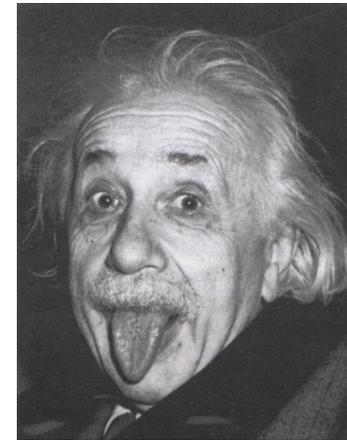


# Auswirkungen der Einsteinschen Theorien

York Schröder

(Theoretische Physik / Uni Bielefeld)



Schülerakademie im ZiF, 09 Dec 2005

# Jubilaumsjahr 2005

## 1000-jähriges Bestehen

- der Akademie von Ma'mun in Usbekistan (erste Akademie Zentralasiens)

## 200. Todestag

- des Dichters Friedrich Schiller

## 150. Todestag

- des Mathematikers Carl Friedrich Gauss

## 100. Todestag

- des französischen Schriftstellers Jules Verne

# Jubilaumsjahr 2005

## 1000-jähriges Bestehen

- der Akademie von Ma'mun in Usbekistan (erste Akademie Zentralasiens)

## 200. Todestag

- des Dichters Friedrich Schiller

## 150. Todestag

- des Mathematikers Carl Friedrich Gauss

## 100. Todestag

- des französischen Schriftstellers Jules Verne

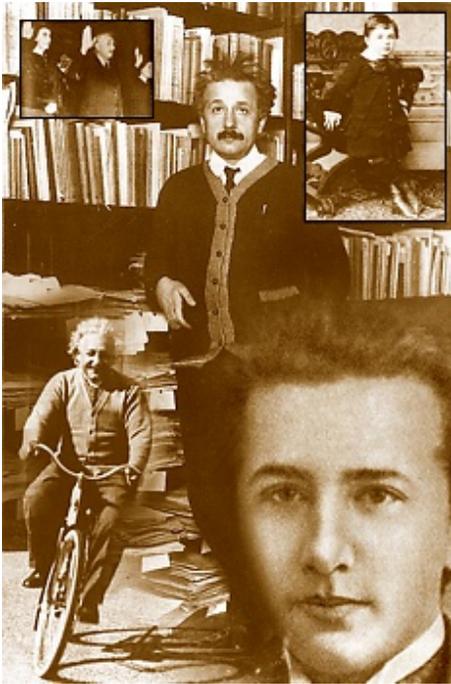
## 100-jähriges Jubiläum

- *des Annus Mirabilis*

## 50. Todestag

- Albert Einsteins

# Kurze Biographie AE



- 1879 Geburt in Ulm
- 1885-94 Schule in München
- 1895 Aufnahmeprüfung ETH Zürich mit 16, negativ
- 1896 Matura (Abitur) in Aargau
- 1896-1900 Studium (Lehramt Mathe/Physik) in Zürich
- 1900-02 kurze Lehraufträge, Nachhilfe etc.
- 1902 Anstellung beim Patentamt Bern
  
- 1905 *Annus Mirabilis*: vier wegweisende Veröffentlichungen
- 1907-13 Aufstieg in der europäischen Wissenschaft
  - ▷ *Habilitation (U Bern) 1907*
  - ▷ *Priv. Dozent Bern 1908*
  - ▷ *Außerord. Prof. Zürich 1909*
  - ▷ *Prof. Prag 1911*
  - ▷ *Prof. Zürich 1912*

# Der Erziehungsrat

des  
Kantons Aargau

urkundet hiemit:

Herr Albert Einstein von Illm,

geboren den 14. März 1879,

besuchte die aargauische Kantonschule & zwar die III. & IV. Klasse  
der Gewerbeschule.

Nach abgelegter schriftl. & mündl. Notenprüfung am 18., 19. & 21.

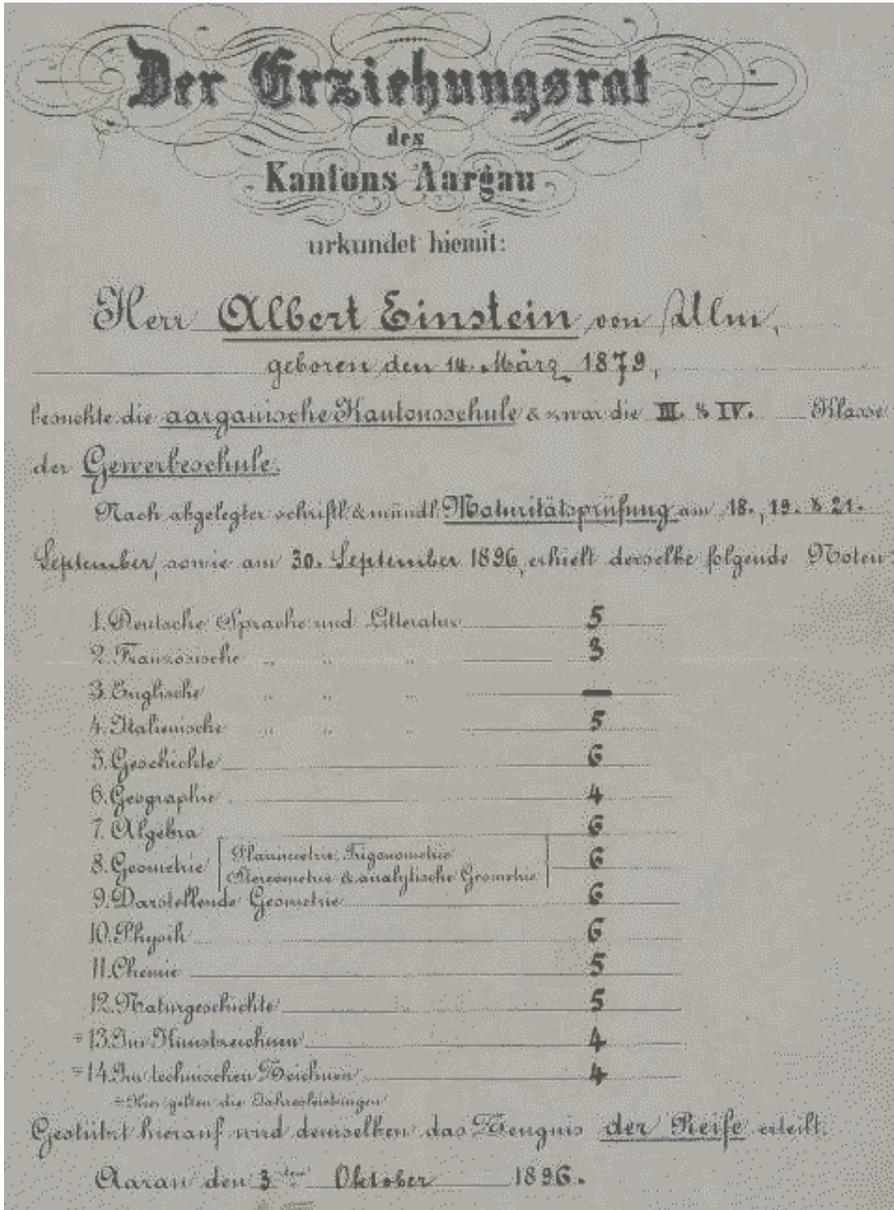
September, sowie am 30. September 1896, erhielt derselbe folgende Noten:

