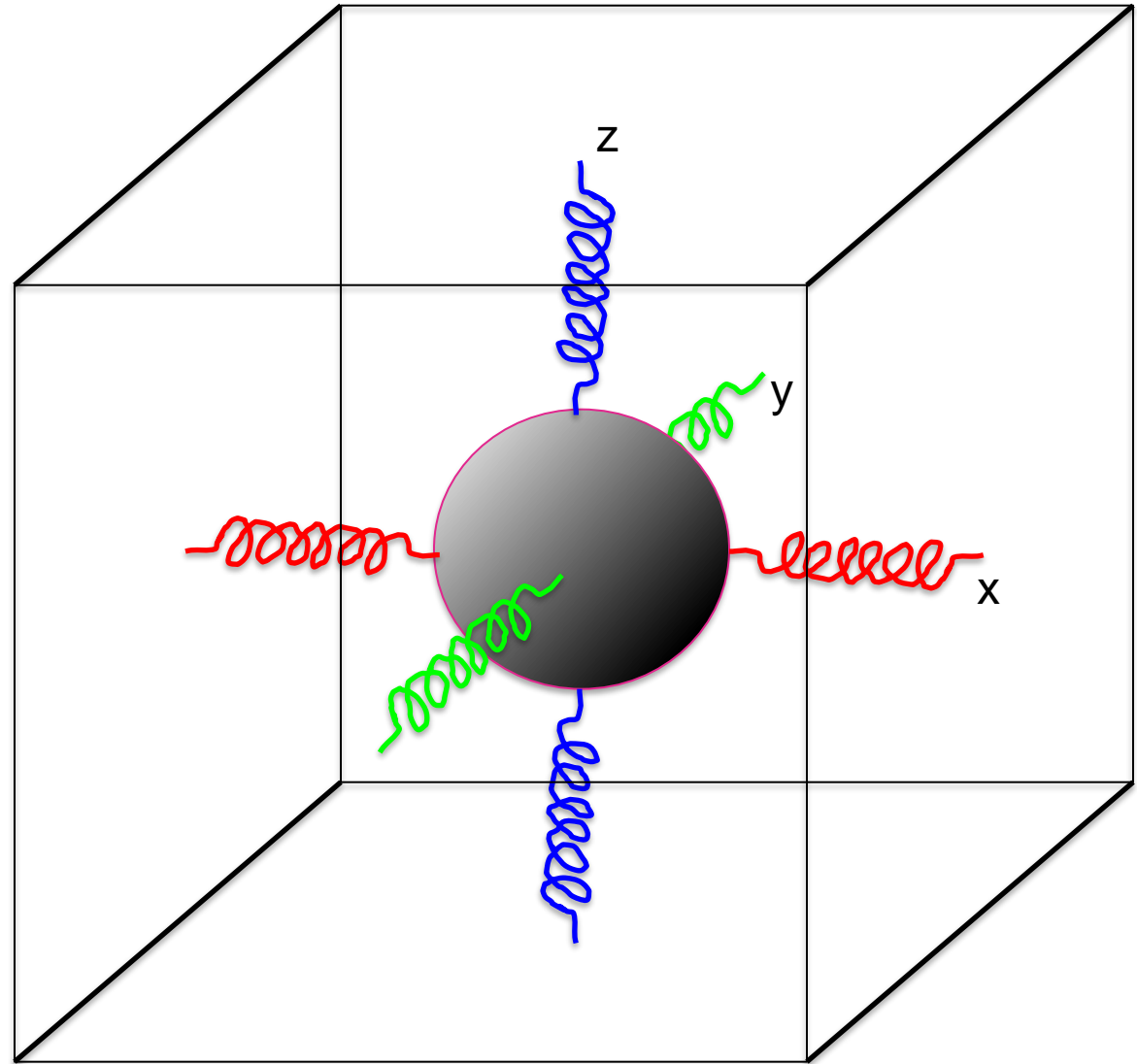


Quelle:
Honeywell



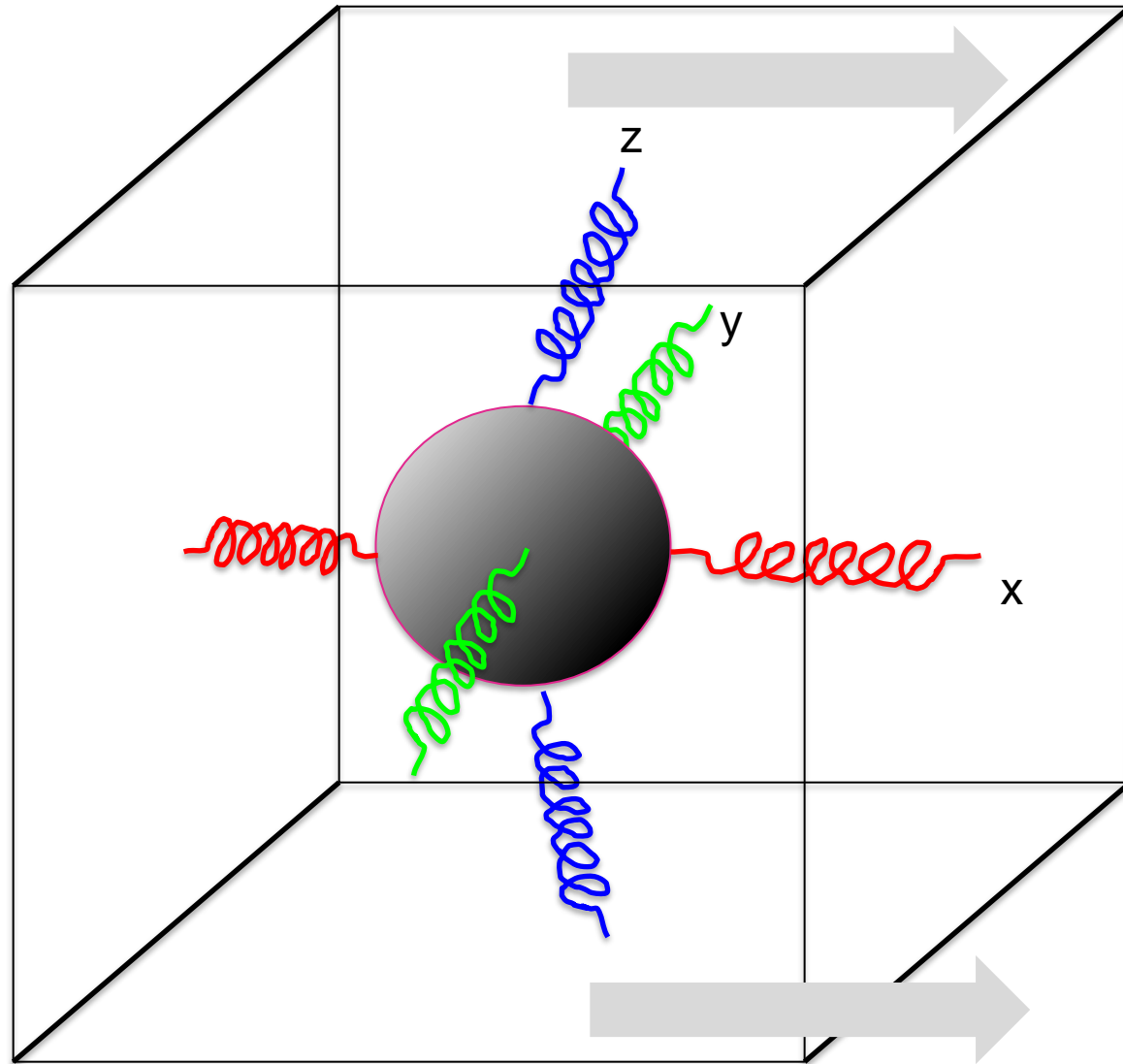
Was misst ein Accelerometer?

- Kraft (-vektor) der benötigt wird um eine Masse an einer festen Position im Sensor zu halten
- Damit Beschleunigung der Masse ($F=m \cdot a$)
- 3 Achsen
 - Rot, Grün, Blau für X, Y, Z
- Schwerkraft diskutieren wir später!



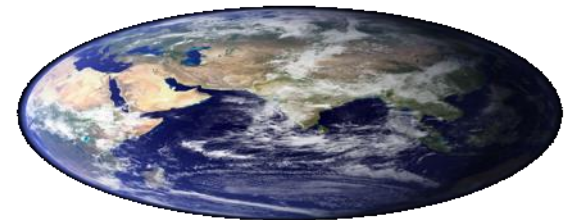
Was misst ein Accelerometer?

