

# Würde Albert einem GPS vertrauen?

Relativitätstheorie im Alltag

Daniel Arnold

Eine Nacht mit Albert  
Bernisches Historisches Museum  
3. Juni 2016

# Was ist GPS?

---

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem

# Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Was ist GPS?

---

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Was ist GPS?

---

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



# Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Was ist GPS?

---

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



# Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Was ist GPS?

---

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



# Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



# Was ist GPS?

---

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Was ist GPS?

---

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



# Was ist GPS?

---

## GPS

- ermöglicht die genaue Positionsbestimmung
  - global
  - jederzeit
  - wetterunabhängig
- wurde seit 1973 vom amerikanischen Militär entwickelt
- kostet im Unterhalt rund 750 Millionen USD pro Jahr
- wurde und wird von anderen Nationen “kopiert”:
  - Russland: GLONASS
  - China: BeiDou
  - Europa: Galileo
  - ...

# Übersicht

---

1. Wie funktioniert GPS?
2. GPS und die Relativitätstheorie  
→ Würde Albert einem GPS einfach so vertrauen?
3. Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

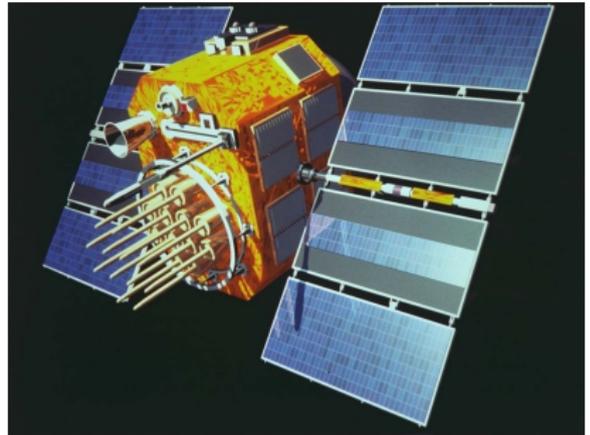
Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

Wie funktioniert GPS?

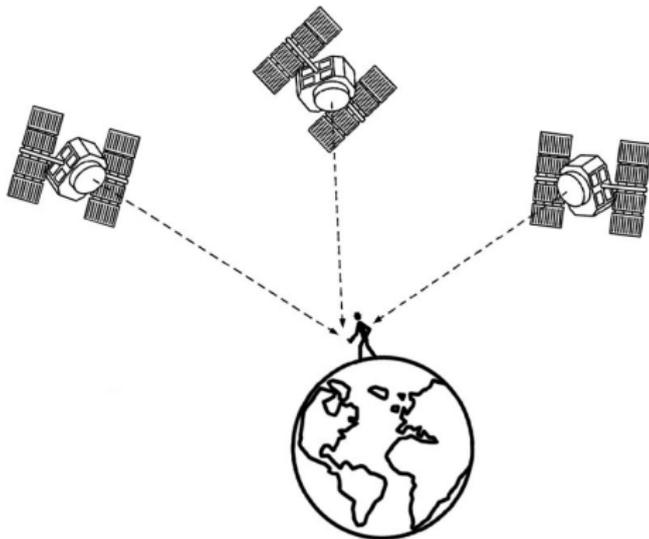
# Wie funktioniert GPS?

---

- GPS basiert zurzeit auf 32 Satelliten, welche die Erde in 20'200 km Höhe zweimal pro Tag umkreisen
- Jeder Satellit sendet laufend ein Funksignal Richtung Erde

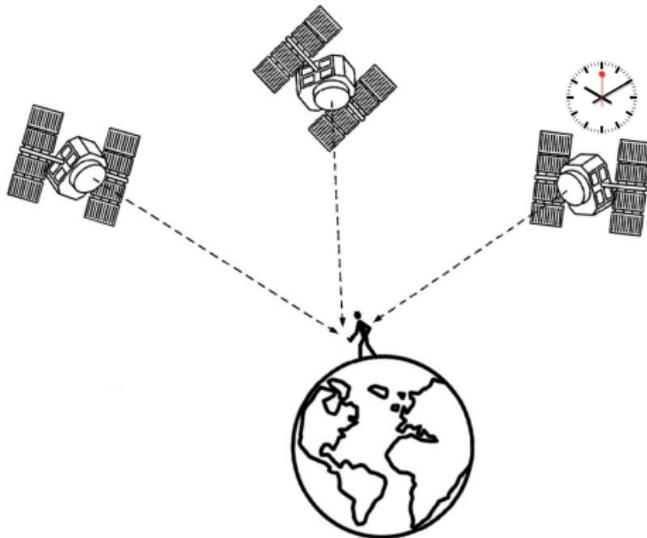


# Wie funktioniert GPS?



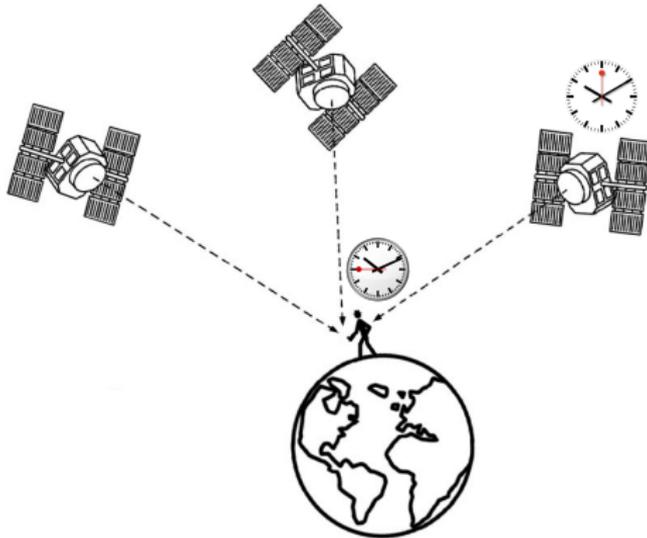
- Die Funksignale fliegen mit Lichtgeschwindigkeit  $c = 300'000$  km/sec vom Satelliten zum Empfänger.

# Wie funktioniert GPS?



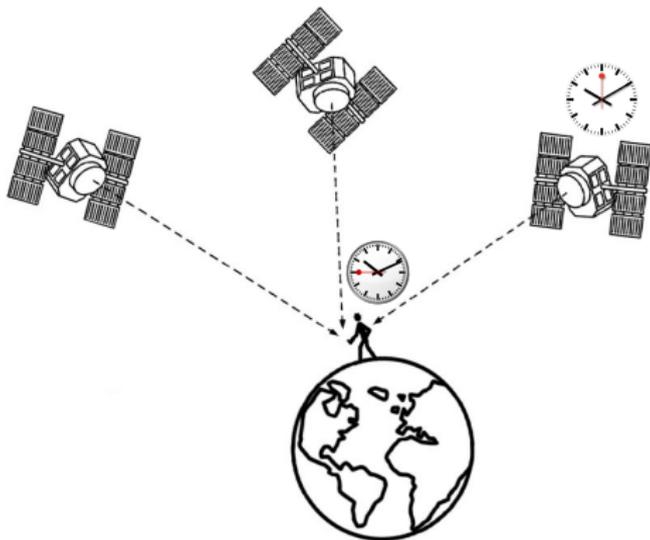
- Die Funksignale fliegen mit Lichtgeschwindigkeit  $c = 300'000 \text{ km/sec}$  vom Satelliten zum Empfänger.
- Jeder Satellit hat eine hochgenaue Uhr an Bord. Im Funksignal steht, wann dieses den Satelliten verlassen hat.

# Wie funktioniert GPS?



- Die Funksignale fliegen mit Lichtgeschwindigkeit  $c = 300'000 \text{ km/sec}$  vom Satelliten zum Empfänger.
- Jeder Satellit hat eine hochgenaue Uhr an Bord. Im Funksignal steht, wann dieses den Satelliten verlassen hat.
- Auch der Empfänger hat eine Uhr und er kann darum die Zeit rechnen, die das Signal unterwegs war.

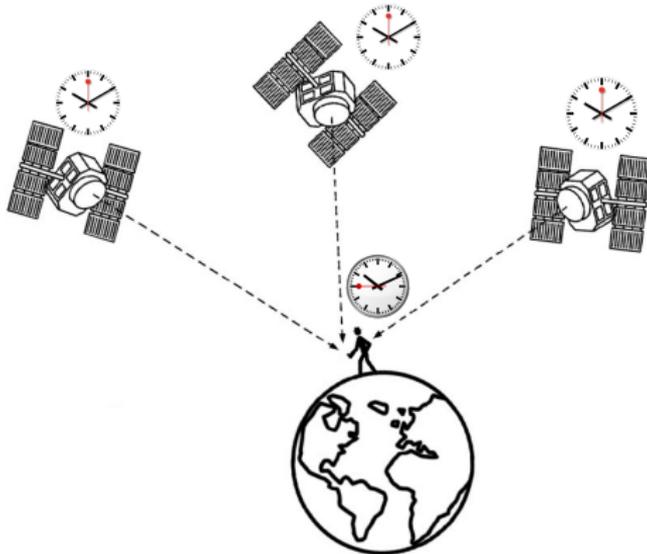
# Wie funktioniert GPS?



- Die Funksignale fliegen mit Lichtgeschwindigkeit  $c = 300'000 \text{ km/sec}$  vom Satelliten zum Empfänger.
- Distanz =  $\text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$

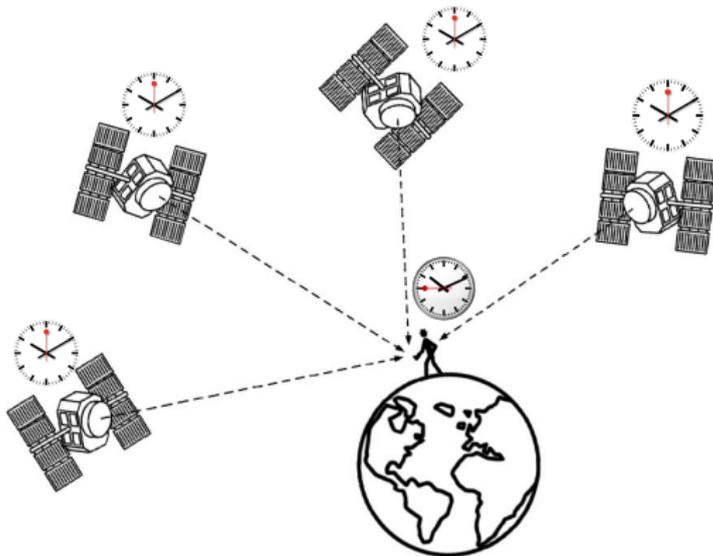
Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Wie funktioniert GPS?



