# Allgemeine Relativitätstheorie

**Markus Pössel**

Haus der Astronomie

21. Oktober 2014

# Inhaltsübersicht

# Allgemeine Relativitätstheorie

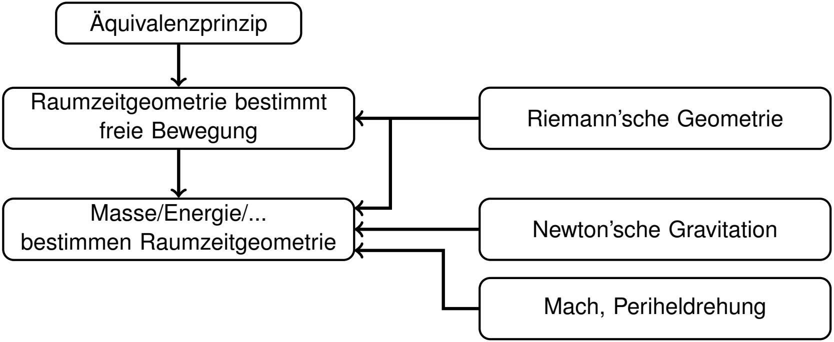
Albert Einsteins Gravitationstheorie, fertiggestellt November 1915

Gravitation ist keine Kraft, sondern Eigenschaft der Raumzeit-Geometrie

„Die Raumzeit sagt der Materie, wie sie sich bewegen soll; die Materie sagt der Raumzeit, wie sie sich verzerren soll“
(nach John Wheeler)

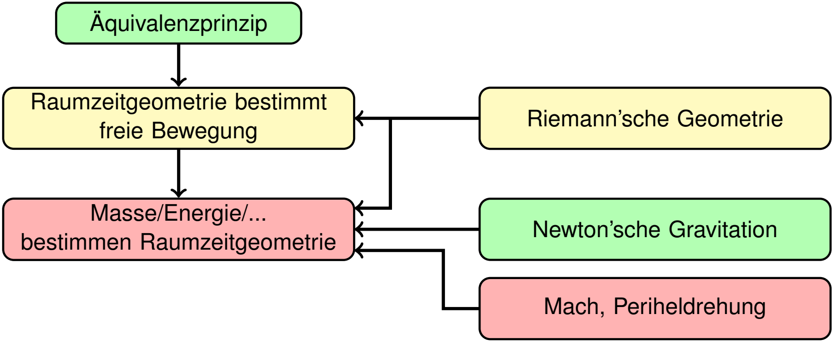
Anwendungen: Relativistische Effekte im Sonnensystem, Gravitationslinsen, Gravitationswellen, Schwarze Löcher, Kosmologie

# Struktur Allgemeine Relativitätstheorie




Ergebnis: **Einstein'sche Feldgleichungen**

# Struktur Allgemeine Relativitätstheorie




Ergebnis: **Einstein'sche Feldgleichungen**

# Anwendungen Allgemeine Relativitätstheorie

Klassische Effekte: Lichtablenkung, Gravitative Rotverschiebung, Periheldrehung, Shapiro-Effekt

Gravitationslinsen: Relativistische Optik

Schwarze Löcher: Definition, Phänomenologie (Akkretion), Optik

Gravitationswellen: Strahlungseigenschaften, EM-Analogie, Erzeugung, GW-Astronomie

Kosmologie: Expandierendes Universum, Dynamik der Expansion, frühes Universum (Urknallphase)

Das Farbschema zeigt an, wieweit das betreffende Thema in der Schule mehr als nur populärwissenschaftlich beschrieben werden kann

# Anwendungen Allgemeine Relativitätstheorie

Klassische Effekte: Lichtablenkung, Gravitative Rotverschiebung, Periheldrehung, Shapiro-Effekt

Gravitationslinsen: Relativistische Optik

Schwarze Löcher: Definition, Phänomenologie (Akkretion), Optik

Gravitationswellen: Strahlungseigenschaften, EM-Analogie, Erzeugung, GW-Astronomie

Kosmologie: Expandierendes Universum, Dynamik der Expansion, frühes Universum (Urknallphase)

Das Farbschema zeigt an, wieweit das betreffende Thema in der Schule mehr als nur populärwissenschaftlich beschrieben werden kann

# Motivation für die geometrische Beschreibung

In der klassischen Mechanik:

- Natürliche Trägheitsbewegung: gerade, konstante Geschwindigkeit
- Abweichung von der natürlichen Bewegung aufgrund von *Kräften* ($\vec{F} = m\ddot{\vec{x}}$)
- Zusätzliche Modelle für die Krafteigenschaften (z.B. in Abhängigkeit von Ladungen)

Beispiel: Newton'sche Gravitationskraft

$$\vec{F}(\vec{r}) = -GMm \, \frac{\vec{r} - \vec{r}_q}{|\vec{r} - \vec{r}_q|^3}.$$

($\vec{r}$ Ort des Teilchens der Masse $m$, das die Kraft spürt, $\vec{r}_q$ Ort der Gravitationsquelle mit Masse $M$, mit $G$ der Gravitationskonstante.)