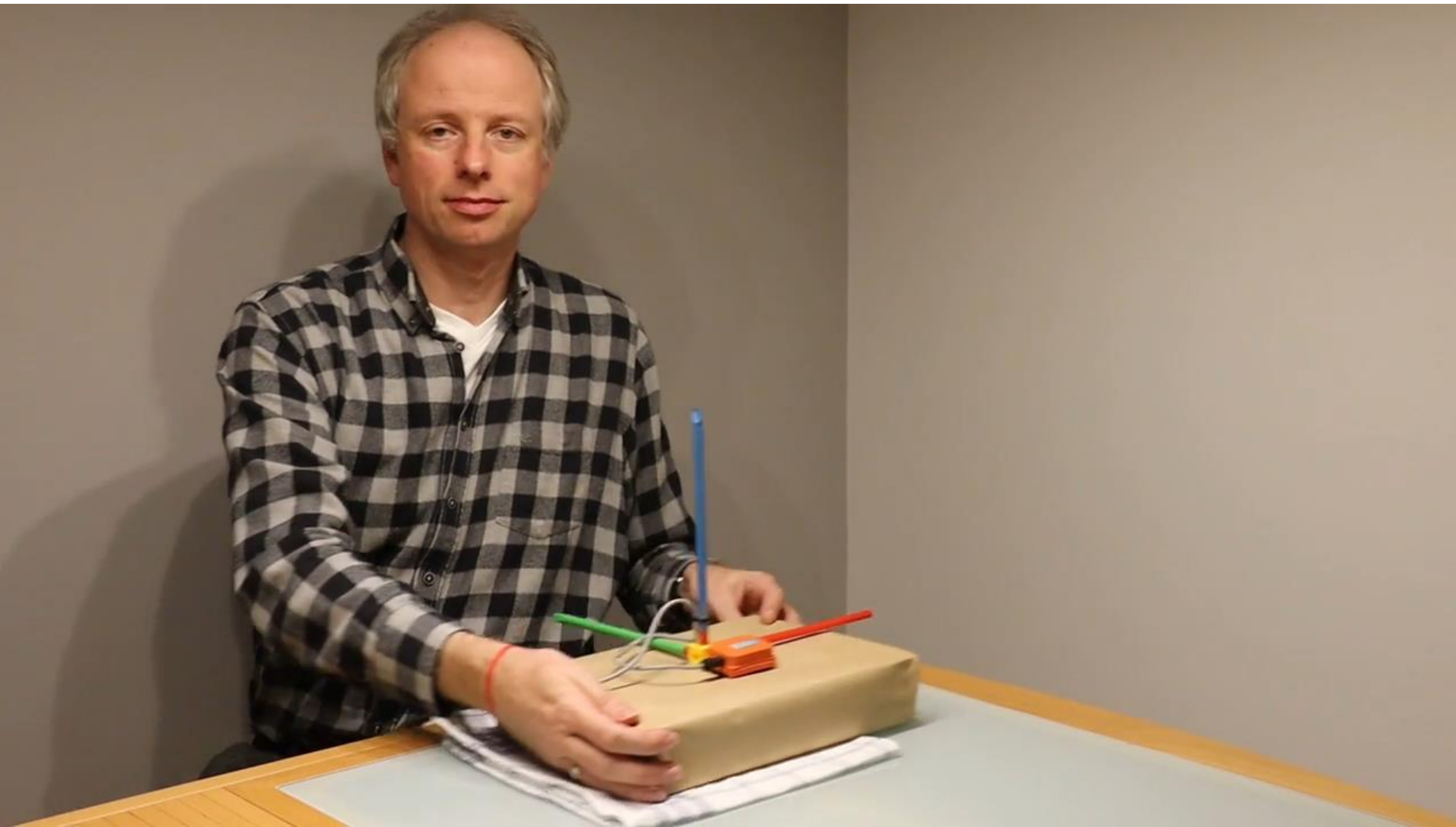
- Kraft (-vektor) der benötigt wird um eine Masse an einer festen Position im Sensor zu halten
- Damit Beschleunigung der Masse ($F=m \cdot a$)
- 3 Achsen
 - Rot, Grün, Blau für X, Y, Z
- Schwerkraft diskutieren wir später!