- Die Funksignale fliegen mit Lichtgeschwindigkeit  $c = 300'000 \text{ km/sec}$  vom Satelliten zum Empfänger.
- Distanz =  $\text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$
- Distanz zu drei Satelliten ergibt Position als Schnittpunkt im dreidimensionalen Raum

# Wie funktioniert GPS?



- Die Funksignale fliegen mit Lichtgeschwindigkeit  $c = 300'000 \text{ km/sec}$  vom Satelliten zum Empfänger.
- Distanz =  $\text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$
- Distanz zu drei Satelliten ergibt Position als Schnittpunkt im dreidimensionalen Raum
- Uhr im Empfänger meist zu ungenau und muss auch bestimmt werden  
→ vierter Satellit

# Wie funktioniert GPS?

---

- Die GPS-Satelliten fliegen so, dass überall auf der Welt zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten am Himmel sichtbar sind.

# Wie funktioniert GPS?

---

- Die GPS-Satelliten fliegen so, dass überall auf der Welt zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten am Himmel sichtbar sind.
- Es müssen diverse Einflüsse berücksichtigt werden, wie z.B. dass die Funksignale in der Atmosphäre abgelenkt und verlangsamt werden.

# Wie funktioniert GPS?

- Die GPS-Satelliten fliegen so, dass überall auf der Welt zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten am Himmel sichtbar sind.
- Es müssen diverse Einflüsse berücksichtigt werden, wie z.B. dass die Funksignale in der Atmosphäre abgelenkt und verlangsamt werden.
- Mit alltäglichen GPS-Empfängern liegt die Positionsgenauigkeit bei einigen Metern.



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Wie funktioniert GPS?

---

- Die GPS-Satelliten fliegen so, dass überall auf der Welt zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten am Himmel sichtbar sind.
- Es müssen diverse Einflüsse berücksichtigt werden, wie z.B. dass die Funksignale in der Atmosphäre abgelenkt und verlangsamt werden.
- Mit alltäglichen GPS-Empfängern liegt die Positionsgenauigkeit bei einigen Metern.
- Mit aufwendigen Empfängern erreicht man weniger als 1 cm.



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Wie funktioniert GPS?

---

GPS basiert also auf Distanzmessungen zu Satelliten, wofür hochgenaue **Uhren** auf den Satelliten verwendet werden.

# Wie funktioniert GPS?

---

GPS basiert also auf Distanzmessungen zu Satelliten, wofür hochgenaue **Uhren** auf den Satelliten verwendet werden.

Einstein und **Uhren**...

# Wie funktioniert GPS?

---

GPS basiert also auf Distanzmessungen zu Satelliten, wofür hochgenaue **Uhren** auf den Satelliten verwendet werden.

Einstein und **Uhren**...

... da war doch was !?

# Wie funktioniert GPS?

---

GPS basiert also auf Distanzmessungen zu Satelliten, wofür hochgenaue **Uhren** auf den Satelliten verwendet werden.

Einstein und **Uhren**...

... da war doch was !?

Würde Albert einem GPS einfach so vertrauen?

# GPS und die Relativitätstheorie

# GPS und die Relativitätstheorie

---

Albert Einstein hat in seinen beiden Relativitätstheorien zwei für GPS sehr wichtige Vorhersagen gemacht:

# GPS und die Relativitätstheorie

---

Albert Einstein hat in seinen beiden Relativitätstheorien zwei für GPS sehr wichtige Vorhersagen gemacht:

Spezielle Relativitätstheorie (1905)

Uhren, die sich bewegen, gehen langsamer

# GPS und die Relativitätstheorie

---

Albert Einstein hat in seinen beiden Relativitätstheorien zwei für GPS sehr wichtige Vorhersagen gemacht:

Spezielle Relativitätstheorie (1905)

Uhren, die sich bewegen, gehen langsamer

GPS-Satelliten fliegen mit rund 3.9 km/sec oder 14'000 km/h um die Erde

# GPS und die Relativitätstheorie

---

Albert Einstein hat in seinen beiden Relativitätstheorien zwei für GPS sehr wichtige Vorhersagen gemacht:

## Spezielle Relativitätstheorie (1905)

Uhren, die sich bewegen, gehen langsamer

GPS-Satelliten fliegen mit rund 3.9 km/sec oder 14'000 km/h um die Erde

## Allgemeine Relativitätstheorie (1916)

Uhren in einem Schwerfeld gehen langsamer

# GPS und die Relativitätstheorie

---

Albert Einstein hat in seinen beiden Relativitätstheorien zwei für GPS sehr wichtige Vorhersagen gemacht:

## Spezielle Relativitätstheorie (1905)

Uhren, die sich bewegen, gehen langsamer

GPS-Satelliten fliegen mit rund 3.9 km/sec oder 14'000 km/h um die Erde

## Allgemeine Relativitätstheorie (1916)

Uhren in einem Schwerfeld gehen langsamer

GPS-Satelliten fliegen auf 20'200 km Höhe, wo die Schwerkraft nur etwa ein Viertel des Wertes auf der Erde beträgt

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross,  $c = 300'000 \text{ km/sec}$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

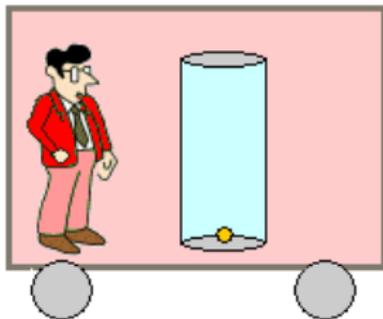
---

Ein “Gedankenexperiment” ...

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Ein "Gedankenexperiment" ...

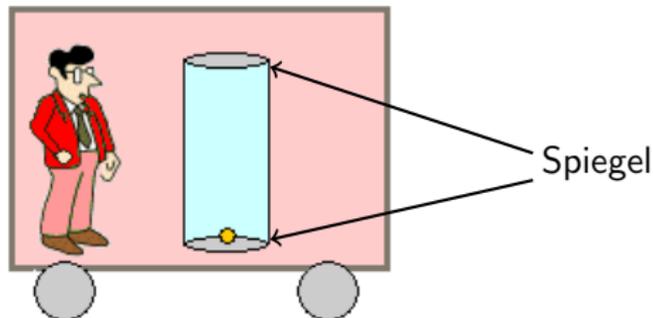


Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

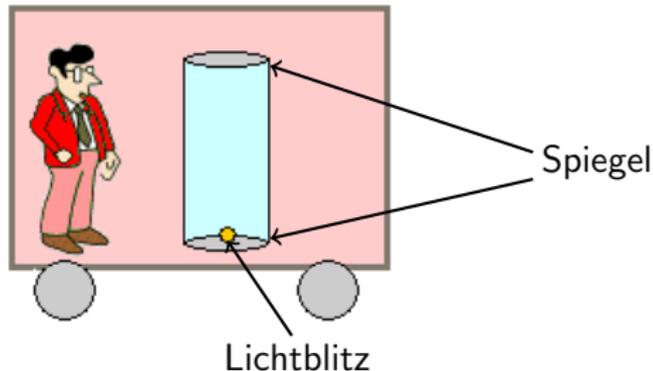
---

Ein "Gedankenexperiment" ...



# Bewegte Uhren gehen langsamer

Ein "Gedankenexperiment" ...



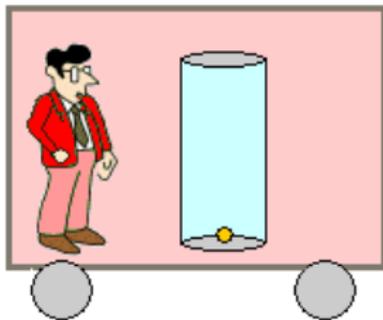
$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still

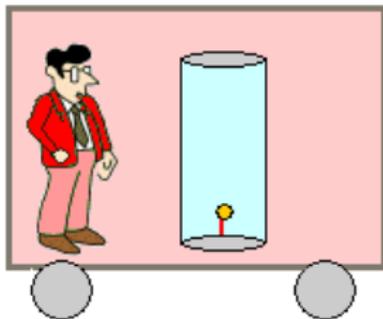


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still

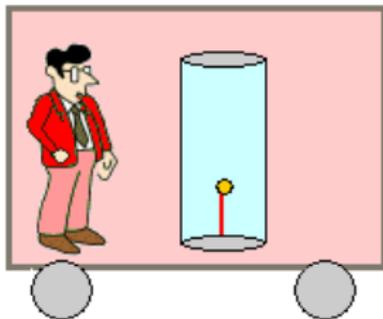


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still



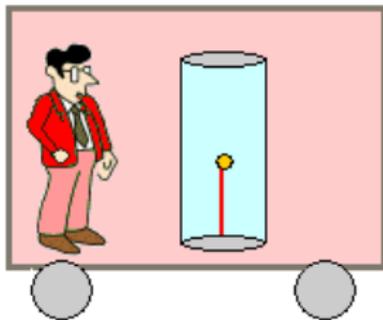
Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still

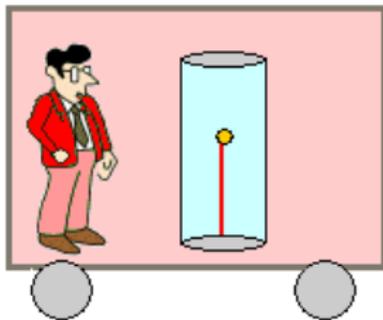


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still

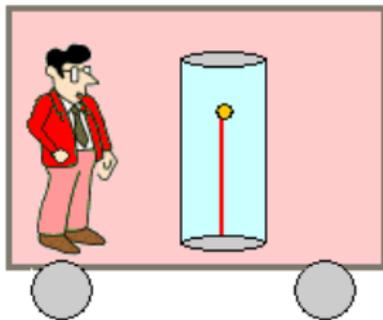


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still

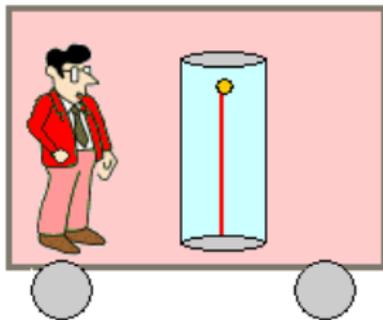


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still

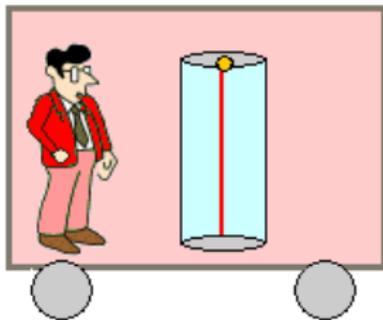


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still



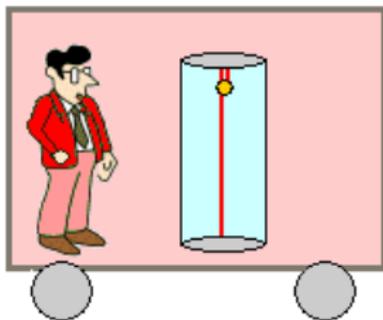
Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still