# Wie identifiziert man die natürliche Bewegung?

- Wie hält man Trägheitskräfte (z.B. rotierendes Koordinatensystem: Coriolis, Fliehkraft...) und andere Kräfte auseinander?)
- Alle “wirklichen” Kräfte auflisten ⇒ keine sinnvolle grundlegende Definition
- Was haben die Trägheitskräfte gemeinsam?
  ⇒ sie sind in Wirklichkeit als Beschleunigungen definiert!
- Zerlege

$$\ddot{\vec{x}} = \frac{1}{m}\vec{F}(\vec{x},\dot{\vec{x}},t) - \vec{A}(t) - 2\vec{\omega}\times\dot{\vec{x}} - \vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times\vec{x}) - \dot{\vec{\omega}}\times\vec{x}$$

# …aber da gibt es leider ein kleines Problem

$$\ddot{\vec{x}} = \frac{1}{m}\vec{F}(\vec{x},\dot{\vec{x}},t) - \vec{A}(t) - 2\vec{\omega}\times\dot{\vec{x}} - \vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times\vec{x}) - \dot{\vec{\omega}}\times\vec{x}$$

Können wir Testteilchen verwenden, um die verschiedenen Beiträge voneinander zu unterscheiden?

Beispiel: Um den Anteil der elektromagnetischen Kräfte herauszufinden nutze man Testteilchen mit unterschiedlicher spezifischer Ladung

$$\frac{q}{m}.$$

Problem: Gravitation!

# Warum Gravitation besonders ist

$$\vec{F}(\vec{r}) = -GMm\,\frac{\vec{r}-\vec{r}_q}{|\vec{r}-\vec{r}_q|^3}.$$

Beschleunigung eines Testteilchens im Feld einer deutlich größeren Masse $M$:

$$\frac{1}{m}\vec{F}(\vec{r}) = -GM\,\frac{\vec{r}-\vec{r}_q}{|\vec{r}-\vec{r}_q|^3}.$$

**Beschleunigung unabhängig von den Teilcheneigenschaften!**

# Masse spielt zwei verschiedene Rollen

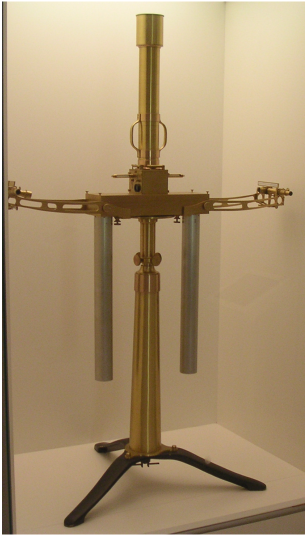
Träge Masse $m_i$ vs. schwere Masse (Gravitationsladung) $m_g$:

$$\vec{F} = m_i \ddot{\vec{x}} \qquad \text{vs.} \qquad \vec{F}(\vec{r}) = -GMm_g \frac{\vec{r}-\vec{r}_q}{|\vec{r}-\vec{r}_q|^3}$$

…und offenbar $m_g = m_i$.

Rechts: Nachbildung der Torsionswaage von Eötvös

(Berliner Einstein-Ausstellung 2005)



# Eine neue Art von natürlicher Bewegung

Wenn man die *Gravitationsbeschleunigung* $\vec{g}(\vec{x},t)$ und die *Trägheitsbeschleunigung* $\vec{A}(t)$ nicht vollständig auseinanderhalten kann:

