

**Sensordatenverarbeitung**

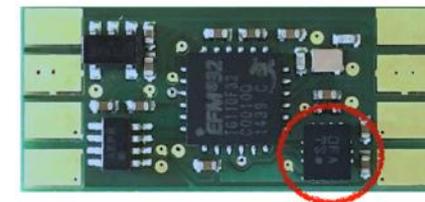
# **ACCELEROMETER (5B)**

**(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
  - → 3D Translation (man sagt auch Position)
  - zweite Ableitung der Position
- Gyrometer misst Drehrate ( $^\circ/s$ ) in 3 Achsen
  - Drehratensensor
  - → 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) → Pose



Quelle: XSens

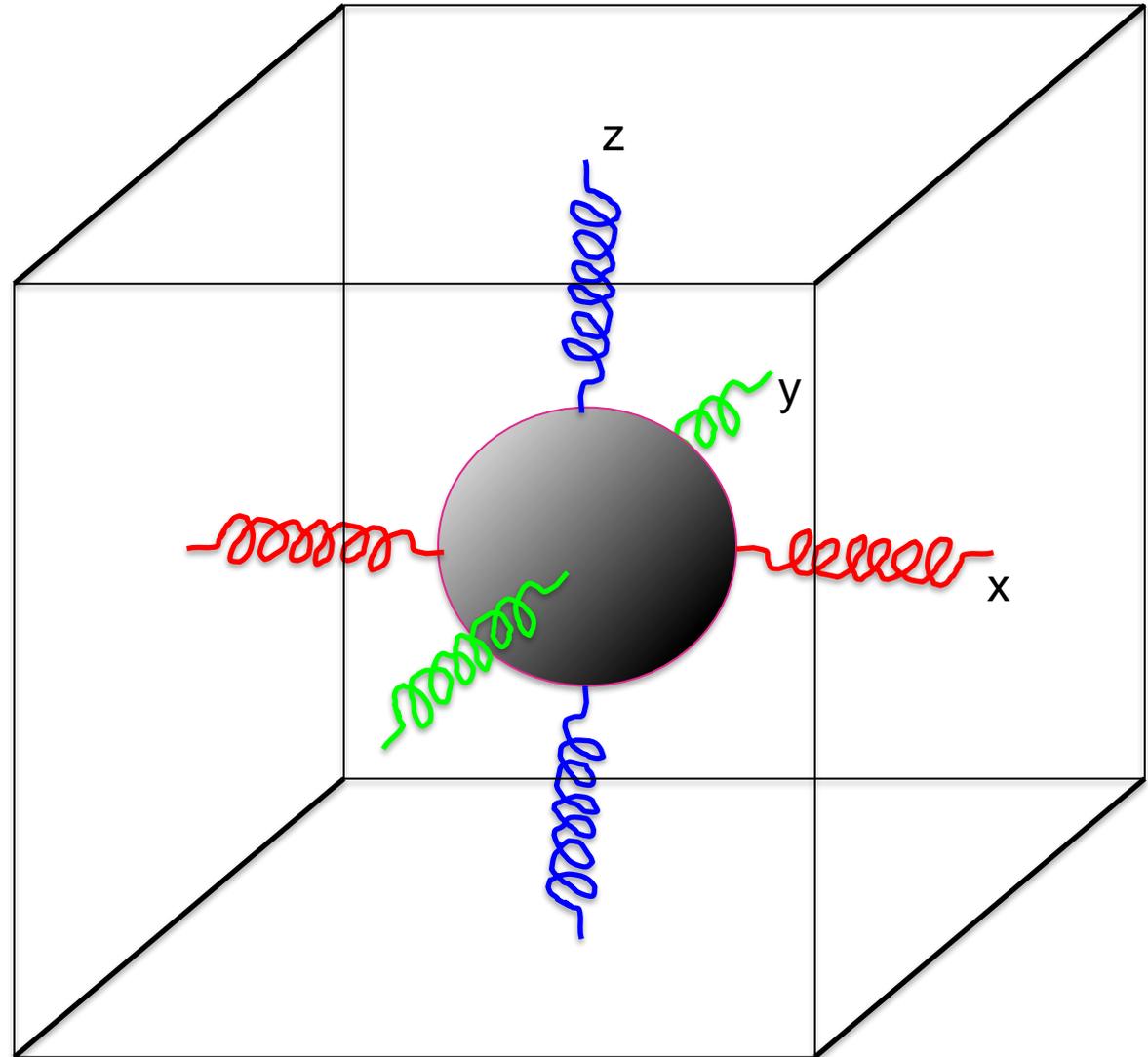


Quelle:  
Honeywell



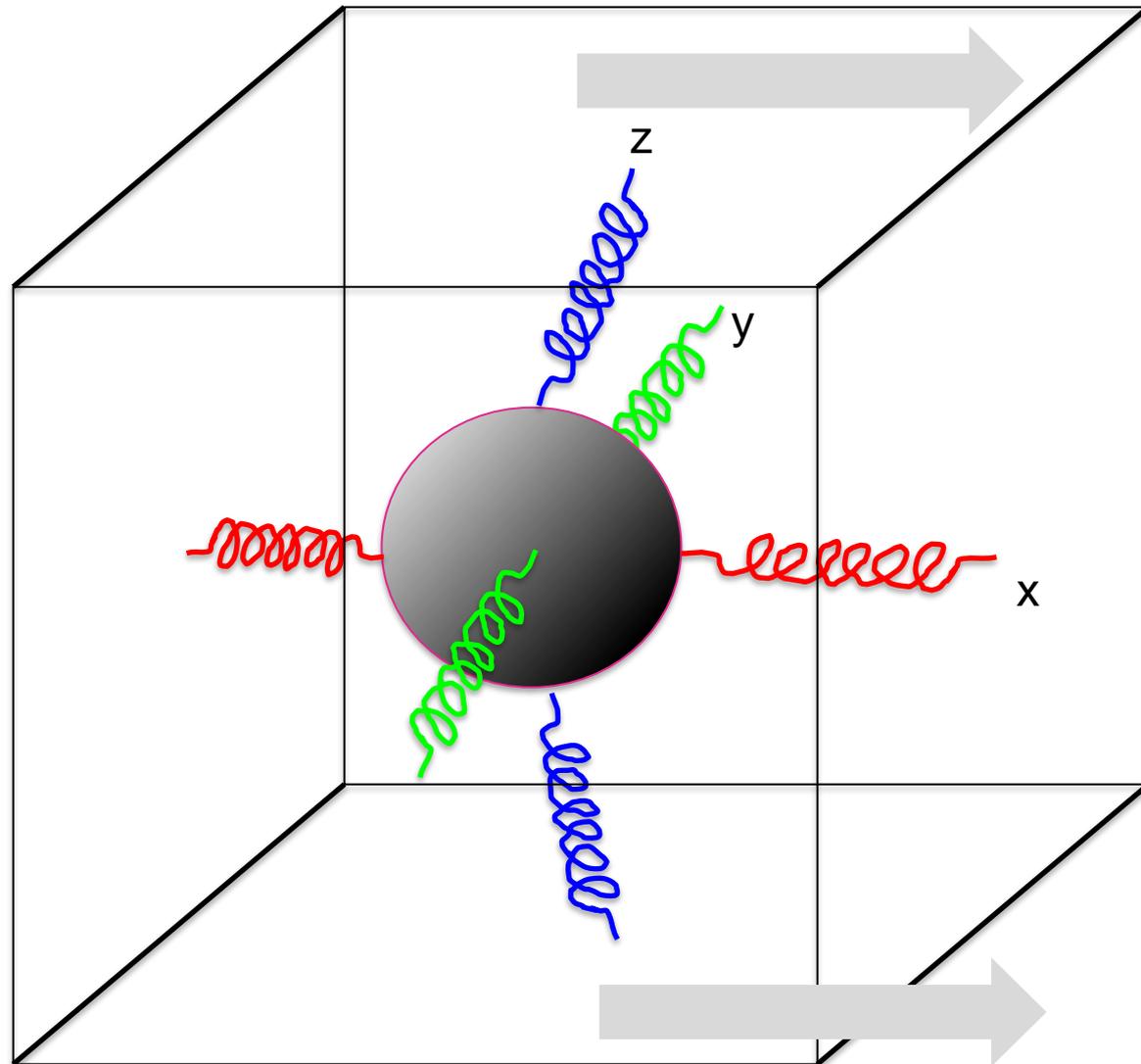
# Was misst ein Accelerometer?