1. Deutsche Sprache und Literatur	5
2. Französisch	3
3. Englisch	—
4. Italienisch	5
5. Geschichte	6
6. Geographie	4
7. Algebra	6
8. Geometrie	6
9. Darstellende Geometrie	6
10. Physik	6
11. Chemie	5
12. Naturgeschichte	5
13. Das Kunstzeichnen	4
14. Das technische Zeichnen	4

= Hier gelten die Nachleistungen

Gestützt hierauf wird demselben das Augnis der Reife erteilt.

Aarau den 3<sup>ten</sup> Oktober 1896.



kein schlechter Schüler  
(6=sehr gut, 5=gut, ...)

- **1913-33** Prof. U. Berlin, Direktor Akademie der Wissenschaften
  - ▷ **1914-18** WW II
  - ▷ **1916** *Allgemeine Relativitätstheorie*
  - ▷ **1921** *Nobelpreis Physik (für Arbeit an Quanten-Theorie)*  
*etliche andere Preise/ Ehrungen folgen*
  - ▷ **1928** *beginnt Arbeit an vereinheitlichter Theorie*
- **1933** kommt von einer längeren Reise nicht nach Deutschland zurück (nach Nazi-Machtergreifung Jan 1933 existiert keine wiss. Freiheit mehr), bleibt in Princeton

- **1933-45** Professur am IAS Princeton
- **1939** unterzeichnet Aufforderung an Roosevelt, Bau der Atombombe voranzutreiben
- **1945** Hiroshima, Nagasaki
- **1955** Tod in Princeton



# Annus Mirabilis 1905

## März: Photoelektrischer Effekt

- Quanten-Struktur des Lichts

## Mai: Brown'sche Molekularbewegung

- mikroskopische Teilchen in Lösung
- Werkzeug zur Untersuchung der Atombewegung

## Juni/September: Spezielle Relativitätstheorie

- Lichtgeschwindigkeit konstant in allen Bezugssystemen
- neues Verständnis von 'Raum-Zeit'
- fundamentaler Fortschritt seit Newton's klassischer Physik (1687)

- Konsequenz:

A photograph of a handwritten equation on a piece of paper. The equation is  $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . The 'E' is written in a cursive style, and the denominator is a square root of a fraction. The paper has a light blue background.

Senkrechtstart mit 26! (try that..)

# Photoelektrischer Effekt

- prägend für moderne Quantentheorie des Lichts
- (UV) Licht auf Metall-Oberfläche
  - ▷ *Messung: Geschwindigkeit  $v$  der freigesetzten Elektronen*
  - ▷ *Ergebnis:  $v \sim$  Frequenz des Lichts, aber nicht  $\sim$  Intensität*

# Photoelektrischer Effekt

- prägend für moderne Quantentheorie des Lichts
- (UV) Licht auf Metall-Oberfläche
  - ▷ *Messung: Geschwindigkeit  $v$  der freigesetzten Elektronen*
  - ▷ *Ergebnis:  $v \sim$  Frequenz des Lichts, aber nicht  $\sim$  Intensität*
- Einstein: Licht nicht kontinuierlich, sondern wie Gas (Molekül  $\hat{=}$  Photon).  $E = \hbar\nu$
- untermauert Planck's Lösung (1900) des Problems der Schwarzkörper-Strahlung

wahre Bedeutung:

- gewöhnt Physiker an dualen Charakter Teilchen/Welle
- de Broglie 1924: Materie genauso!
- danach: alle Spekulationen über Elementarbausteine beeinflusst

... und verschafft AE den **Nobelpreis** 1921

## ein weiterer Quanten-Effekt: elektronisches Rauschen

- Konsequenz der Quantelung der elektrischen Ladung (und damit des Stromflusses)
- spätestens seit der Geburt der el. Verstärkertechnik 'beobachtbar'

## ein weiterer Quanten-Effekt: elektronisches Rauschen

- Konsequenz der Quantelung der elektrischen Ladung (und damit des Stromflusses)
- spätestens seit der Geburt der el. Verstärkertechnik 'beobachtbar'

... und: Sie schauen gerade auf Quanten!

- in der Retina gibt es Moleküle, in denen die Atomverbindungen unter Spannung stehen
- ein (von der Leinwand in Ihr Auge reflektiertes) Lichtquant geeigneter Energie kann ein geeignetes Molekül zur Streckung bringen
- dies löst eine Reaktion aus, die ein Signal über einen Nerv in Ihr Gehirn schickt

# Brown'sche Molekularbewegung

- Verallgemeinerung der zufälligen Bewegung von Gasmolekülen (Boltzmann)
- beobachtete Bewegung mikroskopischer Teilchen in Flüssigkeit
- verursacht durch 'Bombardierung' von Molekülen
- # Moleküle pro Volumeneinheit  $\sim$  Distanz pro Zeiteinheit
- experimenteller Nachweis 1909 (Perrin)
- direktester (und beeindruckendster) Beweis für Existenz von Molekülen

## Bedeutung:

- Atome existieren als reale Objekte!
- (vorher: könnten rein theoretisches Hilfsmittel sein)

# Spezielle Rel

*Kernidee:* physikalische Gesetze sind für alle gleichförmig bewegten Beobachter identisch (kein 'Äther').