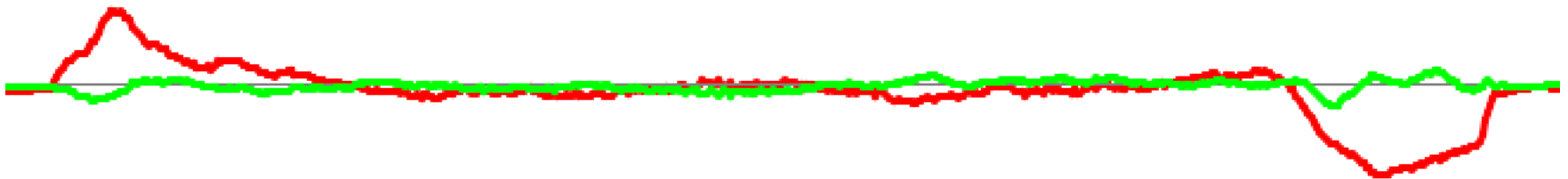
- Ziele
 - Intuition aufbauen:
Wie hängen anschauliche Bewegung und Messwerte zusammen?
 - Gleichung (Beschleunigung, Drehrate) → Pose schrittweise erarbeiten
- Hier vereinfacht diskutiert
 - Annahme: die „Erde ist eine Scheibe“
 - Valide Näherung für low-cost Sensoren





Schritt nach +X

- Drei Phasen



Beschleunigung

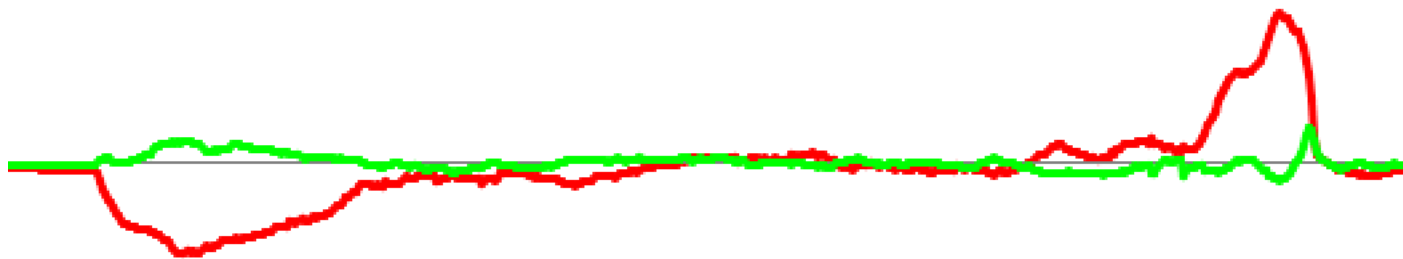
Bewegung mit
konstanter Geschwindigkeit

Verzögerung





- Selben drei Phasen
- Vorzeichen umgedreht



Beschleunigung

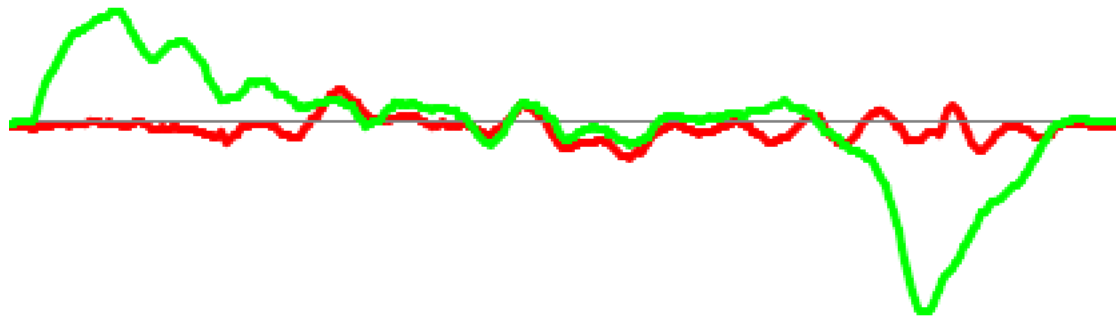
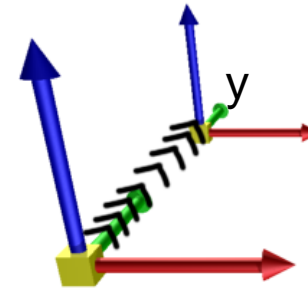
Bewegung mit
konstanter Geschwindigkeit