- 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?

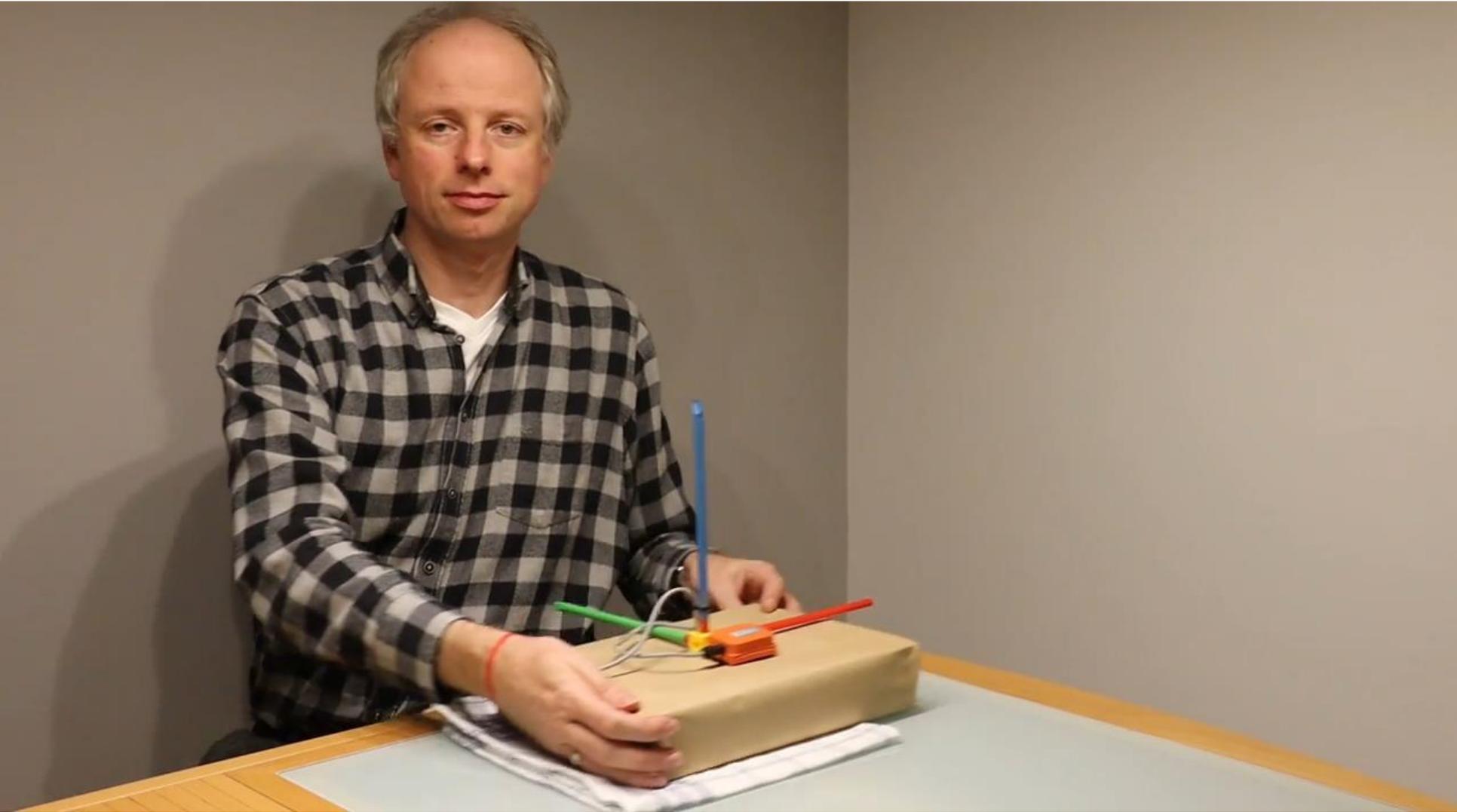
- Kraft (-vektor) der benötigt wird um eine Masse an einer festen Position im Sensor zu halten
- Damit Beschleunigung der Masse ( $F=m \cdot a$ )
- 3 Achsen
  - Rot, Grün, Blau für X, Y, Z
- Schwerkraft diskutieren wir später!