- einfache Beschreibung des Effekts von Relativbewegung auf die grundlegendsten physikalischen Messinstrumente, Skala und (perfekte) Uhr
- die Idee war reif (Voigt, Larmor, Lorentz, Michelson) ..
- Lichtgeschwindigkeit  $c$  als obere Grenze
- einfache mathematische Formulierung: Lorentz-Transformation

z.B.  $x' = \frac{x-vt}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ ,  $t' = \frac{t-vx/c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$

*besondere Leistung AE's:* zeigt exzeptionellen Einfallsreichtum, Einsicht (nicht so sehr - gemessen an höchsten Standards - mathematisches Genie)

# Lichtgeschwindigkeit $c$

$$c \approx 300000 \text{ km/s} \approx 1 \text{ Milliarde km/h}$$

das ist

- 1 Million mal schneller als ein Flugzeug
- 40000 mal schneller als das Space Shuttle im Orbit

bei einer Reise mit Lichtgeschwindigkeit braucht man

- 1 Sekunde für 7 Erdumrundungen
- 8 Minuten von der Erde zur Sonne
- 26000 Jahre zum schwarzen Loch im Zentrum der Milchstrasse

Geometrische Konsequenzen (Aberration, Drehung, Verzerrung) für Messungen an bewegten Objekten

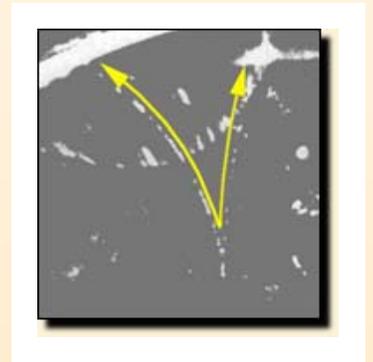
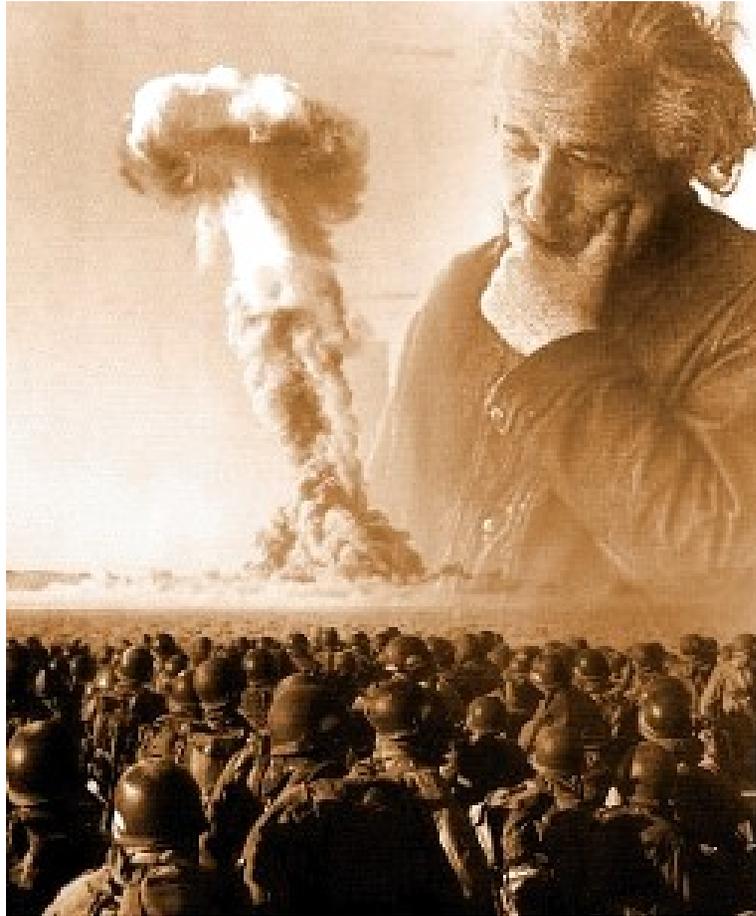
→ movies by [Kraus/Ruder/Weiskopf]

# Spezielle Rel, $E = mc^2$

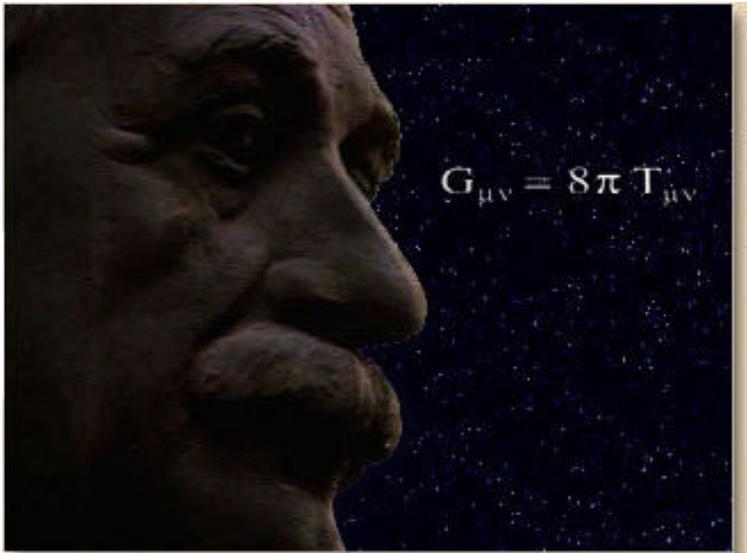
haben weitreichende Konsequenzen! Einige davon:

aber auch:

- warum scheint die Sonne? (schleudert  $m = E/c^2$  hinaus - etwa 4 Millionen Tonnen pro Sekunde)
- Ruheenergie einer Fahrkarte genügt, um einen Zug mehrmals um den Äquator zu schicken
- Energie  $\rightarrow$  Masse!  
Blasenkammer-Aufnahme 1933.
- etliche 'Paradoxa': Zwillinge, ..