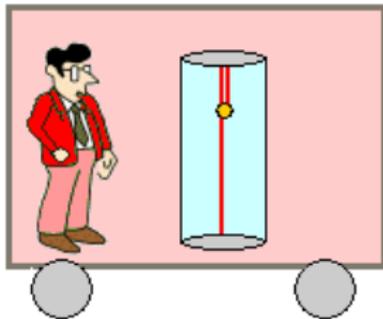


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still



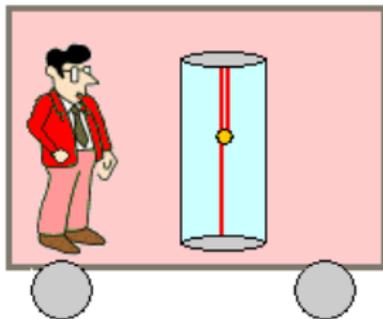
Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still

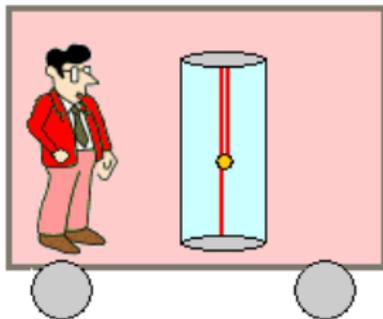


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still

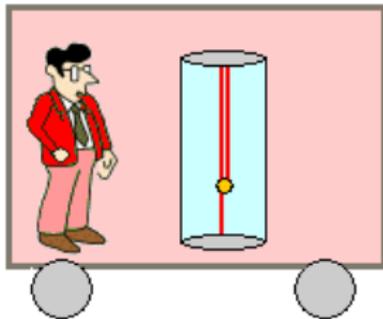


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still

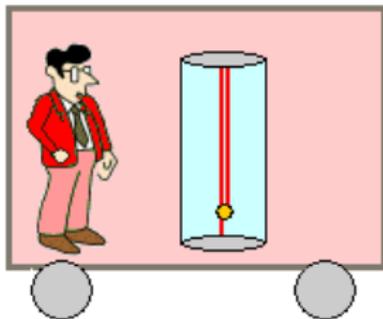


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still

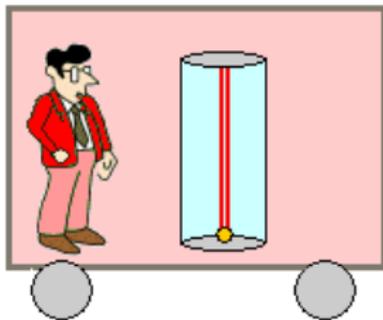


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr steht still

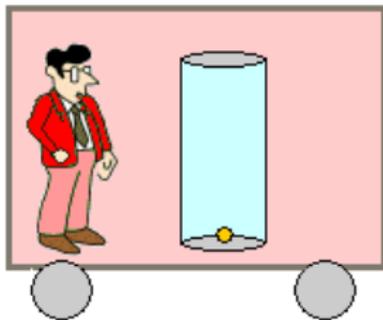


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr bewegt sich



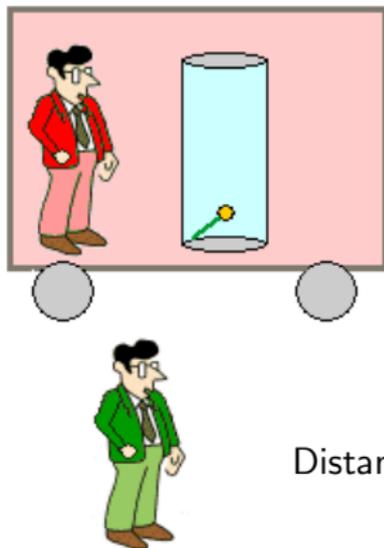
Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Uhr bewegt sich



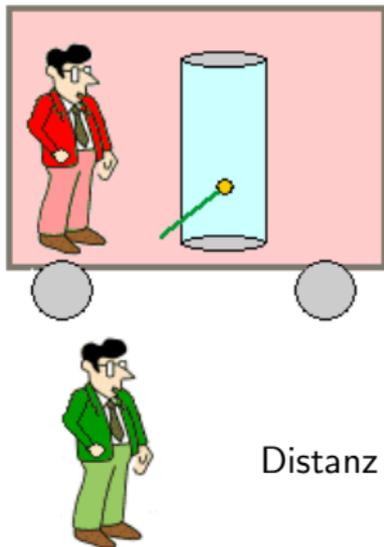
Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

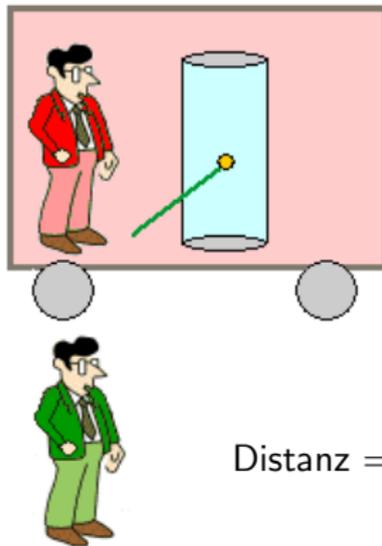
Die Uhr bewegt sich



Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer

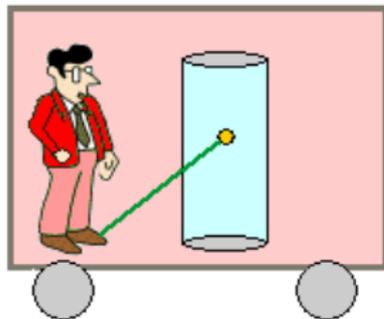
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Uhr bewegt sich

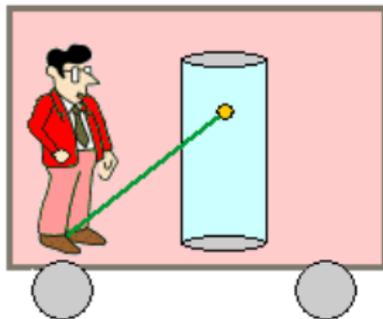


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Uhr bewegt sich

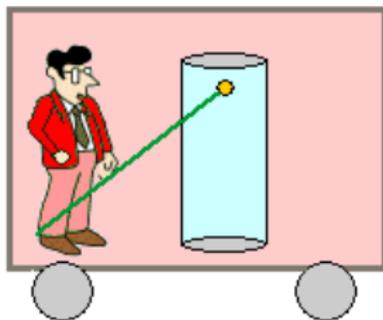


$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Uhr bewegt sich

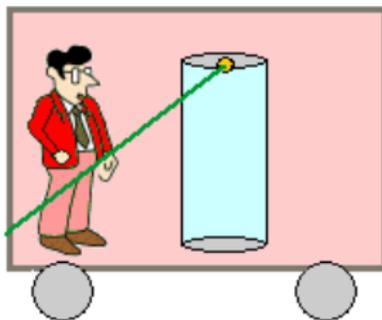


Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Uhr bewegt sich

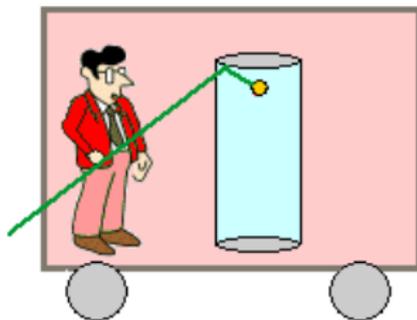


$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Uhr bewegt sich

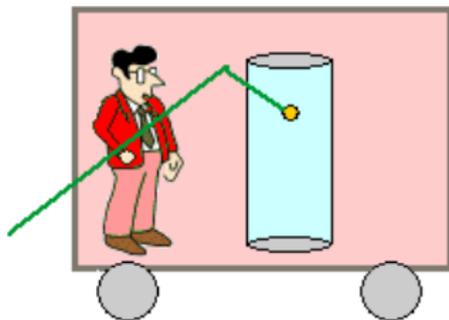


$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

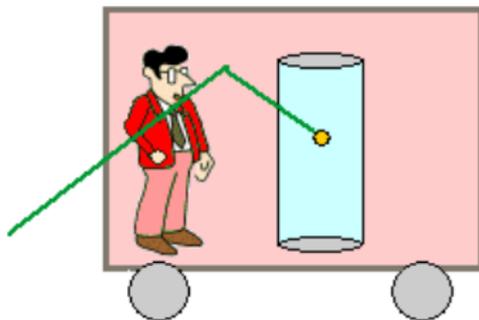
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

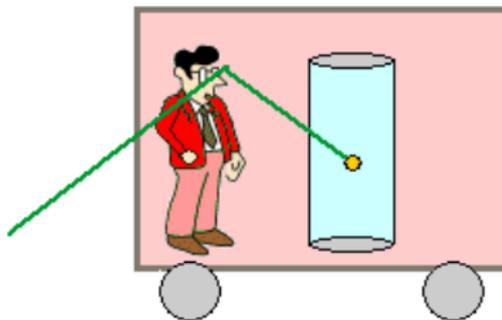
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

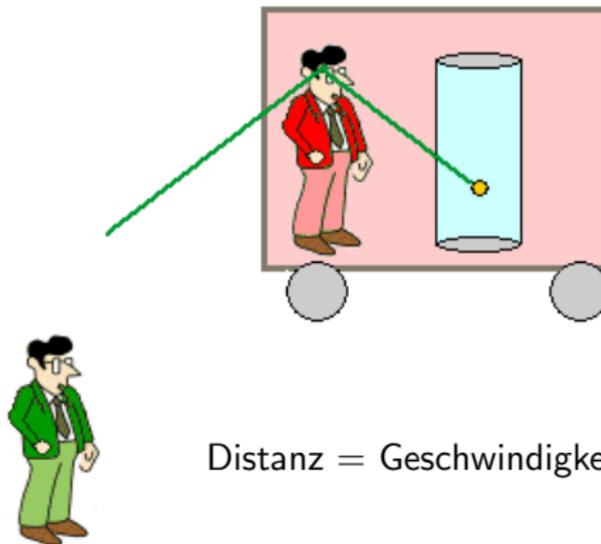
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