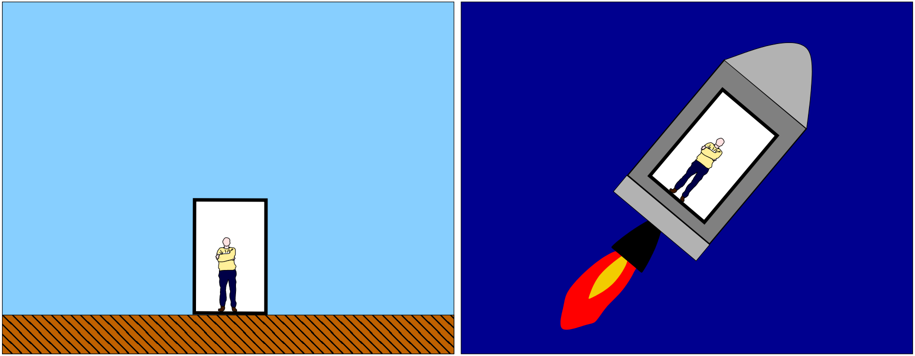
Ersetze

**Testteilchenbewegung = Trägheitsbewegung + Ablenkung durch Kräfte**

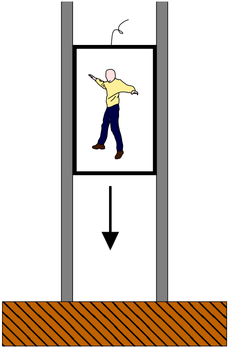
durch

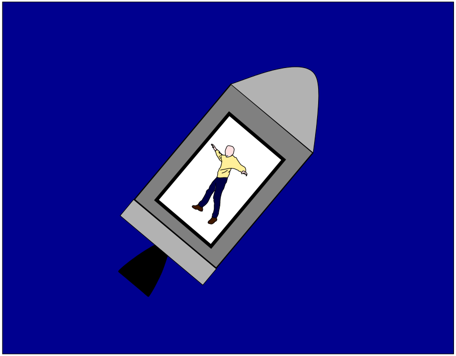
**Testteilchenbewegung = Freier Fall + Ablenkung durch Kräfte**

# Ist Gravitation = Trägheitsbeschleunigung?



# Ist Gravitation = Trägheitsbeschleunigung?





# Mikrogravitation im freien Falll

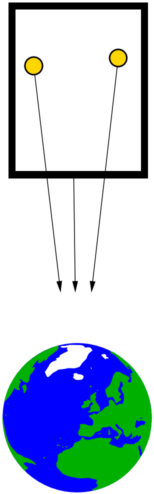
Kapsel im Fallturm des
Glenn Research Center

Bild: NASA/GRC/P. Riedel, A. Lukas

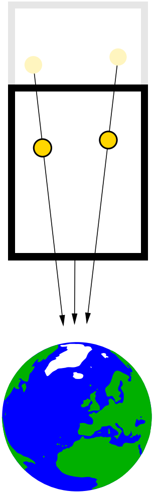
# Mikrogravitation im freien Fall = Umlaufbahn

Chris Hadfield mit Wasserblase an Bord der ISS. Bild: NASA

# Wirklich keine Schwerkraft im freien Fall?

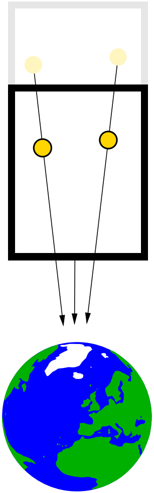


# Wirklich keine Schwerkraft im freien Fall?



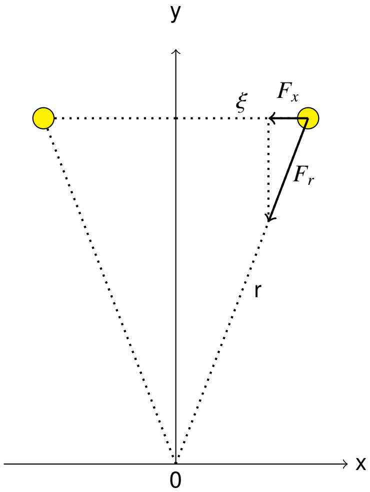
Gezeitenkräfte!

# Wirklich keine Schwerkraft im freien Fall?



**Gezeitenkräfte!**

# Gezeitenkräfte




$$F_x = \frac{\xi}{r} \cdot F_r$$

$$\Rightarrow F_x = -\frac{GMm}{r^3} \cdot \xi$$

Stärke der Gezeitenkraft fällt schneller ab als $1/r^2$!

# Grenzen des freien Falls

Unser Beispiel ist repräsentativ insofern, als Gezeitenkraft proportional zum Abstand zwischen zwei Körpern, $F \sim \xi$

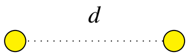
Wartet man lange genug, sieht man Effekte auch für kleines $\xi$.

## Einstein'sches Äquivalenzprinzip

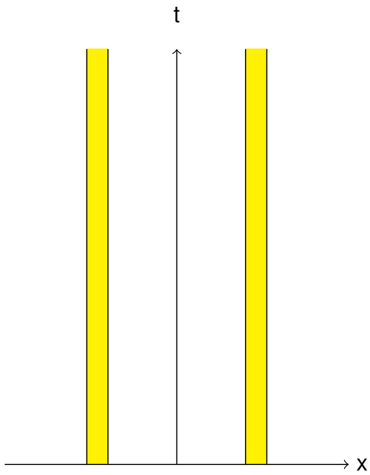
In einer infinitesimal kleinen Raumzeitregion sind die Gesetze der Physik, formuliert in einem frei fallenden Bezugssystem, die gleichen wie in Abwesenheit von Gravitation

In der Praxis: Für hinreichend kleine „Fahrstuhlkabinen" sind die Gezeiteneffekte über hinreichend kleine Zeiträume nicht nachweisbar.