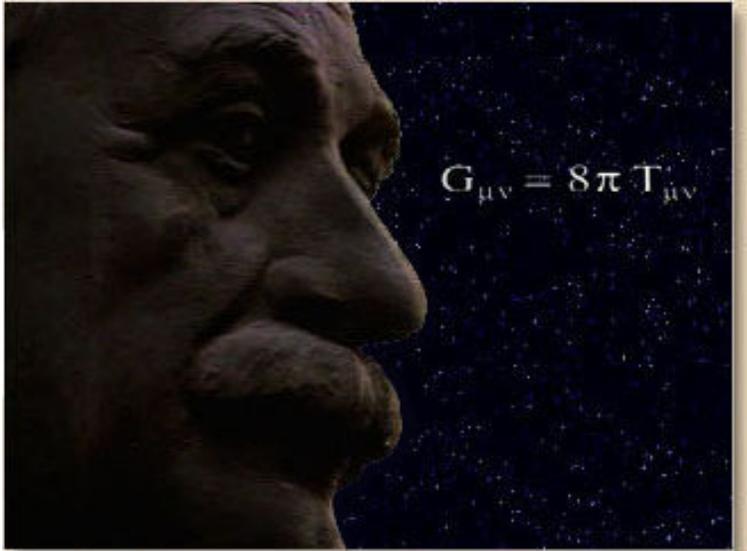


# Allgemeine Rel (ART)



- “Sind Gravitations- und Beschleunigungs-Effekte unterscheidbar?”  
→ [movie by \[pbs.org,NOVA\]](#)
- “Wird Licht von Gravitation abgelenkt?”
- 10 Jahre (harter) Arbeit
- sehr komplexe Theorie ...

# Allgemeine Rel (ART)



- “Sind Gravitations- und Beschleunigungs-Effekte unterscheidbar?”  
→ [movie by \[pbs.org,NOVA\]](#)
- “Wird Licht von Gravitation abgelenkt?”
- 10 Jahre (harter) Arbeit
- sehr komplexe Theorie ...

- ... aber sehr einfache Formel:  $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$
- mit interessanten Namen: Einstein-Tensor, Newton-Konstante, Feldstärke-Tensor, kosmologische Konstante, Cristoffel-Symbole, Riemann’scher Krümmungstensor, Ricci-Tensor, Krümmungs-Skalar

# ART in Formeln (sorry..)

- (einfach nur weil wir viele Abkürzungen benutzen):

$$\begin{aligned}\Gamma_{\alpha\beta}^{\mu} &= \frac{1}{2}g^{\mu\nu} (\partial_{\beta}g_{\nu\alpha} + \partial_{\alpha}g_{\nu\beta} - \partial_{\nu}g_{\alpha\beta}) \\ R^{\mu}_{\nu\alpha\beta} &= \partial_{\alpha}\Gamma^{\mu}_{\nu\beta} - \partial_{\beta}\Gamma^{\mu}_{\nu\alpha} + \Gamma^{\mu}_{\sigma\alpha}\Gamma^{\sigma}_{\nu\beta} - \Gamma^{\mu}_{\sigma\beta}\Gamma^{\sigma}_{\nu\alpha} \\ R_{\mu\nu} &= R^{\sigma}_{\mu\sigma\nu} \quad , \quad R = R_{\mu\nu}g^{\mu\nu} \\ G_{\mu\nu} &= R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}\end{aligned}$$

- System von 10 nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen zweiter Ordnung für den metrischen Tensor  $g_{\mu\nu}$
- dieser bestimmt schliesslich unsere Messung von Entfernungen und Zeit:  
 $ds^2 = g_{\mu\nu}(x) dx^{\mu} dx^{\nu}$
- Lösungen geben die **Struktur der Raumzeit**
- viele interessante Lösungen: Expansion, **schwarze Löcher**, Gravitationswellen, ..
- ART brauchte neue mathematische Disziplin: Tensor-Kalkül [Ricci, Levi-Civita]

# ART in Worten

Worum geht es?

- Raum und Zeit. Warum fallen Dinge, warum kreist der Mond um die Erde, ..
- Masse krümmt Raum und Zeit. Je mehr Masse, desto besser ..
- Uhren in Bereichen grosser Raumkrümmung gehen langsamer
- Bewegung findet auf kürzesten Verbindungslinien statt.  
Diese sind manchmal nicht 'gerade' → [movie by \[pbs.org,NOVA\]](#)

# ART in Worten

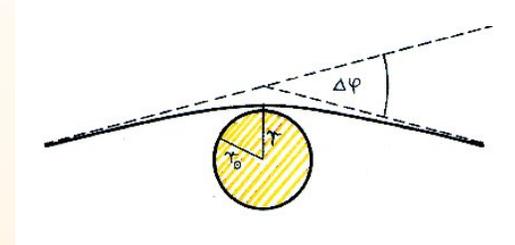
Worum geht es?

- Raum und Zeit. Warum fallen Dinge, warum kreist der Mond um die Erde, ..
- Masse krümmt Raum und Zeit. Je mehr Masse, desto besser ..
- Uhren in Bereichen grosser Raumkrümmung gehen langsamer
- Bewegung findet auf kürzesten Verbindungslinien statt.  
Diese sind manchmal nicht 'gerade' → [movie by \[pbs.org,NOVA\]](#)

Die Planetenbahnen folgen also nicht der Anziehungskraft?

- Nein, die braucht man seit der ART nicht mehr.
- z.B.: die Erde will an der Sonne gerade vorbeifliegen, wegen der 'Delle' in der Raumzeit fliegt sie aber um die Sonne herum. Die 'Delle' ist so gross, dass sich die Umlaufbahn schliesst.