Verzögerung





- Selben drei Phasen
- „Das selbe in Grün“



Beschleunigung

Bewegung mit
konstanter Geschwindigkeit

Verzögerung



- Erste Idee für eine Formel Beschleunigung \rightarrow Position*
- Aufsummieren der Beschleunigung zur Geschwindigkeit
- Aufsummieren der Geschwindigkeit zur Position
- Fachwort: Aufintegrieren
- Position p_t
- Geschwindigkeit v_t
- Beschleunigung (Accelerometer-Messung) a_t
- Zeitschritt δt

$$v_{t+\delta t} = v_t + \delta t a_t$$

$$p_{t+\delta t} = p_t + \delta t v_t$$

*ACHTUNG: Vereinfacht und noch nicht richtig!

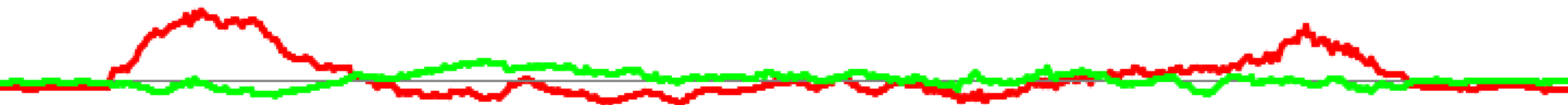
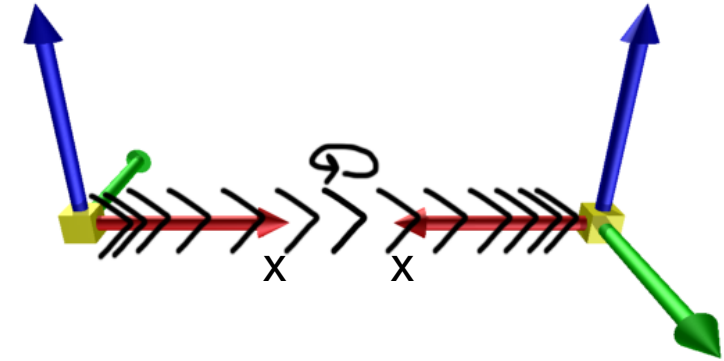


Schritt nach +X mit 180° Z-Rotation

AG MSIS



- Selben drei Phasen
- Aber Beschleunigung und Verzögerung beide positiv
- Konsequenzen
 - nicht im Sensorframe aufintegrieren!
 - müssen im Weltframe aufintegrieren
 - Sensordaten nach Weltframe umrechnen



Beschleunigung

Bewegung mit
konstanter Geschwindigkeit

Verzögerung



- Zweite Idee für eine Formel Beschleunigung \rightarrow Position*
- Position $p_t^{(W)}$ in Weltkoordinaten
- Geschwindigkeit $v_t^{(W)}$ in Weltkoordinaten
- Beschleunigung (Accelerometer-Messung) $a_t^{(It)}$ in Inertialsensorkoordinaten
- Zeitschritt δt
- Orientierung Inertialsensor-in-Welt $R_{W \leftarrow It}$ (woher die kommt? \rightarrow später)