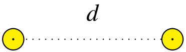
# Raumzeit-Bild: Kugeln im Weltraum



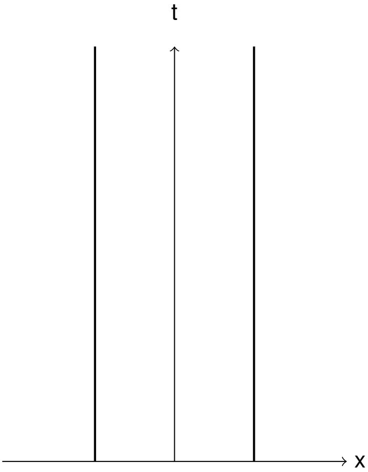

Raumzeitdiagramm dazu: siehe rechts.



# Raumzeit-Bild: Kugeln im Weltraum

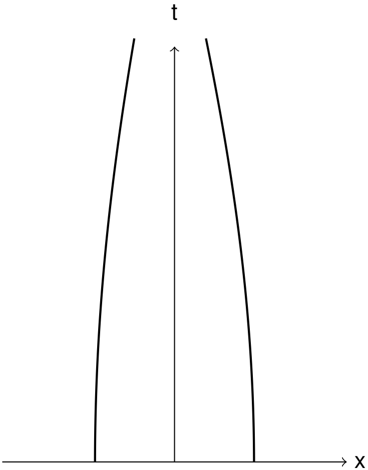



Raumzeitdiagramm
(vereinfachte Version)



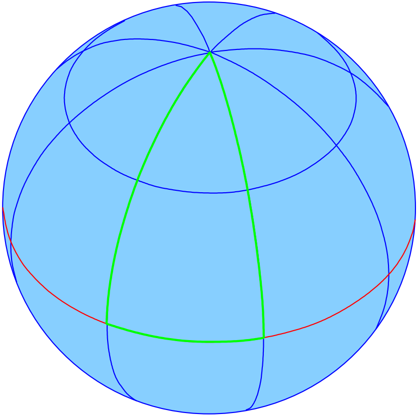
# Raumzeitdiagramm: Kugeln im freien Fall

Ursprünglich sind die Weltlinien parallel. Dann konvergieren sie!



# ... was sind demnach Weltlinien für freien Fall?

Wie im Beispiel konvergieren (oder divergieren) Weltlinien für den freien Fall, selbst wenn sie ursprünglich parallel sind. Geometrische Analogie:



# Legt Analogie mit gekrümmten Oberflächen nahe!

| | |
|---|---|
| Keine Kräfte: Gerade Weltlinien | Geradestmögliche Kurven in der Ebene: Geraden(abschnitte) |
| Freier Fall: Weltlinien können konvergieren/divergieren | auf gekrümmter Oberfläche: geradestmögliche Kurven können konvergieren/divergieren |
| Äquivalenzprinzip | infinitesimaler Ausschnitt aus gekrümmter Fläche sieht flach aus |

# Zeit und Gravitation: Trödelprinzip

An dieser Stelle lässt sich mithilfe von Weltlinien noch näher ausführen, was Gravitation mit Zeitverzerrung zu tun hat:

Trödelprinzip: Die Weltlinie im freien Fall zwischen A und B verläuft so, dass für den fallenden Körper die maximale Eigenzeit vergeht; Gefälle der „Zeitgeschwindigkeiten“ entspricht Gravitationsfeld.

Tatsächlich: Newton’sche Gravitation ist in Einsteins Theorie natürlicherweise durch variable „Zeitgeschwindigkeit“ (Koordinatenzeit vs. Eigenzeit) realisiert.