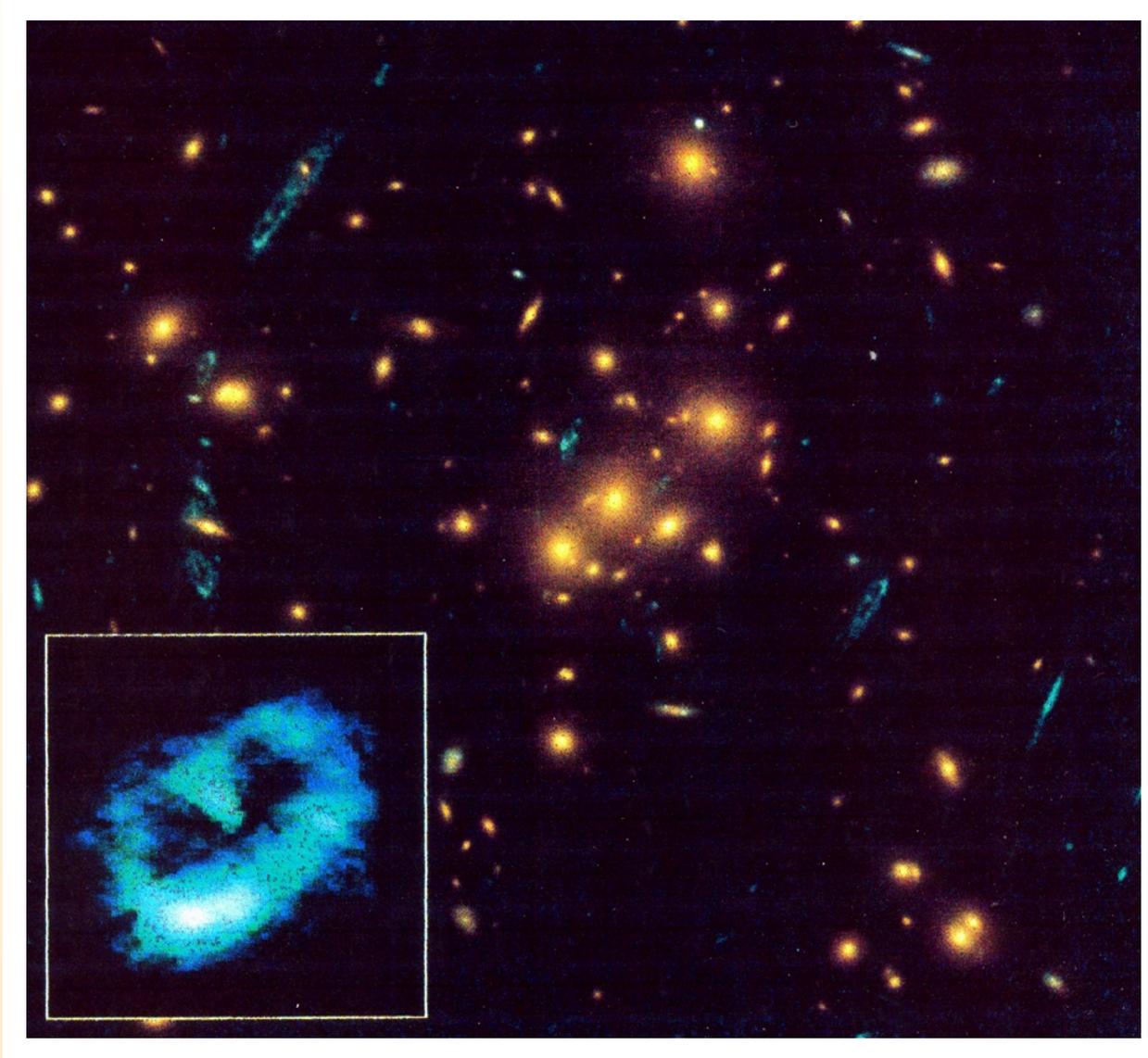
- Unterschied in Planeten-Theorie zwischen Newton (Mechanik) und ART:
  - ▷ *extrem klein!*
  - ▷ *ART 'löst' ein (seit 1859) bekanntes Problem: langsame Veränderung in Merkur's Umlaufbahn (Periheldrehung)*
  - ▷ *ART macht Vorhersage: Lichtablenkung von fernen Sternen nahe der Sonne (Sonnenfinsternis 1919: OK!!!)*
  - ▷ *weitere Vorhersage: Rotverschiebung sehr massiver Sterne (erst sehr viel später gemessen)*



## Anwendung der ART auf Kosmologie

- altes "unlösbares" Problem: "Wie kann das Universum eine gleichmäßige Dichte haben, den ganzen Raum füllen, und trotzdem eine endliche Masse haben?"
- 'big bang', Raumkrümmung, Expansion des Universums
- Penzias und Wilson entdecken 1965 kosmische Hintergrundstrahlung

# Konsequenz der ART: Gravitations-Linsen



Galaxy Cluster 0024+1654, Hubble Space Telescope

# weitere wissenschaftliche Leistungen

## Grosse vereinheitlichte Theorien (GUT)

- arbeitet an Vereinheitlichung von Rel mit Elektromagnetismus
- viele Veröffentlichungen, keine besonders signifikant
- noch heute ein 'heisses' Forschungsthema (String-Theorie,..)

# weitere wissenschaftliche Leistungen

## Grosse vereinheitlichte Theorien (GUT)

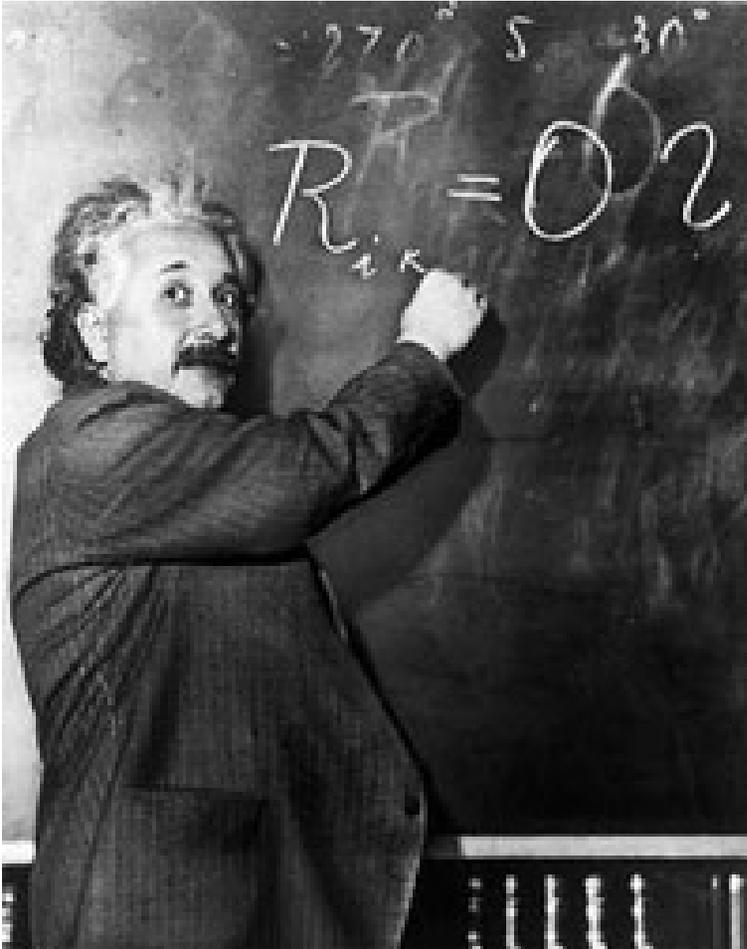
- arbeitet an Vereinheitlichung von Rel mit Elektromagnetismus
- viele Veröffentlichungen, keine besonders signifikant
- noch heute ein 'heisses' Forschungsthema (String-Theorie,..)