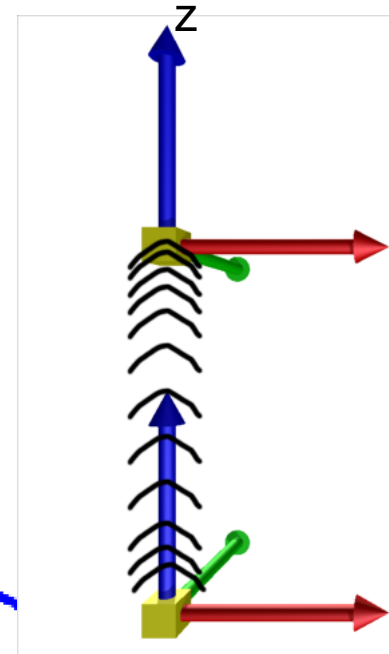
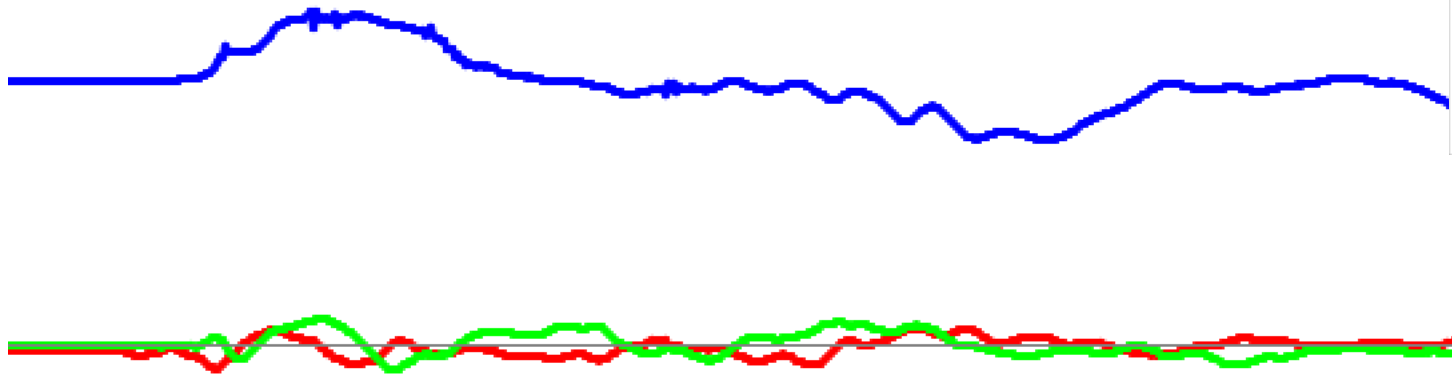
$$v_{t+\delta t}^{(W)} = v_t^{(W)} + \delta t R_{W \leftarrow It} a_t^{(It)}$$
$$p_{t+\delta t}^{(W)} = p_t^{(W)} + \delta t v_t^{(W)}$$

*ACHTUNG: Vereinfacht und noch nicht richtig!





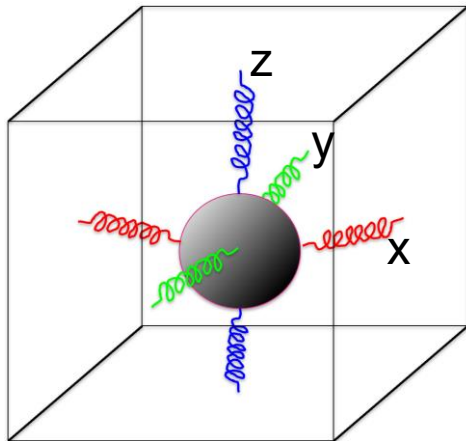
- Erst Ruhe, dann Schritt nach +Z
 - Positive Z-Beschleunigung in Ruhe
 - Darüber die selben drei Phasen
- Konsequenz
Accelerometer misst Beschleunigung MINUS
Erdbeschleunigung



Beschleunigung Bewegung mit Verzögerung
konstanter Geschwindigkeit



- Im Fall spürt man Schwerelosigkeit (0g)
- Accelerometer misst 0 \leftrightarrow
Accelerometer fällt mit Erdbeschleunigung
- Accelerometer in Ruhe misst die Beschleunigung die es am Fallen hindert
- Erdbeschleunigung auf Messwert aufaddieren
- Gravitation wirkt auf die Masse ohne durch die Federn zu gehen



Von CuttyP, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=745805>



- Richtige Idee für eine Formel Beschleunigung \rightarrow Position*
- Position $p_t^{(W)}$
- Geschwindigkeit $v_t^{(W)}$
- Beschleunigung (Accelerometer-Messung) $a_t^{(I_t)}$
- Zeitschritt δt
- Orientierung Inertialsensor-in-Welt $R_{W \leftarrow I_t}$
- Gravitationsvektor $g^{(W)}$ (nach unten)