Details: Pössel, *Das Einstein-Fenster*, Kap. 4 und 5

# . . . und was ist mit dem Gummituch?

[Oft verwendetes Bild: Gravitation ist wie eine schwere Kugel auf einem Gummituch, welche die Bahn kleiner Murmeln auf dem Gummituch ablenkt]

. . . allenfalls als sehr allgemeines Bild „Raumzeiteigenschaften beeinflussen Bewegung“

Potenziell missverständlich:

- Newtonsche Gravitation ist fast nur Zeitverzerrung, nicht Raumkrümmung
- Merkwürdige Doppelrolle der Gravitation in der Analogie
- Man darf nicht zu genau hinsehen (Middleton & Langston, *American Journal of Physics* **82** (2014), 287)

# Genauere Beschreibung: Einsteingleichungen?

Begriff der Metrik als Verallgemeinerung von $\mathrm{d}l^2 = \mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2$ bzw. relativistisch $\mathrm{d}\tau^2 = \mathrm{d}t^2 - c^{-2}\mathrm{d}x^2$: Prinzipiell auch auf Schulniveau (vgl. *Das Einstein-Fenster* Kap. 5)

Probleme gibt's dann bei: Krümmungsgrößen, Einfluss der Krümmung auf Ableitungen. Bezug zu Gezeitenkräften.

⇒ Einsteingleichungen

(Ausdruck für Raumzeitkrümmung) = (Ausdruck für Energie-Impulsinhalt der Materie)

bleiben schwer zugänglich.

(Bester Ansatz, den ich kenne: John C. Baez & Emory F. Bunn, *Amer. Jour. Phys.* **73** (2005), 644-652; `http://arxiv.org/abs/gr-qc/0103044`)

# Gravitationsquellen

Wheeler-Reprise: „Die Raumzeit sagt der Materie, wie sie sich bewegen soll; die Materie sagt der Raumzeit, wie sie sich krümmen soll“

Gravitationsquellen: Verallgemeinerung von Newton, dort einzige Gravitationsquelle *Masse* (relativistisch: Ruhemasse).

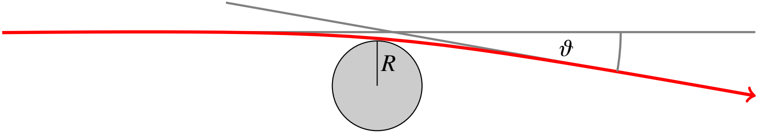
Bei Einstein ist auch Energie eine Gravitationsquelle ($E = mc^2$), außerdem: Druck! (Letzteres kann zu Stabilitätsproblemen bei kompakten Körpern führen.)

# Klassische Effekte

1. Gravitations-Rotverschiebung
2. Lichtablenkung durch Massen
3. Periheldrehung
4. Shapiro-Effekt

...davon am schultauglichsten (allein aus Äquivalenzprinzip ableitbar!): Gravitations-Rotverschiebung

# Lichtablenkung



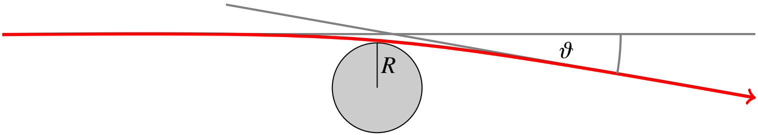

Newton'sche Rechnungen (Anfangsgeschwindigkeit $v = c$) ergeben (im Bogenmaß):

$$\vartheta = \frac{2GM}{c^2 R}.$$

(Vereinfachte Versionen wie auf `http://www.lehrer-online.de/lichtablenkung.php` bekommen den richtigen Faktor mehr zufällig heraus und sind letztlich so etwas wie verklausulierte Dimensionsbetrachtungen.)

Richtige Rechnung (Johann Georg von Soldner 1804): Mit Hyperbelbahn im Prinzip schultauglich, aber länglich/umständlich.

# Lichtablenkung

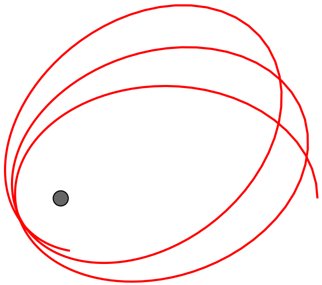



Rechnungen im Rahmen der ART ergeben (im Bogenmaß):

$$\vartheta = \frac{4GM}{c^2R}.$$

Hintergrund: Raumkrümmung trägt noch einmal denselben Ablenkungswinkel bei wie Zeitverzerrung. Messungen (erstmals Eddington und andere 1919) bestätigen den Einstein'schen Wert.

# Periheldrehung



Relativistische Periheldrehung: Perihel eines Planeten wandert mit der Zeit; umso stärker, je exzentrischer die Bahn.

Sonnensystem: größter Effekt bei Merkur, anomale Periheldrehung von $43''$ pro Jahrhundert (anomal = zusätzlich zu den Gravitationseffekten der anderen Planeten)

# Periheldrehung

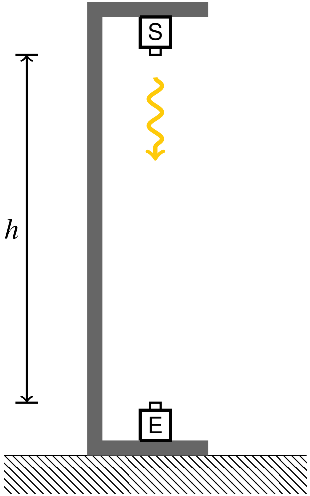
Doppelpulsar PSR J0737-3039 als sehr kompaktes System (zwei Neutronensterne, die beide Pulsare sind): relativistische Periheldrehung von $16{,}9^\circ$ pro Jahr!