## Gegner der Quantenmechanik [Heisenberg 1925, Schrödinger 1926, ..]

- Einstein: "Gott würfelt nicht", glaubt an 'kausale' Physik
- AE fordert Bohr (auf Konferenz 1930) heraus:  
Gedanken-Experiment zur Widerlegung der Unbestimmtheitsrelation
  - ▷ *Kasten mit Strahlung, Uhr die Schalter öffnet und ein Photon austreten lässt. Kenne nach Wiegen Zeitpunkt und Energie des Photons mit unendlicher Genauigkeit (?)*.
- Bohr: messe Masse durch Gegengewicht! Dies beeinflusst die Position, und nach Spez Rel (Zeit ist nicht absolut) die Zeit.

AE wissenschaftlich relativ isoliert, aber medienwirksam ..

# Zusammenfassung/Ausblick



- Paradigmenwechsel:  
Raumzeit ist dynamisch
- prägender Einfluß auf Physik, Kosmologie
- Newton etabliert Gravitation in voller Einfachheit und Universalität
- Einstein enthüllt Gravitation als Phänomen der Weltgeometrie
- 'graue' Theorie? Kein **GPS** ohne ART!
- große Vereinheitlichung?!
- heute nicht diskutiert: AE der Mensch, Jude, Vater, Philosoph, Pazifist, Politiker, ...

# EINLADUNG

Vortrag

Mo, 12.12.2005, 18 Uhr

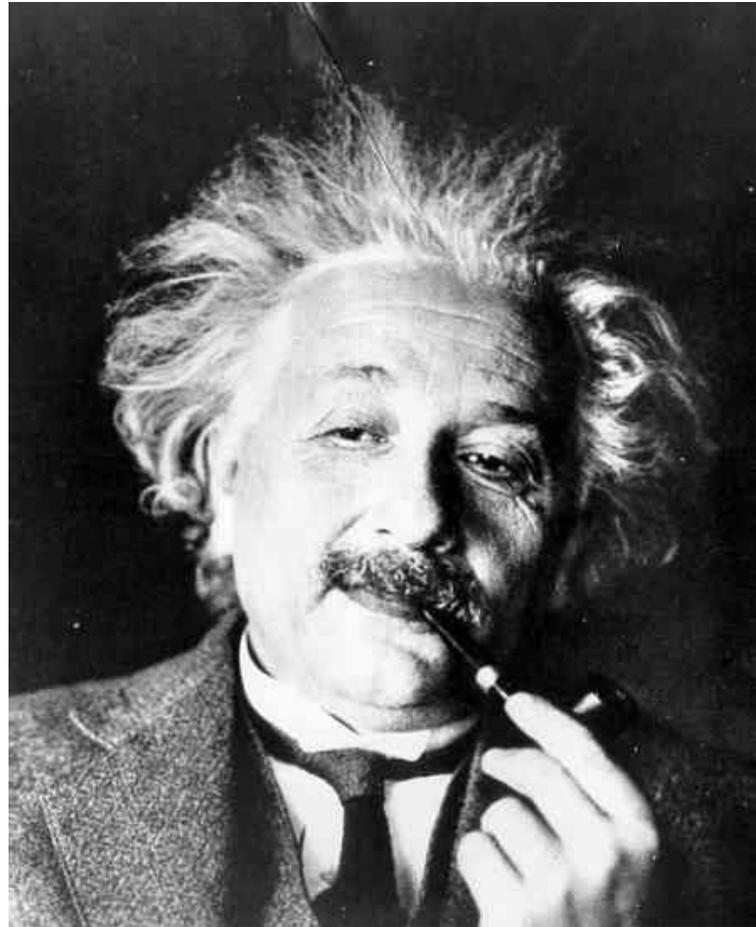
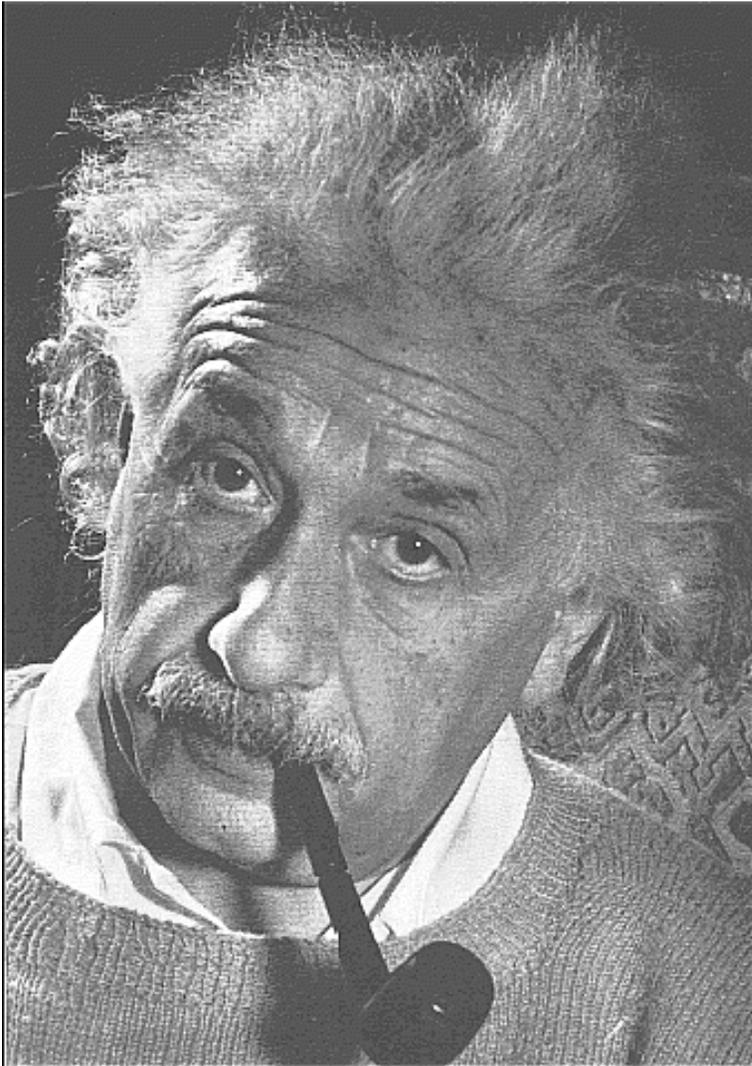
Uni Bielefeld, Hörsaal 6