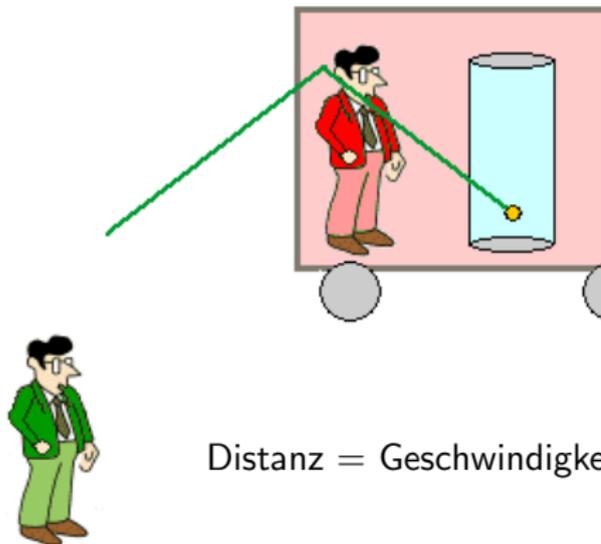
Die Uhr bewegt sich



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

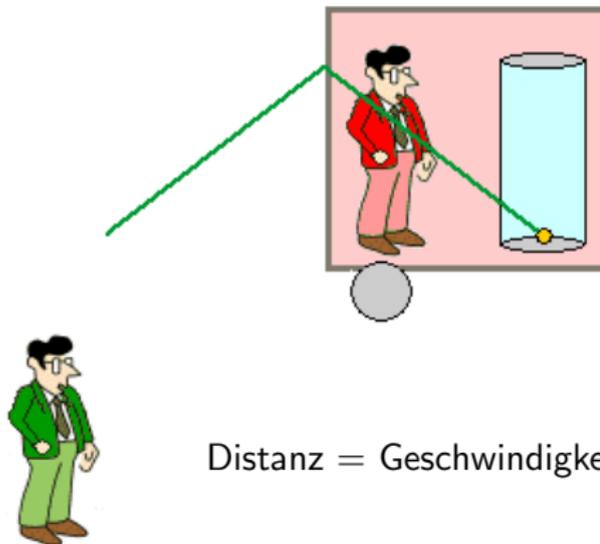
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

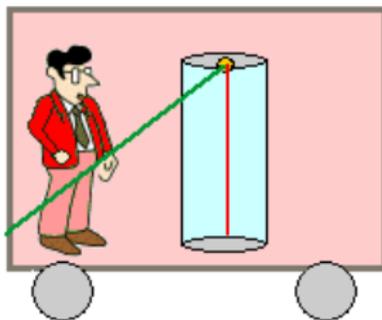
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

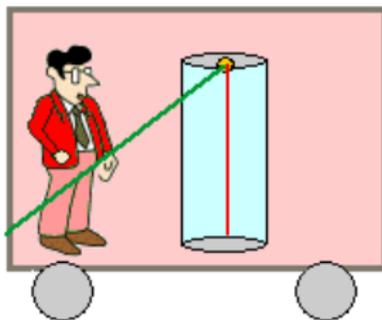
Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer



Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

# Bewegte Uhren gehen langsamer



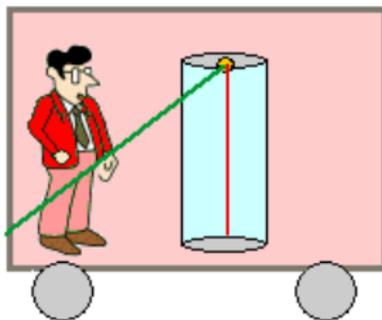
Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

Distanz = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross,  $c = 300'000 \text{ km/sec}$

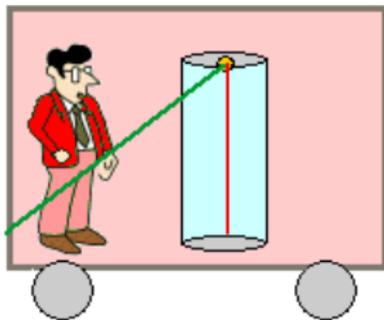


$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross,  $c = 300'000$  km/sec



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

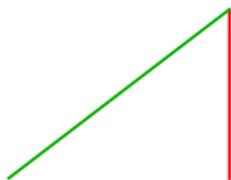
$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

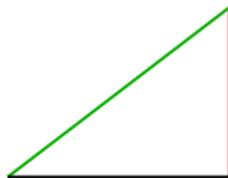
Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross,  $c = 300'000 \text{ km/sec}$



# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross,  $c = 300'000 \text{ km/sec}$



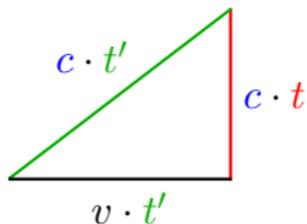
# Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross,  $c = 300'000 \text{ km/sec}$

Uhr steht still:  $t$

Uhr bewegt sich:  $t'$

Geschwindigkeit der Uhr:  $v$



Satz von Pythagoras:  $(c \cdot t)^2 + (v \cdot t')^2 = (c \cdot t')^2$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross,  $c = 300'000 \text{ km/sec}$

Uhr steht still:  $t$

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Satz von Pythagoras:  $(c \cdot t)^2 + (v \cdot t')^2 = (c \cdot t')^2$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Ein GPS-Satellit fliegt mit 3.9 km/sec. Wie lange dauert es von uns aus gesehen, bis seine Uhr um 1 Sekunde vorgerückt ist?

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Ein GPS-Satellit fliegt mit 3.9 km/sec. Wie lange dauert es von uns aus gesehen, bis seine Uhr um 1 Sekunde vorgerückt ist?

$$t' = \frac{1 \text{ sec}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Ein GPS-Satellit fliegt mit 3.9 km/sec. Wie lange dauert es von uns aus gesehen, bis seine Uhr um 1 Sekunde vorgerückt ist?

$$t' = \frac{1 \text{ sec}}{\sqrt{1 - \frac{(3.9 \text{ km/sec})^2}{c^2}}}$$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Ein GPS-Satellit fliegt mit 3.9 km/sec. Wie lange dauert es von uns aus gesehen, bis seine Uhr um 1 Sekunde vorgerückt ist?

$$t' = \frac{1 \text{ sec}}{\sqrt{1 - \frac{(3.9 \text{ km/sec})^2}{(300'000 \text{ km/sec})^2}}}$$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Ein GPS-Satellit fliegt mit 3.9 km/sec. Wie lange dauert es von uns aus gesehen, bis seine Uhr um 1 Sekunde vorgerückt ist?

$$t' = \frac{1 \text{ sec}}{\sqrt{1 - \frac{(3.9 \text{ km/sec})^2}{(300'000 \text{ km/sec})^2}}} = 1.000000000085 \text{ sec}$$

# Bewegte Uhren gehen langsamer

---

Ein GPS-Satellit fliegt mit 3.9 km/sec. Wie lange dauert es von uns aus gesehen, bis seine Uhr um 1 Sekunde vorgerückt ist?

$$t' = \frac{1 \text{ sec}}{\sqrt{1 - \frac{(3.9 \text{ km/sec})^2}{(300'000 \text{ km/sec})^2}}} = 1.000000000085 \text{ sec}$$

Von uns aus gesehen geht die Satellitenuhr nach einer Sekunde um 85 billionstel Sekunden nach.

# Würde Albert einem GPS vertrauen?

---

- Spezielle Relativitätstheorie
  - 1 sec  $\rightarrow$  1.000000000085 sec

# Würde Albert einem GPS vertrauen?

---

- Spezielle Relativitätstheorie
  - 1 sec  $\rightarrow$  1.000000000085 sec
- Allgemeine Relativitätstheorie: GPS-Uhren in 20'200 km Höhe ticken schneller
  - 1 sec  $\rightarrow$  0.99999999947 sec

# Würde Albert einem GPS vertrauen?

---

- Spezielle Relativitätstheorie
  - 1 sec  $\rightarrow$  1.000000000085 sec
- Allgemeine Relativitätstheorie: GPS-Uhren in 20'200 km Höhe ticken schneller
  - 1 sec  $\rightarrow$  0.99999999947 sec
- Beide Effekte zusammen bewirken, dass die Satelliten-Uhr vom Boden aus gesehen zu schnell läuft
  - 1 sec  $\rightarrow$  0.99999999956 sec
  - 38 millionstel Sekunden pro Tag

# Würde Albert einem GPS vertrauen?

---

- Spezielle Relativitätstheorie
  - 1 sec  $\rightarrow$  1.000000000085 sec
- Allgemeine Relativitätstheorie: GPS-Uhren in 20'200 km Höhe ticken schneller
  - 1 sec  $\rightarrow$  0.99999999947 sec
- Beide Effekte zusammen bewirken, dass die Satelliten-Uhr vom Boden aus gesehen zu schnell läuft
  - 1 sec  $\rightarrow$  0.99999999956 sec
  - 38 millionstel Sekunden pro Tag
- Distanz zum Satelliten = Lichtgeschwindigkeit  $\times$  Zeit

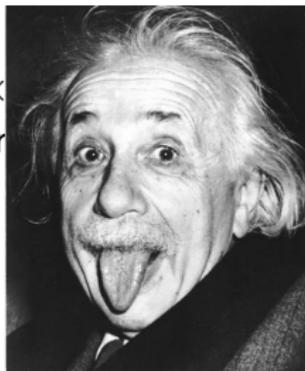
# Würde Albert einem GPS vertrauen?

---

- Spezielle Relativitätstheorie
  - 1 sec  $\rightarrow$  1.000000000085 sec
- Allgemeine Relativitätstheorie: GPS-Uhren in 20'200 km Höhe ticken schneller
  - 1 sec  $\rightarrow$  0.99999999947 sec
- Beide Effekte zusammen bewirken, dass die Satelliten-Uhr vom Boden aus gesehen zu schnell läuft
  - 1 sec  $\rightarrow$  0.99999999956 sec
  - 38 millionstel Sekunden pro Tag
- Distanz zum Satelliten = Lichtgeschwindigkeit  $\times$  Zeit  
Distanzfehler = Lichtgeschwindigkeit  $\times$  Zeitfehler
  - = 13 cm nach 1 Sekunde
  - = 480 m nach 1 Stunde
  - = 11.5 km nach 1 Tag

# Würde Albert einem GPS vertrauen?

- Spezielle Relativitätstheorie
  - 1 sec  $\rightarrow$  1.000000000085 sec
- Allgemeine Relativitätstheorie: GPS-Uhren in 20'200 km Höhe ticken schneller
  - 1 sec  $\rightarrow$  0.99999999947 sec
- Beide Effekte zusammen bewirken, dass die Satelliten-Uhr vom Boden aus gesehen zu schnell läuft
  - 1 sec  $\rightarrow$  0.99999999956 sec
  - 38 millionstel Sekunden pro Tag
- Distanz zum Satelliten = Lichtgeschwindigkeit  $\times$  Distanzfehler = Lichtgeschwindigkeit  $\times$  Zeitfehler
  - = 13 cm nach 1 Sekunde
  - = 480 m nach 1 Stunde
  - = 11.5 km nach 1 Tag



Albert täte gut daran, GPS nicht blind zu vertrauen!