Diese Systeme sind überhaupt die besten Testfälle für die relativistische Mechanik – auch Lichtablenkung, Shapiro-Effekt etc; vgl. den Artikel zu den Forschungen von Michael Kramer in *Max Planck Forschung 3/2013*, `http://www.mpg.de/mpf_2013_3`

# Shapiro-Effekt

Verzerrte Raumzeit als „ortsabhängiger Brechungsindex“ führt zu Laufzeitverzögerungen; nachgemessen durch Radarsignale zu den inneren Planeten, an der Sonne vorbei.

# Gravitations-Rotverschiebung




Situation: Licht fällt im Schwerefeld der Erde senkrecht nach unten.

Wellenlängenverschiebung

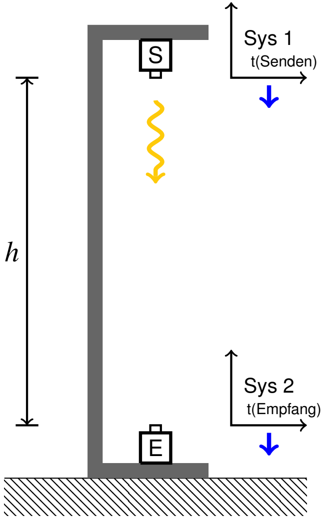
$$z \equiv \frac{\lambda_E - \lambda_S}{\lambda_S}$$

ist gegeben durch

$$z = -\frac{gh}{c^2} = -\frac{\Delta\Phi}{c^2},$$

bei $g \sim 9,81\ m/s^2$ der Gravitationsbeschleunigung und der Potentialdifferenz $\Delta\Phi = \Phi(r_S) - \Phi(r_E)$.

# Gravitations-Rotverschiebung: Rechnungsskizze




Frei fallende Systeme 1 und 2.

System 1: Im Moment der Lichtaussendung relativ zu Sender S in Ruhe

System 2: Im Moment des Licht*empfangs* relativ zu Empfänger E in Ruhe

Bestimme Sendefrequenz im Aussendemoment im System 1, Empfangsfrequenz im Empfangsmoment im System 2 (Äquivalenzprinzip - in System 1 ändert sich die Frequenz auf der Reise nicht!)

Vergleich von 1 und 2 im Empfangsmoment – Frequenzen hängen über Dopplereffekt $z = -v/c$ zusammen.

$v$ ist Geschwindigkeit von System 1 aufgrund von freiem Fall während der Zeit $h/c$, also $v = gh/c$.

# Rotverschiebung und Gang von Uhren

Uhren vergleichen mithilfe von Lichtsignalen: Rotverschiebung (diesmal nicht für Frequenz der Lichtwellen, sondern der aufeinanderfolgenden Signale!)

Statische Situation: Lichtsignale sollten von der einen zur anderen Uhr immer die gleiche Zeit benötigen ⇒ „Transport von Zeitintervallen“

Vergleich der Zeitintervalle (die Gravitations-Rotverschiebung erleiden!) mit lokalen Uhren setzt deren Zeit zueinander in Beziehung.

Uhrentransport (von A nach B, in B lange laufen lassen, von B zurück nach A) zeigt: Wenn die Lichtsignale zeigen, dass eine Uhr langsamer geht, dann geht sie auch tatsächlich langsamer (macht mehr „Ticks“ als Referenzuhr).

# Rotverschiebung und Gang von Uhren

Sei $\nu_1$ die Tick-Frequenz aller unserer Standarduhren. Sei eine dieser Uhren am Punkt 1 im Gravitationspotential, Radialkoordinate $r_1$. Von einem Ort 2 gesehen (Lichtsignal läuft radial nach außen nach $r_2 > r_1$) tickt die tieferliegende Uhr dann mit Frequenz $\nu_2$, wobei

$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = 1 - \frac{\Phi(r_2) - \Phi(r_1)}{c^2} = 1 + \frac{GM}{c^2}\left[\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right] < 1,$$

also mit geringerer Frequenz: Uhren tiefer im Gravitationsfeld gehen langsamer!