- 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





- Drei Phasen



Beschleunigung

Bewegung mit  
konstanter Geschwindigkeit

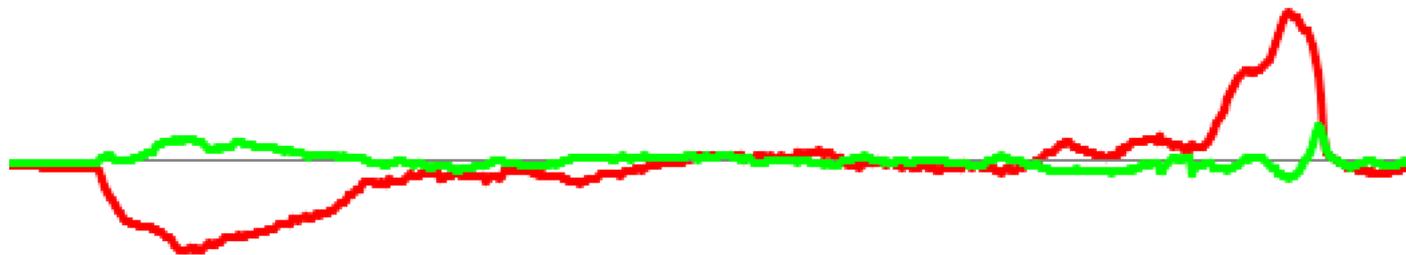
Verzögerung





# Schritt nach -X

- Selben drei Phasen
- Vorzeichen umgedreht



Beschleunigung

Bewegung mit  
konstanter Geschwindigkeit

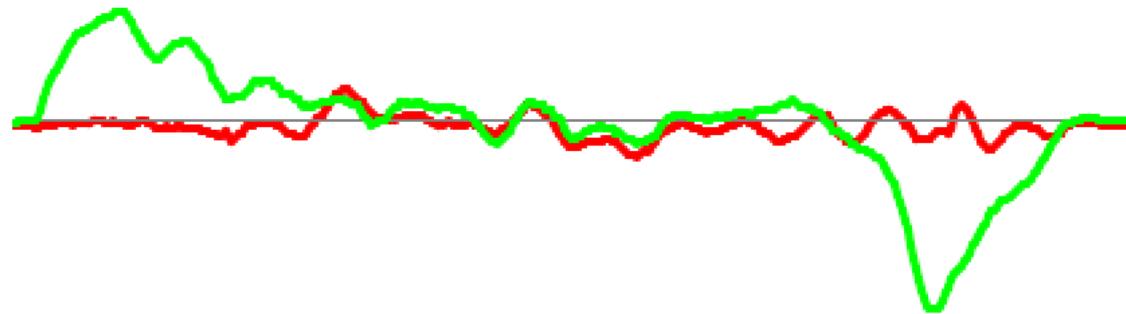
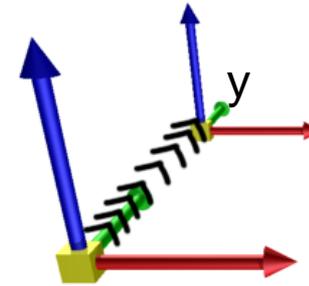
Verzögerung