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

---

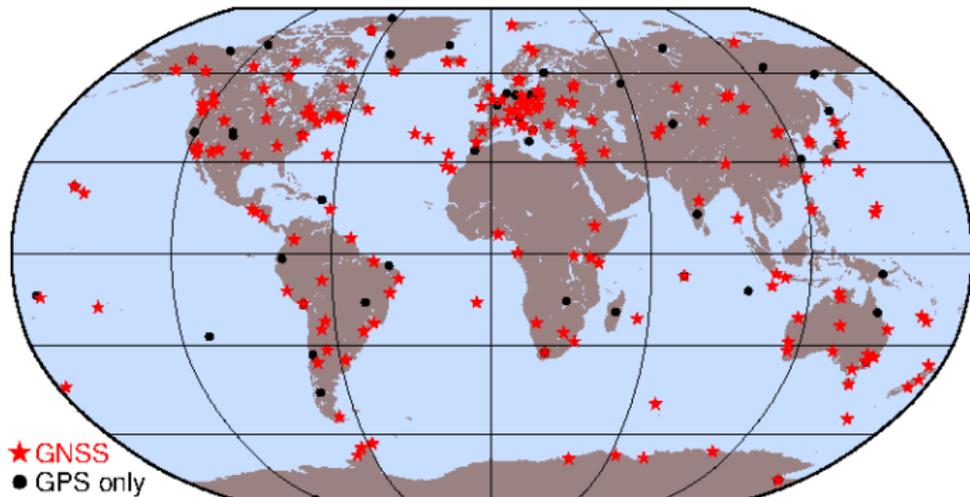
Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...



# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

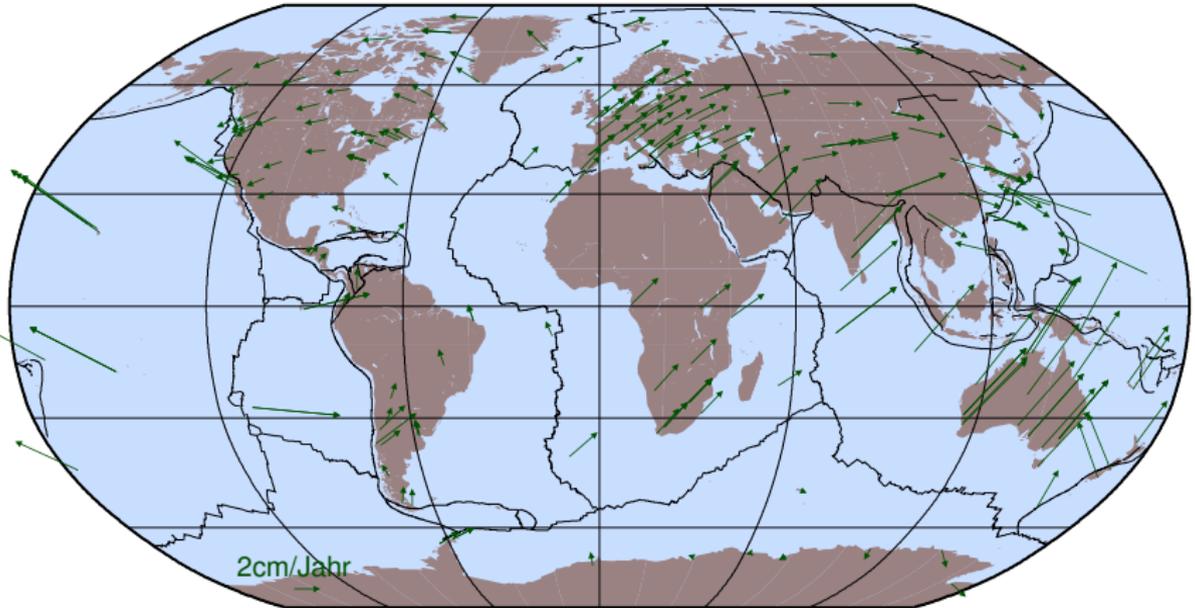
- die Stationspositionen



# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

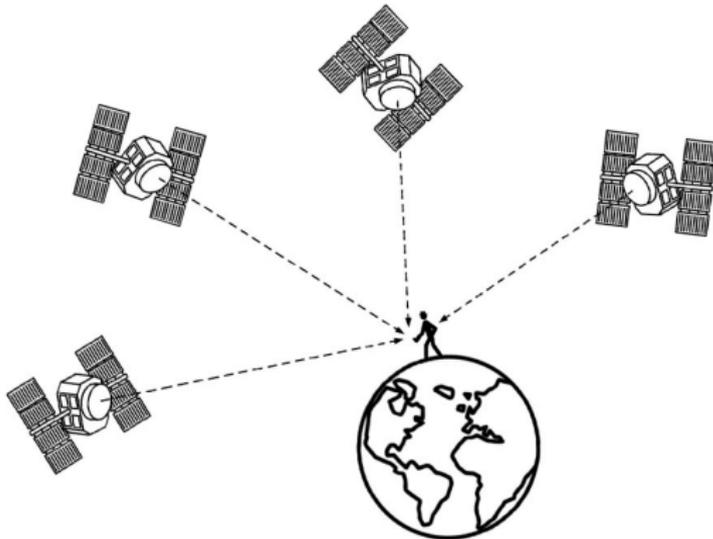
- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten



# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

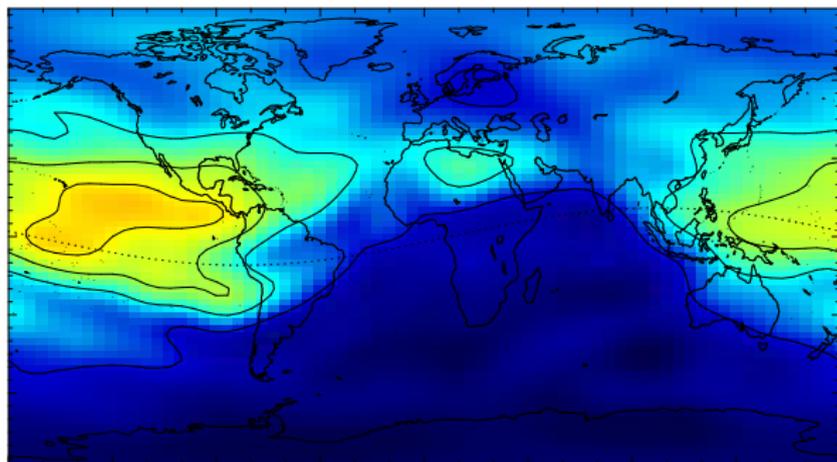
- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten



# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

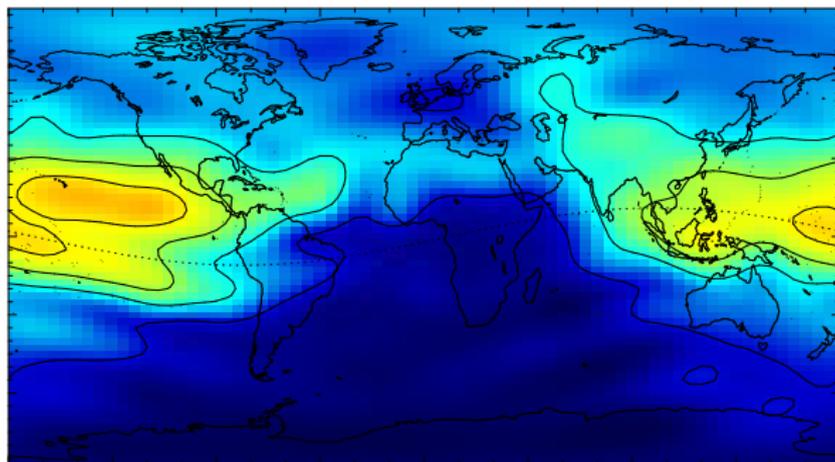


00:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

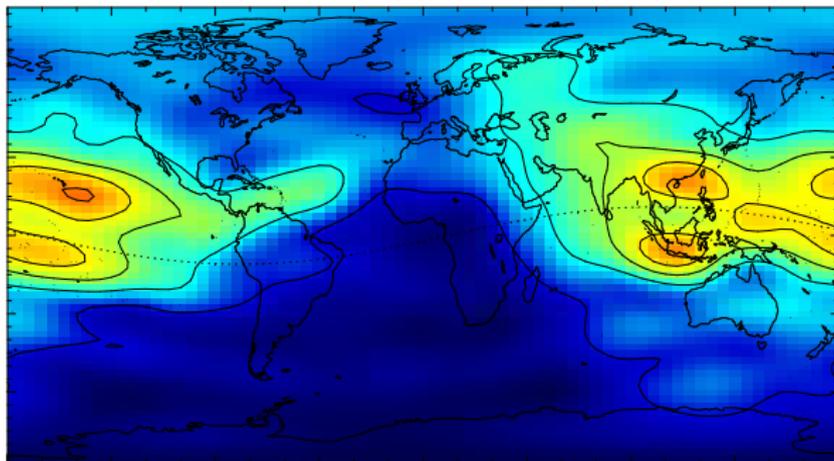


02:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

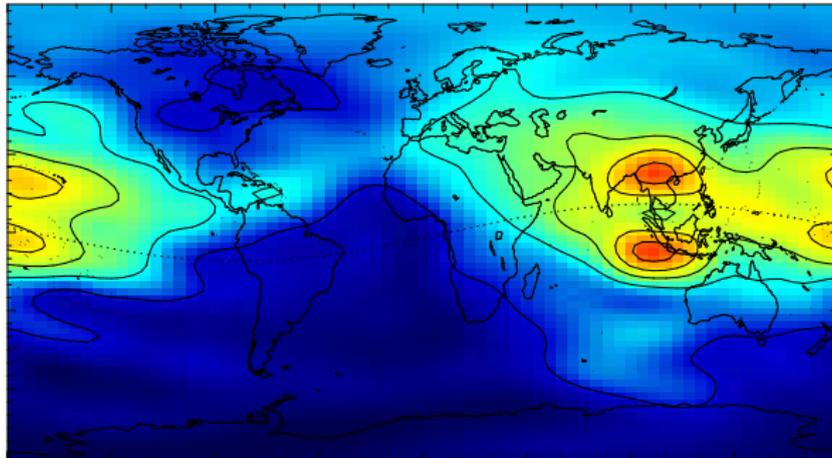


04:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

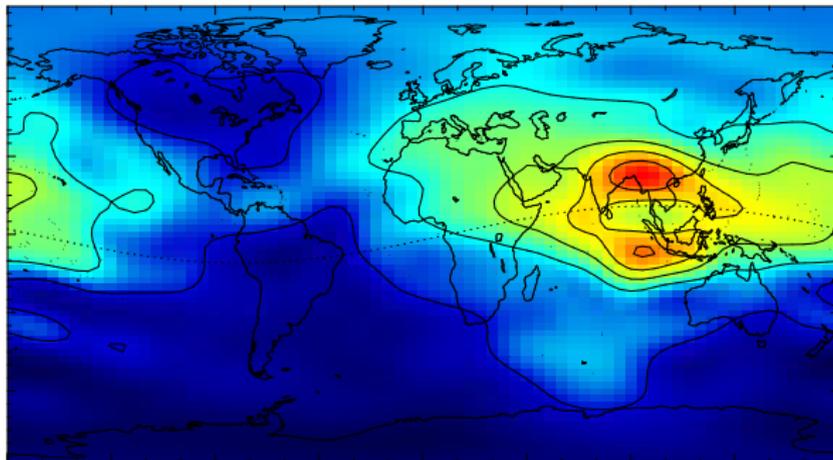


06:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

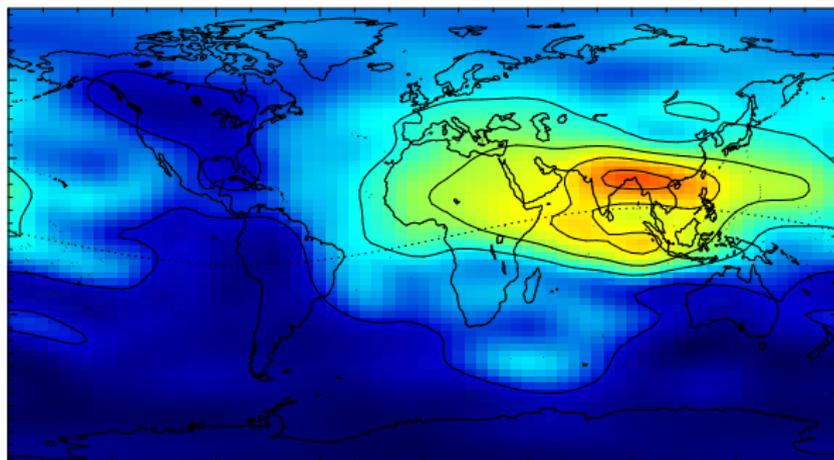


08:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

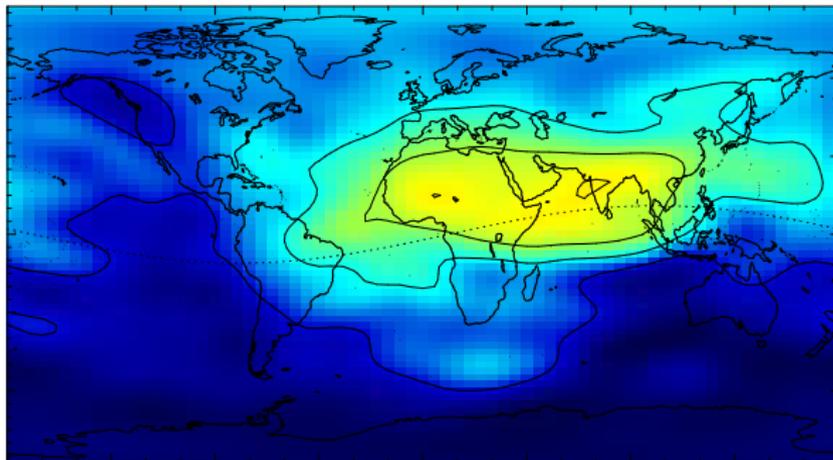


10:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

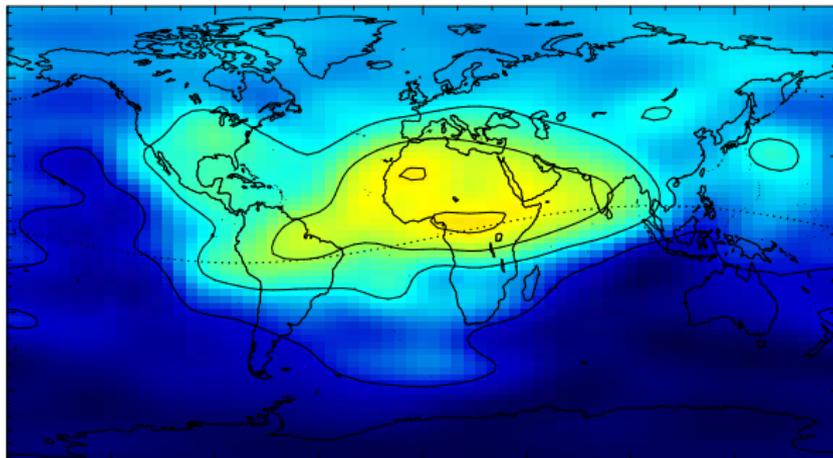


12:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

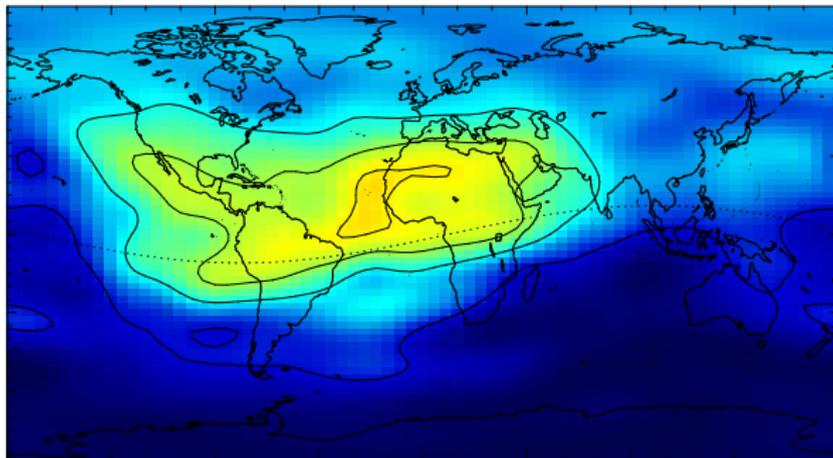


14:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

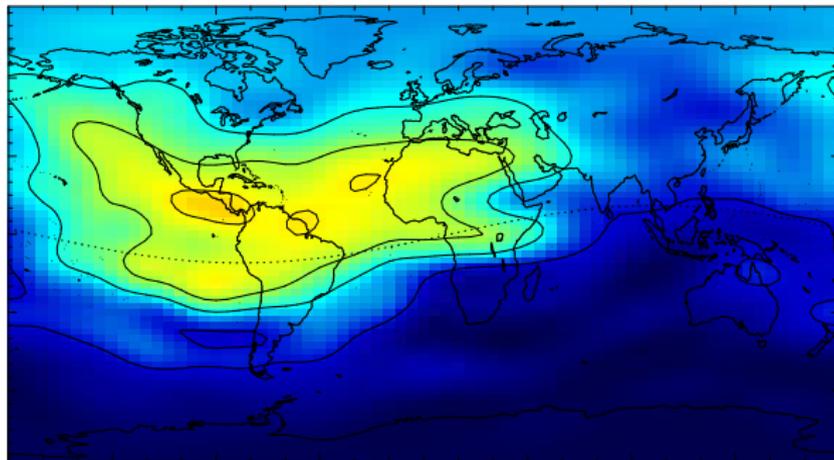


16:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

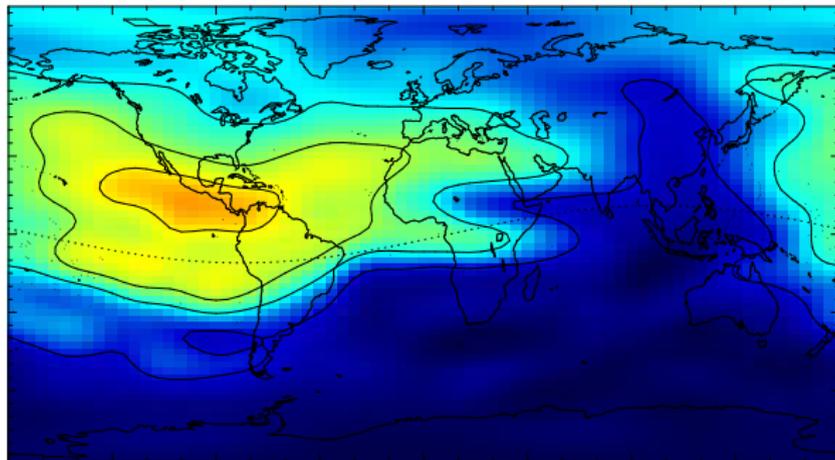


18:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

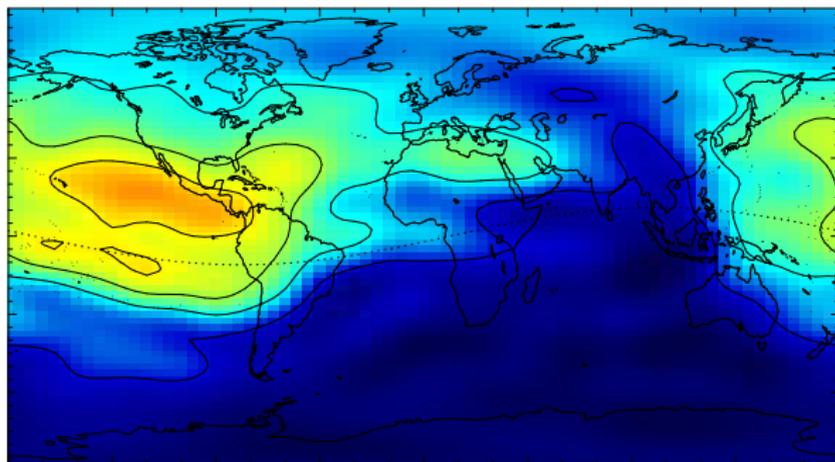


20:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

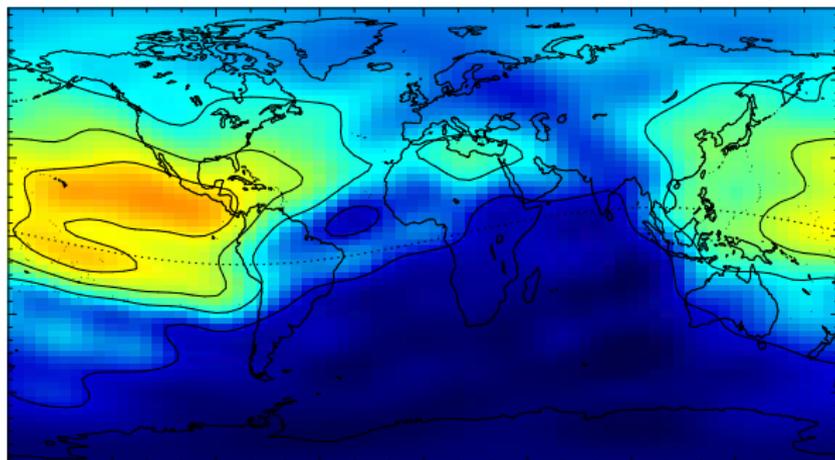


22:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre



24:00 UT

# Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

---

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...  
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre
- ... und vieles mehr

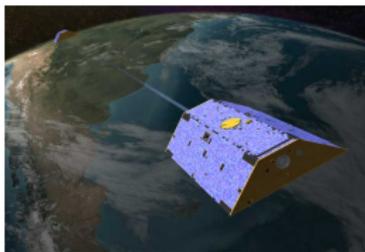
# Bahnbestimmung tieffliegender Satelliten

Zahlreiche Satelliten, die in einer Höhe zwischen 250-2000 km fliegen, haben einen GPS-Empfänger an Bord. Dies erlaubt die cm genaue Bestimmung der Satellitenbahnen.