# Rotverschiebung und Gang von Uhren

Exakter Ausdruck in der Umgebung einer kugelsymmetrischen Masse $M$ ist:

$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = \sqrt{\frac{1 - \mathcal{R}/r_1}{1 - \mathcal{R}/r_2}}$$

mit

$$\mathcal{R} = \frac{2GM}{c^2}$$

dem Schwarzschild-Radius (Rechnung benutzt die Schwarzschild-Metrik: Eigenschaften der Raumzeit rund um eine kugelsymmetrische Masse).

# Relativität und GPS

GPS-Satelliten: Bahnradius $a = (20200 + 6370)$ km; nutze 3. Kepler'sches Gesetz:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} \cdot a^3 = (11{,}97 \text{ Stunden})^2$$

Bahngeschwindigkeit ist

$$v = \sqrt{\frac{GM}{a}} = \sqrt{|\Phi(a)|} \approx 3{,}9\ km/s \qquad \text{mit Gravitationspotential } \Phi(r).$$

Speziell-relativistische Zeitdilatation alleine:

$$\tau_{Sat} = \tau_{Erde}\sqrt{1-(v/c)^2} = \tau_{Erde}\sqrt{1-\frac{GM}{c^2 a}} \approx \tau_{Erde} \cdot 0{,}999999999916$$

# Relativität und GPS

Gravitations-Rotverschiebung alleine: Satellitenuhr läuft schneller,

$$\tau_{Sat} = \tau_{Erde}\left[1 + \frac{GM}{c^2}\left(\frac{1}{r_E} - \frac{1}{a}\right)\right] \approx \tau_{Erde} \cdot 1{,}00000000053$$

(mit $r_E$ dem Erdradius).

Umstellen auf Frequenzen $\nu \sim 1/T$, beide Effekte berücksichtigen: Eine Uhr mit Frequenz $\nu_{Sat}$ auf dem GPS-Satelliten hat von der Erde aus gemessen (Lichtsignale) die Frequenz

$$\nu_{Erde} = \nu_{Sat}\left[1 + \frac{GM}{c^2}\left(\frac{1}{r_E} - \frac{1}{a}\right)\right] \cdot \sqrt{1 - \frac{GM}{c^2 a}} \approx \nu_{Sat} \cdot \left(1 + 4{,}5 \cdot 10^{-10}\right)$$

# Relativität und GPS

Lösung der GPS-Konstrukteure: normale Grundfrequenz der verwendeten Atomuhren ist $10{,}23\ MHz$; Satellitenuhren sind aber eingestellt auf

$$10{,}229999995453\ MHz$$

(für unsere Rechnung sollten es sein: $10{,}229999995438\ MHz$).

Was würde andernfalls passieren?

# Relativität und GPS

Häufige falsche Rechnung:

Tag hat $86400$ Sekunden, in dieser Zeit würden unkorrigierte Satellitenuhren um $\Delta t = 3{,}8 \cdot 10^{-5}$ Sekunden vorgehen.

Satelliten bestimmen Entfernungen über Lichtlaufzeiten; typischer Abstandsfehler bei diesem Zeitfehler ist beim Vergleich von Satellitenuhren mit „GPS-Empfängeruhren“ auf der Erde:

$$c\,\Delta t \sim 10 \text{ Kilometer}$$

pro Tag!

Findet man nicht selten so auch in der populärwissenschaftlichen Literatur (leider auch bei mir in Texten Jahrgang 2005) und z.B. auch auf `http://schule-gps.de/`

# Relativität und GPS

In Wirklichkeit: GPS-Empfänger haben keine Atomuhr aufgebaut — Zeit und Ort werden aus direktem Vergleich von mindestens vier Satellitensignalen bestimmt!

Für Abstandsfehler durch Lichtsignallaufzeit ist die charakteristische Zeitskala $a/c < 0{,}1\ s$ und über diesen Zeitraum hinweg gehen Satellitenuhren höchstens um $\Delta t = 4 \cdot 10^{-11}\ s$ falsch, entsprechend

$$c\,\Delta t \sim 1\ cm$$

und damit weit unterhalb der Genauigkeit von GPS!

# Relativität und GPS

Größerer Effekt: Ist der Ort relativ zu den Satelliten bestimmt, benutzt das System auf die irdische Zeit bezogene Ephemeriden, um den Ort relativ zum irdischen System zu berechnen.

Wäre die Satellitenzeit nicht-relativistisch, würde das System in den Ephemeriden zu etwas falscher Zeit nachschauen.

Je länger das System läuft, umso größer ist der Effekt, aber: Jede Woche wird das System zurückgesetzt!

Maximaler Fehler: Direkt vor der nächsten Rücksetzung!

# Relativität und GPS

Maximal: Nach $7 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60$ Sekunden, gingen die Satellitenuhren um $2{,}7 \cdot 10^{-4}\ s$ vor.