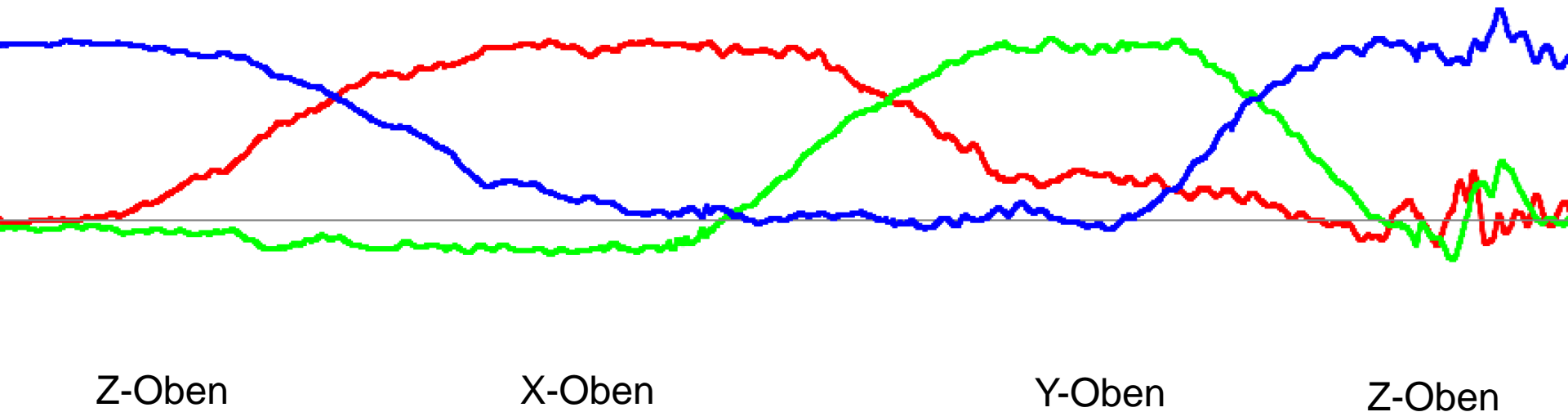
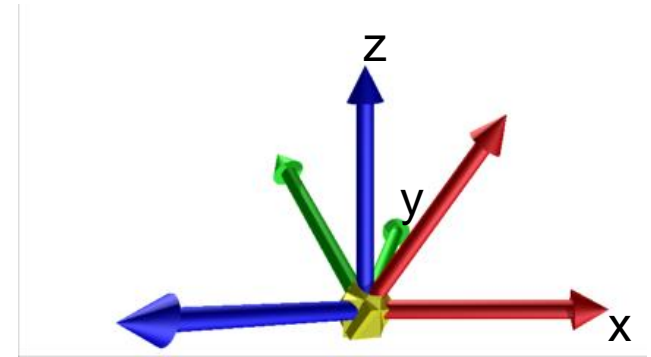
$$v_{t+\delta t}^{(W)} = v_t^{(W)} + \delta t (R_{W \leftarrow I_t} a_t^{(I_t)} + g^{(W)})$$
$$p_{t+\delta t}^{(W)} = p_t^{(W)} + \delta t v_t^{(W)}$$