CHAMP



GRACE



GOCE



Jason



Jason-2



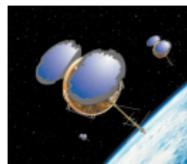
MetOp-A



ICESat



COSMIC



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?  
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

---

- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

---

- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.

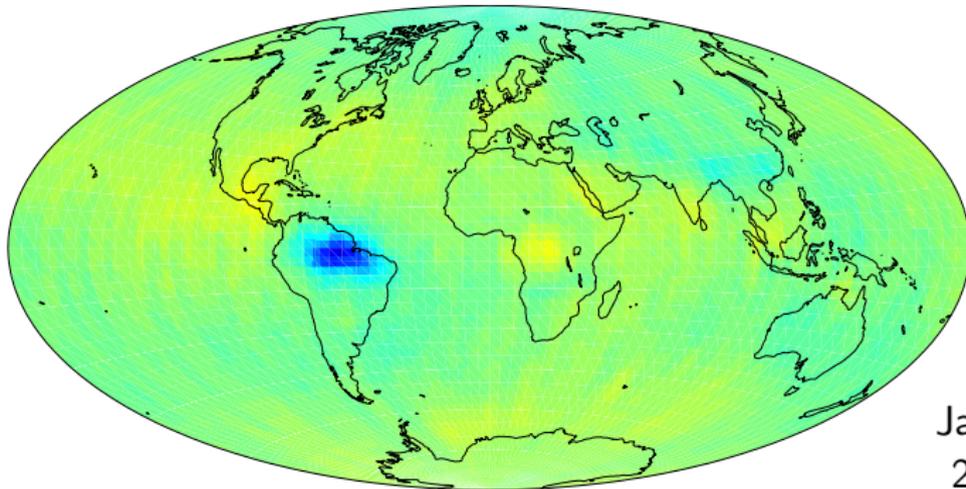
# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

---

- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

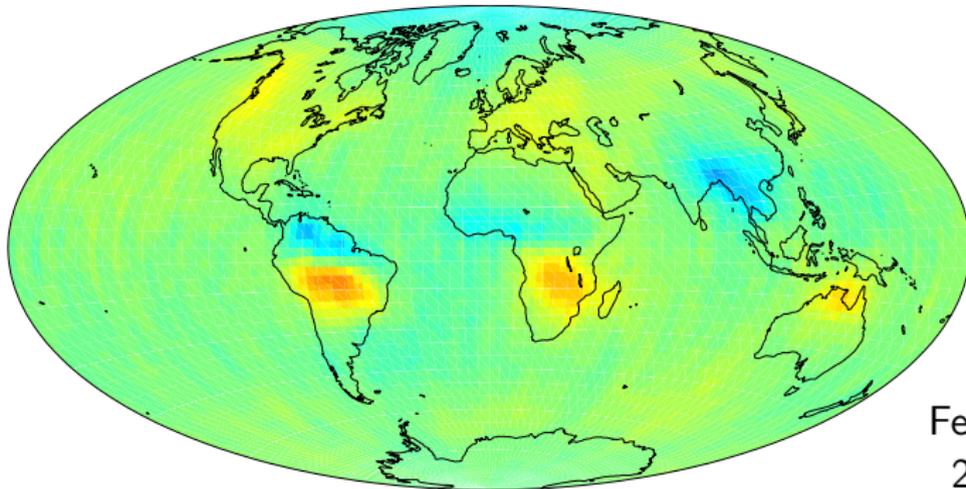
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Januar  
2007

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

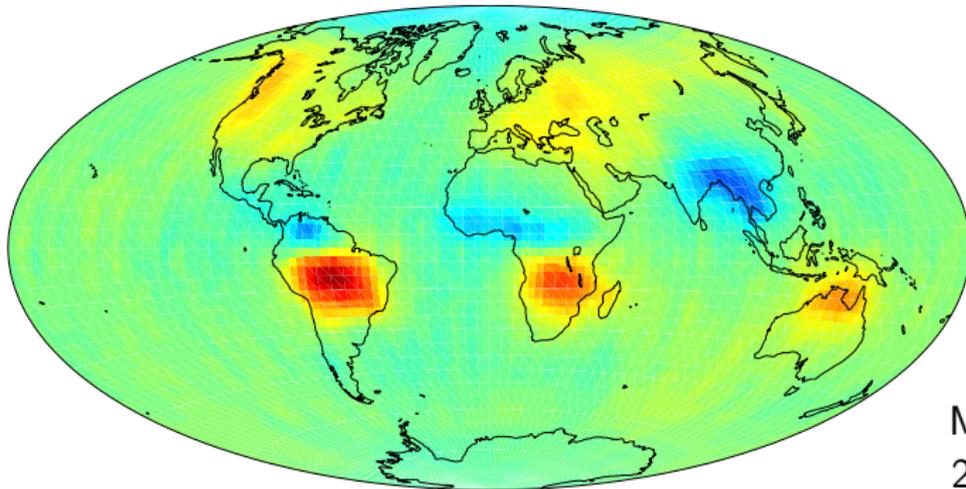
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Februar  
2007

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

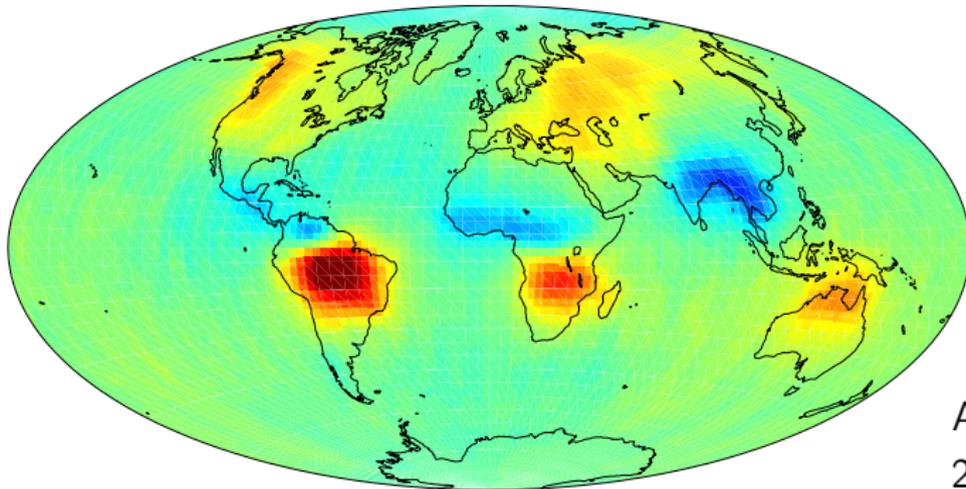
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



März  
2007

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

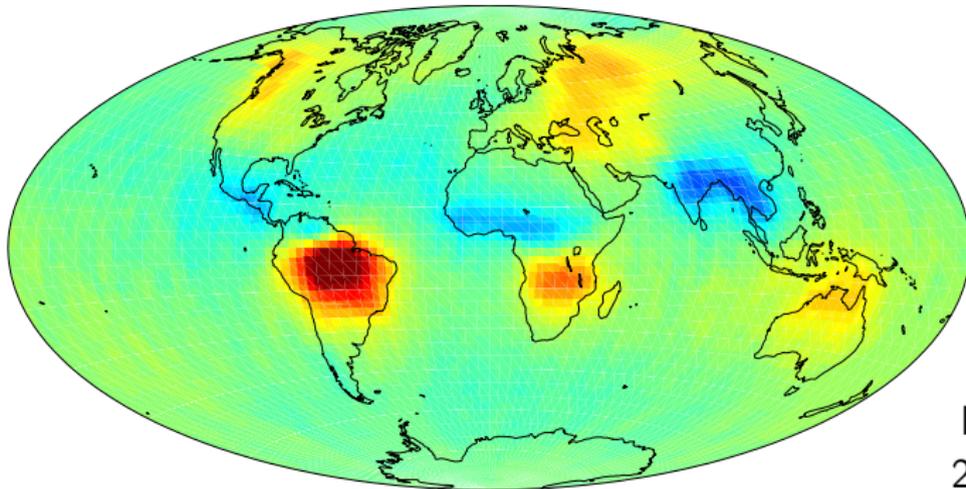
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



April  
2007

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

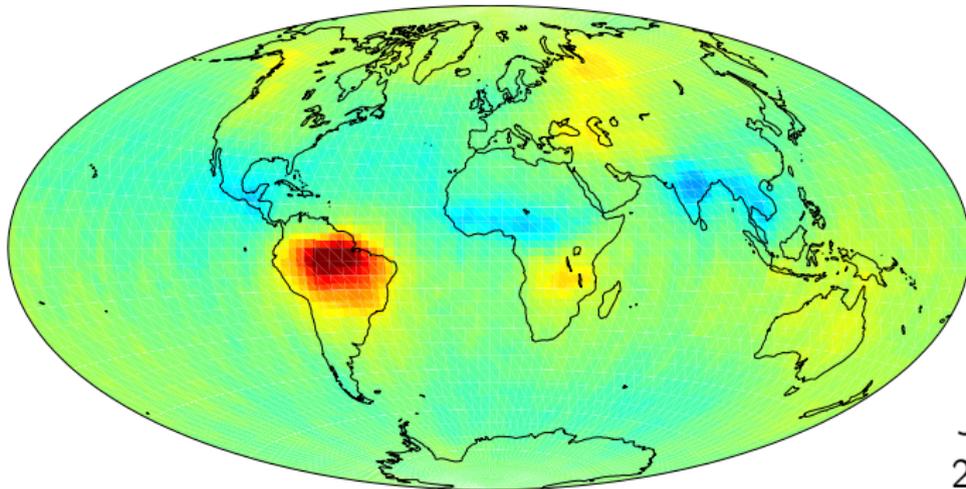
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Mai  
2007