# Schritt nach +Y

- 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  $\delta t$

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

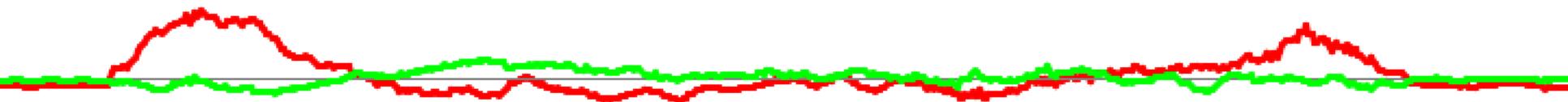
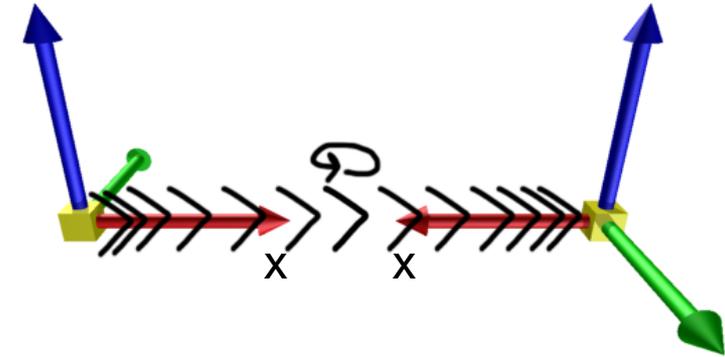
$$p_{t+\delta t} = p_t + \delta t v_t$$

\*ACHTUNG: Vereinfacht und noch nicht richtig!





- 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)  $a_t^{(I_t)}$  in Inertialsensorkoordinaten
- Zeitschritt  $\delta t$
- Orientierung Inertialsensor-in-Welt  $R_{W \leftarrow I_t}$  (woher die kommt?  $\rightarrow$  später)

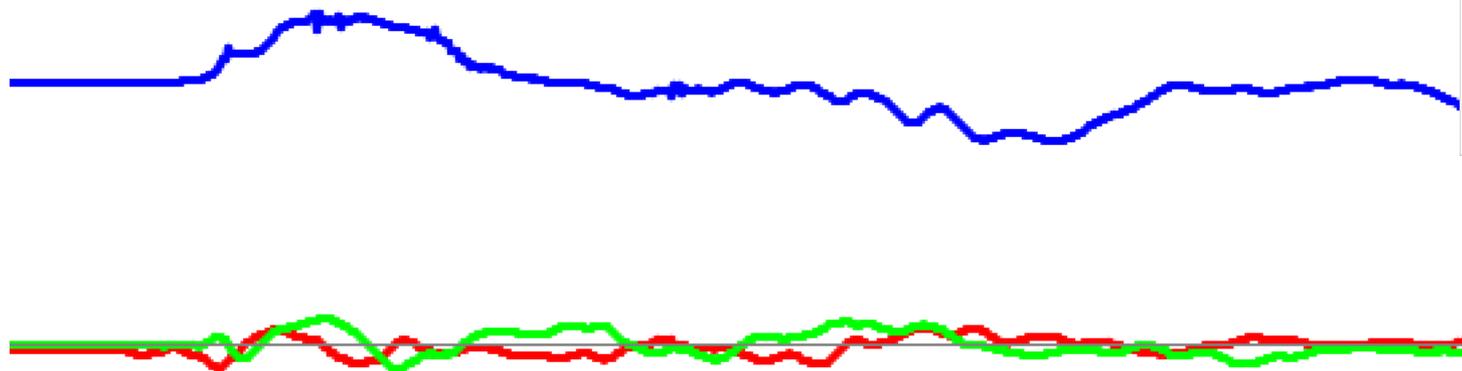
$$v_{t+\delta t}^{(W)} = v_t^{(W)} + \delta t R_{W \leftarrow I_t} a_t^{(I_t)}$$
$$p_{t+\delta t}^{(W)} = p_t^{(W)} + \delta t v_t^{(W)}$$

\*ACHTUNG: Vereinfacht und noch nicht richtig!