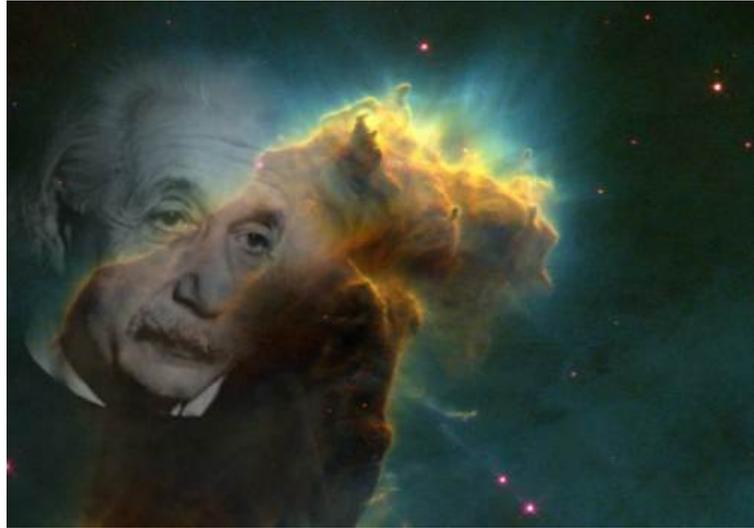
“Einstein und das moderne Weltbild”

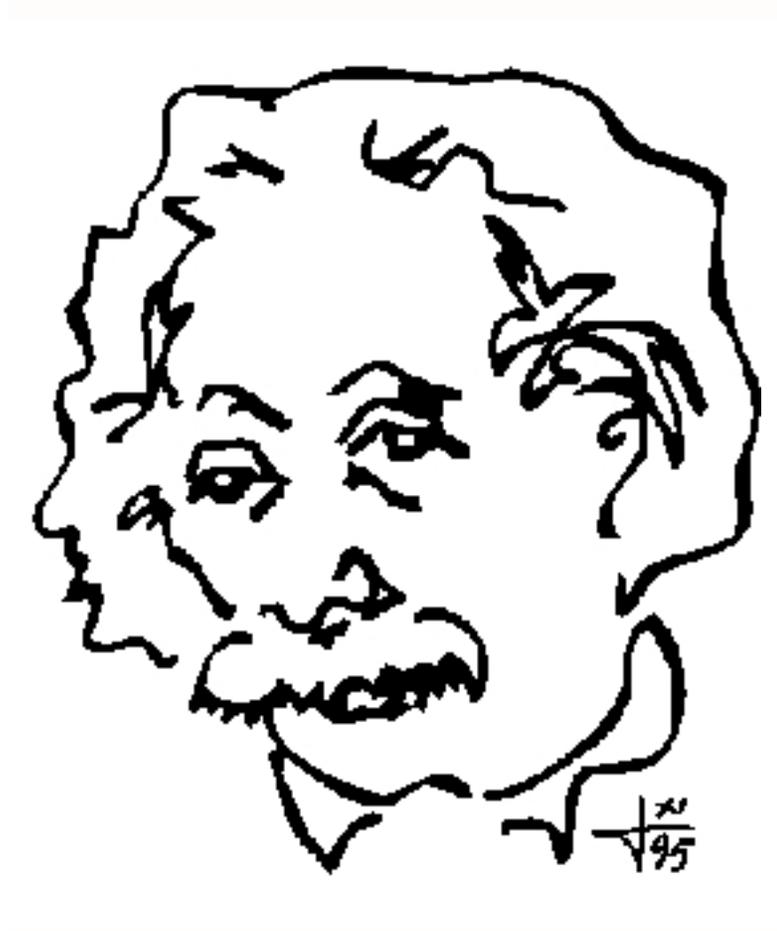
Martin Carrier

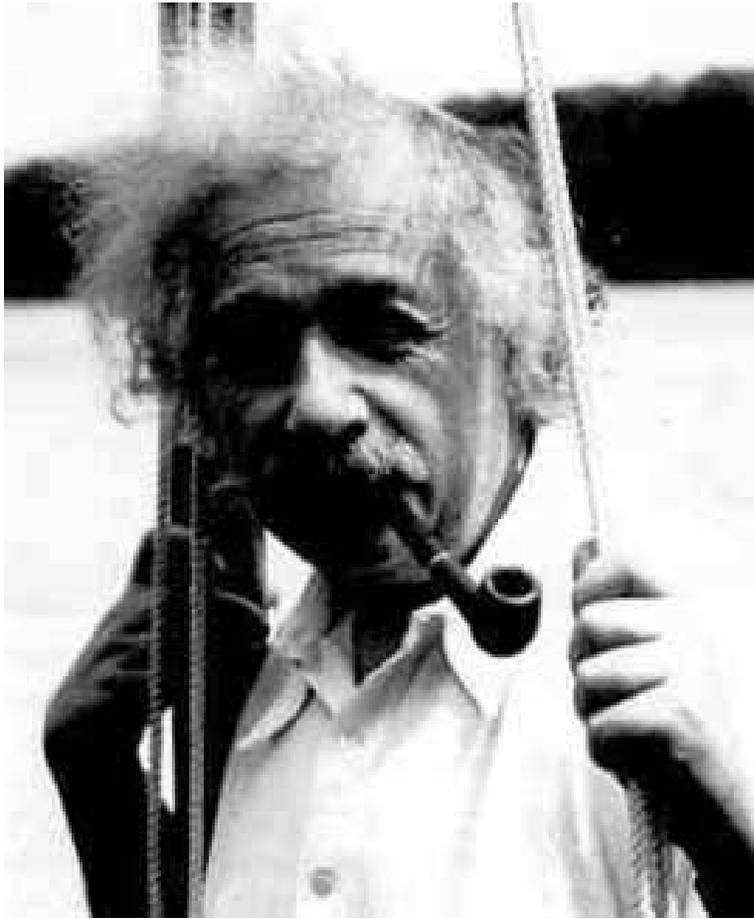
(Philosophie / Uni Bielefeld)

# Galerie









For "Lectures on Relativity" 2. Nov. 1946

Das Gesetz von der Erhaltung von Masse und Energie ( $E=mc^2$ )  
 In der vor-relativistischen Physik gab es zwei verschiedene unabhängige  
 Erhaltungsgesetze, die strenge Gültigkeit beanspruchten, nämlich  
 1) den Satz von der Erhaltung der Energie  
 2) den Satz von der Erhaltung der Masse.