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

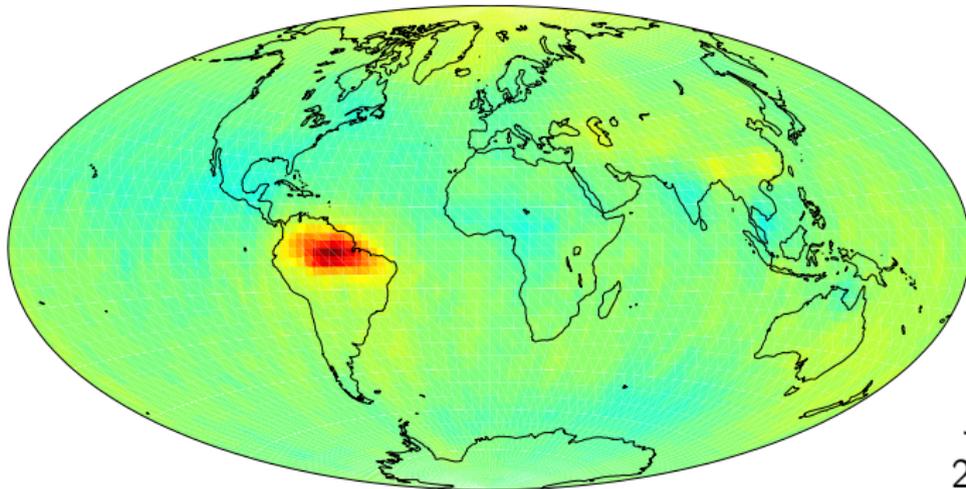
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Juni  
2007

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

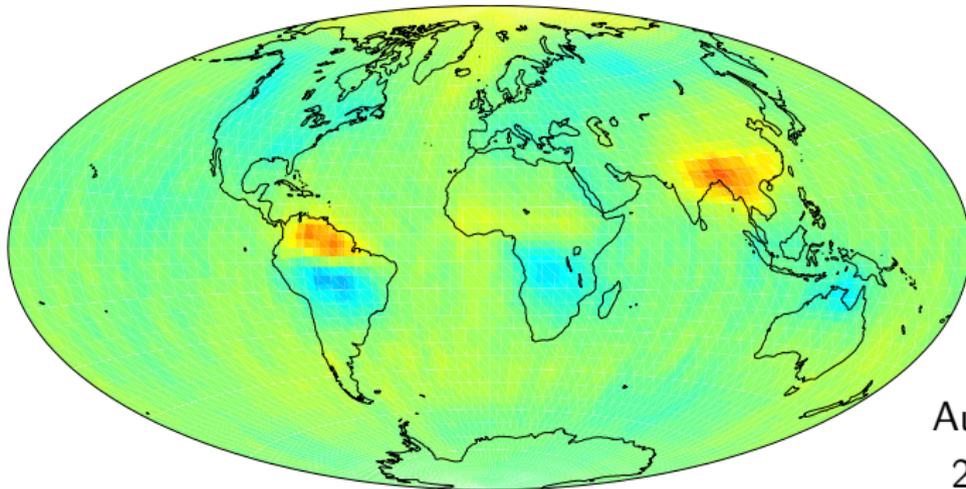
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Juli  
2007

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

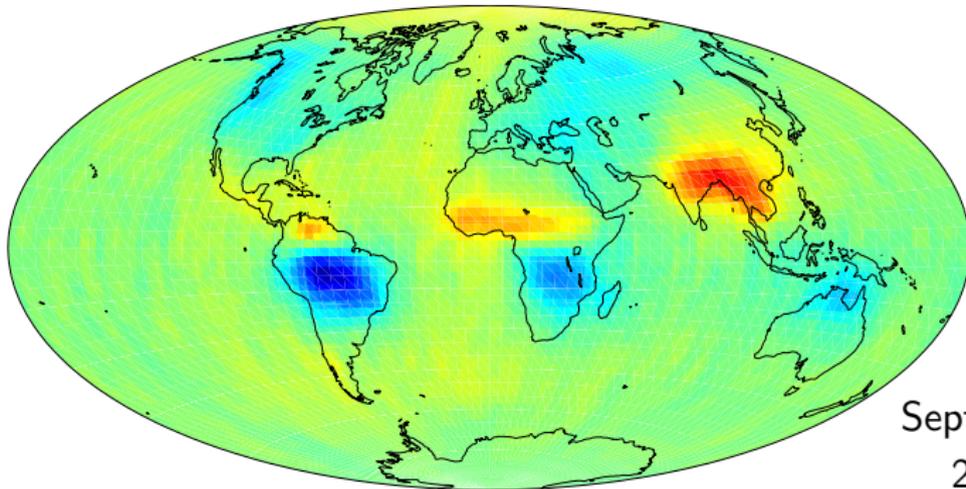
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



August  
2007

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

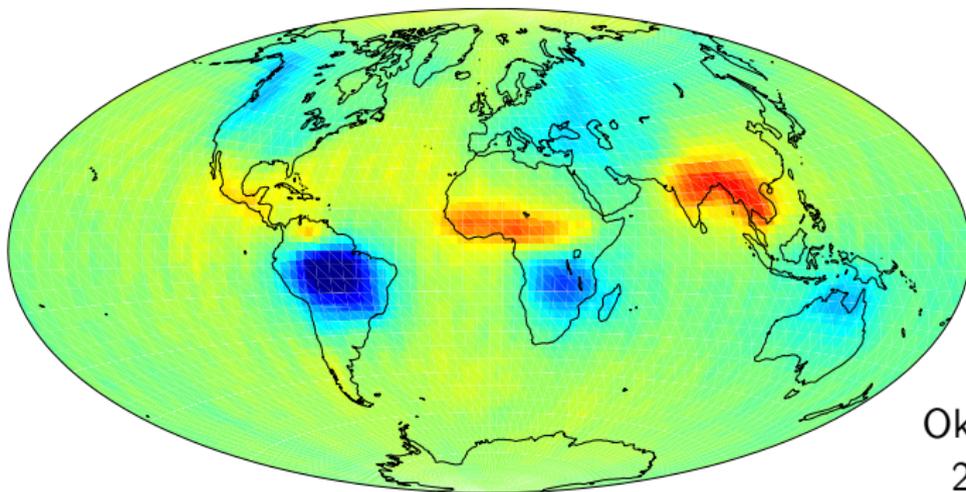
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



September  
2007

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

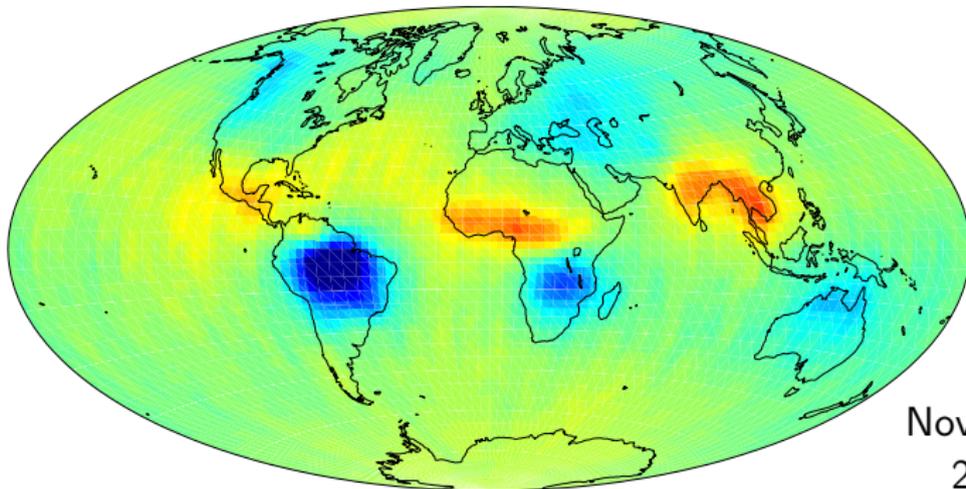
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Oktober  
2007

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

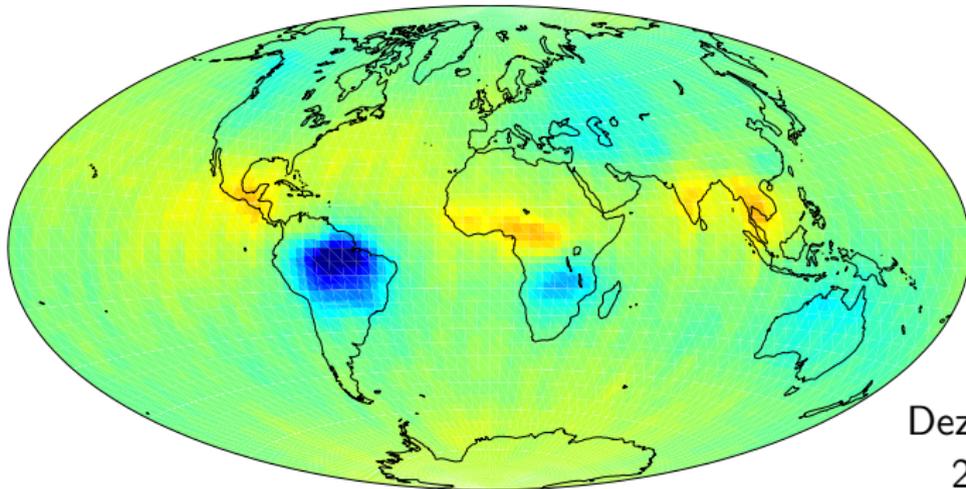
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



November  
2007

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.

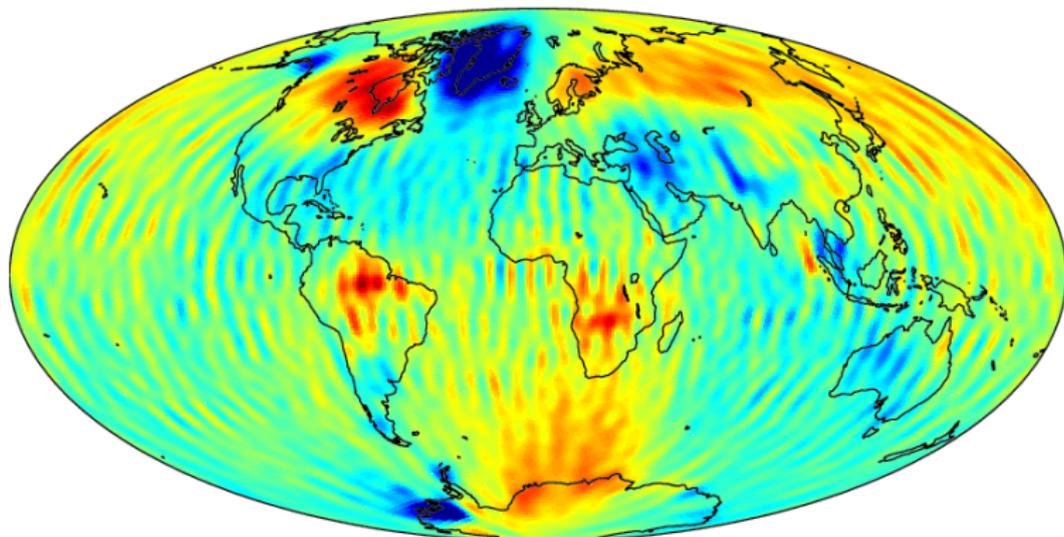


Dezember  
2007

# Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

---

Änderung des Schwerfelds im Zeitraum 2003-2009:



Das Eisschmelzen in Grönland und in der Antarktis ist deutlich zu sehen!

Vielen Dank!