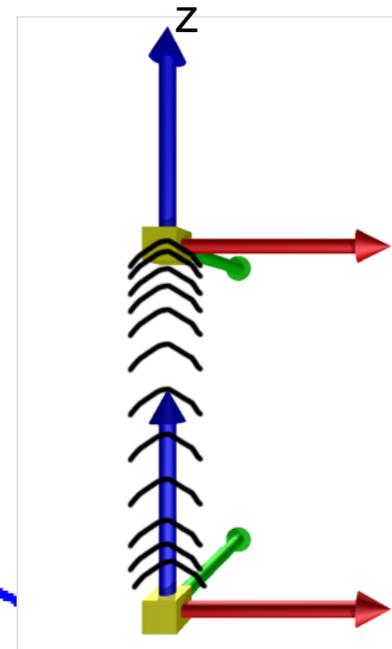




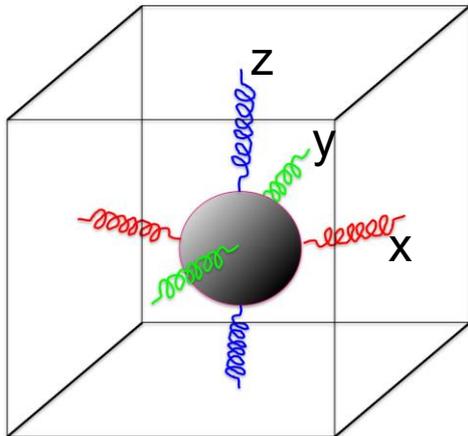
- Erst Ruhe, dann Schritt nach +Z
  - Positive Z-Beschleunigung in Ruhe
  - Darüber die selben drei Phasen
- Konsequenz  
Accelerometer misst Beschleunigung MINUS  
Erdbeschleunigung



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 CurtyP, 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  $\delta t$
- Orientierung Inertialsensor-in-Welt  $R_{W \leftarrow I_t}$
- Gravitationsvektor  $g^{(W)}$  (nach unten)

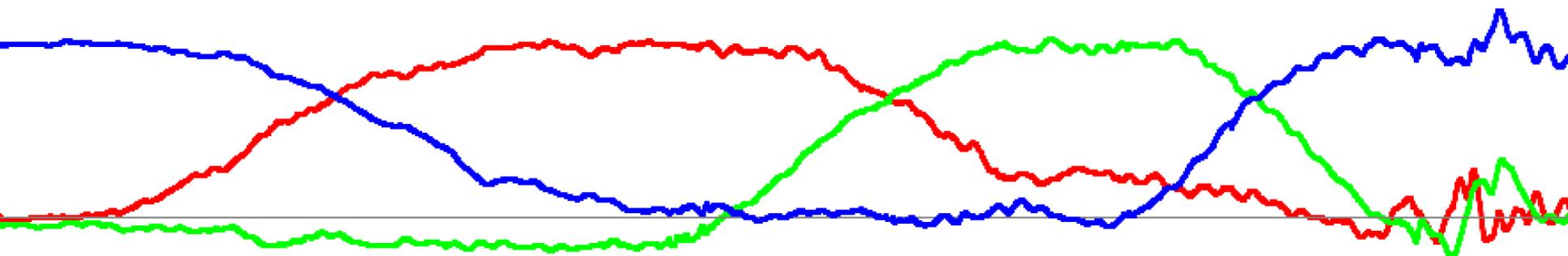
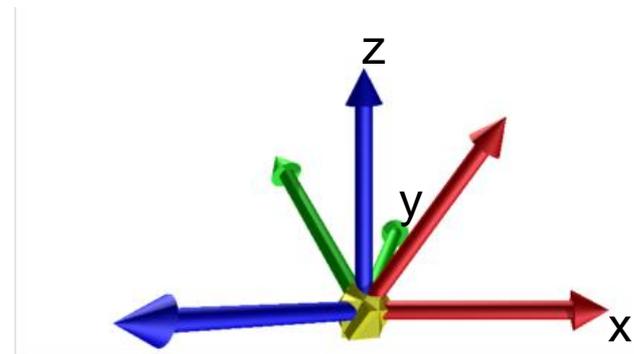
$$v_{t+\delta t}^{(W)} = v_t^{(W)} + \delta t (R_{W \leftarrow I_t} a_t^{(I_t)} + g^{(W)})$$
$$p_{t+\delta t}^{(W)} = p_t^{(W)} + \delta t v_t^{(W)}$$