*Immer noch vereinfacht





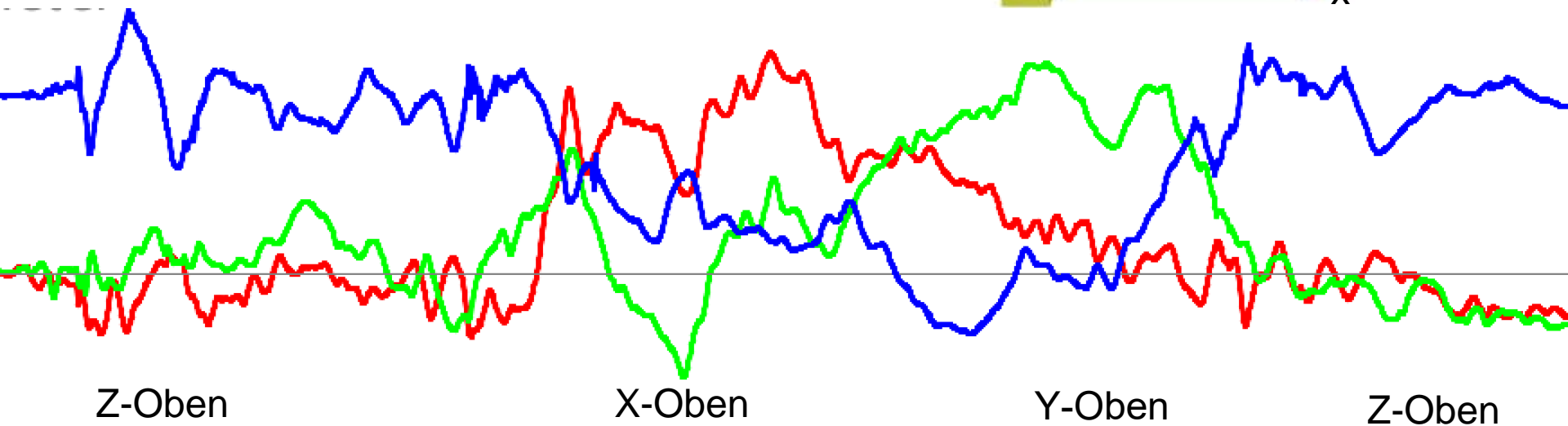
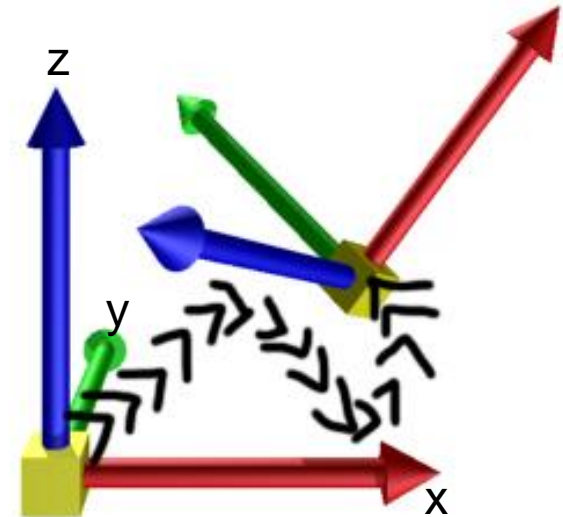
- Drehung in verschiedene Richtungen bei fester Position
- Accelerometer-Messung zeigt immer nach oben
- Nutzung als „Neigungssensor“



Ruckelige Drehung



- Drehung in verschiedene Richtungen mit gleichzeitiger Translationsbewegung
- Accelerometer-Messung ist überlagert von Beschleunigungen
- zeigt aber im Mittel nach oben



- Inertialsensor besteht aus Accelerometer und Gyrometer
- Accelerometer
 - Misst Beschleunigung MINUS Gravitation in Sensorkoordinaten
 - Integration zu Geschwindigkeit und Position in Weltkoordinaten

$$v_{t+\delta t}^{(W)} = v_t^{(W)} + \delta t (R_{W \leftarrow I_t} a_t^{(I_t)} + g^{(W)})$$
$$p_{t+\delta t}^{(W)} = p_t^{(W)} + \delta t v_t^{(W)}$$



- Accelerometer X/Y
 - Schritt +X
 - Schritt -X
 - Schritt +Y
 - Schritt +X mit Rotation 180° Z
- Accelerometer X/Y/Z
 - Ruhe, Schritt nach +Z
 - Ruhige Drehung am Ort
 - Ruckelige Drehung am Ort
- Gyrometer
 - Rotation um Z vor und zurück
 - Rotation um +Z+Y+X-Y jeweils 90°
- Orientierung (aus Gyrometer integriert)
 - Rotation um +Z+Y+X-Y jeweils 90°
- Pose (aus Gyrometer und Accelerometer integriert)
 - Sensor in Ruhe
 - Sensor hochgehoben und genau wieder zurückgesetzt

- DFKI, Projektabschlussbericht SIRKA
- XSens, MIT
- Honeywell
- Von CuttyP, Fallturm in Bremen,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=745805>, CC BY-SA 3.0,
- Udo Frese, Illustrationen zu Bewegungen eines Inertialsensors
- Udo Frese, Inertialsensor Erklärvideo