Charakteristische Geschwindigkeit ist die Bahngeschwindigkeit der Satelliten (vereinfacht! vernachlässigt Durcheinanderlaufen!), also Satelliten-Positionsfehler

$$\Delta s_{Sat} \sim (3,9\ km/s) \cdot (2{,}7 \cdot 10^{-4} s) \sim 1m.$$

In Wirklichkeit werden Länge und Breite auf der Erde berechnet; Positionsfehler dabei ergibt sich auf der Erdoberfläche zu

$$\Delta s_{Erde} = \Delta s_{Sat} \cdot \frac{r_E}{a} \sim 25\ cm.$$

Genauere Rechnung ergibt einen etwas größeren Wert Größenordnung $\sim 1$ Meter – das ist in derselben Größenordnung wie andere GPS-Fehler.

# Relativität und GPS

Fazit:

Relativistische Effekte (SRT + Äquivalenzprinzip) sind im GPS-System eindeutig nachzuweisen (relative Genauigkeit der Atomuhren $10^{-13}$, so dass sich die Betreiber am Ende jeder Woche über denselben deutlich messbaren Fehler wundern würden).

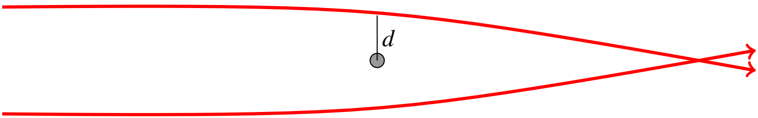
Berücksichtigung der relativistischen Effekte bringt merkliche Verbesserung der GPS-Fehlerbilanz.

Aber es ist keineswegs so, dass GPS völlig funktionsuntauglich würde, wenn man die Relativitätstheorie weglässt.

# Anwendungen

1. Gravitationslinsen
2. Schwarze Löcher
3. Gravitationswellen
4. Kosmologie

# Gravitationslinsen




Lichtablenkung kann zu optischer Verstärkung/Vergrößerung bzw. Verzerrung führen; Grundgleichung Ablenkungswinkel (im Bogenmaß) von

$$\vartheta = \frac{4GM}{c^2 d}$$

für Lichtstrahlen, die um $d$ vom „Linsenzentrum“ parallelversetzt sind.

**⇒ Vortrag von Robert Schmidt und Workshop mit einfachen Modellen**

# Schwarze Löcher

Kompakte Regionen, aus denen noch nicht einmal Licht entkommen kann; astrophysikalisch wichtig, da Akkretion (Materie fällt auf Schwarzes Loch, sammelt sich in Scheibe) der Motor für AGN, Mikroquasare ist

Für die Schule tauglich: Fluchtgeschwindigkeitsrechnung; Flussmodell (cf. `http://arxiv.org/abs/gr-qc/0411060`), Abschätzung Wirkungsgrad Akkretion.

⇒ **Vortrag von Knud Jahnke und Bastel-Workshop**

# Gravitationswellen

Wellenartige Störungen, breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus; Analogie zu elektromagnetischen Wellen (aber: nicht Dipol, sondern Quadrupol)

Nobelpreis 1993 für indirekten Nachweis (Effekte auf Bahn eines Binärpulsars)

Zukünftig: Gravitationswellen als astronomischer Informationsträger, „Gravitationswellen-Astronomie“

# Kosmologie

Weltmodelle auf Basis der Allgemeinen Relativitätstheorie – Expansion des Universums und der Urknall

Schule: Dynamik von Universen mit Newton'schem Gravitationsgesetz gut ableitbar, Milne-Universum als speziell-relativistisches Modell für Raumexpansion

⇒ **Vortrag von Björn Malte Schäfer**

# Literatur (Auswahl)


Diese Folien: `http://www.haus-der-astronomie.de/art2014`

Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule (Aulis): Heft 4/54 (Juni 2005): *Didaktik der Relativitätstheorien*

Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule (Aulis): Heft 7/54 (Oktober 2005): *Einstein – fächerübergreifend*

Astronomie + Raumfahrt im Unterricht: Themenheft *Kosmologie* (Heft 107, Ausgabe 5, Oktober 2008; Friedrich-Verlag)

Uwe Schröter, „ART mit Mitteln der Schulmathematik“ in K.-H. Lotze, W. B. Schneider (Hg) *Wege in der Physikdidaktik* Bd. 5 (2002), `http://www.solstice.de`.

Karl-Heinz Lotze, „Das Weltmodell der Newtonschen Kosmologie“ ibid

Markus Pössel, *Das Einstein-Fenster*. Hoffmann & Campe 2005.

*Einstein Online*: `http://www.einstein-online.info`