\*Immer noch vereinfacht





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



Z-Oben

X-Oben

Y-Oben

Z-Oben

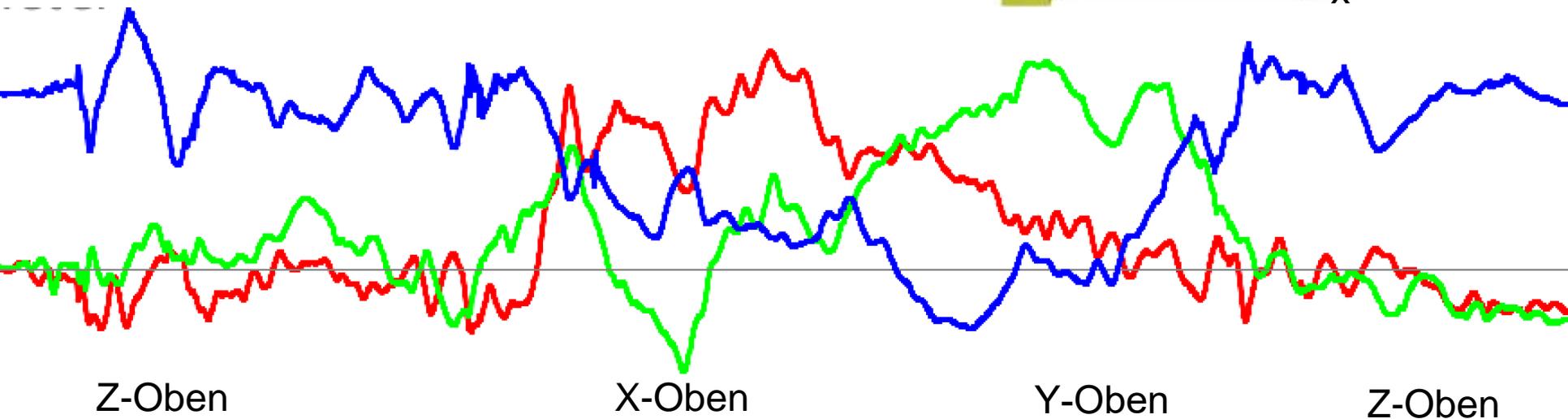
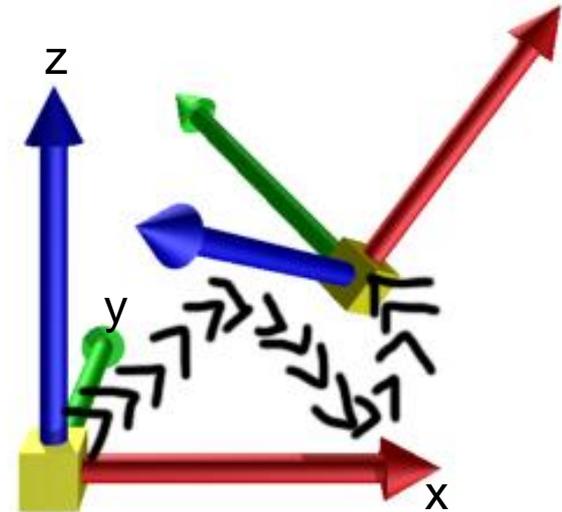


# Ruckelige Drehung



# 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 Weltkoodinaten

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



- 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