Der Satz von der Erhaltung der Energie, welcher schon vor dem 17. Jahrhundert  
 in seiner vollen Allgemeinheit als gültig vermutet wurde, entwickelte  
 sich im 19. Jahrhundert wesentlich als eine Folge eines Satzes der Mechanik.  
 Man betrachtete ein Pendel, dessen Masse  $m$  zwischen  
 den Punkten A und B hin und her schwingt.



In A (und B) verleiht die Geschwindigkeit  $v$ , und die Masse  $m$  Arbeit  $m \cdot h$  höher als  
 als im tiefsten Punkte C der Bahn. In C  
 ist diese Arbeit verloren gegangen, dafür aber hat die Masse hier eine  
 Geschwindigkeit  $v$ . Es ist, wie man sieht, Arbeit in Geschwindigkeit  
 und umgekehrt wohl verwandelbar. Die exakte Beziehung  
 ist

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

wobei  $g$  die Beschleunigung der Erdbeschwerk bedeutet. Das Interessante  
 dabei ist, dass diese Beziehung unabhängig ist von der Größe des  
 Pendels und überhaupt von der Form der Bahn zu welcher die Masse  
 geführt wird. Interpretation: Es gibt ein etwas (nenn ich es Energie)  
 die während des Vorgangs erhalten bleibt. In A hat die Energie eine  
 Energie der Lage oder potentielle Energie" in C eine Energie der Bewegung  
 oder kinetische Energie". Wenn diese Auffassung das Mass der Sache  
 richtig erklärt, so muss die Summe

$$mgh + \frac{1}{2}mv^2$$

über für alle Zwischenlagen denselben Wert haben, wenn man mit  
 $h$  die Höhe über C und mit  $v$  die Geschwindigkeit fest in diesem beliebigen  
 Punkte der Bahn. Dies verhält sich in der Tat so. Die Kräfteleistung  
 dieses Satzes gibt den Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie.  
 Wie aber, wenn das Pendel schliesslich durch Reibung zur Ruhe gekommen  
 ist? Davon später.

Beim Stillwerden der Wärme. Jetzt was man zu verstehen  
 "Eigenschaften gekanntes und Grundlegung der Thermodynamik,  
 dass die Wärme ein unzerstörbarer Stoff sei, der von wärmeren  
 zum kälteren Stoff fließt", so sehen einen Satz von der Erhaltung  
 der Wärme" vor geben. Anderserseits aber wissen seit mindestens  
 Zehnen Jahrhunderten bekannt, und davon durch Reibung Wärme erzeugt  
 wird (Reibung der Indianer). Nachdem sich die Physiker lange abgemüht

A. Einstein Archive  
 1-148

Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie.

A. Prinzipielle Erwägungen zum Postulat der Relativität.

§1. Die spezielle Relativitätstheorie.

Die im Nachfolgenden dargestellte Theorie bildet die denkbar weitgehendste  
 Verallgemeinerung der heute allgemein als "Relativitätstheorie" bezeichneten  
 Theorie, die sich aus der "speziellen Relativitätstheorie" und der "speziellen  
 Gravitationstheorie" ergibt. Diese Verallgemeinerung wurde sehr wesentlich  
 durch die Gestalt, welche der speziellen Relativitätstheorie durch  
 Minkowski gegeben wurde, welcher Mathematiker zuerst die formale  
 Gleichwertigkeit der räumlichen und der zeitlichen Koordinaten klar erkannt  
 und für den Aufbau der Theorie nutzbar machte. Die für die allgemeine  
 Relativitätstheorie nötigen mathematischen Hilfsmittel liegen fertiger  
 bereit in dem "absoluten Differentialkalkül", welcher auf den Forschungen  
 von Gauss, Riemann und Christoffel über nicht-euklidische  
 Mannigfaltigkeiten ruht und von Ricci und Levi-Civita in ein  
 System gebracht und bereits für die Probleme der theoretischen  
 Physik angewendet wurde. Ich habe im Abschnitt B der vorliegenden  
 Abhandlung alle für mich nötigen, bei dem Physiker nicht als bekannt  
 voranzusetzenden mathematischen Hilfsmittel angedeutet in  $\S 2$ ,  $\S 3$ ,  $\S 4$ ,  
 voranzusetzenden Weise entwickelt, sodass ein Studierender, der  
 mathematische Literatur für das Verständnis der vorliegenden Abhand-  
 lung insoweit erforderlich ist. Endlich sei an dieser Stelle dankbar  
 meines Freundes, des Mathematikers Grossmann gedacht, der mir  
 durch seine Hilfe nicht nur das Studium der einschlägigen  
 mathematischen Literatur erspart, sondern mich auch beim Durch-  
 lesen der Feldgleichungen der Gravitation unterstützt.

A. Prinzipielle Erwägungen zum Postulat der Relativität.

§1. Die spezielle Relativitätstheorie.

Die spezielle Relativitätstheorie ~~beruht~~ <sup>beruht</sup> auf dem folgenden Postulat  
 gegründet, welches auch durch die Galilei-Newton'sche Mechanik gezeigt  
 geleistet wird: Wähle ein Koordinatensystem  $K$  so gewählt, dass in Bezug  
 auf dasselbe die physikalischen Gesetze in ihrer einfachsten Form gelten,  
 so gelten dieselben Gesetze auch in Bezug auf jedes andere Koordinaten-  
 system  $K'$ , das relativ zu  $K$  in gleichförmiger Translationsbewegung  
 begriffen ist. Das Postulat nennen wir  $R_1$  "spezielles Relativitätsprinzip".  
 Durch das Wort "speziell" soll angedeutet werden, dass das Prinzip auf dem

